



פליטת גזי חממה מטיפול בפסולת

סיון תש"ע יוני 2010

גלעד אוסטרובסקי ורועי קוצר

המחלקה המדעית

אדם טבע ודין

עמותת אדם טבע ודין הנה עמותה רשומה, אשר נוסדה בשנת 1990 במטרה לקדם את ההגנה על איכות הסביבה בישראל. העמותה הנה גוף בלתי תלוי, הפועל ללא כוונת רווח וממומן על ידי תרומות. בעמותה כ- 4,000 חברים והיא מונה כ- 27 חברי צוות מקצועי, בהם עורכי דין, אנשי מחקר ומדע ואנשי תכנון. העמותה פועלת, בין היתר, למניעת מפגעים סביבתיים, הגנה על בריאות הציבור וקידום המודעות הסביבתית אצל תושבים, רשויות ועסקים.

תקציר

על פי התחזיות, ההתחממות העולמית צפויה לגרום נזקים עצומים לאנושות ולפגוע באופן בלתי הפיך במערכת האקולוגית, במידה ולא תיעצר בעשורים הקרובים. כיום שוררת הסכמה רחבה בקרב רוב המדענים על כך שפליטת גזי חממה כתוצאה מפעילות האדם היא הגורם המרכזי להתחממות העולמית. בוועידת קופנהאגן שנערכה בדצמבר 2009, הציבו רוב מדינות העולם המפותחות יעדים שאפתניים להפחתת פליטות גזי החממה בתחומן. גם נציג ישראל בוועידה, נשיא המדינה, שמעון פרס, הצהיר על כוונה לצמצם את פליטות גזי החממה של ישראל ב-20% עד שנת 2020 (בהשוואה לתרחיש של "עסקים כרגיל"). הפחתת גזי החממה הינה משימה קשה ומורכבת. אין ספק שבכדי להשיג הפחתה משמעותית בפליטות יידרש שילוב של מגוון צעדים בתחומים שונים ובדרכי פעולה מגוונות, המגובים ברגולציה מתאימה ובתמריצים כלכליים. תחום הפסולת אינו התורם הגדול ביותר לפליטות גזי החממה בישראל אולם הוא בהחלט תחום שטומן בחובו הזדמנות לצמצום משמעותי בפליטות גזי החממה, כפי שיתברר בעבודה זו.

בישראל מייצרים כ-4 מיליון טון פסולת מוצקה ביתית ומסחרית כל שנה. רובה המכריע של הפסולת מועברת להטמנה. דרך זו לטיפול בפסולת גורמת לפליטת גזי חממה בסך של כ-1 מיליון טון CO₂eq בשנה. לשם השוואה, כמות זו שווה לפליטות השנתיות של כ-200,000 רכבים פרטיים.

בעבודה זו בחנו את החלופות הקיימות לטיפול בפסולת על פי גזי החממה הנפלטים מהן. החלופות שנבחנו הן שיטות טיפול ידועות ומוכחות לטיפול בפסולת: הטמנה, שריפה, דש"ב (דלק שמקורו בפסולת), קומפוסטציה, עיכול אנארובי ומחזור פסולת יבשה.

בכדי להציג תמונה שלמה וקרובה ככל האפשר למציאות, בנינו לכל אחת מהחלופות תרחיש שבו חלק גדול מהפסולת מטופל בשיטת הטיפול המרכזית (החלופה הנבחרת) ואילו שאר מרכיבי הפסולת מועברים לטיפולים אחרים בהתאם לסוג ואיכות החומר. העבודה מבוססת ברובה על מחקר שבוצע עבור האיחוד האירופי בשנת 2001 תוך התאמת חישובי הפליטות לנתוני ישראל ושינוי התרחישים בהתאם. המחקר בוצע בשיטת ניתוח מחזור חיים שבה מחשבים את פליטות גזי החממה הנובעות מכלל הפעילויות והתהליכים הקשורים לכל אחת מדרכי הטיפול.

מהממצאים עולה שבמצב הקיים, שבו רוב הפסולת מועברת להטמנה, נפלטים כ-297 ק"ג ש"ע פד"ח/ טון פסולת מעורבת. בכל שאר החלופות, נפלטים פחות גזי חממה כאשר בחלופות שבהן מופקת אנרגיה או נחסכים משאבים באמצעות מיחזור, מגיעים לחסכון כולל בגזי חממה.

התרחיש המוביל בחסכון גזי חממה הוא התרחיש שבו עיכול אנארובי הוא הטיפול המרכזי והוא תורם לחסכון של 179 ק"ג ש"ע פד"ח לכל טון פסולת מעורבת. אחריו מדורגים לפי פליטת גזי החממה, קומפוסטציה (חסכון של 134 ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת מעורבת), דש"ב (חסכון של 91 גר' CO₂eq / טון פסולת מעורבת) ושריפה (חסכון של 84 גר' CO₂eq / טון פסולת מעורבת).

מהממצאים ניתן להסיק, שבחלופות הטיפול שבהן הפסולת המעורבת מופרדת במקור לשני זרמים: אורגני רקבובי ומרכיבים יבשים, ניתן להגיע לחסכון הגבוה ביותר בפליטת גזי חממה. הסיבות לכך הן:

- הימנעות מהטמנת חומר אורגני רקבובי בקרקע (חומר אורגני רקבובי הוא התורם המרכזי לפליטת גזי חממה מהטמנה).
- הפקת אנרגיה ממקור מתחדש (בחלופת העיכול האנארובי).

- קיבוע פחמן בקרקע באמצעות יישום חומר אורגני מעובד (קומפוסט) בקרקעות חקלאיות.
- חסכון בשימוש בדשנים כימיים.
- הפרדת המקטע היבש מאפשרת העלאת שיעורי המחזור שחוסך בחומרי גלם ובאנרגיה לייצור חומרי גלם.

בבואנו לבחון חלופות לטיפול בפסולת הביתית יש להכניס עוד שיקולים רבים למערכת קבלת ההחלטות, עם זאת, לתמונת פליטות גזי החממה משקל רב, לא רק בגלל חשיבות נושא האקלים וההתחממות הגלובלית אלא גם בגלל שהיא משקפת, במידה מסוימת, את האופן שבו אנו מנצלים את משאבי הטבע ומצליחים להחזירם למעגל מחזורי ובר קיימא.

תוכן העניינים

7	רקע	פרק 1
7	גזי חממה ושינוי האקלים	1.1
7	משק הפסולת בישראל 2009	1.2
8	מטרות, הגדרות ושיטות העבודה	פרק 2
9	סוג הפסולת	2.1
9	תחשיב פליטות גזי חממה	2.2
9	פחמן דו חמצני (CO ₂)	2.3
10	מתאן (CH ₄)	2.4
10	פחמן ישן ופחמן חדש	2.5
11	חנקן תת-חמצני (N ₂ O)	2.6
11	חומר אנאורגני וחומר אורגני	2.7
11	השבת אנרגיה	2.8
12	שיטות טיפול בפסולת	פרק 3
12	הטמנה	3.1
12	שריפה	3.2
13	דש"ב (דלק שמקורו בפסולת)	3.3
13	קומפוסטציה	3.4
14	עיכול אנארובי	3.5
14	מחזור רכיבים יבשים	3.6
16	מרכיבי הטיפול בפסולת	פרק 4
16	איסוף ושינוע	4.1
16	טיפול בפסולת	4.2
16	הטמנה	4.3
16	יצירת אנרגיה חלופית	4.4
17	שימוש במשאבים ממוחזרים	4.5
18	פליטת גזי חממה על פי שיטות הטיפול בפסולת	פרק 5
18	הטמנה	5.1
24	שריפה	5.2
27	דלק שמקורו בפסולת (דש"ב)	5.3
28	קומפוסטציה	5.4
34	עיכול אנארובי	5.5
36	מיחזור רכיבים יבשים	5.6
39	תרחישי טיפול בפסולת	פרק 6
41	תרחיש 1: הטמנה כטיפול מרכזי	6.1
41	תרחיש 2: עיכול אנארובי כטיפול מרכזי	6.2
41	תרחיש 3: קומפוסטציה כטיפול מרכזי	6.3
41	תרחיש 4: שריפה כטיפול מרכזי	6.4
42	תרחיש 5: דש"ב כטיפול מרכזי	6.5
42	תרחיש משולב דש"ב וקומפוסטציה/עיכול אנארובי	6.6
43	תוצאות – סיכום מאזן גזי החממה בתרחישים השונים	פרק 7
44	שינוע	7.1
44	פד"ח מאובני	7.2
44	מתאן	7.3
45	חנקן תת חמצני	7.4
45	קיבוע פחמן	7.5
45	חיסכון באנרגיה ומשאבים	7.6
45	סיכום ומסקנות	פרק 8

רשימת טבלאות

- טבלה 1 : פוטנציאל ההתחממות העולמית של גזי החממה המרכזיים.....9
- טבלה 2 : פליטת פד"ח מייצור חשמל בישראל.....17
- טבלה 3 : הרכב "פסולת אנאורגנית".....19
- טבלה 4 : הרכב חיתולים משומשים (ממוצע גילאים 0-2.5 שנים).....20
- טבלה 5 : הרכב רכיב "השונות" בפסולת.....20
- טבלה 6 : גזי חממה הנפלטים מהטמנת מרכיבי פסולת שונים.....21
- טבלה 7 : הפקת אנרגיה מביוגז.....23
- טבלה 8 : סיכום פליטות גזי חממה מהטמנה (ק"ג שע"פ לטון פסולת).....23
- טבלה 9 : פליטות גזי חממה כתוצאה משריפת פסולת.....25
- טבלה 10 : ערכים קלוריים, אנרגיה וחיסכון בגזי חממה כתוצאה משריפת פסולת.....26
- טבלה 11 : סיכום פליטות גזי חממה משריפה (ק"ג שע"פ לטון פסולת).....27
- טבלה 12 : סיכום פליטות גזי חממה מדש"ב (ק"ג שע"פ לטון פסולת).....27
- טבלה 13 : פליטות חנקן תת חמצני מקומפוסטציה של זבל בקר, שאריות מזון וזבל ירוק.....30
- טבלה 14 : חיסכון בגזי חממה כתוצאה מקיבוע פחמן במהלך יישום קומפוסט בקרקע.....31
- טבלה 15 : פליטות גזי חממה כתוצאה מרכיב הייצור של החלפת דשנים כימיים.....32
- טבלה 16 : חיסכון בגזי חממה כתוצאה מרכיב הייצור של החלפת דשנים כימיים.....33
- טבלה 17 : צמצום פליטות חנקן תת חמצני הנגרמות מהחלפת דשנים כימיים.....33
- טבלה 18 : סיכום פליטות גזי חממה מקומפוסטציה.....34
- טבלה 19 : חיסכון באנרגיה ומשאבים כתוצאה מעיכול אנארובי.....35
- טבלה 20 : סיכום פליטות גזי חממה מעיכול אנארובי.....36
- טבלה 21 : החיסכון בפליטות גזי חממה כתוצאה ממיחזור רכיבים יבשים שונים.....39
- טבלה 22 : תרחישי הטיפול בפסולת הביתית.....40
- טבלה 23 : אחוזי המיחזור של הרכיבים בני המיחזור בתרחיש הפרדת הפסולת לשני זרמים.....41

רשימת איורים

- איור 1 : הרכב הפסולת הביתית.....9
- איור 2 : תזרים גזי החממה כתוצאה מהטמנת פסולת ביתית מעורבת.....18
- איור 3 : תזרים פליטות גזי חממה כתוצאה משריפת פסולת.....24
- איור 4 : תזרים פליטות גזי חממה מקומפוסטציה.....28
- איור 5 : תזרים פליטות גזי חממה מעיכול אנארובי.....34
- איור 6 : פליטת גזי חממה על פי תרחישי הטיפול.....43
- איור 7 : התפלגות פליטת גזי חממה על פי תרחישי הטיפול.....43

מושגים וראשי תיבות חשובים

פד"ח - פחמן דו חמצני (CO₂).

דש"ב- דלק שמקורו בפסולת

ש"ע פד"ח – שוה ערך פחמן דו חמצני. יחידות מדידה המבטאות פוטנציאל השפעה על ההתחממות

העולמית (CO₂eq).

חל"מ – חלקים למיליון

מקור ביוגני - בע"ח, צמחים, חיידקים והפרשותיהם.

פרק 1 רקע

1.1 גזי חממה ושינוי האקלים

גזי החממה הם קבוצה של גזים הבולעים את קרינת התת-אדום של השמש המוחזרת מפני כדור הארץ וגורמים להתחממותו. שלושת גזי החממה המרכזיים הם פחמן דו-חמצני (CO₂), מתאן (CH₄) וחנקן תת-חמצני (N₂O). במאתיים השנים האחרונות, ריכוזם של גזים אלו באטמוספירה עולה עקב פעילות האדם, בין השאר גם כתוצאה מטיפול בפסולת הביתית. מסוף המאה ה-18, עת הופעל לראשונה מנוע הקיטור, עלה ריכוז הפחמן הדו-חמצני (פד"ח) מריכוז של 280 חלקיקים למליון (חל"מ) לריכוז של 387 חל"מ. עלייה זו נמשכה גם בשנים האחרונות בקצב של 0.4% בשנה וגרמה להתחממות של 0.4-0.8 מעלות בטמפרטורה הממוצעת בכדור הארץ ולעליית מפלס הים ב-10-15 ס"מ¹ ושורה של תופעות מדאיגות כגון מדבור וארועי קיצון אקלימיים. בשנת 2007 נפלטו בישראל כ-77 מיליון טון ש"ע פד"ח¹, מתוכם כ-5 מיליון טון מיוחסים למגזר הפסולת, הכולל בתוכו גם את הפסולת התעשייתית². הרוב המכריע מיוחס לפליטות של מתאן כתוצאה מתהליכי תסיסה של החומר האורגני הרקבובי במטמנות בתנאים אל-אווירניים.

1.2 משק הפסולת בישראל 2009

למעלה מ-85% מהפסולת הביתית בישראל עדיין מועבר להטמנה. נפח ההטמנה במטמנות הקיימות הולך ומצטמצם ועל פי התחזיות כבר ב-2014 יורגש מחסור³. משאב הקרקע מצוי במחסור חמורה בשפע ולכן הרחבת המטמנות הקיימות או פתיחת מטמנות חדשות אינם פתרונות לטווח הארוך. בעיית נפח ההטמנה חמורה במיוחד ביישובי המרכז שכבר היום משנעים חלק גדול מהפסולת שלהם לדרום הארץ ובאזור הצפון, בו נפח ההטמנה מוגבל. בנוסף להטמנה, חלק קטן מהפסולת מועבר למיחזור והוא מכיל ברובו מרכיבים יבשים (נייר, קרטון, פלסטיק, מתכת וזכוכית). רכיבים אלו מופרדים במקור ע"י התושבים או בתחנת המעבר באמצעות קו מיון. בחלק מתחנות המעבר מפרידים גם את הפסולת האורגנית הביתית באמצעות נפה סובבת (טרומל) ומעבירים אותה לאתרי קומפוסטציה. שיעור המיחזור של כלל מרכיבי הפסולת הביתית אינו עולה על 7% וברוב הרשויות הוא נמוך יותר.

מדיניות הטיפול בפסולת של המשרד להגנת הסביבה נועדה להביא להגדלת ההשבה והמיחזור ולהפחתה הדרגתית של כמות הפסולת המוטמנת. מטרת המדיניות היא להקטין באופן הדרגתי עד לשנת 2020 את כמויות הפסולת המועברות להטמנה ל-50%, לכל היותר⁴. כחלק ממדיניות זו, הוטל היטל הטמנה שיגיע לשיעור מרבי של 50 ש"ח/טון בשנת 2011. כספי היטל מיועדים לסיוע לרשויות ויזמים לצורך עידוד אמצעים חלופיים להטמנת פסולת.

¹ יחידות שוות ערך להשפעתו של פחמן דו-חמצני על שינוי האקלים

על אף ההיטל, מחיר ההטמנה בארץ, עדיין נמוך בהשוואה למדינות אירופה המפותחות והוא אינו מייצג את כלל העלויות החיצוניות הכרוכות בהטמנה, לרבות עלויות הקרקע, פליטות גזי חממה ובזבוז משאבים. מצב זה מקשה על כניסתן של חלופות אחרות לטיפול בפסולת, על אף שהן טומנות בחובן יתרונות סביבתיים רבים וכרוכות בעלויות חיצוניות נמוכות יותר.

פרק 2 מטרות, הגדרות ושיטות העבודה

מטרת עבודה זו היא להציג תמונת מצב מהימנה של השפעת חלופות הטיפול בפסולת על פליטת גזי החממה. לטיפול בפסולת השפעות רבות נוספות כגון זיהום קרקע ומי תהום, מטרדי רעש וריח ועוד. השפעות אלו הינן בעלות משקל רב, אולם עבודה זו מתמקדת בפליטת גזי חממה כתוצאה מטיפול בפסולת בלבד.

הגישה העומדת בבסיסה של עבודה זו הנה גישה רחבה המתבססת על תפישת ניתוח מחזור החיים. תפישה זו מכמתת את מכלול ההשפעות הסביבתיות של הפסולת משלב יצור המוצרים ועד לגמר הטיפול בפסולת ואינה מסתפקת בפליטות הישירות הנובעות מהטיפול בפסולת בלבד. בגישה זו מושם דגש רב על הבנת כלל ההשפעות הסביבתיות הנובעות משיטת הטיפול בפסולת, לרבות השפעות בלתי ישירות. לדוגמא, בגישה זו נכלול בחישוב הפליטות הנגרמות מקומפוסטציה הן את הפליטות הישירות מהמתקן והן את החסכון בפליטות המתקבל כתוצאה מישום הקומפוסט בקרקע. דוגמא נוספת ומשמעותית ביותר היא ההטמנה. כאן לא נסתפק בפליטות הישירות מהאתר אלא נחשב גם את קיבוע הפחמן בגוף המטמנה. במקרה זה, הכללת קיבוע הפחמן משנה באופן משמעותי את מאזן הפליטות מאתרי ההטמנה.

ניתוח מחזור חיים לפליטות גזי חממה מתייחס למרכיבים הבאים:

- פליטות ישירות מטיפול בפסולת.
- אנרגיה שמשמשת לטיפול וסילוק פסולת והפליטות הקשורות בה.
- אנרגיה שנחסכת כתוצאה משימוש בחומרים ממוחזרים.
- אנרגיה שנחסכת במהלך הייצור והשינוע של חומרי גלם ממוחזרים.
- פליטות שנמנעות כתוצאה מהשבת אנרגיה.
- קיבוע פחמן בהטמנה ובקומפוסטציה.

כך, פליטות גזי חממה שנמנעות כתוצאה מטיפול בפסולת יחשבו כחיסכון בגזי חממה. טיפול בפסולת יכול למנוע גם פליטות כתוצאה מהחלפת מקורות אנרגיה קיימים, החלפת חומרי גלם או ייעול תהליכים. תרשימי זרימה של גזי החממה הנפלטים במהלך החלופות לטיפול בפסולת מובאים בנספחים בפרקי החלופות השונות.

