



Natural Resource and
Environmental Research Center



אוניברסיטת חיפה
University of Haifa

המרכז לחקר משאבי טבע וסביבה

ניתוח עלות-תועלת וניתוח מחזור חיים לבחינת ניצול פסולת פלסטיק בישראל

מוגש למדענית הראשית, משרד להגנת הסביבה

ע"י

פרופ' אופירה אילון

ד"ר ציפי עשת

מר עמוס שטיבלמן (*)

אוגוסט 2013

(*) המחקר הינו עבודת הגמר המחקרית של עמוס שטיבלמן, לשם קבלת התואר
מוסמך אוניברסיטת חיפה בחוג לניהול משאבי טבע וסביבה, ביה"ס לניהול

ניתוח עלות-תועלת וניתוח מחזור חיים לבחינת ניצול פסולת פלסטיק בישראל

תוכן עניינים

9	.....	תקציר
11	.....	מבוא
12	.....	1 סקירת ספרות ורקע מדעי
12	.....	1.1 רקע
13	.....	1.2 בעיות ומגבלות המיחזור
13	.....	1.3 היבטים כלכליים של מיחזור פלסטיק
14	.....	1.4 כלים לניתוח עלויות ותועלות סביבתיות וכלכליות
14	.....	1.4.1 ניתוח מחזור חיים (LCA) Life Cycle Assessment
14	.....	1.4.2 ניתוח עלות תועלת - (CBA) Cost Benefit Analysis
15	.....	2 מטרות המחקר
15	.....	3 הנחות
16	.....	4 שיטות המחקר
17	.....	5 פתרונות טיפול וסילוק פסולת פלסטיק
17	.....	5.1 מיחזור ראשוני
17	.....	5.2 מיחזור שניוני (מכני)
19	.....	5.3 מיחזור שלישוני (כימי)
25	.....	5.4 השבת אנרגיה
27	.....	5.5 שימוש בפסולת פלסטיק בכבשני מלט
28	.....	5.6 דש"ב (RDF)
29	.....	5.7 כבשני ייצור פלדה
29	.....	5.8 גזיפיקציה משולבת פחם (IGCC)
29	.....	6 הערכת הרכב וכמות פסולת פלסטיק בישראל
29	.....	6.1 הרכב וכמות פסולת פלסטיק בעולם
30	.....	6.1.1 שיעור פסולת פלסטיק בעולם
30	.....	6.1.2 מקורות פסולת הפלסטיק
32	.....	6.1.3 פסולת פלסטיק לפי פולימרים
33	.....	6.2 ייצור ויבוא פלסטיק בישראל
34	.....	6.3 הרכב והיקף פסולת הפלסטיק בישראל
34	.....	6.3.1 אריזות – מיכלי משקה, שקיות ואחרים
37	.....	6.3.2 פסולת חקלאית – יריעות

38.....	פסולת אלקטרונית	6.3.3
41.....	רכבים מגריטה	6.3.4
41.....	הערכות המבוססות על היקף הפסולת בישראל ובעולם	6.3.5
43.....	סיכום	6.3.6
44.....	7 ניתוח מחזור חיים (LCA)	
44.....	7.1 שלבי יישום ה-נמ"ח	
45.....	7.2 מחקרי נמ"ח על ניהול פסולת פלסטיק – סקירת ספרות	
45.....	7.2.1 מטרות המחקרים	
46.....	7.2.1 יחידה פונקציונאלית (FU)	
47.....	7.2.2 גבולות המערכת	
48.....	7.2.3 מחקרי נמ"ח בניהול פסולת פלסטיק	
48.....	7.2.4 קטגוריות השלכות שנבחנו במחקרי ה-נמ"ח	
49.....	7.3 הגדרות ותיאור המערכת במחקר	
49.....	7.3.1 הגדרת מטרת וטווח ניתוח ה-נמ"ח	
49.....	7.3.2 תרחישים	
49.....	7.3.3 תרחישי מיחזור	
50.....	7.3.4 אפשרויות השבת אנרגיה והטמנה	
50.....	7.3.5 גבולות המערכת	
51.....	7.4 הנחות בסיס למחקר	
51.....	7.4.1 מידול התרחישים	
52.....	7.4.2 הרכב פסולת הפלסטיק	
53.....	7.4.3 הובלה ותחבורה	
53.....	7.4.4 ייצור חשמל	
54.....	7.4.5 מיון פסולת פלסטיק	
54.....	7.4.6 מיחזור מכני	
55.....	7.4.7 שיוך (allocation)	
55.....	7.5 תיאור התרחישים ורשימות המצאי (LCI)	
55.....	7.5.1 תרחיש 1 – הטמנה	
56.....	7.5.2 תרחיש 2 – מיחזור	
58.....	7.5.3 תרחיש 3 – שריפה לייצור חשמל (מבערה)	
59.....	7.5.4 תרחיש 4 – דש"ב (RDF) בכבשן מלט	
60.....	7.5.5 תרחיש 5 – פירוליזה (ייצור דלק נוזלי)	
61.....	7.5.6 תרחיש 6 – גזיפיקציה (ייצור חשמל)	
62.....	7.6 הערכת השלכות מחזור חיים (LCIA)	
62.....	7.6.1 מתודולוגית העבודה	
64.....	7.6.2 התמודדות עם אי ודאות	