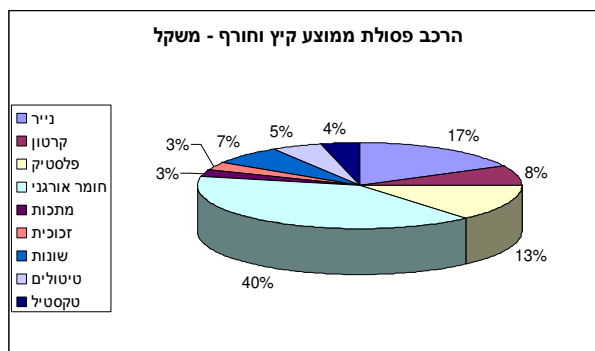
הניתוח אינו כולל פליטות המיוחסות להקמת מתקנים וציוד. מחקרים שנעשו בשיטת ניתוח מחזור חיים הראו שחלק זה קטן מאד יחסית לסך הפליטות בתהליך ולכן הוא לא נכלל בחישובנו.

העבודה מסתמכת על דו"ח מקיף בשיטת ניתוח מחזור חיים שהוכן עבור האיחוד האירופי⁵. הדו"ח עצמו מתייחס לנתונים ממוצעים של האיחוד האירופי. אנחנו הסתמכנו על ערכי הפליטות בדו"ח זה על פי סוג הטיפול וסוג הפסולת המטופלת וערכנו התאמה לישראל. על בסיס חלופות הטיפול בנינו מספר תרחישים אפשריים לטיפול בפסולת בהתייחס לשנת 2010.

2.1 סוג הפסולת

עבודה זו בוחנת את הטיפול בפסולת הביתית והמסחרית בלבד (להלן: "פסולת ביתית"). פסולת זו מהווה את רוב הפסולת המוצקה בישראל והיא אינה כוללת פסולת תעשייתית, גם ופסולת בניין. הרכב הפסולת הביתית מפורט באיור 1.

איור 1 : הרכב הפסולת הביתית⁶



2.2 תחשיב פליטות גזי חממה

העבודה מתבססת על שיטת החישוב של הפאנל הבינממשלתי לשינוי האקלים (IPCC) שבו פליטות גזי החממה מחושבות ביחידות שווה ערך פד"ח (שע"פ או CO₂eq). ערכו של כל גז חממה ביחידות שע"פ מחושב על פי פוטנציאל ההשפעה שלו על ההתחממות העולמית (GWP) בהשוואה לפד"ח. ההשפעות של גזי החממה מופיעות בטבלה 1.

טבלה 1 : פוטנציאל ההתחממות העולמית של גזי החממה המרכזיים⁷.

פליטות ישירות	פוטנציאל התחממות עולמית (ל-100 שנים)	אחוז מהפליטות הנובעות מפסולת באירופה (%)
פד"ח מאובני (CO ₂)	1	9%
מתאן (CH ₄)	21	89%
חנקן תת חמצני (N ₂ O)	310	2%

2.3 פחמן דו חמצני (CO₂)

פחמן דו חמצני (פד"ח) הוא הגורם הראשון בחשיבותו להתחממות העולמית. עליית ריכוזו באטמוספירה מריכוז של כ-280 חל"מ לפני המהפכה התעשייתית לריכוז של 378 חל"מ בשנת 2010

נמצאת במתאם גבוה עם ההתחממות העולמית ומוכרת כיום ע"י רוב המדענים כגורם המרכזי להתחממות העולמית. פליטות פד"ח מטיפול בפסולת נובעות משריפה פסולת, תסיסה אל-אווירנית, שינוע ומיכון (שריפת דלק בתחבורה). מאידך, טיפול בפסולת יכול גם לחסוך בפליטות פד"ח ע"י קיבוע פחמן אטמוספרי בקרקע, יצירת אנרגיה מפסולת המחליפה שריפת דלקים מאובנים ומיחזור המונע שימוש בדלקים מאובנים. בחישוב פליטות הפד"ח יש להבחין בין פד"ח ביוגני (פחמן חדש) לבין פד"ח ממקור מאובני (פחמן ישן) כפי שיוסבר בהמשך.

2.4 מתאן (CH₄)

למרות שפד"ח הוא הגז המרכזי שתורם להתחממות העולמית, פוטנציאל ההשפעה של מתאן על ההתחממות העולמית גדול פי 21 והוא הגז המשפיע ביותר כשמדובר בפסולת. מתאן נוצר בתהליכי תסיסה אל-אווירנית של פסולת אורגנית רקבובית. תנאים אל – אווירניים נוצרים במטמנות שבהן הפסולת מכוסה בעפר, בגומחות שנוצרות בערימות קומפוסט או באופן מבוקר במתקני עיכול אנארובי.

2.5 פחמן ישן ופחמן חדש

יש להבחין בין פליטות פד"ח התורמות להתחממות האקלים, לעומת פליטות שהן חלק ממעגל הפחמן הטבעי. פחמן שהיה מקובע בקרום כדה"א במשך מיליוני שנים ומשתחרר לאטמוספירה בצורת פד"ח, מעלה את ריכוז הפד"ח הכללי באטמוספירה והפליטות מחושבות כתורמות להתחממות העולמית. פד"ח זה נקרא "פד"ח מאובני" או "פחמן ישן" והוא נמצא בפלסטיק ובחלק מהטקסטיל שבפסולת. פחמן ישן בד"כ אינו מתפרק בתהליכים ביולוגיים והדרך לשחרורו היא באמצעות שריפה.

פחמן שמקורו במחזור הפחמן הטבעי, נקלט מן האטמוספירה ע"י צמחים, בקטריות ואצות בתהליך הפוטוסינתזה ונפלט חזרה לאטמוספירה בתהליכים ביולוגיים או כימיים כחלק מתהליך מחזורי. פחמן זה נקרא "פחמן ביוגני" או "פחמן חדש". כאשר פחמן ביוגני משתחרר לאטמוספירה בצורת פד"ח, הפליטות אינן מחושבות כתורמות להתחממות העולמית משום שמדובר בפחמן שפליטתו חזרה לאטמוספירה אינה תורמת לעליית ריכוז גזי החממה². במידה ופחמן ביוגני משתחרר כמתאן, הפליטות מחושבות כתורמות להתחממות האקלים משום שהשפעת המתאן על ההתחממות העולמית גבוהה פי 21 מאשר פד"ח.

בטיפול בפסולת ישנם שני סוגים מרכזיים של פליטות פד"ח. הסוג הראשון הוא שימוש בדלקים מאובנים. הפליטות משריפת דלקים אלו מחושבות כתורמות לגזי החממה. הסוג השני הוא שחרור של פחמן שנמצא בפסולת עצמה. כאשר המקור של הפחמן הוא ביוגני, למשל קרטון, הפליטות אינן נכללות בחישוב גזי החממה משום שמדובר בפחמן שחוזר לאטמוספירה בטווח הזמן הקצר. לעומת זאת, כאשר משתחרר פחמן מפלסטיק, שמקורו בתוצרי נפט, פחמן זה מחושב כגז חממה התורם להתחממות כדור הארץ ולכן הוא יכלול בחישובים.

² ריכוז הפחמן הביוגני באטמוספירה קבוע בטווח הזמן הקצר

במקרים שבהם פחמן ביוגני נשאר כלוא בקרקע למשך תקופת זמן ממושכת, שהוגדרה ע"י ה - IPCC כתקופה של מעל 100 שנה, הפחמן אינו זמין למעגל הפחמן הטבעי והוא נחשב כ"מקובע". פחמן "מקובע" שאינו נפלט לאטמוספירה מביא לחסכון בגזי חממה. "קבוע פחמן" מתרחש בחלופת ההטמנה כאשר רכיבים עשירים בליגנין (קשה פרוק) כגון נייר וקרטון מוכנסים לתנאים אל-אווירניים וכן בחלופת הקומפוסטציה כאשר חומר אורגני רקבובי הופך לרכיבים הומים שעמידותם בקרקע גבוהה.

2.6 חנקן תת-חמצני (N₂O)

חנקן הוא מאבני היסוד של כל יצור חי והוא מצוי במקטע האורגני שבפסולת וגם בחומרים אנאורגניים מסוימים. ישנם שני מקורות מרכזיים לפליטות חנקן תת חמצני. אחד הוא החנקן האורגני שבפסולת שלאחר פירוקו הוא עשוי לעבור תהליכי ניטריפיקציה- דניטריפיקציה ולהפוך לחנקן תת חמצני. מקור נוסף הוא שריפה של פסולת מעורבת.

2.7 חומר אנאורגני וחומר אורגני

ניתן לחלק את הפסולת לשני סוגים מרכזיים: חומרים אורגניים וחומרים אנאורגניים. שני אלה מתנהגים באופן שונה זה מזה בשיטות הטיפול השונות. חומר אורגני הוא חומר שמורכב משרשרות פחמן ומקורו ביוגני (בע"ח, צמחים, חיידקים והפרשותיהם). חומר אנאורגני הוא חומר שאינו עונה להגדרת חומר אורגני. את החומר האורגני ניתן לסווג לפי קצב פירוקו. חומר אורגני רקבובי הוא חומר שבו רוב המרכיבים האורגניים זמינים לפירוק ביולוגי בזמן קצר והוא אכן מתפרק בקצב מהיר. חומר אורגני קשה פירוק הוא חומר שבו הרכיב האורגני אינו זמין לפירוק מידי והוא מתפרק לאט או שאינו מתפרק כלל. עץ ותוצריו מכילים ליגנין שמתפרק רק בתנאים אווירניים ופירוקו ארוך יחסית. פלסטיק הוא גם חומר אורגני, אולם הוא אינו פריק ביולוגית בתנאי הסביבה. בפסולת הביתית, כ - 40% חומר אורגני רקבובי ו-25% נייר וקרטון. שאר הפסולת מוגדרת במסמך זה כמקטע אנאורגני אולם חשוב לזכור שבהגדרת המקטע האנאורגני נכללים חומרים שהם למעשה אורגניים או אורגניים בחלקם כגון חיתולים, עץ, טקסטיל וחומרים אורגניים שנספחו לרכיבים האחרים.

2.8 השבת אנרגיה

לצורך חישוב האנרגיה המוחלפת כתוצאה מהשבת אנרגיה במהלך הטיפול בפסולת השתמשנו בממוצע גזי חממה הנפלטים במהלך ייצור חשמל בישראל בתמהיל הדלקים הקיים בישראל. בניתוחי מחזור חיים רצוי להתבסס על נתונים עדכניים ועל שיטות ידועות שנמצאות בשימוש. לפיכך, לא כללנו בעבודה טכנולוגיות לטיפול בפסולת שנמצאות בפיתוח ולא לקחנו בחשבון שינויים צפויים בהרכב הפסולת הביתית. עם זאת, אפשר להעריך במידה גבוהה יחסית של דיוק את תמהיל הדלקים העתידי לייצור חשמל משום שאמצעי ייצור החשמל מתוכננים לטווח של 10-

20 שנה לפחות. לפיכך כדאי להתייחס למגמה הצפויה של צמצום פליטות גזי החממה הנגרמים מייצור חשמל.

פרק 3 שיטות טיפול בפסולת

3.1 הטמנה

כפי שצינו הטמנה היא שיטת הטיפול הרווחת כיום בישראל לטיפול בפסולת ביתית. הטיפול במטמנות כולל את קליטת הפסולת, הטמנה, כיסוי והידוק, ובקרה שוטפת על מפגעים שעלולים להיווצר כגון תשטיפים, פליטות גזים, מטרדי ריח ובע"ח. בעבר היו בארץ אתרי הטמנה רבים שלא עמדו בתנאים הסביבתיים הבסיסיים הנדרשים. בשנות ה-90 בוצע מהלך ארצי לסגירת אתרים אלו והסדרת פעילותם של מספר מצומצם של אתרי הטמנה גדולים. אתרי ההטמנה שנותרו הם ברובם אתרים מתקדמים מבחינת ההגנות הסביבתיות, אך גם הם גורמים לבעיות סביבתיות כבדות משקל.

ראשית, הטמנה דורשת שטח גדול וגורמת לפגיעה קשה בנוף. הפגיעה חמורה במיוחד משום שלא מדובר רק בתפיסת שטח ההטמנה עצמו אלא בהגבלת שימושי הקרקע ברדיוס ניכר מסביב למטמנה. שנית, מדובר בפתרון שאינו מאפשר ניצול יעיל של הפסולת כמשאב. הדרך היחידה להשיב חלק מהפסולת לשימוש היא באמצעות איסוף הביוגז הנפלט מהמטמנה, אך כפי שנראה בהמשך ישנן שיטות עדיפות לאיסוף הביוגז וניצולו. גם הסיכון לזיהום קרקע ומים קיים, על אף שבמטמנות מתקדמות ניתן לצמצמו באופן ניכר. היתרונות המרכזיים של ההטמנה הם העלות הנמוכה והאפשרות לסלק את כל הפסולת באתר אחד. העלות הנמוכה היא יתרון רק במצב שבו העלויות החיצוניות לא באות לידי ביטוי. היטל ההטמנה נועד להפנים את העלויות החיצוניות ולתת להן ביטוי במחיר ההטמנה.

מבחינת גזי חממה קיימים הבדלים בין אתרי ההטמנה. באתרים המתקדמים יותר הותקנו מערכות לאיסוף הביוגז ושריפתו בלפיד או לחילופין שימוש בביוגז כמקור אנרגיה. ישנם גם הבדלים הנובעים משיטת ההטמנה, סוג הפסולת וגיל הפסולת במטמנה. פירוט נוסף לגבי גזי חממה הנפלטים במטמנות מובא בהמשך.

3.2 שריפה

במספר לא מבוטל של מדינות באירופה, השריפה הנה אחת מהחלופות הבולטות להטמנה. בטכנולוגיות השריפה הקיימות כיום ניתן להפיק אנרגית חום וחשמל שמחליפים מקורות אנרגיה קיימים. תוצר לוואי של השריפה הוא אפר שחלקו משמש בעבודות הנדסיות וחלקו (האפר המרחרף) מועבר על פי רוב להטמנה. בגלל עלויות ההקמה הגבוהות, מתקני שריפה פועלים בד"כ בהיקפים גדולים של 100,000 טון/שנה או יותר והם צריכים לקבל פסולת עם ערך קלורי גבוה יחסית. לכן שיטה זו אינה מעודדת מיחזור של נייר, קרטון ופלסטיק, שהם מרכיבים בעלי ערך קלורי גבוה ובלעדיהם לא ניתן להפעיל את מתקן השריפה ביעילות. פסולת שמכילה אחוזים גבוהים של פסולת אורגנית רקבובית אינה מתאימה לשריפה מכיוון שאחוז הרטיבות הגבוה

מוריד את הערך הקלורי באופן ניכר. בעיה נוספת במתקני שריפה היא גזים רעילים הנפלטים בתהליך.

טכנולוגיות שריפה אחרות כגון פירוליזה וגזיפיקציה מגבילות את ריכוז החמצן בזמן השריפה. הן פחות נפוצות בעולם ויקרות מאד ביחס לחלופות האחרות ולכן לא התייחסנו אליהן בעבודה זו.

3.3 דש"ב (דלק שמקורו בפסולת)

בשיטה זו משתמשים בפסולת ממוינת בלבד שמכילה רק את המרכיבים בעלי הערך הקלורי הגבוה (לרוב פלסטיק, נייר וקרטון) במתקנים בהם הפסולת מחליפה דלק פוסילי אחר. האנרגיה שניתן להפיק במתקני דש"ב גבוהה יחסית, אולם שיעור הפלסטיק במתקנים אלו גבוה יותר ולכן גם יפלט יותר פד"ח מאובני. שימוש נפוץ בדש"ב הוא שריפה של פסולת ביתית בכבשני מלט ה המשתמשים במקרים רבים בדלק נחות ומזהם. ניתן להשתמש בדש"ב גם בתחנות כוח פחמיות.

3.4 קומפוסטציה

קומפוסטציה היא תהליך ביולוגי שבו חומר אורגני רקבובי מתפרק בתנאים אווירניים ע"י מיקרואורגניזמים. תוצרי התהליך הם מים, פד"ח וחומר אורגני יציב שמכיל יסודות הזנה לצמחים ויכול לשמש כדשן ולהחליף דשנים כימיים. התהליך ניתן לביצוע במתקן ביתי (קומפוסטר) או במתקני קומפוסטציה גדולים. ישנן שיטות טיפול שונות ובהן קומפוסטציה בשורות רוח, קומפוסטציה עם אוורור מאולץ וקומפוסטציה במתקנים סגורים. בעבודה זו אנו מתייחסים לקומפוסטציה פתוחה בשורות רוח ולקומפוסטציה סגורה. קומפוסטציה פתוחה בשורות רוח היא שיטה שבה הפסולת נערמת בשורות ועוברת מספר היפוכים על מנת להכניס אוויר לערימות ולזרז את התהליך. בד"כ מוסיפים לפסולת גזם קצוץ על מנת להוריד את הרטיבות, לאזן בין פחמן לחנקן ולאורר את הערימה. בשלב הראשון שורות הפסולת האורגנית עוברות היפוך מכני 1-2 פעמים בשבוע למשך 3-5 שבועות. במהלך שלב זה חיידקים טרמופילים מפרקים את החומר האורגני בתהליך שיוצר חום רב והורג את רוב הפתוגנים שבפסולת. בשלב הבא מניחים לערימות להבשיל עוד 3-4 חודשים עד לקבלת תוצר יציב בצבע אדמה. בכדי לקבל תוצר איכותי מפסולת ביתית, נדרשת הפרדת הפסולת האורגנית במקור. כמו כן בד"כ נדרש טיפול מקדים להרחקת מרכיבים יבשים וקיצוץ הגזם וטיפול נוסף לאחר ההבשלה שבו מנפים את החומר בכדי לקבל תוצר גרגרי נקי ממזהמים. בקומפוסטציה סגורה החומר האורגני נערם במבנה סגור ומאוורר באופן תדיר. מסננים ביולוגים מסייעים לשמור על אוורור מספיק תוך מניעת ריחות כלפי חוץ. המבנה מאפשר גם בקרה על תשטיפים, הרחקת בע"ח ויצירת תנאים מיטביים שבהם ניתן לזרז את התהליך.

בקומפוסטציה ניתן לטפל בפסולת אורגנית לסוגיה (בוצות שפכים, זבל בע"ח, ופסולת אורגנית ביתית). בארץ קיימים מספר מתקנים שמטפלים בפסולת בע"ח ובבוצות שפכים. כמויות קטנות מאד של פסולת אורגנית ביתית מטופלות בארץ בקומפוסטציה באתרים מסחריים.

עבודה זו מניחה שפסולת המיועדת לקומפוסטציה מופרדת במקור מכיוון שפסולת שלא הופרדה מכילה זכוכית, מתכות וחומרים נוספים שמונעים את שיוקו של הקומפוסט כדשן. המשדר להגנת הסביבה אינו תומך בקומפוסטציה של פסולת ביתית שלא הופרדה במקור.

3.5 עיכול אנארובי

עיכול אנארובי הוא פירוק ביולוגי של חומר אורגני בתנאים אל-אווירניים. עיכול אנארובי מתבצע בתאים סגורים (מעכלים/ריאקטורים) כאשר במהלך הפירוק, החומר האורגני הופך לביוגז שמכיל פד"ח ומתאן. בביוגז ניתן להשתמש להפקת אנרגיה ע"י הזרמתו לגנראטורים המפיקים חשמל, הפיכתו לחום או הפרדת המתאן וניצולו כדלק לתחבורה. למעשה עיכול אנארובי הוא אותו תהליך ביולוגי שמתרחש במטמנות אלא שבעיכול אנארובי הוא מתבצע תחת תנאים מבוקרים תוך שליטה על הטמפ', ה-PH והלחות.

שני תוצרים נוספים של התהליך הם בוצה שמקורה בשאריות החומר האורגני ומי נטל שנפלטים כעודפים. הבוצה בד"כ מיוצבת לקבלת קומפוסט או מצע לרפתות. מי הנטל הם עודפי מים שמכילים ריכוזים גבוהים של חומר אורגני מסיס ומלחים, במידה ואיכות המים מספיק גבוהה, ניתן לפזרם בשטחים פתוחים וקרקעות חקלאיות שאינם רגישים מבחינה הידרולוגית. אפשרות נוספת היא לטפל במים במתקן לטיהור שפכים.

על מנת לקבל קומפוסט איכותי ולשמור על תקינות הציוד ורציפות התהליך יש צורך בפסולת אורגנית ביתית שהופרדה במקור. בארץ פועלים שני מתקני עיכול אנארובי. מתקן אחד (המטב"ח) של חברת י.ת.ב בע"מ, הפועל בעמק חפר ומטפל כיום רק בזבל רפתות. מתקן זה כבר נערך לקליטת פסולת אורגנית ביתית שהופרדה במקור. לצורך כך, מתוכנן מתקן לטיפול-קדם בפסולת הביתית. מתקן נוסף, בבעלות חברת "חץ אקולוגיה", פועל בתחנת מעבר חירייה ומטפל בפסולת ביתית שהופרדה באמצעים מכניים. קיים מתקן נוסף בשלבי הקמה סופיים ליד הישוב מיצר שברמת הגולן. גם מתקן זה מתוכנן לקליטת פסולת אורגנית ביתית.

3.6 מחזור רכיבים יבשים

בעוד שאר החלופות מיועדות לקלוט אחוז ניכר מהפסולת (מעל 25%), מחזור הרכיבים היבשים הוא צעד משלים ולכן לא בנינו לו תרחיש בפני עצמו אלא הוספנו את מרכיב המיחזור בהתאמה לכל אחד מהתרחישים. כיום, ברוב הערים מבוצעת הפרדה במקור של נייר, קרטון ומיכלי פלסטיק. האיסוף נעשה במוקדי מחזור שכונתיים ובאמצעות חוק הפיקדון, אולם בשיטה זו ניתן לאסוף רק אחוזים בודדים מכלל הפסולת. כל רכיב נאסף ממוקדי האיסוף ומשונע למפעל המחזור בנפרד, עבודה הכרוכה בעלויות לא מבוטלות.

ניתן גם להפריד את הרכיבים היבשים מהפסולת המעורבת ב קו מיון בתחנות מעבר. בקו המיון מפרידים בד"כ קרטון, בקבוקי פלסטיק ומתכת. בישראל ישנן מספר תחנות מעבר שמתבצעת בהן הפרדה על קו מיון. מכיוון שחלק מהמיון נעשה באופן ידני, העלויות הן גבוהות והפעלת קו המיון תלויה גם במחירי חומרי הגלם.

למעשה, בכדי למחזר חלק משמעותי מתוך הרכיבים היבשים יש להפרידם במקור מהזרם הרטוב משום שברגע שפסולת אורגנית מתערבבת עם נייר, קרטון, פלסטיק או זכוכית, מחזורם הופך מורכב ואת חלקם בכלל אין אפשרות למחזר באמצעים הקיימים.

הצעת חוק האריזות, לכשתאושר, תיצור שינוי במצב זה. על היצרנים והיבואנים תחול חובה לאסוף ולמחזר את האריזות המשווקות על ידיהם. מערך האיסוף והמיחזור ימומן על ידי

היצרנים, כך שבעלויות לרשויות המקומיות תפחתנה. כמות הפסולת שתיאסף, תלויה ביעדים שיקבעו בחוק (60% מכלל הארזות בתוך כמה שנים). כמות זו שווה לכעשרה אחוזים מכלל הפסולת הביתית.

פרק 4 מרכיבי הטיפול בפסולת

בבואנו לחשב את גזי החממה הנפלטים בכל חלופה עלינו להתייחס לכל השלבים מרגע יצירת הפסולת ועד פתרון הקצה. בכל אחת מהחלופות שנבחנו, שלבי הטיפול בפסולת הם מעט שונים, אולם ניתן לזהות מספר שלבים המשותפים לכל החלופות בהקשר של גזי חממה:

4.1 איסוף ושינוע

כולל את ההובלות של הפסולת לאורך התהליך: מיצרן הפסולת לכלי האצירה, מכלי האצירה למתקני הטיפול השונים וממתקני הטיפול לצרכני חומרי הגלם/ המוצרים. גז החממה המרכזי שנפלט משינוע הוא פד"ח שהוא תוצר שריפה של דלקים מאובנים. חנקן תת חמצני נגרע מחישוב זה מכיוון שאינו מהווה יותר מ-1% מסך הפליטות הקשורות לתחבורה⁸.

4.2 טיפול בפסולת

הטיפול בפסולת כולל את הפעולות השונות שמתבצעות על מנת לטפל בפסולת בשיטות השונות (הטמנה, שריפה, קומפוסטציה וכו'). מבחינת גזי חממה מדובר בפליטות ישירות שנובעות מהפסולת עצמה או פליטות הנובעות משימוש בדלקים בתהליך הטיפול.

4.3 הטמנה

שלב זה מתייחס רק להטמנה והוא כולל את גזי החממה הנפלטים מהמטמנה ואת החיסכון בגזי חממה כתוצאה מקיבוע פחמן בקרקע לאחר הטמנה של חומרים אורגניים כגון נייר וקרטון. הטמנה היא ברירת המחדל של פסולת שלא ניתן או לא כדאי להשיבה לשימוש ולכן בכל התרחישים שנבחנו, למעט שריפה, קיים מקטע מסוים שעובר להטמנה.

4.4 יצירת אנרגיה חלופית

אנרגיה חלופית היא אנרגיה שנוצרת כתוצאה מהטיפול בפסולת ומנוצלת על מנת להחליף מקורות אנרגיה קיימים. חישוב האנרגיה שניתן לנצל מכל אחת מהחלופות מפורט בפרקים הבאים. בסעיף זה נתעכב על חישוב האנרגיה ממקורות קיימים, שזהה לגבי כל החלופות. למרות שאנרגיה חלופית יכולה להחליף מקורות אנרגיה שונים, רוב האנרגיה שמוחלפת היא אנרגיית חשמל. ככל שייצור החשמל ממקורות קיימים פולט יותר גזי חממה, החיסכון מהחלפתם באנרגיה שמקורה בפסולת גדול יותר. בארץ רוב החשמל מיוצר מפחם (כ-65% מהחשמל)

שבתהליך שריפתו נפלטים כ-855 ג' CO2 לכל קוט"ש⁹. כ-26% מהחשמל מיוצר מגז טבעי שתורם כ-469 ג' CO2 / קוט"ש³ והיתר מיוצר ממקורות שונים כמפורט בטבלה 2.

טבלה 2 : פליטת פד"ח מייצור חשמל בישראל

פליטות גזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח)	אחוז מהייצור בישראל	ק"ג ש"ע פד"ח / קוט"ש	
0.55575	65%	0.855	פחם
0.02205	3%	0.735	מזוט
0.01836	3%	0.612	סולר מחזמ
0.02844	3%	0.948	סולר בטורבינת גז
0.12194	26%	0.469	גז
	פחות מ-1%	0.009	רוח
	פחות מ-1%	0.05	PV
	פחות מ-1%	0.018	ביומסה
0.74654	100%		סה"כ

בתהליך ייצור החשמל נפלטים גם גזי חממה אחרים אולם הם לא מהווים מרכיב משמעותי ולא נכללים בעבודה זו. הגז שאחראי לרוב ההשפעה מבחינת גזי חממה הוא פד"ח. בחישוב כולל, כל קוט"ש שמיוצר בישראל תורם בממוצע כ-746 ג' CO2eq ועל בסיס נתון זה חושב החיסכון בגזי חממה כתוצאה משימוש באנרגיות חלופיות. לנתון זה יש חשיבות ראשונה במעלה בניתוח מחזור החיים והוא יכול לשנות את התמונה מן הקצה אל הקצה, במיוחד בחלופות בהן מופקת אנרגיה רבה (שריפה, דש"ב ועיכול אנארובי). חשוב לציין שבאיחוד האירופי כל קוט"ש שמיוצר תורם בממוצע רק 450 ג' CO2eq, הודות לשימוש באנרגיה גרעינית ובגז טבעי לייצור חשמל. במידה וישראל תגיע בעתיד למצב דומה, תפחת היעילות של חלופות הטיפול בפסולת בהפחתת גזי החממה מייצור חשמל.

אנרגיה נוספת שיכולה להיות מוחלפת היא אנרגיית חום שמשמשת בד"כ בתהליכים תעשייתיים או להסקת בתים. אנרגיית חום יכולה להיות כמובן תוצר המרה של אנרגיה חשמלית, אולם לרוב בתעשייה הכבדה המקור הוא דלקים שונים כגון פט קוק שמשמש כדלק בתעשיית המלט. בארץ אין שימוש במערכות הסקה מרכזיות לבתים והאפשרות להחלפת אנרגיית חום היא רק בתעשייה. לצורך חישוב החיסכון באנרגיית חום לתעשייה נלקח נתון של 280 ג' CO2eq.

4.5 שימוש במשאבים ממוחזרים

משאב ממוחזר הוא פסולת שהופכת לחומר גלם או למשאב המחליף משאבים קיימים. בהגדרה זו נכללים הרכיבים היבשים שעוברים מחזור וחוסכים חומרי גלם ואנרגיה לייצור מוצרים מחומרי גלם אזילים. ברוב המקרים מוביל המיחזור לחיסכון בפליטת גזי חממה אך לא בכל מצב. על פי רוב, חומר ממוחזר עובר הנחתה והופך למוצר נחות יחסית למוצר המקורי. עם זאת, מחקר

³ אחוז זה מתייחס לחשמל שהופק ב-2008 מתחנות כוח הפועלות על גז, עם זאת יש לעיתים הפסקות באספקת הגז ואז עוברים לשימוש בסולר שמשמש כגיבוי ומזהם הרבה יותר.

מקיף שבוצע ע"י הסוכנות להגנת הסביבה האמריקאית הראה שברוב המקרים מיחזור חוסך בפליטות גזי חממה¹⁰.

משאב נוסף שמחליף מוצר קיים הוא קומפוסט המיוצר מפסולת אורגנית ויכול להחליף דשנים כימיים וחומרי הדברה ויכול להביא לחסכון בתשומות חקלאיות.

פרק 5 פליטת גזי חממה על פי שיטות הטיפול בפסולת

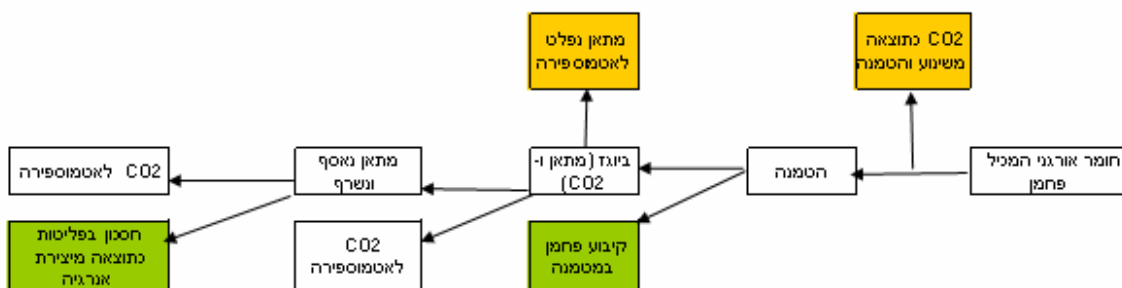
בחלק זה נסקור את שיטות הטיפול השונות בפסולת וגזי החממה הנפלטים בכל אחת השיטות. גזי החממה מחושים בהתאם למרכיבים השונים בפסולת והשלבים השונים לאורך שרשרת הטיפול.

5.1 הטמנה

רוב פליטות גזי החממה המיוחסות להטמנה נובעות מהפירוק האנארובי של הפסולת האורגנית הרקבובית שבמהלכו משתחרר מתאן. חלק קטן מאד של הפליטות נובע משינוע הפסולת ושימוש בציוד מכני להטמנה הגורמים לפליטות פד"ח ישן. לפליטות חנקן תת-חמצני משמעות זניחה בהטמנה.

בצד החיסכון בפליטות ישנו קיבוע פחמן כתוצאה מהטמנת חומר אורגני וחיסכון באנרגיה כתוצאה משימוש בגז המטמנות להפקת חשמל או חום. איור 2 מתאר את מאזן גזי החממה של חלופת ההטמנה.

איור 2: תזרים גזי החממה כתוצאה מהטמנת פסולת ביתית מעורבת



למרות שכל הפסולת עוברת כמקטע אחד (פסולת מעורבת) להטמנה, פליטות גזי החממה שונות לגבי כל אחד מהמרכיבים שבפסולת המעורבת. פסולת העוברת להטמנה תורמת לפליטות גזי חממה כתוצאה מפליטות מתאן ומנגד יכולה להביא לחיסכון בגזי חממה ע"י קיבוע פחמן והחלפת דלקים מאובנים.

על מנת לחשב את פליטות גזי החממה יש להבין ראשית מהם מרכיבי הפסולת. **חשיבות מרכזית יש לחומר האורגני, מוצאו (ביוגני או מאובני) וקצב פירוקו בקרקע.**

5.1.1 פסולת אורגנית רקבובית

פסולת אורגנית רקבובית היא חומר שעובר פירוק (חלקי או מלא). כאשר חומר אורגני מתפרק בתנאים אל-אווירניים הפחמן האורגני שבו הופך למתאן (כ-50%) ולפד"ח ביוגני (50%) ואילו כאשר הוא מתפרק בתנאים אווירניים רוב הפחמן הופך לפד"ח ביוגני. החלק שאינו מתפרק נשאר בקרקע ולכן מוביל לקיבוע פחמן אטמוספירי ולחיסכון במאזן גזי החממה. בפסולת אורגנית רקבובית כוללת את שאריות המזון, גזם רך, נייר וקרטון.

5.1.2 פסולת אנאורגנית ושונית

פסולת אנאורגנית אינה מכילה פחמן שזמין לפירוק ביולוגי בטווח הזמן הקצר ולכן בהטמנת המקטע האנאורגני לא צפויות כביכול פליטות גזי חממה וגם לא צפוי חיסכון משימוש בגז או קיבוע פחמן. עובדה זו נכונה לגבי פלסטיק, מתכות וזכוכית, אולם יש לזכור שבמקטע האנאורגני (כהגדרתו בסקר הפסולת 2005) נכללים חומרים שהם למעשה אורגנים או אורגנים בחלקם כגון חיתולים, עץ, טקסטיל וחומרים אורגנים אחרים שנספחו לרכיבים היבשים. לחומרים אלו השפעה לא מבוטלת על מאזן גזי החממה. בד"כ פסולת אנאורגנית לא מוטמנת בנפרד ולכן קשה מאד לדעת מהן פליטות גזי החממה הנגרמות ממנה. לצורך כך חילצנו את רכיבי החומר האורגני הנכללים בהגדרת "פסולת אנאורגנית". הרכב מקטע זה מבוסס על סקר הפסולת 2005 כמפורט ב טבלה 3.

טבלה 3 : הרכב "פסולת אנאורגנית"

סה"כ מוטמן	ממוחזר	סה"כ	
12.7%	0.3%	13%	פלסטיק
2.7%	0.1%	2.8%	מתכת
2.4%	0.8%	3.2%	זכוכית
4.0%	0.0%	4.0%	טקסטיל
4.6%	0.0%	4.6%	טיטולים
7.9%		7.9%	אחר
34.4%	1.1%	35.5%	סה"כ

הרכיבים החשובים לעניין גזי החממה הם חיתולים, טקסטיל ו"אחר" משום שהם מכילים גם חומר אורגני פריק (פלסטיק הוא אמנם חומר אורגני אבל אינו פריק). במקטע האנאורגני נפלטים כ-151 CO₂eq / טון, כתוצאה מתסיסה של הרכיב האורגני הרקבובי בחיתולים, בטקסטיל ובשונית.

חיתולים חד-פעמיים

פסולת חיתולים מורכבת מהחיתול עצמו ומההפרשות. החיתול עשוי מפלסטיק ומחומרי ספיגה שהם בחלקם הגדול ממקור ביוגני (תאית). החלק שסופג את הנוזלים הוא ליבת החיתול שמורכבת מתאית ומפולימר סינטטי סופג (SAP או אחר). המעטפת החיצונית מונעת דליפות ומספקת תמיכה פיזית בשכבה הסופגת והיא עשויה מפלסטיק מסוג PE, PP או סוגים אחרים. ההפרשות הן צואה ושתן. בהתבסס על מחקר מקיף שנערך עבור הסוכנות להגנת הסביבה באנגליה¹¹ אנו מעריכים שכ-20% מפסולת החיתולים (חיתולים משומשים) הם תאית, כ-25% פלסטיק מסוגים שונים ו-55% הפרשות שמתוכן רק כ-30% פסולת אורגנית רקבובית (כ-70% מההפרשות הן מים). רכיב התאית מקביל לפסולת נייר ועץ מבחינת גזי החממה ואילו רכיב ההפרשות (ללא הנוזלים) מקביל להגדרות פסולת אורגנית רקבובית.

טבלה 4: הרכב חיתולים משומשים (ממוצע גילאים 0-2.5 שנים)

פליטות גזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח / טון)	אחוזים	משקל (גר")	הרכב חיתולים (עד גיל 2.5 שנים)
2	25%	99	פלסטיק
110	56%	219	הפרשות
-	15%	61	צואה
-	40%	158	שתן
39	19%	76	תאית
150	100%	394	סה"כ

טקסטיל

טקסטיל מכיל כ-40% פחמן שמתוכם רק כ-50% פחמן אורגני פריק ומתוך הפחמן הפריק רק 30% משתחרר לאטמוספירה כמתאן או פד"ח. כלומר ניתן לצפות שהטמנת טקסטיל תגרום לפליטות מתאן כתוצאה מפירוק המרכיב האורגני הזמין לפירוק ומאידך גיסא לקיבוע פחמן שמקורו במרכיב שאינו זמין לפירוק.

אחר/שונות

להלן מרכיבי רכיב השונות כפי שהם מופיעים בסקר הפסולת 2005.

טבלה 5: הרכב רכיב "השונות" בפסולת

עץ	אנאורגנים	פסולת אלקטרונית	מיוחדת	אורגנים	סה"כ
0.865%	3.850%	0.68%	1.97%	0.54%	7.900%

הרכיבים המעניינים אותנו מבחינת גזי חממה הם העץ והרכיבים האורגנים. אל עץ נתייחס לפי נתוני נייר וקרטון ואל הרכיב האורגני כאל פסולת אורגנית רקבובית.

5.1.3 פליטות מתאן

פסולת ביתית שמגיעה למטמנה מכוסה בשכבות של עפר ואדמה היוצרות תנאים אל-אווירניים. בתנאים אלו המרכיב האורגני הרקבובי עובר תהליך של פירוק אנארובי שאחד מתוצריו הוא גז המטמנות המכיל כ-50% מתאן ו-50% פד"ח. פירוק אנארובי הוא תהליך ביולוגי המתרחש במספר שלבים ע"י מגוון של מיקרואורגניזמים. קצב הפירוק ותוצריו תלויים, בין השאר, בשיעור

החומר האורגני הפריק (DOC- degradable organic carbon) ומתוכו בחלק שעובר מינרליזציה ומשתחרר כמתאן או פד"ח (DDOC- dissimilable degradable organic carbon).
 חומר אורגני רקבובי, כגון שאריות מזון מכיל אחוז גבוה של חומרים זמינים לפירוק ע"י מיקרואורגניזמים והוא מתפרק מהר בתנאים אל-אווירניים. לעומת זאת, ישנם מרכיבים אורגניים בפסולת שבהם חלק גדול מהחומר האורגני אינו זמין לפירוק ע"י מיקרואורגניזמים. מרכיבים אלו, לדוגמא נייר וקרטון, עוברים פירוק איטי יותר וחלק גדול מהפחמן האורגני האצור בהם אינו מתפרק בטווח זמן של 100 שנה (טווח הזמן שהוגדר ע"י ה-IPCC לקיבוע פחמן). מרכיבים אלו מכילים אחוז גבוה של חומר עמיד לפירוק ע"י מיקרואורגניזמים כגון ליגנין שהוא הפולימר המרכזי בעץ.

פד"ח שנפלט מחומר אורגני רקבובי, קרטון ונייר הוא "פד"ח ביוגני" ולכן אינו מחושב כתורם לפליטת גזי חממה. לפיכך, הגז המשמעותי היחיד מבחינת גזי חממה הנפלטים מהטמנה הוא מתאן. בהתאם להערכה ש-50% מהפחמן בגז המטמנות משתחרר כמתאן¹² ניתן לחשב את פליטות גזי החממה מפסולת מוטמנת באופן הבא:

$$\text{Methane emissions (Kg/t)} = SW_c \cdot DDOC \cdot 50\% \cdot 16/12 \cdot 1000$$

כאשר:

SW_c : אחוז המרכיב C מתוך כלל הפסולת

$DDOC$: אחוז החומר הזמין לפירוק שמשתחרר כגז מטמנות

50%: אחוז המתאן מתוך גז המטמנות

16/12: יחס המשקל מולקולארי של מתאן/ פחמן

מחישב זה יש להפחית את הגז שנאסף ממטמנות ומשמש לייצור חשמל או נשרף בלפיד (בשני המקרים נפלט פד"ח ביוגני שאינו תורם להתחממות כדה"א) וכן את אחוז המתאן שעובר חמצון לפני הגיעו לאטמוספירה. אנחנו הערכנו שאחוז הפסולת שממנה נאסף גז בישראל היא 68% מכלל הפסולת ויעילות האיסוף היא 54% מכלל הגז הנפלט. הערכה זו מתבססת על הפריסה הקיימת של מערכות לאיסוף גז במטמנות, בתוספת הערכה שבשנים הקרובות נגיע למצב הדומה למצב הממוצע באירופה. מתוך כמות הגז שנאספת כ-60% מנוצל לייצור חשמל והשאר נשרף בלפיד. כ-3% מהמתאן עוברים חמצון ע"י מיקרואורגניזמים ומשתחרר לאוויר כפד"ח.
 מתוך הגז שנאסף הנחנו שכ-10% אינם נשרפים או משמשים להפקת אנרגיה. מדובר בגז שנאסף במטמנות חדשות או לקראת סוף חיי המטמנה וריכוז המתאן שבו נמוך, כך שאינו מתאים לשריפה ואין ברירה אלא לשחררו לאטמוספירה.

בטבלה 6 מופיעים ערכי המתאן המשתחרר ממרכיבי הפסולת המרכזיים.

טבלה 6: גזי חממה הנפלטים מהטמנת מרכיבי פסולת שונים

g	f	e	d	c	b	a	
קיבוע פחמן (Kg) (CO ₂ eq / t)	פליטות מתאן בלי איסוף (Kg CH ₄ / t)	אחוז המתאן בגז המטמנות	DDOC (%)	DOCf (%)	DOC (%)	TC (total carbon content)	
$(g=-1000*(b-d)*44/12)$	$(f=1000*d*e*16/12)$	(e)	$(d=c*b)$	(c)	(b)	(a)	
-787	77	50%	11.6%	35%	33%	33%	נייר וקרטון
-147	73	50%	11.0%	75%	15%	15%	מזון
-440	80	50%	12.0%	50%	24%	24%	גזם
-272	76	50%	11.5%	64%	19%	19%	חומר אורגני רקבובי
-513	40	50%	6.0%	30%	20%	39%	טקסטיל

n	m	i	k	j	i	h	
פליטות גזי חממה (Kg) (CO ₂ eq / t)	מתאן שנפלט לאטמוספירה (Kg CH ₄ / t)	מתאן שעובר חימצון לפני הגיעו לאטמוספירה (Kg CH ₄ / t)	גז שנאסף ויוצא חזרה לאטמוספירה (% מתוך הגז שנאסף)	סה"כ מתאן שנאסף	יעילות איסוף	מתאן הנאסף ממטמנות (% ממוצע מכלל)	
$(n=m*21)$	$(m=f-j+k*j-l)$	(l)	(k)	$(j=f*h*i)$	(i)	(h)	
1032	49.2	2.4	10%	28	54%	68%	נייר וקרטון
981	46.7	2.4	10%	27	54%	68%	מזון
1074	51.2	2.4	10%	29	54%	68%	גזם
1023	48.7	2.4	10%	28	54%	68%	חומר אורגני רקבובי
541	25.8	1.0	10%	15	54%	68%	טקסטיל

*חומר אורגני רקבובי: חישוב ממוצע של שאריות מזון וגזם רך

יש לציין שאחוז המתאן בגז המטמנות וכן אחוז החומר האורגני כ- DDOC תלויים במספר משתנים בהם גיל המטמנה, סוג הפסולת, אחוז הרטיבות, הטמפרטורה, המשקעים ושיטות הניהול של המטמנה (אטימה, הידוק וכו'). משתנים אלו משפיעים על היווצרות תנאים אווירניים במטמנה שבהם חלק מהפחמן משתחרר כפד"ח ביוגני. לפיכך נהוג להכניס משתנה נוסף למשוואה שהוא קבוע הפירוק האווירני של הפסולת (MCF- methane correction factor). ככל שהמטמנה עמוקה יותר ומנוהלת באופן נכון יותר יקטן הפירוק האווירני של הפסולת. מכיוון שבארץ רוב המטמנות מנוהלות ברמה סבירה קבוע זה שווה ל-1, כלומר ניתן להניח שהפירוק האווירני הוא זניח⁴.

5.1.4 קיבוע פחמן במטמנה

חלק ניכר מהחומר האורגני שמגיע למטמנה אינו זמין לפירוק אנארובי בטווח הזמן הקצר. מדובר בחומרים כגון נייר וקרטון שמורכבים, בין השאר מליגנין, פולימר עמיד יחסית בפני פירוק אנארובי. יש לציין שבתנאים אווירניים יש מיקרואורגניזמים שיכולים לפרק ליגנין. בתנאים אנארוביים, לעומת זאת, החומר האורגני נשאר יציב ומקובע בקרקע. מכיוון שהפחמן האורגני מקורו בפד"ח ביוגני, קיבועו בקרקע מהווה הפחתה של פד"ח באטמוספירה והוא מחושב כחיסכון בגזי חממה. אחוז החומר האורגני שאינו מתפרק במטמנה, כלומר מקובע בקרקע, הוא ההפרש בין DOC ל-DDOC.

⁴ מדובר בפירוק אווירני של הפסולת בשונה מחמצון של המתאן עצמו ע"י מיקרואורגניזמים המתרחש בתוך גוף הפסולת.

5.1.5 השבת אנרגיה מהפסולת

הגז שנאסף בחלק מהמטמנות משמש לייצור חשמל או חום. בחלק מהמטמנות הגז נשרף בלפיד כדי שהפחמן ייפלט כפד"ח ביוגני ולא כמתאן. במטמנות שבהן מייצרים חשמל הגז מוזרם לגנרטורים שבהם הוא נשרף ונפלט כפד"ח. כמות החשמל המופק בדרך זו היא תוצאה של אחוז הגז המשמש ליצירת חשמל מתוך הגז שנאסף ויעילות המרת הגז לאנרגיה חשמלית. אנחנו הנחנו ש-60% מהגז שנאסף משמש ליצירת אנרגיה ושכל האנרגיה מומרת לחשמל. יעילות המרת האנרגיה לחשמל היא 30%-28% והנחת העבודה שלנו היא 30%. לפיכך ניתן לחשב:

טבלה 7: הפקת אנרגיה מביוגז

j	i	h	g	f	e	d	c	b	a	
חיסכון בגזי חממה (ש"ע פד"ח / טון פסולת)	פליטות מתמהיל הדלקים הנוכחי (ק"ג ש"ע פד"ח / קוט"ש)	קוט"ש / טון פסולת	סה"כ חשמל מופק מ-1 ק"ג מתאן (קוט"ש)	יעילות אנרגטית (%)	ערך קלורי של מתאן (קוט"ש / ק"ג)	ערך קלורי של מתאן (קילו ג'אול/ק"ג)	גז שמשמש ליצירת חשמל (ק"ג/טון פסולת)	אחוז הגז שמשמש ליצירת חשמל (%)	סה"כ מתאן שנאסף (ק"ג/טון פסולת)	
(j=h*i)	(i)	(h=g*c)	(g=e*f)	(f)	(e=d/3600)	(d)	(c=a*b)	(b)	(a)	
53	0.75	70.7	4.17	30%	14	50000	16.96	60%	28	נייר וקרטון
50		67.3					16.16		27	מזון
55		73.4					17.63		29	גזם
53		70.1					16.82		28	חומר אורגני רקבובי
28		36.7					8.81		15	טקסטיל

לפי חישוב זה מכל ק"ג מתאן שנאסף ניתן להפיק כ-4.17 קוט"ש. כמות זו של חשמל מחליפה את החשמל המיוצר בישראל באמצעות תמהיל הדלקים הקיים. בייצור חשמל בישראל נפלטים בממוצע 750 גר/קוט"ש, מכאן שעבור כל טון פסולת אורגנית נחסכים כ-53 ק"ג ש"ע פד"ח. מכיוון שה-DDOC של נייר וקרטון כמעט זהה לזה של פסולת אורגנית, החיסכון מהשבת אנרגיה בהטמנת נייר וקרטון דומה מאד. לגבי הפסולת האנאורגנית רכיב השבת האנרגיה חושב על בסיס המרכיב האורגני הזמין לפירוק שבה.

5.1.6 סיכום פליטות גזי חממה כתוצאה מהטמנה

טבלה 8: סיכום פליטות גזי חממה מהטמנה (ק"ג ש"ע פ לטון פסולת)

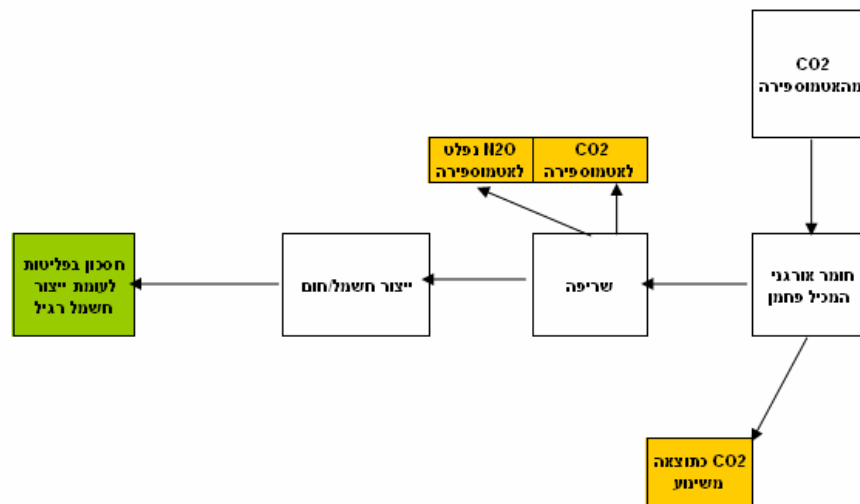
סה"כ	השבת אנרגיה	קיבוע פחמן	פליטות מתאן	שינוע ומיכון	
200	-53	-787	1032	8	נייר וקרטון
708	-53	-272	1025	8	חומר אורגני רקבובי
42	-8	-108	150	8	פסולת אנאורגנית

5.2 שריפה

שריפת פסולת היא תהליך שבו חלק גדול מהפסולת עובר חימצון והופך ממצב של מוצק או נוזל למצב צבירה גזי. רוב הגז משתחרר בצורת פד"ח שנחלק לשני סוגים: פד"ח ביוגני שמקורו בחומר אורגני "חדש" ופד"ח ישן שמקורו בחומר אורגני ישן (נפט ותוצריו). התהליך מתרחש בטמפי' גבוהות מאד ומשתחררת בו אנרגיה רבה שיכולה לשמש ליצירת חשמל או לחימום. הערך הקלורי של החומר המוזן הוא שקובע בסופו של דבר כמה אנרגיה ניתן להפיק. להרכב הפסולת המוזנת לתהליך השפעה מכרעת על מאזן גזי החממה. ישנן טכנולוגיות שונות לשריפת פסולת. בחלק זה אנו בוחנים שריפת פסולת מעורבת בתנאים של נוכחות חמצן (Mass- burning) כאשר האנרגיה המופקת משמשת ליצירת חשמל בלבד. טכנולוגיה זו היא השיטה הנפוצה כיום ברחבי העולם לשריפת פסולת. בד"כ הפסולת מוזנת למשרפה כמקטע אחד (פסולת מעורבת), אולם לצורך החישוב חילקנו את הפסולת לשני מקטעים מרכזיים:

1. חומר אורגני רקבובי, נייר, קרטון וטקסטיל- רוב הפליטות מפסולת זו הן פד"ח ביוגני.
2. פסולת אנאורגנית – מקטע שמרכיביו הם פלסטיק, זכוכית, מתכת ו"שונות" והוא כולל בתוכו גם חומרים אורגנים. רוב הפליטות מפסולת זו הן פד"ח ישן.

איור 3: תזרים פליטות גזי חממה כתוצאה משריפת פסולת



5.2.1 שינוע

חלק קטן מאד של הפליטות נובע משינוע הפסולת ושימוש בצידוד מכני לצורך קליטת הפסולת והזנתה. הפליטות דומות לחלופת ההטמנה.

5.2.2 פד"ח

רוב הפליטות כתוצאה משריפה הן פד"ח. כאמור מקור הפחמן חשוב על מנת לקבוע האם פליטות לאטמוספירה תורמת להתחממות העולמית. כאשר מקור הפסולת הוא ממקטע 1 (חומר אורגני),

רוב הפחמן משתחרר כפד"ח ביוגני ואינו מחושב בתזרים גזי החממה. עם זאת, מקטע 1 כולל גם טקסטיל שבחלקו מורכב מחומרים סינטטיים כגון סיבי פלסטיק. חומרים אלו, כאשר הם נשרפים, פולטים פד"ח ישן שנכלל בחישוב גזי החממה. בשריפה של מקטע 2 (פסולת אנאורגנית), משתחרר פד"ח ישן שמקורו בפלסטיק לסוגיו ובפסולת "אחר", מקטע שיכול לכלול מוצרים היברידיים, חיתולים וכו'. פליטות הפד"ח כתוצאה משריפת פסולת מפורטות בטבלה 9.

5.2.3 חנקן תת-חמצני

חנקן תת-חמצני אינו מנוטר באופן סדיר במתקני שריפה ולכן חסרים נתונים בנושא זה. לצורך החישוב נלקחה הערכה ממוצעת על בהתאם להנחיות ה-IPCC, על פיה בממוצע נפלטים כ-0.05 ק"ג חנקן תת-חמצני מכל טון פסולת מעורבת.

5.2.4 מתאן

בתהליך השריפה רובו המכריע של הפחמן משתחרר כפד"ח וכמעט אין פליטות מתאן.

טבלה 9: פליטות גזי חממה כתוצאה משריפת פסולת

פליטות פד"ח (ק"ג ש"ע / טון / פד"ח / טון)	פליטות תת-חמצני (ק"ג ש"ע / טון / פד"ח / טון)	פליטות פד"ח (ק"ג ש"ע / טון / פד"ח / טון)	אחוז פחמן מאובני (%)	תכולת פחמן (%)	
15	15	0	0%	33%	נייר וקרטון
15	15	0	0%	19%	חומר אורגני רקבובי
730	15	715	50%	39%	טקסטיל
2252	15	2237	100%	61%	פלסטיק
15	15	0	0%	0%	מתכת
15	15	0	0%	0%	זכוכית
270	15	255	29%	24%	אחר

5.2.5 קיבוע פחמן

פחמן ביוגני נשרף ונפלט כפד"ח ולכן אין קיבוע פחמן.

5.2.6 השבת אנרגיה ומשאבים

האנרגיה שניתן להפיק מהפסולת תלויה בערך הקלורי של כל אחד מהמרכיבים, יעילות המרת הערך הקלורי לחשמל וחום, והפליטות הנגרמות מתמהיל הדלקים המוחלף. כאשר שורפים חומר מסוים מושקעת גם אנרגיה על מנת לאדות את המים האצורים בחומר. ככל שאחוז הרטיבות בחומר גבוה יותר נדרשת כמות גדולה יותר של אנרגיה לאידוי המים והיא באה על חשבון האנרגיה שמנוצלת לייצור חשמל או חום. על מנת לקבל ערך קלורי שמייצג את האנרגיה שניתנת לניצול, נקבע "ערך קלורי נקי" (NCV) שהוא הערך הקלורי של החומר לאחר שהושקעה האנרגיה להוצאת המים.

משתנה נוסף שמשפיע על כמות האנרגיה המופקת הוא יעילות המרת האנרגיה של המתקן. כאן ישנו הבדל גדול בין המרת אנרגיה לחום שבה יעילות הניצול היא כ-50% ובין המרת אנרגיה לחשמל שבה היעילות היא 15-22%. הנחות העבודה שנלקחו הן 50% יעילות לחום ו-18% לחשמל. על פי הנחות אלו ניתן להפיק אנרגיית חשמל בשיעור של 427 קוט"ש / טון פסולת מעורבת או 1185 קוט"ש / טון פסולת מעורבת כאנרגיית חום. כאן חשוב לציין שבעולם קיימים מתקני שריפה שמייצרים חום וחשמל אולם בד"כ החום משמש למערכות חימום מרכזיות במדינות עם אקלים קר או לתעשייה כבדה. מכיוון שצרכני חום אלו אינם מצויים בישראל, התייחסנו בעבודה זו רק להשבת אנרגיה חשמלית.

בשגיאה! מקור ההפניה לא נמצא. מופיעים נתונים על ערכם הקלורי של מרכיבים שונים בפסולת, האנרגיה שניתן להפיק מהם והחיסכון בגזי חממה. מקדם הפליטות של קוט"ש חשמל בתמהיל הדלקים הישראלי הוא 750 גרי / קוט"ש.

טבלה 10 : ערכים קלוריים, אנרגיה וחיסכון בגזי חממה כתוצאה משריפת פסולת

דש"ב-חיסכון בפליטת גזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת)	שריפת פסולת מעורבת-חיסכון בפליטת גזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת)	קוט"ש / טון	ערך קלורי נקי (NCV) (GJ/ton)	
-1092	-428	570	11.5	נייר וקרטון
-	-148	197	3.98	חומר אורגני רקבובי
-1382	-543	724	14.6	טקסטיל
-2983	-1171	1562	31.5	פלסטיק
-	0	0	0	מתכת
-	0	0	0	זכוכית
-	-312	417	8.4	אחר

5.2.7 סיכום פליטות גזי חממה משריפת פסולת לפי מרכיבי הפסולת

מסיכום הפליטות כתוצאה משריפת פסולת ניתן להבחין שהמרכיבים המשמעותיים הם פליטות הפד"ח הישן והשבת האנרגיה. בחומרים ממקור ביוגני פליטות הפד"ח אינן מחושבות וכאשר הערך הקלורי הנקי הוא חיובי ישנו חיסכון בפליטות כתוצאה מיצירת חשמל. לעומת זאת, שריפת חומרים שערכם הקלורי גבוה אך מקורם במקורות מאובנים, למשל פלסטיק, מחזירה הרבה אנרגיה אך מנגד גורמת לפליטת פד"ח ישן ולכן תורמת בסיכומו של דבר באופן חיובי למאזן גזי החממה. יש לציין ששריפת המרכיב האורגני הרקבובי יחד עם שאר מרכיבי הפסולת מורידה את סך הערך הקלורי ועשויה ליצור בעיות בגלל הקושי לשמור על טמפרטורות גבוהות הנחוצות לשריפת החומרים האחרים. מכאן שיעילות השריפה יורדת כאשר שורפים פסולת מעורבת. מסיבה זו, קבעו מדינות שונות באירופה סף תחתון לערך קלורי מותר במתקני שריפת פסולת. בגרמניה, קובעות התקנות שאין לשרוף פסולת בעלת ערך קלורי נמוך מ-7.5 מגה ג'אול (1,792 קילו קלוריות) לקילוגרם פסולת ביתית¹³. מנהל מתקן שריפה גדול בבלגיה ציין שמבחינה תפעולית אין לרדת מתחת לערך קלורי של 10 מגה ג'אול לקילוגרם (2,390 קק"ל) פסולת.¹⁴

טבלה 11: סיכום פליטות גזי חממה משריפה (ק"ג שע"פ לטון פסולת)

השבת אנרגיה- דש"ב	סה"כ - שריפה	השבת אנרגיה- שריפה	פליטות פד"ח ישן	פליטות חנקן תת- חמצני	שינוע ומיכון	
-1092	-405	-428	0	15	8	נייר וקרטון
	-125	-148	0	15	8	חומר אורגני רקבובי
-1382	195	-543	715	15	8	טקסטיל
-2983	270	-816	1063	15	8	פסולת אנאורגנית

5.3 דלק שמקורו בפסולת (דש"ב)

חלופת הדש"ב דומה לחלופת השריפה אלא שכאן הפסולת ממוינת ונעשה שימוש רק במרכיבים יבשים בעלי ערך קלורי גבוה (פלסטיק, טקסטיל, נייר וקרטון). אנו מניחים שניתן יהיה להגיע למיון של 80% מרכיבים אלו לדש"ב והשאר יועבר להטמנה. יעילות המרת האנרגיה גבוהה יותר מאשר בשריפה כוללת (18% בשריפה לעומת כ-45% בדש"ב) ולכן החיסכון בפליטות גדול יותר. לעומת זאת, אחוז גדול יותר מהפסולת המוזנת מקורו בפחמן מאובני. גם בשימוש בדש"ב ישנן טכנולוגיות שונות. השימושים הנפוצים בדש"ב הם תחליף פחם בתחנות כוח לייצור חשמל ותחליף לפט קוק שהוא דלק שמזין כבשני מלט. אנחנו התייחסנו רק לדש"ב כתחליף לדלק בכבשני מלט, משום שזו החלופה היחידה שמתוכננת כיום בישראל.

מבחינת הפליטות אחוזי הפחמן האורגני המאובני הם אותם ערכים המופיעים בטבלה 9 ולכן הנתונים זהים לנתוני השריפה של המרכיבים השונים. לעומת זאת החיסכון באנרגיה גדול יותר בדש"ב משום שיעילות השריפה גבוהה יותר.

5.3.1 סיכום פליטות דש"ב

פליטות גזי החממה מדש"ב דומות לפליטות בשריפה רק שכאן המרכיבים כוללים רק את החומרים בעלי הערך הקלורי הגבוה יותר. כתוצאה מכך ניתן לשמור על תהליך יעיל יותר. אנחנו בדקנו את חלופת הדש"ב שבה מחליפים דלק לכבשני מלט ולכן האנרגיה שמופקת מהפסולת מנוצלת כחום. שני גורמים אלו מגדילים את יעילות ניצול האנרגיה ואת החיסכון בפליטות. סיכום מאזן גזי החממה מדש"ב מופיע בטבלה 12.

טבלה 12: סיכום פליטות גזי חממה מדש"ב (ק"ג שע"פ לטון פסולת)

הפליטות (Emissions factor) המשמש כברירת מחדל, ל-4 ק"ג מתאן / טון פסולת (רטובה). נתון זה מייצג טווח רחב של פליטות (0.03-0.8 ק"ג מתאן / טון פסולת) שמקורו במדידות בתנאים שונים עם סוגי פסולת שונים.

המחקר עבור האיחוד האירופאי, שעליו מבוססים רבים מנתוני עבודה זו⁵, אינו זוקף פליטות מתאן לתהליך הקומפוסטציה וכך גם מחקר מקיף בנושא גזי חממה מפסולת מוצקה שנערך ע"י הסוכנות להגנת הסביבה האמריקאית¹⁰. הנחיות ה-IPCC קובעות טווח רחב מאד לקבוע פליטות המתאן והן גם מבוססות על מחקרים בזבל בקר ולכן אינן מתאימות לבחינה של פסולת ביתית.

במחקר שבחן קומפוסטציה של זבל בקר נמצא שיש מתאם חזק בין פליטות המתאן לריכוזי החנקן האנארוגני בזבל הטרי ובמיוחד עם ריכוז יוני האמוניום¹⁶. אמוניום מהווה מקור מרכזי לחנקן בעבור חיידקים מתאנוגנים וכזה הוא מעודד היווצרות תנאים מתאימים לגידול מתאנוגנים. ריכוז האמוניום בקומפוסט מזבל בקר גדול בשני סדרי גודל לפחות בהשוואה לפסולת אורגנית ביתית ולכן בפסולת ביתית צפויות הרבה פחות פליטות מתאן^{17,18}. תופעה זו הוכחה במחקר שבחן קומפוסטציה של פסולת שאריות מזון¹⁹. בדגימות של פסולת שאריות מזון לא תועדו פליטות מתאן משמעותיות במהלך הקומפוסטציה, אולם בדגימות שבהן הוסיפו לפסולת זבל בקר תועדו פליטות מתאן באותם תנאי ניסוי.

הנחת העבודה שלנו היא שאין פליטות מתאן בתהליך קומפוסטציה שמנוהל כהלכה וגם אם נוצר מתאן באזורים מסוימים בערימת הקומפוסט הוא מתחמצן כאשר הוא מגיע לכיסי אוויר ובא במגע עם חמצן. הנחה זו מתבססת על המחקרים של הסוכנות האמריקאית להגנת הסביבה והאיחוד האירופאי ועל המחקר שבחן פליטות מתאן מקומפוסטציה של פסולת ביתית.^{10,19}

5.4.3 פליטות חנקן תת חמצני

חנקן תת חמצני נוצר כתוצר ביניים בתהליכי הניטריפיקציה והדה-ניטריפיקציה של חנקן. בניטריפיקציה חנקן תת חמצני הוא תוצר ביניים של חמצון יון האמוניום לניטריט ואח"כ לניטראט, כחלק מתהליך שמתרחש בתנאים אווירניים על ידי חיידקים ניטריפיקטיים (*nitrosomonas*, *nitrosococcus*, *nitrosolobus* ועוד). בתהליך הדה-ניטריפיקציה ניטראט מחוזר לחנקן אטמוספרי כאשר חנקן תת חמצני הוא תוצר ביניים. דה ניטריפיקציה מתרחשת בתנאים אל-אווירניים ע"י חיידקים דה-ניטריפיקטיים (*Bacillus*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, ואחרים).

קבוע ה-IPCC לפליטות חנקן תת חמצני מטיפול ביולוגי בפסולת מוצקה הוגדר כ- 0.3 גר' / ק"ג טון חומר טרי. קבוע זה משמש כברירת מחדל לפסולת מוצקה והוא מייצג טווח רחב של תוצאות (0.06-0.6 גר' / ק"ג טון חומר טרי). לעומת זאת, במחקר שנערך עבור האיחוד האירופאי ובמחקר אחר של הסוכנות האמריקאית להגנת הסביבה לא נזקפו כלל פליטות חנקן תת חמצני לתהליך הקומפוסטציה^{5,10}.

מכיוון שחנקן תת חמצני הוא גז חממה חזק ביותר, יכולה להיות לו השפעה מכרעת על תוצאות הבדיקה. לכן מצאנו צורך להבין את הנושא לעומקו וסקרנו מספר מחקרים שבחנו פליטות חנקן תת חמצני מקומפוסטציה, חלקם מהמקורות שעליהם מבוסס קבוע ה-IPCC.

רוב המחקרים בנושא מתייחסים לזבל בקר, בוצות שפכים או זבל ירוק (גזם ופסולת חקלאית). בניסויים עם זבל בקר תועדו פליטות חנקן תת חמצני בשיעורים של 0.08-0.19 ק"ג חנקן תת חמצני/טון חומר יבש^{16,20,21}.

לעומת זאת, מצאנו רק שלושה מחקרים שמתייחסים ישירות לפסולת שאריות מזון ומחקר נוסף שבחן זבל ירוק מעורב עם קליפות תפוז. כל המחקרים מצביעים על כך ששיעור פליטות החנקן התת חמצני נמוך מאד בקומפוסטציה של פסולת שאריות מזון^{22,23,19,24}. כלומר לסוג החומר האורגני שעובר קומפוסטציה ולהרכבו הפעה מכרעת על שיעור פליטות החנקן התת חמצני.

בקומפוסטציה של זבל בקר פליטות החנקן התת חמצני גבוהות באופן משמעותי ביחס לקומפוסטציה של שאריות מזון. הוכחה לכך היא שבדגימות בהן הוסיפו לשאריות המזון קומפוסט מזבל בקר הייתה קפיצה משמעותית בפליטות החנקן התת חמצני¹⁹.

ייתכן שההסבר לכך נעוץ בעובדה שפליטות החנקן התת חמצני נמצאות במתאם גבוה עם ריכוזי ה- NO_2^- וה- NO_3^- שבפסולת. קשר זה הוכח במחקר שבחן קומפוסטציה של שאריות מזון ומצא שכאשר מוסיפים לשאריות המזון קומפוסט מזבל בקר או כאשר מוסיפים יוני NO_2^- ישנה עלייה חדה בפליטות החנקן התת חמצני²².

על סמך מחקרים אלו והמחקרים של סוכנות האמריקאית להגנת הסביבה והאיחוד האירופאי, אנו מניחים שפליטות חנקן תת חמצני במהלך הקומפוסטציה אינן משמעותיות. בכדי לכמת בכל זאת את פליטות החנקן התת חמצני לקחנו ממוצע של המחקרים על קומפוסטציה של שאריות מזון בתוספת המחקר שבדק זבל ירוק. התוצאה הייתה 7 ק"ג חנקן תת חמצני / טון חומר אורגני טרי, כמפורט בטבלה 13.

טבלה 13: פליטות חנקן תת חמצני מקומפוסטציה של זבל בקר, שאריות מזון וזבל ירוק

המאמר	סוג הפסולת	% החנקן בקומפוסט	% פליטות N_2O מתוך סך החנקן שבחומר הטרי	פליטות חנקן תת חמצני (ק"ג חנקן תת חמצני/טון פסולת אורגנית)	פליטות גזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח/טון פסולת אורגנית)
Hao, 2004	זבל בע"ח			0.08	24.8
Hao, 2001	זבל בע"ח			0.19	58.9
Pattey, 2005	זבל בע"ח			0.162	50.2
yaowu, 2000	שאריות מזון (עם שבבי עץ)			0.0017	0.5
Beck-Friis, 2001	שאריות מזון (עם גבעולי חיטה)	1.3%	0.02%	0.00258	0.8
H. J. Hellebrand, 1997	זבל ירוק (גזם וקליפות תפוז)	1.3%	0.50%	0.0541	16.8
yaowu, 2000	שאריות מזון (תוספת זבל בקר)			0.7543	234

5.4.4 קיבוע פחמן

פסולת אורגנית ביתית (שאריות מזון בלבד) מכילה כ- 18% פחמן לטון. כ-75% מהפחמן משתחרר במהלך הפירוק לאטמוספירה כפד"ח. גם לאחר היישום בקרקע פחמן ממשיך להשתחרר לאוויר כפד"ח כך שבסופו של דבר כשמסתכלים על אופק של 100 שנים כ-92% מהפחמן שיושם בקרקע משתחרר ורק 8.2% נשארים מקובעים בקרקע. כאשר מתרגמים אחוז זה למשקל בק"ג פד"ח,

מקבלים כ-22 ק"ג ש"ע פד"ח. חישוב זה מתייחס למצב בו הקומפוסט מוצנע בקרקע. במצב בו החומר האורגני אינו מוצנע יש לצפות שאחוז גדול יותר מהחומר יתנדף כפד"ח.

טבלה 14: חיסכון בגזי חממה כתוצאה מקיבוע פחמן במהלך יישום קומפוסט בקרקע

ש"ע פד"ח מקובע (ק"ג / טון פסולת אורגנית)	ש"ע פד"ח מקובע (ק"ג / טון קומפוסט טרי)	פחמן מקובע (ק"ג / טון קומפוסט)	פחמן בטון קומפוסט (ק"ג)	אחוז מקובע בקרקע
22	54	15	180	8.20%

5.4.5 שיטת הקומפוסטציה (סגורה/פתוחה)

שיטת הקומפוסטציה לא צפויה להשפיע על מאזן הפליטות למעט על מרכיב השינוע שבו נכללת גם האנרגיה הדרושה למיכון בתהליך. האנרגיה הדרושה לתהליך סגור מוערכת בכ-40 קוטי"ש לטון חומר אורגני שהם כ-30 ק"ג ש"ע פד"ח. כיום לא קיימים בארץ מתקני קומפוסטציה סגורים אולם קיימים מספר מתקנים פתוחים המטפלים בזבל רפתות, בוצות שפכים ובמעט פסולת אורגנית שהופרדה מכנית. הגדרות המשרד להגנת הסביבה מגבילות מאד הקמת אתרי קומפוסטציה פתוחים ולכן צפוי שלפחות חלק מהמתקנים שיקומו בעתיד יהיו סגורים. עם זאת, המתקנים הפתוחים יהוו את התשתית לטיפול בפסולת האורגנית הביתית לפחות בשנים הקרובות. לאור מצב זה, החלטנו לקחת ממוצע שבו 50% מהמתקנים הם פתוחים ו-50% סגורים. ההשפעה היא כאמור רק על מרכיב העיבוד שבממוצע הוא 24 ק"ג ש"ע פד"ח.

5.4.6 החלפת דשנים כימיים

קומפוסט שהוכן מפסולת אורגנית מכיל חומרי הזנה הנחוצים לצמח, משפר את חדירות הקרקע ואת יכולת תאחיזת המים שלה, מגדיל את המגוון הביולוגי, מונע סחף קרקעות ויכול למנוע אידוי של מים מפני הקרקע כאשר הוא מיושם כחיפוי²⁵. בזכות תכונות אלו ואחרות הקומפוסט מהווה תחליף טוב לדשנים כימיים ויכול לשמש גם כמטייב קרקע. מגוון השימושים של קומפוסט רחב מאד וכולל גינון פרטי וציבורי, גידולי שדה, ירקות ומטעים, שיקום מחצבות וטיוב קרקעות. השימוש המרכזי והגדול ביותר הוא במגזר החקלאי. קומפוסט מפסולת ביתית מכיל את שלושת חומרי ההזנה החשובים (מאקרו-נוטריינטים) הדרושים לצמח: חנקן (N), זרחן (P) ואשלגן (K). למרות שריכוז הנוטריינטים בקומפוסט קטן יחסית לדשנים הכימיים, במקרים רבים קומפוסט יכול להחליף לגמרי את הדשן הכימי או לחלופין לשמש כתוסף החוסך בדישון כימי. הנוטריינט הדרוש לצמח בכמות הגדולה ביותר הוא חנקן והדישון נקבע לרוב על בסיס ריכוזו בדשן. בשונה מדשנים כימיים שבהם החנקן מופיע בצורה אנאורגנית כניטראט (NO_3^-) או כאמוניום (NH_4^+), חומרים הזמינים מיידית לצמח, בקומפוסט רוב החנקן מופיע בצורתו האורגנית. חנקן אורגני צריך לעבור פירוק נוסף, ע"י מיקרואורגניזמים המצויים בקרקע, על מנת שיהיה זמין לצמח.

במקרים רבים הנוטריינטים האנאורגנים המצויים בדשנים כימיים, חודרים לקרקע, עוברים את בית השורשים מבלי שהצמח מספיק לנצלם ועשויים לזהם את מי תהום. דליפת ניטראטים

לקרקע היא בעיה נפוצה בשימוש בדשנים כימיים והיא הובילה להגבלת השימוש בדשנים בהתאם לדירקטיבת החנקות⁵ ולתקנות מי השתייה באירופה, ארה"ב וישראל^{26, 27, 28}. בשונה מדשן כימי, חומרי ההזנה בקומפוסט משתחררים לאט ובמשך תקופה ארוכה. תכונה זו, על אף שהיא מגבילה את השימוש בקומפוסט כזרז לגדילה מהירה, תורמת רבות לחסכון בנוטריינטים ולמניעת זיהום.

בנוסף לזיהום מי תהום, דשנים כימיים גורמים גם לפליטת גזי חממה בשני אופנים:

1. שחרור חנקן תת חמצני (N_2O) לאוויר – חיידקים דניטריטיפקטים הופכים את הניטראט לחנקן תת חמצני בגומחות אנארוביות בקרקע.
 2. שחרור פד"ח מאובני (CO_2) וחנקן תת חמצני (N_2O) בתהליך הייצור של הדשן.
- על מנת לחשב את החיסכון בגזי חממה כתוצאה מהחלפת דשנים כימיים עלינו למצוא כמה גזי חממה נפלטו משימוש בדשנים כימיים וכמה קומפוסט דרוש להחלפת 1 טון דשן כימי.

5.4.6.1 פליטות גזי חממה מדשנים כימיים

בתהליך ייצור הדשן הכימי הנפוץ, אמוניום ניטראט (ammonium nitrate), משתמשים בחומצה ניטרית (nitric acid) המיוצרת בתגובה כימית קטליטית שבה נפלט חנקן תת חמצני בכמויות גדולות כתוצר לוואי (9-2 גר' / ק"ג חומצה ניטרית). בנוסף נפלט פד"ח כתוצאה משימוש בדלקים מאובנים ובגז טבעי במהלך הייצור. הערכת סך גזי החממה הנפלטים כתוצאה משימוש בדשנים כימיים מופיעה בטבלה 15.

טבלה 15 : פליטות גזי חממה כתוצאה מרכיב הייצור של החלפת דשנים כימיים

ק"ג ש"ע פד"ח / טון דשן	ק"ג ש"ע פד"ח / טון יסוד צרוף	
5.29	5.29	חנקן (N)
0.22	0.52	זרחן (P) - כ- (P_2O_5)
0.31	0.38	אשלגן (K) - כ- (K_2O)

הנתון השני שעלינו לברר הוא באיזו מידה יכול הקומפוסט להחליף דשנים כימיים.

5.4.6.2 החלפת דשן כימי בקומפוסט

השימוש בקומפוסט כתחליף לדשן כימי תלוי מאד בסוג הגידול, תנאי הקרקע והאקלים, שיטת הגידול, השקיה וגורמים נוספים. בחקלאות אינטנסיבית ובגידולים הדורשים מנות חנקן גדולות לפרקי זמן קצרים קומפוסט אינו יכול להתחרות בדשן הכימי אולם הוא יכול להוות תוסף. לעומת זאת בגידולים מסוימים ובמגוון של תנאי גידול קומפוסט יכול להוות תחליף שווה ערך לדשן כימי ואף טוב ממנו. קומפוסט יעיל במיוחד בגידולי פלחה, כאשר נדרש שיפור של תכונות הקרקע או כאשר יש משמעות גדולה לחסכון במים. הדישון בקומפוסט פועל באופן שונה מאשר דשן כימי והוא יעיל לתקופה ארוכה יותר וטומן בחובו יתרונות נוספים לצמח ולקרקע שגם אותם יש לקחת בחשבון כשבוחנים אותו כתחליף

⁵ Council Directive 91/676/EEC

לדשן כימי. בעניין זה חשוב לציין שקיימת מודעות נמוכה של החקלאים ליתרונות הגלומים בקומפוסט וקיים פער בין הידע המדעי הקיים בתחום לבין רמות הביקוש לקומפוסט בפועל. כדי לחשב כמה דשן ניתן להחליף בטון קומפוסט נחשב ראשית את ריכוז יסודות ההזנה בקומפוסט בהשוואה לדשנים כימיים, זאת מבלי להתחשב בזמינות היסודות לצמח.

טבלה 16: חיסכון בגזי חממה כתוצאה מרכיב הייצור של החלפת דשנים כימיים

סה"כ	אשלגן	זרחן	חנקן	
-	3.0	1.5	6.5	קומפוסט אשפת ערים (ק"ג / טון קומפוסט)
-	1.2	0.6	2.6	קומפוסט אשפת ערים (ק"ג / טון פסולת אורגנית)
-	-0.38	-0.52	-5.29	חסכון בגזי חממה מהחלפת דשן כימי (ק"ג ש"ע פד"ח / ק"ג יסוד)
-14.4	-0.5	-0.3	-13.6	סה"כ חסכון בגזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת אורגנית)

* החישוב לטון קומפוסט בוצע לפי ריכוז חומרי ההזנה לטון חומר יבש כפול ריכוז החומר היבש בטון קומפוסט מעובד (50%). החישוב לטון פסולת אורגנית נעשה על בסיס טון קומפוסט * 40%.

5.4.6.3 צמצום פליטות חנקן תת חמצני הנגרמות מיישום דשנים כימיים.

כאשר דשן כימי מיושם בקרקע חלק מהחנקן עובר תהליכי ניטריפיקציה - דניטריטיפיקציה ומשתחרר כחנקן תת חמצני. ההערכה היא שבין 1% ל-3% משתחררים לאטמוספירה כחנקן תת חמצני (בממוצע 2%). אין מידע מדויק על הבדל בין קומפוסט לדשן כימי מבחינה זו אולם בקומפוסט השחרור של חנקן לקרקע איטי יותר ובכדי שישתחרר כחנקן תת חמצני עליו לעבור קודם מינרליזציה ולכן סביר שתהליך זה הרבה פחות משמעותי בקומפוסט בהשוואה לדשן כימי. כדי לתת ביטוי להבדלים בין קומפוסט לדשן כימי הנחנו שבקומפוסט רק 0.5% מהחנקן משתחרר כחנקן תת חמצני. הנחה זו היא אמנם שרירותית, אך היא עדיפה על מצב שבו אין התייחסות לנושא כלל. פירוט החישוב מופיע בטבלה 17.

טבלה 17: צמצום פליטות חנקן תת חמצני הנגרמות מהחלפת דשנים כימיים

החיסכון בפליטות גזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח/טון פסולת אורגנית)	חיסכון בפליטות חנקן תת חמצני (ק"ג חנקן תת חמצני/טון פסולת אורגנית)	קומפוסט המיוצר מטון פסולת אורגנית (ק"ג)	החיסכון בפליטות חנקן תת חמצני (ק"ג חנקן תת חמצני/ק"ג חנקן בקומפוסט)	החיסכון באחוז החנקן שמשחרר כחנקן תת חמצני בדשן כימי בהשוואה לקומפוסט	כמות החנקן בקומפוסט - חומר יבש (ק"ג)
-34.9	-0.113	37%	-0.3041	1.5%	12.9

בהנחה שטון קומפוסט יכול להחליף רק 30% מדשן כימי על בסיס חנקן צרוף בגלל שהוא משתחרר לאט יותר, החיסכון בגזי חממה כתוצאה מהחלפת דשנים כימיים ע"י קומפוסט הוא 10.5 ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת אורגנית.

5.4.7 סיכום פליטות גזי חממה מקומפוסטציה

בתהליך קומפוסטציה של פסולת אורגנית ביתית יש מעט פליטות גזי חממה, רובן פליטות הנובעות משימוש בדלקים מאובנים בתהליך ומקצתן פליטות חנקן תת חמצני במהלך התהליך. יישום הקומפוסט בקרקע מביא לחיסכון בפליטות בשלוש דרכים:

- קיבוע פחמן אטמוספרי בקרקע.
 - חיסכון בפליטות גזי חממה הנגרמים במהלך הייצור של דשן כימי.
 - חיסכון בפליטות חנקן תת חמצני הנפלט במהלך היישום של דשן כימי.
- בסיכום כולל שיטת הקומפוסטציה מביאה לחיסכון בפליטות גזי החממה כמפורט בטבלה 18.

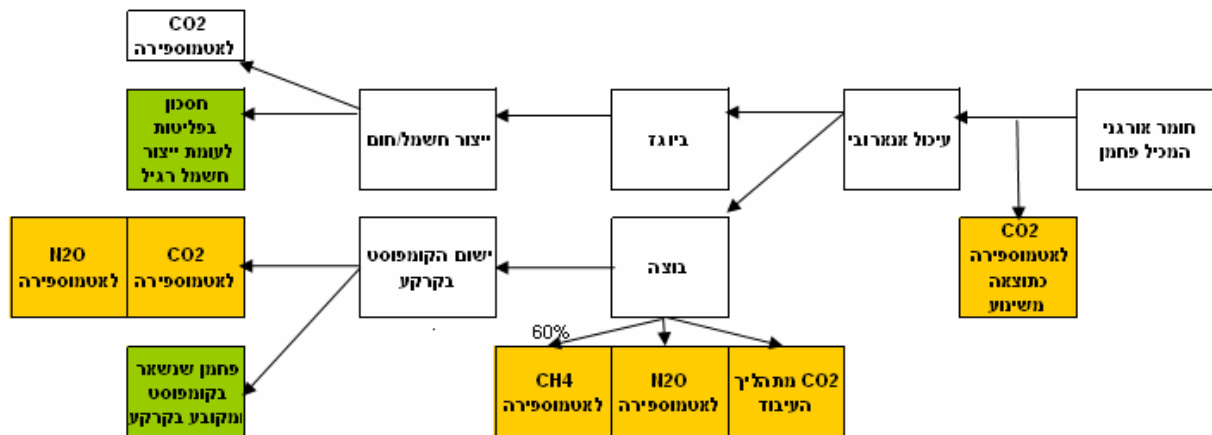
טבלה 18 : סיכום פליטות גזי חממה מקומפוסטציה

פליטות / חיסכון בפליטות (ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת אורגנית)				
שינוע ומיכון	פליטות חנקן תת חמצני	חיסכון מהחלפת דשנים כימיים	קיבוע פחמן	סה"כ
21	7	-25	-22	-19

5.5 עיכול אנאירובי

עיכול אנאירובי נעשה בתנאים סגורים ומבוקרים, כך שבתהליך עצמו מועטות הפליטות לאוויר. פליטות גזים קיימות בגנרטורים המייצרים חשמל ופולטים פד"ח. פד"ח זה מקורו בפסולת אורגנית כך שהוא נחשב פד"ח ביוגני. בנוסף ישנן פליטות של חנקן תת חמצני שנפלט במהלך הקומפוסטציה המתבצעת בהמשך לתהליך העיכול. ההנחות בעבודה זו הן שהפליטות במהלך הקומפוסטציה זהות לפליטות בקומפוסטציה רגילה כפי שתוארו בסעיף הקודם. על אף שהתוצר (הקומפוסט) נחשב לעיתים נחות מקומפוסט רגיל בגלל תכולת חומרי הזנה נמוכה יותר, בעבודה זו אנו מתייחסים אליו כקומפוסט רגיל שיכול להימכר ולהיות מיושם בחקלאות. מבחינת חיסכון מפליטות, ישנו חיסכון מייצור חשמל, תחליף לדשן וקיבוע פחמן. תזרים הפליטות מוצג באיור 5.

איור 5: תזרים פליטות גזי חממה מעיכול אנאירובי



5.5.1 שינוע

השינוע כולל הובלה מבית התושב ישירות למתקן הקומפוסט או דרך תחנת מעבר ושינוע של הקומפוסט לשטחים החקלאיים. בדומה למתקן הקומפוסטציה, סעיף זה גם כולל את עבודות המיכון הדרושות לתהליך אלא שבמתקן עיכול אנארובי רוב האנרגיה לתהליך מיוצרת מהביוגז ולא בדלקים מאובנים. בסיכום כולל הפליטות בשינוע זהות לפליטות בסעיף ההטמנה והן מהוות חלק קטן מסך הפליטות.

5.5.2 החלפת דלקים מאובנים

הביוגז שמיוצר בתהליך משמש ליצירת חשמל ע"י גנראטורים או ניתן לשימוש כגז טבעי לאחר ניקוי. כאשר הביוגז נשרף בגנראטורים נוצרים חשמל וחום. גם החשמל וגם החום יכולים להימכר או לשמש לצרכים פנימיים לחימום הריאקטורים או פסטור המוצקים. המחקר האירופאי מעריך שכ-1/3 מהגז משמש לצרכים פנימיים. בארץ האקלים חם יותר וחלק גדול מחודשי השנה אין צורך בחימום אינטנסיבי של הריאקטורים. מנתונים של מתקני עיכול הפועלים בארץ ובאירופה אנו מעריכים שרק כ- 20% מהגז משמש לצרכים פנימיים. יתר האנרגיה מיוצאת ומחליפה אנרגיה שמקורה בדלקים מאובנים. אנו הנחו שחום לא מיוצא אל מחוץ למתקן מכיוון שמדובר בכמויות קטנות יחסית ובארצנו החמה אין אפשרות להשתמש בחום להסקת בתים. החשמל נמכר לחברת החשמל ומחליף את תמהיל הדלקים הקיים. בנוסף, ניתן להזרים את הגז ישירות לשימושים תעשייתיים או לנקות אותו ולהשתמש בו כדלק לתחבורה. על אף ששימושים אלו בביוגז מיושמים כבר בעולם, הם מחייבים היערכות נוספת או תנאים ייחודיים כגון סמיכות למפעל תעשייתי ולכן הנחנו שהביוגז משמש ליצירת חשמל בלבד.

ניתן להפיק כ-100 מ"ק ביוגז מכל טון פסולת אורגנית, זו הערכה שמרנית מכיוון שקיימים מתקנים שמפיקים גם 150 מ"ק/טון ויותר. מכל מ"ק ניתן לייצר 10 קוט"ש ביעילות אנרגטית של כ-30%. בתנאים אלו ייצור החשמל חוסך 108 ק"ג ש"ע פד"ח כמפורט בטבלה 19.

טבלה 19: חיסכון באנרגיה ומשאבים כתוצאה מעיכול אנארובי

100 מ ³ טון פסולת	סה"כ ביוגז המיוצר במתקן
60%	אחוז המתאן בביוגז
30%	יעילות הפקת האנרגיה
20%	חשמל לצרכים פנימיים
10 קוט"ש/מ ³	ערך קלורי של מתאן
144	סה"כ חשמל ליצוא (קוט"ש / טון פסולת)
0.75	תמהיל דלקים (ק"ג פד"ח / קוט"ש)
108	חסכון בגזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח/טון פסולת)
36	חיסכון במשאבים משימוש בקומפוסט (ק"ג ש"ע פד"ח)
144	סה"כ חיסכון באנרגיה ומשאבים (ק"ג ש"ע פד"ח)

5.5.3 קיבוע פחמן וחיסכון בשימוש בדשנים כימיים

זהה לחלופת הקומפוסטציה.

5.5.4 סיכום פליטות גזי חממה מעיכול אנארובי

למתקני עיכול אנארובי ישנם שני יתרונות גדולים מבחינת גזי חממה:

1. התהליך כולו מתבצע במיכלים סגורים וכמעט אין פליטות לאטמוספירה.
2. החזרת משאבים מרבית ע"י ניצול מירבי: הביוגז לאנרגיה והמוצקים לדישון וקיבוע פחמן.

שני יתרונות אלו מאפשרים חיסכון ניכר בגזי חממה.

טבלה 20: סיכום פליטות גזי חממה מעיכול אנארובי

פליטות / חיסכון בפליטות (ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת אורגנית)				
שינוע ומיכון	חיסכון מייצור חשמל	חיסכון מייצור דשן	קיבוע פחמן	סה"כ
8	-108	-36	-22	-158

5.6 מיחזור רכיבים יבשים

הרכיבים היבשים הסחירים יכולים להחליף חומרי גלם קיימים ובכך לחסוך פליטות גזי חממה הנובעים משיטות הייצור במצב הקיים. לא כל הרכיבים היבשים אכן ניתנים למחזור ומתוך הרכיבים הניתנים למיחזור לא כולם אכן סחירים. כלומר לא תמיד ישנו שוק שיקלוט אותם ולעיתים גם המיחזור עצמו אינו כדאי מבחינה כלכלית. לדוגמא, קלקר הוא חומר שקשה למיחזור, לעומתו גביע יוגורט ניתן למיחזור אך בגלל משקלו הקטן יחסית ושאריות המזון שהוא מכיל, מיחזורו אינו כדאי.

המיחזור כולל בד"כ שלושה שלבים:

1. איסוף
2. מיון שניוני
3. עיבוד מחדש ליצירת חומר גלם

אנחנו מתייחסים כאן לשלושה סוגי מיחזור הנבדלים זה מזה בשיטות האיסוף והמיון:

- **הפרדה במקור במוקדי מיחזור** - הכוונה היא לחומרים שהופרדו במקור ע"י הצרכנים ונאספו במוקדי מיחזור עירוניים כולל איסוף נייר בפחים ייעודיים מבניינים רבי קומות. בשיטה זו רוב החומר שנאסף הוא נייר וקרטון ובאחוזים נמוכים פלסטיק, פח וזכוכית. במרבית הרשויות אחוזי המיחזור בשיטה זו אינם עולים על 7% מכלל הפסולת הביתית. רוב הרכיבים שנאספים הם רכיבים סחירים ובני מיחזור.
- **הפרדה במקור לשני זרמים** – כל הרכיבים היבשים שבפסולת לאחר שהופרדו במקור מהפסולת האורגנית הרקבובית והושלכו לפח ייעודי (פח יבש). מקטע זה כולל רכיבים סחירים ושאינם סחירים כגון אריזות פלסטיק, נייר לסוגיו, קרטון, עץ, מתכות וזכוכית. מכיוון שהנחנו שהדגש הוא על ניקיון הזרם הרטוב, למקטע היבש יגיעו גם חיתולים ואחוז

מסוים של פסולת אורגנית רקבובית. אחוז המקטע היבש הוא גבוה יחסית ויכול להגיע ל-50%. מקטע זה מועבר לתחנת מעבר למיון שניוני שבה ממיינים ומפרידים את הרכיבים הסחירים משאר הפסולת באמצעים ידניים ומכאניים. שיעור ההפרדה מוערך ב-50%, כלומר כ-25% מכלל הפסולת הינם רכיבים סחירים.

- **הפרדה מכנית בתחנות מעבר** - פסולת מעורבת שממוינת בתחנת מעבר. כאן מדובר בכל רכיבי הפסולת שעוברים מיון מכני וידני בתחנת מעבר. מכיוון שהרכיבים היבשים מעורבבים בפסולת אורגנית רקבובית, חלקם מאבד את יכולתו לעבור מיחזור. לדוגמא, קרטון או נייר שעורבבו בפסולת אורגנית מתחילים להתפורר והם אינם מתאימים לשינוע והעברה למפעל מחזור. גם פלסטיק מלוכלך בשאריות מזון עשוי לגרום לבעיות בקו המחזור. הפרדה מכנית בתחנות מעבר קיימת רק בתחנות מעבר בודדות בארץ וגם הן מפעילות את קו המיון בהתאם לשינויים במחירי חומרי הגלם.

5.6.1 תחנת מעבר למיון שניוני

תחנת מעבר למיון שניוני מיועדת לקלוט פסולת ביתית שהופרדה במקור. חשוב לציין שקו המיון בתחנת מעבר למיון שניוני אמנם דומה לקו המיון הקיים בחלק מהתחנות כיום אולם הוא משוכלל יותר ויכול להוציא אחוז גבוה יותר מהרכיבים הסחירים למחזור. קוי המיון הקיימים כיום בארץ מיועדים לפסולת מעורבת והם בד"כ כוללים: נפה סובבת (טרומל) לקריעת שקיות וסינון פסולת אורגנית וחלקיקים בקוטר קטן מ-6 ס"מ, מסוע למיון ידני של הרכיבים הסחירים ומכונות לדחסה ואריזה של החומרים לקראת שינוע. בקו מיון שניוני מתקדם המיועד לפסולת יבשה בלבד ישנו ציוד כגון מכשירים להפרדה אופטית של סוגי פלסטיק שונים, מגנט להפרדת מתכות ובחלק מהמתקנים משתמשים גם בשיקוע במים או בשאיבת אוויר בואקום לצורך הפרדה של מרכיבים בעלי משקל סגולי שונה.

5.6.2 שינוע ומיכון

מסלול השינוע של הרכיבים הסחירים כולל העברה מבית התושב למוקדי המיחזור או למוקדי איסוף של תאגיד המיחזור ומשם למפעלי המיחזור. לחילופין המסלול יכול לעבור מבית התושב לתחנת מעבר ממיינת ומשם למפעלי המיחזור. השינוע מבית התושב למוקדי המיחזור לא נכלל החישוב מכיוון שבמקרים רבים התושב מביא את החומרים בהליכה ברגל או בדרכו ליעד אחר ובכל מקרה אין מדובר בפליטות משמעותיות. תהליך המיון, דחיסה ואריזה של החומרים צורך בממוצע 25 קוט"ש / טון.

5.6.3 חיסכון באנרגיה משימוש בחומרים ממוחזרים

המידע על פליטות גזי חממה מתהליכי ייצור של רכיבים שונים מסתמך על מספר מקורות ובראשם מחקר מרכזי של הסוכנות האמריקאית להגנת הסביבה¹⁰, - חסר מראה מקום - מאגר המידע BUWAL וכן מחקרים נוספים המתייחסים לרכיבים השונים. בעבודה זו על מנת לפשט ולקצר לא נביא את כל ההסבר הכולל את הנתונים ואופן החישוב. במקום זאת, נציג את התוצאה הסופית, נפנה אל מקור הנתונים ונסביר מהם השלבים המהותיים לחיסכון בפליטות.

5.6.4 נייר

הנייר הנאסף ממוקדי מיחזור מתחלק לשני סוגים: נייר עיתון ונייר מדפסות לבן. שיעורי האיסוף למיחזור גבוהים יחסית והם עולים ככל שהשירות נגיש יותר לתושב. ניתן למחזר נייר לרמות איכות שונות ואיכות הנייר הממוחזר תלויה באופן ישיר באיכות חומר הגלם. התהליך כולל מספר שלבים ובהם הסרת הדיו (de-inking), סינון וניקוי.

5.6.5 זכוכית

כל הזכוכית בישראל נאספת במסגרת חוק הפיקדון ע"י תאגיד המיחזור והיא כוללת מיכלי משקה עד 1.5 ליטר בצבעים שונים. קיימות גם מספר יוזמות מקומיות לאיסוף זכוכית אך הן אינן משמעותיות. הזכוכית נאספת ממרכזי האיסוף ולאחר שבירתה היא נכנסת כחומר גלם נוסף לתהליך ייצור הזכוכית. הזכוכית השבורה מוזנת לכבשני הזכוכית ומייעלת את תהליך ההמסה כך שנדרשת פחות אנרגיה להפעלת התנור. קיימים שימושים נוספים למיכלי הזכוכית ובהם שימוש כחומר גלם לבניית לבנים ומוצרים נוספים. שימוש אחר הוא השימוש החוזר, כלומר שטיפת הבקבוקים והכשרתם לשימוש נוסף. אנו מתייחסים למחזור זכוכית "רגיל" שבו הזכוכית משמשת לייצור זכוכית כחומר גלם.

5.6.6 אלומיניום ומתכות ברזליות

אלומיניום משמש לייצור פחיות, רדידי אלומיניום לשימוש ביתי ובוא גם נמצא במכשירי חשמל שונים. המיחזור של אלומיניום כדאי מאד מבחינה כלכלית אולם האיסוף מורכב ויקר. ניתן גם להפריד אלומיניום ע"י שימוש בזרם חשמל. פחיות ימוחזרו בד"כ לחומר גלם ליצירת פחיות חדשות ואילו רדידי האלומיניום יעברו לשימוש כחומר גלם לתעשיית הרכב. תעשיית הברזל מסתמכת במידה רבה על חומר ממוחזר אולם משקי הבית אינם מהווים גורם משמעותי בשוק הברזל משום שברזל בד"כ אינו מצוי בפסולת הביתית. הנתונים על גזי החממה בתהליך נלקחו ממאגר הנתונים BUWAL. כריית אלומיניום כרוכה בצריכת דלקים מאובנים גבוהה בתוספת גזי חממה נוספים המשמשים בתהליך לכן כל טון שממוחזר מביא לחיסכון גדול מאד בגזי חממה (כ- 10,000 ק"ג ש"ע פד"ח).

5.6.7 טקסטיל

מיחזור טקסטיל תורם להפחתת שימוש בגז ובדלקים מאובנים ומצמצם את הצורך בניקוי חומר הגלם והכנתו. למרות שנדרשת גם הכנה של הטקסטיל שנאסף ליצירת חומר גלם חדש, בסך הכול החיסכון עולה על התשומות.

5.6.8 פלסטיק

פסולת הפלסטיק הנאספת כיום מורכבת ברובה ממיכלי משקה הכלולים בחוק הפיקדון. קיימות גם יוזמות מקומיות שונות אך הן אינן משמעותיות לתמונה הכללית. בתחנות מעבר בד"כ ממינינים בקבוקים למשלוח למפעלי המיחזור. הבעיה המרכזית עם פלסטיק היא האיסוף. בגלל המשקל הסגולי הנמוך של מוצרי הפלסטיק, רכבי הפינוי "אוספים הרבה אוויר" כך שיעילות האיסוף נמוכה והעלויות גבוהות. סוגי הפלסטיק הניתנים למיחזור כוללים בין השאר: PE, PET,

HDPE, LDPE, PP, PS, PVC, PA ואחרים. עם זאת, בארץ נאסף למיחזור ממשקי הבית בעיקר PET שהוא החומר המרכזי לייצור מיכלי משקה ו - HDPE המשמש ביצור מיכלי ואריזות שונות.

באירופה קיימים אמצעים אופטיים למיון סוגי פלסטיק שונים ומפעלים שיקלטו אותם. בעתיד, עם כניסתו של חוק האריזות והפרדת פסולת לשני זרמים ברשויות, ניתן להניח שגם תחנות המעבר ומפעלי המיחזור בארץ ייערכו בהתאם. לאחר המיון ניתן לדחוס את הפלסטיק ולהגיע ליחס של 300 ק"ג / מ"ק ובכך ליעל את השינוע למפעל המיחזור.

מיחזור הפלסטיק יכול להיעשות פשוט ע"י ניקוי החומר, גריסתו ושיווקו כחומר גלם המתאים לשימוש ולייצור מוצרים בטכניקות של ניפוח, אקסטרוזיה וכו'. לחילופין ניתן להתיך את הפלסטיק ולייצר ממנו תוצר גרגרי לשימוש כחומר גלם ממוחזר. בתהליך זה מבצעים למעשה דה-פולימריזציה של החומר שבה שרשרות הפולימרים מפורקות ולאחר מכן מחוברות מחדש ליצירת מבנים כימיים חדשים. בד"כ פלסטיק ממוחזר עובר סוג מסוים של הנחתה, כלומר שימוש כחומר גלם נחות לעומת השימוש המקורי.

הנתונים לגבי גזי החממה מייצור פלסטיק ממוחזר נלקחו ממאגר הנתונים BUWAL שמסתמך על נתוני ה-AMPE (Association of Plastics Manufacturers in Europe).

5.6.9 סיכום החיסכון בפליטות גזי חממה כתוצאה ממיחזור רכיבים יבשים שונים

החישוב של החיסכון נגזר מההפרש בין פליטות גזי חממה מייצור החומר מחומרי גלם רגילים ופליטות מייצור החומר מחומרים ממוחזרים. הנתונים מופיעים בטבלה 21.

טבלה 21: החיסכון בפליטות גזי חממה כתוצאה ממיחזור רכיבים יבשים שונים

נייר וקרטון	פלסטיק- PET	זכוכית	מתכות ברזל	אלומיניום	טקסטיל	
0	0	0	0	0	0	N2O
24	24	24	24	24	24	CO2 מצריכת אנרגיה
10	15	10	10	10	10	CO2 משינוע
-634	-1800	-287	-1521	-9108	-3203	חיסכון בגזי חממה (ק"ג ש"ע פד"ח / טון ממוחזר)
-600	-1761	-253	-1487	-9074	-3169	סה"כ

פרק 6 תרחישי טיפול בפסולת

עד כה בחנו את גזי החממה הנפלטים משיטות הטיפול השונות בפסולת. לכל אחת מהשיטות יתרונות וחסרונות וחלקן מיועדות לטפל רק במקטעים מסוימים מתוך הפסולת. הצגה זו אינה משקפת את תמונת המציאות שבה מקטעים שונים של הפסולת יטופלו בשיטות שונות ולכן מצריך לבחון הוא תמהיל השיטות בהתבסס על שיטת טיפול אחת מרכזית. יש לזכור

גם שהפעלת שיטת טיפול מסוימת עשויה להשפיע על אחוזי הפסולת שיגיעו לחלופות טיפול אחרות ועל איכותם. כך לדוגמא, הפרדת הפסולת לשני זרמים וקומפוסטציה של הזרם הרטוב, מותירה יותר מרכיבים יבשים המיועדים למיחזור ובאיכות גבוהה יותר. לעומת זאת, חלופת הדש"ב מתחרה במידה מסוימת עם חלופת המיחזור על אותם מרכיבים (נייר, קרטון ופלסטיק). על מנת לבחון את השיטות השונות באופן קרוב ביותר למציאות בנינו תרחישים שימחישו את תמונת המצב הכוללת. בכל אחד מהתרחישים ישנה שיטת טיפול אחת מרכזית, כאשר ברירת המחדל היא הטמנה (בדומה למצב כיום) וחלק מסוים מתוך הפסולת מיועד למיחזור. החלק שמיועד למיחזור מורכב מרכיבים סחירים הנאספים כבר כיום במוקדי מיחזור (מיכלי פיקדון, נייר וקרטון) בתוספת של חומר הממוין בתחנות מעבר. הערכנו ששיעור האיסוף של מרכיבים אלו לא יעלה באופן משמעותי בעתיד הקרוב.

חשוב לציין שהתייחסנו לפסולת הביתית והמסחרית בלבד (להלן "פסולת ביתית") ולא כללנו פסולת תעשייתית, גם או פסולת בניין. החלוקה בין המקטעים מבוססת על סקר הפסולת הארצי⁶. יש לציין שבסקר אחוז החומר האורגני (40%) הינו נמוך יחסית למצב האמיתי משום ששאריות חומר אורגני מתערבבות ונדבקות גם לרכיבים היבשים. לפי הערכות עורכי הסקר, אחוז החומר האורגני הרקבובי מגיע לכ-48%. בעבודה זו התייחסנו לנתונים הרשמיים כפי שהם מופיעים בסקר וגם לא התחשבנו בשינויים עתידיים הצפויים במשק הפסולת. שינויים אלו כרוכים במידה רבה של אי ודאות ולכן הם מחוץ למסגרת עבודה זו. עם זאת, במידת הצורך ניתן יהיה לערוך התאמות וניתוחי רגישות בהסתמך על נתוני הבסיס. הרכב הפסולת הביתית בישראל 2005 מופיע בתרשים מס' 1. החלוקה הפנימית בכל אחד מהתרחישים מוצגת בטבלה 22.

טבלה 22: תרחישי הטיפול בפסולת הביתית

5	4	3	2	1	
דש"ב	שריפה	קומפוסטציה	עיכול אנאורבי	הטמנה	
4%	64%	-	-	-	שריפה של חומר אורגני כולל נייר, קרטון וטקסטיל
10%	30%	-	-	-	שריפה של חומר אנאורגני
19%	-	-	-	-	שריפת נייר קרטון וטקסטיל
-	-	35%	35%	-	טיפול ביולוגי בחומר האורגני הרקבובי
38%	-	5%	5%	40%	הטמנת חומר אורגני ללא נייר וקרטון
-	-	-	-	20%	הטמנת נייר וקרטון
23%	-	41%	41%	34%	הטמנת חומר אנאורגני
6%	6%	19%	19%	6%	מיחזור
100%	100%	100%	100%	100%	סה"כ

6.1 תרחיש 1: הטמנה כטיפול מרכזי

תרחיש זה ממחיש למעשה את המצב הקיים שבו רוב הפסולת הביתית (94%) מועברת להטמנה ואילו 6% בלבד נאספים למחזור במוקדי מיחזור. כ-5% (מכלל הפסולת) מתוך החומר הממוחזר הם נייר וקרטון. ההטמנה עצמה מחולקת למקטעים: אורגני רקבובי, נייר וקרטון ואנאורגני. כל מקטע מתנהג באופן שונה במטמנה כפי שכבר הוסבר בפרק הקודם ובהתאם פליטות גזי החממה.

6.2 תרחיש 2: עיכול אנאורגני כטיפול מרכזי

בתרחיש זה רוב הפסולת האורגנית הרקבובית (35% מכלל הפסולת) מועברת לעיכול אנאורגני. כ-5% מהפסולת האורגנית הרקבובית עוברים להטמנה, בהנחה ששיעור הפרדת הפסולת האורגנית הוא כ-88%. בנוסף ישנה הרחבה של מיחזור הרכיבים היבשים כתוצאה מטיפול במקטע היבש בתחנת מעבר למיין שניוני. הרחבת המיחזור של הרכיבים היבשים מביאה את סך המחזור של רכיבים אלו ל-19% והיא מוצגת בטבלה 23 שאר הפסולת עוברת להטמנה.

טבלה 23: אחוזי המיחזור של הרכיבים בני המיחזור בתרחיש הפרדת הפסולת לשני זרמים

סה"כ	נייר וקרטון	פלסטיק-PET	זכוכית	מתכות ברזל	אלומיניום	טקסטיל	סה"כ
אחוז בפסולת	25%	13%	3%	2.8%	0.2%	4%	48%
אחוז ממוחזר	50%	15%	50%	50%	50%	30%	
אחוז משוכלל	13%	2%	2%	1%	0%	1%	18.8%

6.3 תרחיש 3: קומפוסטציה כטיפול מרכזי

בתרחיש זה רוב הפסולת האורגנית הרקבובית (35%) מופרדת במקור ומטופלת במתקן קומפוסטציה. גם כאן אנו מניחים שהפרדת הזרם הרטוב לא תהיה מלאה ולכן כ-5% מהפסולת האורגנית יגיעו לפח היבש וימצאו את דרכם למטמנה. אחוזי מיחזור הרכיבים היבשים זהים לתרחיש 2.

6.4 תרחיש 4: שריפה כטיפול מרכזי

בתרחיש זה רוב הפסולת (94%) מועברת לשריפה ללא מיון כאשר המיחזור ממשיך במתכונת של מצב קיים. הפסולת שמועברת לשריפה מחולקת למקטעים (אורגני ואנאורגני) שגם בהם ישנה חלוקה פנימית לרכיבי פסולת שונים. לגבי כל רכיב פסולת ישנן פליטות שונות של גזי חממה כמפורט בסעיף הקודם.

6.5 תרחיש 5: דש"ב כטיפול מרכזי

בתרחיש זה הפסולת ממוינת וכ-33% מועברים לשריפה בכבשני מלט. מתוכם כ-4% פסולת מעורבת, 10% פלסטיק ו-19% הנותרים הם נייר, קרטון וטקסטיל. רוב הפסולת האורגנית הרקבובית (38%) וכ-23% מהפסולת האנאורגנית עוברים להטמנה. הפסולת האנאורגנית שעוברת להטמנה מורכבת משאריות חומר יבש שעברו את תהליך המיון ולא הופנו לשריפה ומפסולת מעורבת שאינה מתאימה לשריפה. המיחזור נשאר במתכונת של מצב קיים.

6.6 תרחיש משולב דש"ב וקומפוסטציה/עיכול אנארוני.

לכאורה מתבקש תרחיש משולב שבו הפסולת מופרדת במקור, הזרם הרטוב מועבר לטיפול ביולוגי ואילו הרכיבים היבשים עוברים לדש"ב. תרחיש כזה אפשרי אך אנו הנחנו שהוא בסבירות נמוכה. ראשית משום שלאחר הפרדת הרכיבים הסחירים במקור עולה כדאיות המיחזור שלהם ולכן סביר יותר שהם יופנו למיחזור. שנית, דש"ב הוא פתרון הדורש התאמה ייחודית של סוג הפסולת למתקן הקצה. בארץ קיים כיום רק מפעל אחד גדול למלט שיכול לקלוט כמויות משמעותיות של פסולת יבשה כדלק. מכאן שהזמינות של חלופה זו נמוכה ביחס לחלופות האחרות. לבסוף, מכיוון שדש"ב למעשה מתחרה עם חלופת המיחזור על אותם חומרים (נייר, קרטון ופלסטיק), אנו נותנים עדיפות לחלופה העדיפה סביבתית מבחינת מדרג הטיפול בפסולת (צמצום במקור-שימוש חוזר- מיחזור- השבת אנרגיה- הטמנה).

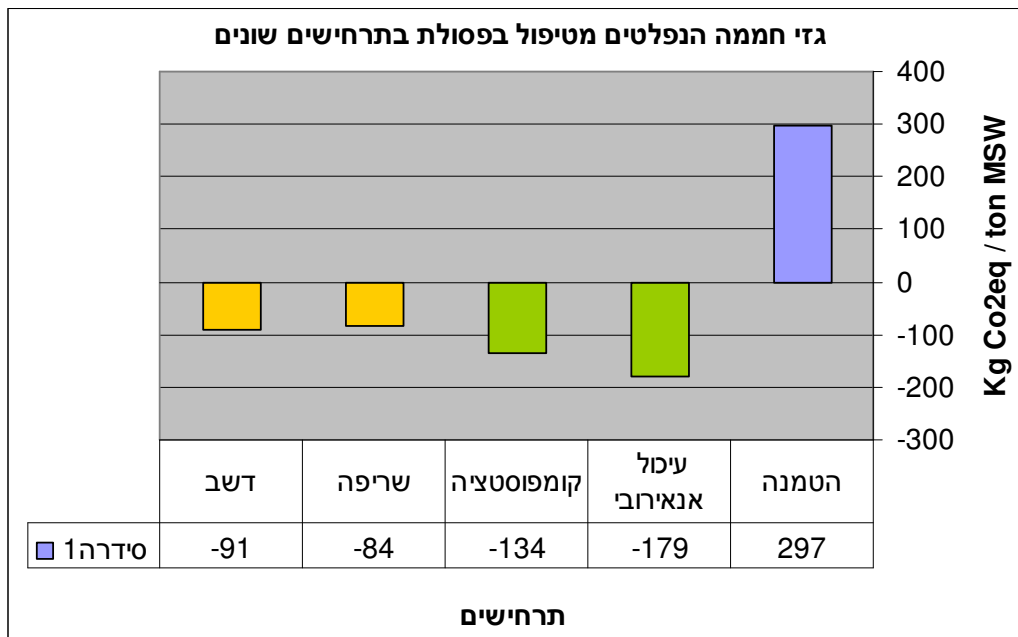
פרק 7 תוצאות – סיכום מאזן גזי החממה בתרחישים השונים

ניתוח הנתונים מסכם את כל גזי החממה הנפלטים מתמהיל שיטות הטיפול בכל אחד מהתרחישים. הפליטות מכל שיטת טיפול מפורטים בפרק 5 ואילו התרחישים מפורטים בפרק 6. לגבי כל תרחיש חולקה הפסולת לרכיבים השונים שיגיעו אליה לפי אחוזים כמפורט בפרק 6. כל רכיב בפסולת מטופל בשיטה המתאימה לו לפי התרחיש ובהתאם מתקבל מאזן גזי החממה. כך למשל, בתרחיש מס' 2 חלק מהפסולת האורגנית הרקבובית מועבר לעיכול אנארובי והתוצאה מאזן פליטות מסוים ואילו שאר הפסולת האורגנית הרקבובית מוטמנת והפליטות הן אחרות.

למעט תרחיש 1 (המצב הקיים) כל התרחישים מובילים לחיסכון בפליטות גזי חממה. הסיבות המרכזיות לכך הן צמצום ההטמנה ופליטות המתאן הנובעות ממנה והשבת אנרגיה ומשאבים שמחליפים אנרגיה ומשאבים קיימים.

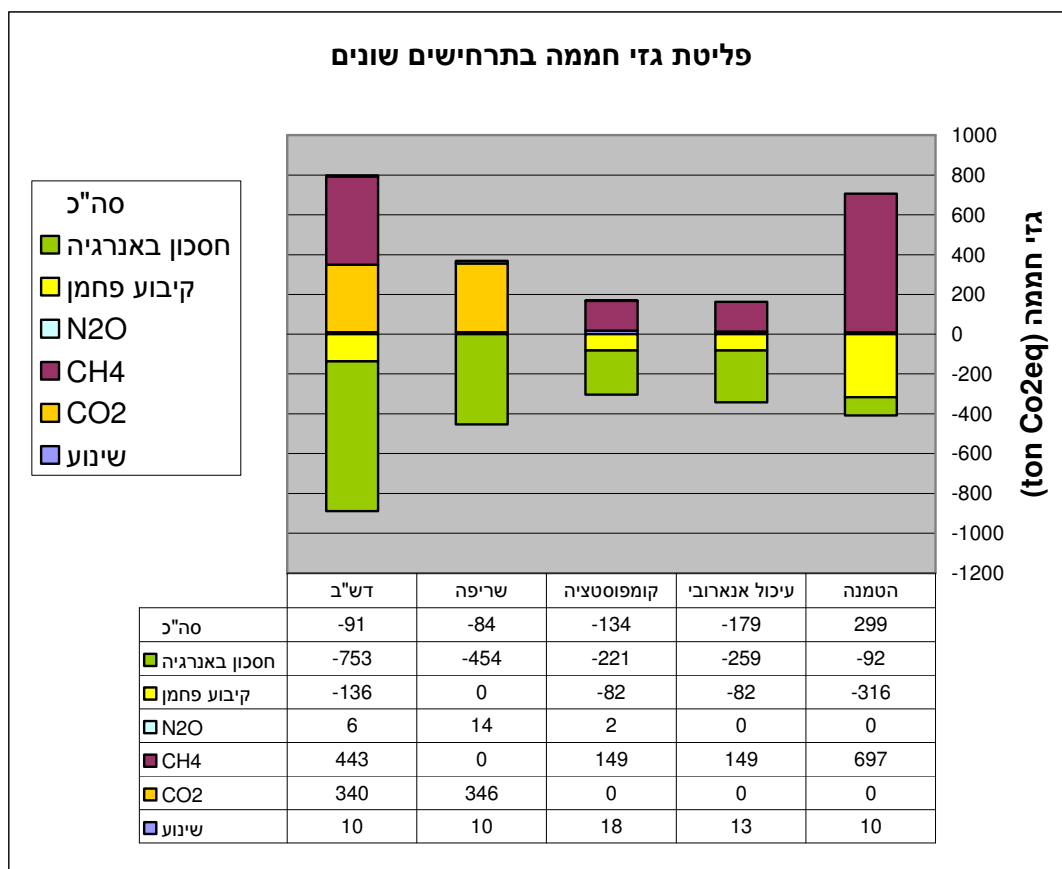
הממצאים מציבים את תרחיש מס' 2 ושיטת העיכול אנארובי כתרחיש עם מאזן גזי החממה הנמוך ביותר שיוביל לחיסכון של 179 ק"ג ש"ע פד"ח. אחריו תרחיש מס' 3 – קומפוסטציה עם 134 ק"ג ש"ע פד"ח, תרחיש 5- דש"ב עם 91 ק"ג ש"ע פד"ח ותרחיש 4 - שריפה עם 84 ק"ג ש"ע פד"ח.

איור 6: פליטת גזי חממה על פי תרחישי הטיפול



על מנת להבין את התמונה גם "לרוחב", כלומר כיצד הפליטות מתחלקות בתוך כל אחד מהתרחישים ערכנו ניתוח של סוגי הפליטות ומקורותיהם בכל אחד מהתרחישים במפורט באיור להלן.

איור 7: התפלגות פליטת גזי חממה על פי תרחישי הטיפול



7.1 שינוע

במבט כולל ניתן להבחין שפליטות גזי החממה משינוע ומיכון הן שוליות ביחס לכלל הפליטות עד כי קשה להבחין בהן בתרשים.

7.2 פד"ח מאובני

פליטות פד"ח קיימות אמנם בכל התרחישים אולם אנו מעוניינים בפד"ח ממקור מאובני. פד"ח מאובני נפלט רק בתרחישי השריפה והדש"ב כתוצאה משריפת פלסטיק.

7.3 מתאן

מתאן נפלט מהטמנה של חומר אורגני ולכן ניתן למצוא אותו בהתאם לכמויות המוטמנות וסוג הפסולת המוטמנת (נייר, קרטון או אורגני רקבובי). בתרחיש השריפה אין בכלל הטמנה ולכן אין פליטות מתאן, במצב הקיים רוב הפסולת עוברת להטמנה ולכן מתאן הוא גז החממה המרכזי בתרחיש זה. בתרחישי הטיפול הביולוגי רק חלק מהפסולת האורגנית (נייר, קרטון ו-5% מהאורגני הרקבובי) מגיעים להטמנה ואילו בתרחיש הדש"ב רוב החומר האורגני הרקבובי מגיע להטמנה ופולט מתאן.

7.4 חנקן תת חמצני

חנקן תת חמצני נפלט בכמויות קטנות בתרחישי הקומפוסטציה והעיכול האנארובי, כתוצאה מתהליכי פירוק וניטריפיקציה- דה ניטריפיקציה של חנקן אורגני. גם בשריפה נפלטות כמויות קטנות של חנקן.

7.5 קיבוע פחמן

קיבוע פחמן מוביל לחיסכון בגזי חממה והוא תוצאה של הטמנת חומרים אורגניים קשי פירוק כגון נייר, קרטון ועץ או של יישום חומר אורגני מעובד (קומפוסט) בקרקע, שבו אחוז מסוים מהחומר אינו מתפרק ונשאר מקובע בקרקע. דווקא בתרחיש ההטמנה מתקבע הרבה פחמן בקרקע. הסיבה לכך היא הטמנת נייר, קרטון ועץ שאינם מתפרקים בקלות בתנאים אנארוביים. הקיבוע בתרחישי הטיפול הביולוגי נובעים מיישום קומפוסט ואילו בתרחיש הדש"ב הקיבוע נובע מהטמנת חומר אורגני. חשוב לציין שמקובל לבחון גזי חממה לטווח של 100 שנה (זמן החיים האטמוספרי של פד"ח הוא כ-100 שנה) ולכן גם קיבוע הפחמן צריך להיבחן באותו טווח זמן. הגדרה זו יוצרת עיוות מסוים משום שבטווח זמן של מאות שנים חומרים כגון נייר וקרטון עשויים להתפרק ואילו החומרים ההומים (הומוס) שבקומפוסט הרבה יותר יציבים וצפויים להישאר מקובעים זמן ארוך יותר, כך שלמעשה בהטמנה הפחמן ייפלט בסופו של דבר לאטמוספירה (כמתאן או פד"ח) ואילו ביישום קומפוסט הקיבוע הוא לטווח הרבה יותר ארוך. מכיוון שאין אפשרות לכמת פער זה בהשוואה בין התרחישים ולא רצינו להתרחק מההגדרות המקובלות של ה-IPCC, אנו נשארים עם הממצאים שמוצגים תוך הבנה שייתכן וישנה הערכת יתר בקיבוע פחמן בהטמנה.

7.6 חיסכון באנרגיה ומשאבים

חיסכון נוסף בגזי חממה ייתכן כאשר מחליפים מקורות אנרגיה קיימים (בהנחה שהם ימשיכו להתבסס על דלקים מאובנים) או כאשר מייעלים תהליכי ייצור ומשתמשים בחומרים ממוחזרים. בתרחיש הדש"ב שבו שורפים ומפיקים אנרגיה מהרכיבים עם הערך הקלורי הגבוה ביותר מושג החיסכון הגדול ביותר באנרגיה. יעילות השריפה גבוהה יותר מאשר בתרחיש השריפה שגם בו ישנו חיסכון לא קטן באנרגיה. בתרחישי הטיפול הביולוגי החיסכון מושג מהחלפת דשנים כימיים ומהרחבת שיעורי המיחזור כאשר בתרחיש העיכול האנארובי ישנה גם השבת אנרגיה כתוצאה משימוש בביוגז. בתרחיש ההטמנה רוב החיסכון באנרגיה מקורו באיסוף גז המטמנות וחלק קטן מיוחס למיחזור במוקדי מיחזור.

פרק 8 סיכום ומסקנות

מאזן גזי החממה הוא אחד השיקולים בבחירת דרך ניהול הפסולת. לצידו ניתן למנות שיקולים כבדי משקל לא פחות כגון תפיסת שטחים פתוחים, פגיעה נופית, מטרדי ריח, זיהום אוויר, קרקע ומים, שינוי המרקם הביולוגי, דלדול משאבים ועוד. זאת, מבלי לכלול שיקולים שאינם סביבתיים כגון שיקולים כלכליים, חברתיים או מדיניים. בהתייחס לשיקולים סביבתיים, הצגת תמונת גזי החממה מייצגת במידה מסוימת, מוגבלת אמנם, גם שיקולים סביבתיים מעבר להתחממות העולמית. כך למשל, דלדול משאבים מקרום כדה"א ובכללו שימוש בדלקים מאובנים מיוצג ע"י פליטות הפד"ח משימוש בדלקים והחיסכון בשימוש בדלקים אלו בשיטות השונות. למרות הדגש

שניתן בעבודה זו לגזי חממה, היא מכילה גם מידע רב ובעל ערך על מרכיבי הפסולת השונים. העבודה צוללת ומעמיקה להרכב הכימי של רכיבי הפסולת השונים על מנת להבין כמה אנרגיה ניתן להפיק מהם, כמה פחמן נותר בקרקע וכמה צפוי להשתחרר לאוויר, לאילו רמות מיון והפרדה ניתן להגיע ועוד. בבואנו לבחור חלופות לטיפול בפסולת יש להתחשב במכלול השיקולים הסביבתיים וגם בשיקולים אחרים. נתונים אלו יהיו לעזר בבחינת מגוון השיקולים לבחירת חלופת טיפול נכונה.

הטמנה היא הפתרון הגרוע ביותר מבחינת גזי חממה. במצב הקיים נפלטים כ- 1.18 מיליון טון ש"ע פד"ח כתוצאה מהטמנת פסולת ביתית. ביחס לכל שאר התרחישים תרחיש ההטמנה הוא היחיד שבו מאזן פליטות חיובי והסיבה המרכזית לכך היא פליטות המתאן. חשוב לציין שגם אם נשפר את שיטות ההטמנה ונאסוף גז מכל המטמנות בארץ עדיין מאזן הפליטות יהיה חיובי וגבוה מאשר בשאר התרחישים.

התרחישים המובילים מבחינת מאזן גזי החממה (כלומר עם המאזן הנמוך ביותר) הם תרחישים שבהם הפסולת מופרדת במקור. בתרחישים אלו הפסולת האורגנית מטופלת בטיפול ביולוגי, כך שבמקום שיפלט ממנה מתאן, היא משמשת לייצור קומפוסט, השבת אנרגיה והחלפת דשנים כימיים. בנוסף, ניתן למחזר חלק גדול יותר מהרכיבים היבשים, תוך חיסכון באנרגיה ובגזי חממה. בתרחישים אלו החומר שמועבר להטמנה הוא ברובו חומר אינרטי שאינו פולט מתאן. ישנו יתרון גדול לעיכול אנארובי לעומת קומפוסטציה משום שבעיכול ניתן גם להשיב אנרגיה ובנוסף התהליך מבוצע בתנאים מבוקרים ללא דליפות לאטמוספירה.

תרחיש השריפה מביא גם הוא חיסכון ניכר בגזי חממה. רוב החיסכון מקורו בהחלפת מקורות אנרגיה קיימים. מבחינת גזי חממה הכדאיות של תרחיש זה צפויה לקטון בעתיד כאשר ייכנסו לשימוש יותר אנרגיות מתחדשות (סולרי ורוח). טענה זו נכונה גם לגבי דש"ב שהוא תרחיש שתורם גם כן לחיסכון בגזי חממה אולם ספק אם ניתן ליישמו בקנה מידה ארצי.

ניתן להסיק מכך מספר מסקנות חשובות:

- הטמנה ובפרט הטמנת חומר אורגני רקבובי, היא חלופה גרועה ביותר מבחינת גזי חממה ויש להשתמש בה כברירת מחדל בלבד.
- הפרדת פסולת לשני זרמים טומנת בחובה פוטנציאל גדול להפחתת גזי חממה.
- טיפול ביולוגי בחומר האורגני הרקבובי הוא החלופה הטובה ביותר לטיפול במקטע זה של הפסולת.
- מיחזור רכיבים יבשים חוסך באופן משמעותי בגזי חממה גם כאשר נדרש שינוע נוסף.
- שריפה ודש"ב יכולים להביא לחיסכון בגזי חממה בתמהיל הדלקים הנוכחי.
- בעתיד כאשר ייפלטו פחות גזי חממה מייצור חשמל, הכדאיות של שריפה ודש"ב ירדו באופן משמעותי.
- ניתן להפחית באופן משמעותי מאד את גזי החממה הנפלטים מטיפול בפסולת.

המסקנה האחרונה היא החשובה מכולן, שאר המסקנות מסבירות כיצד ניתן ליישם מסקנה זו.

- ¹ הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, מדדים לפיתוח בר קיימא, יולי 2007
- ² הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, שנתון סטטיסטי לישראל 2009, פליטות גזי חממה לפי מקור
- ³ תוכנית אב לטיפול בפסולת מוצקה בישראל. ינואר 2005. עבור המשרד להגנת הסביבה
- ⁴ אמות המידה לסיוע לקידום אמצעים חלופיים להטמנת פסולת במרחב החוץ עירוני מכספי היטל ההטמנה לשנים 2008-2009 ("חלק ב"), אוגוסט 2008.
- ⁵ **Alison Amith**, Keith Brown, Steve Ogilvie, Kathryn Rushton Judith Bates, Waste management options and climate change/AEA technology. July 2001
- ⁶ הרכב הפסולת הביתית, סקר ארצי 2005 / חברת שלדג בהוצאת המשרד להגנת הסביבה. דצמבר 2006
- ⁷ Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ⁸ Revised 1996 IPCC Guidelines for national Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual
- ⁹ דוח סביבתי של חברת החשמל 2008
- ¹⁰ U.S. EPA Office of Solid Waste, SOLID WASTE MANAGEMENT AND GREENHOUSE GASES: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks. 3rd EDITION. September 2006
- ¹¹ **Simon Aumônier** and Michael Collins, Life cycle assessment of Disposable and Reusable Nappies in the UK, UK Environment Agency, 2003.
- ¹² **2006 IPCC Guidelines** for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 3: Solid Waste Disposal
- ¹³ **Dr. Thomas Kloeckner**, office of CEO, federal ministry for the environment, Germany, personal communication, 8 Feb 2010
- ¹⁴ **Nick Alderweireldt Hoofdingenieur** Thermische Technieken, personal communication, 11 Feb 2010
- ¹⁵ **IPCC Guidelines** for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. volume 5: waste. Chapter 4: Biological treatment of solid waste.

¹⁶ **E. Pattey**, M.K. Trzcinski and R.L. Desjardins, Quantifying the reduction of greenhouse gas emissions as a result of composting dairy and beef cattle manure, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (2005) 72:173–187

¹⁷ **מנחם אגסי**, יורם בנימיני, אפריים פיזיק, משה גוטסמן, אביבה הדס, פנחס פיין, גיא לוי, לנה ז'בלב, שי קטאין, דני ארז 2000. קרקעות חקלאיות כאתר לסילוק קומפוסט אשפת ערים.

¹⁸ **Bernard Gagnon** and Régis R. Simard, Nitrogen and phosphorus release from on-farm and industrial composts. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*.1999

¹⁹ **Yaowu He**, Yuhei Inamori, Motoyuki Mizuochi, Hainan Kong, Norio Iwami, Tieheng Sun, Measurements of N O and CH from the aerated composting of food waste. *The Science of the Total Environment* 254 (2000).65-74

²⁰ **Xiying Hao**, Chi Chang, Francis J. Larney, and Greg R. Travis. Greenhouse Gas Emissions during Cattle Feedlot Manure Composting. *J. Environ. Qual.* 30:376–386 (2001).

²¹ **Xiying Hao**, Chi Chang, and Francis J. Larney. Carbon, Nitrogen Balances and Greenhouse Gas Emission during Cattle Feedlot Manure Composting. *J. Environ. Qual.* 33:37–44 (2004).

²² **Yaowu He**, Yuhei Inamori, Motoyuki Mitochi, Hainan Kong, Norio Iwami and Tieheng Sun. Nitrous Oxide Emissions from Aerated Composting of Organic Waste. *Environ. Sci. Technol.* 2001, 35, 2347-2351.

²³ **Hellebrand**, H.J. (1998). 'Emissions of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste', *J. agric, Engng Res.*, 69:365-375.

²⁴ **Beck-Friis**, B., S. Smårs, H. Jönsson, and H. Kirchmann. 2001. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia, and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. *J. Agric. Eng. Res.* 78:423–430

²⁵ מסמך מנחה: יישום חומר אורגני בקרקעות חקלאיות, מהדורה שנייה, פברואר 2010/ הפורום האורגני ביזמת אדם טבע ודין

²⁶ Council Directive 91/676/EEC

²⁷ The Drinking Water Directive (DWD), Council Directive 98/83/EC

²⁸ תקנות בריאות העם (איכותם התברואתית של מי השתייה), תשל"ד 1947 (נוסח משולב 2001).