64.....	7.6.3 תרגום השלכות סביבתיות של התרחישים השונים
67	8 תוצאות ניתוח ה-נמ"ח
67.....	8.1 פוטנציאל להתחממות גלובלית (GWP)
68.....	8.2 פוטנציאל להיווצרות אוזון פוטו כימי (POFP)
68.....	8.3 פוטנציאל להיווצרות חלקיקים (PMFP)
69.....	8.4 פוטנציאל להחמצת קרקע (TAP100)
70.....	8.5 פוטנציאל לאטרופיקציה ימית (MEP)
71.....	8.6 פוטנציאל להדלדלות משאבים (FDP)
71.....	8.7 סיכום תוצאות מדדי הביניים
72.....	8.8 נזק לבריאות האדם
73.....	8.9 נזק למגוון ביולוגי ולאקוסיסטמה
74.....	8.10 נזק לזמינות משאבים
74.....	8.11 סיכום תוצאות מדדי הקצה
75.....	8.12 הערכת ההשפעה הסביבתית הפוטנציאלית הסופית (מדדי קצה) בשנה בישראל
77	9 ניתוח עלות - תועלת כלכלית
77.....	9.1 מטרה
77.....	9.2 מתודולוגיה
78.....	9.3 עלויות ישירות לטיפול בפסולת
80.....	9.4 עלויות חיצוניות של טיפול בפסולת פלסטיק בישראל
80.....	9.5 הכנסות
81.....	9.6 תוצאות המודל הכלכלי
81.....	9.6.1 עלויות חיצוניות
83.....	9.6.2 תועלת כוללת
85.....	9.6.3 אי וודאות
83.....	9.6.4 היבטי זמינות
85	10 מסקנות
88.....	10.1 המלצות להמשך מחקר
89	מקורות
99	11 נספח I- מחקרי LCA בניהול פסולת פלסטיק
101	12 נספח II- רשימות מצאי (LCI)
117	13 נספח III- עלות-תועלת

רשימת טבלאות

20	טבלה 1. שיטות תרמיות לטיפול שלישוני בפסולת פלסטיק
24	טבלה 2. שיטות הכימוליה של PET ומאפייניהן
25	טבלה 3. ערך קלורי של סוגי פלסטיק ודלקים שונים
30	טבלה 4. שיעור פסולת הפלסטיק מסך משקל הפסולת הביתית במקומות שונים בעולם
30	טבלה 5. שימושים וביקושים לפלסטיק בעולם
32	טבלה 6. הרכב פסולת אריזות פלסטיק בצרפת
32	טבלה 7. אחוז צריכת הפלסטיק לפי סוג פולימר- פולין, אוסטריה (2004)
32	טבלה 8. הרכב פולימרים מתוך פסולת פלסטיק עירונית במערב אירופה
33	טבלה 9. היקף ייבוא וייצור חומרי גלם (אלפי טון) לייצור פלסטיק, לפי סוג חומרי גלם לשנת 2010
35	טבלה 10. היקף פסולת ומיחזור אריזות בישראל
37	טבלה 11. התפלגות פסולת פלסטיק חקלאית לפי מחוזות וסוגי הפסולת (טון/שנה)
39	טבלה 12. מכירות "מוצרים לבנים" בישראל נכון לשנת 2011 באלפים, משקלם הכולל באלפי טון, האחוז המשקלי היחסי ומשקל הפלסטיק הצפוי בהם באלפי טונות
40	טבלה 13. התפלגות סוגי הפלסטיק של פסולת "מכשירים לבנים"
42	טבלה 14. סיכום הערכות להיקף פסולת פלסטיק הנוצרת בישראל בשנה
44	טבלה 15. סיכום היקפי פסולת פלסטיק ושיעור המיחזור לפי זרמים
47	טבלה 16. היחידה הפונקציונאלית מבוססת משקל במחקר נמ"ח שונים
53	טבלה 17. הרכב פסולת מעורבת ומיכלי משקה לפי פלסטיק קשיח ופילם
54	טבלה 18. ערכי פליטה סגולית לאויר מייצור חשמל בתחנות הכח של חברת החשמל (גרם לקילו-וואט שעה מיוצר) בהתאם לתמהיל ייצור החשמל בישראל לשנת 2011
54	טבלה 19. תמהיל ייצור החשמל בישראל לשנת 2011
56	טבלה 20. תרחיש הטמנה – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)
58	טבלה 21. תרחיש מיחזור A – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)
58	טבלה 22. תרחיש מיחזור B – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)
59	טבלה 23. תרחיש שריפה לאנרגיה (מבערה) – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)
60	טבלה 24. תרחיש דש"ב (RDF) בכבשן מלט – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)
61	טבלה 25. פירוליה (תרחיש ייצור דלק) – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)
62	טבלה 26. גזיפיקציה (תרחיש ייצור חשמל) – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)
65	טבלה 27. קטגוריות מדדי ביניים (MidPoint)
65	טבלה 28. קטגוריות מדדי קצה (Endpoints)
72	טבלה 29. תוצאות מדדי הביניים של התרחישים השונים, עבור 1 טון פסולת פלסטיק
79	טבלה 30. עלויות ישירות לטיפול בפסולת פלסטיק (מחירים לא כוללים מע"מ)
80	טבלה 31. עלויות חיצוניות של מזהמי אוויר בישראל
81	טבלה 32. מחירי תוצרים
83	טבלה 33. עלויות ותועלות כוללות לסך פסולת הפלסטיק בישראל בתרחישים השונים
86	טבלה 34. רמות הסיכון של התרחישים השונים
86	טבלה 35. דירוג רמת תועלות התרחישים בגילום שיעור הסיכון
85	טבלה 36. עלויות טיפול כוללות בתרחיש פסולת בצפון
88	טבלה 37. דירוג סביבתי מסכם של החלופות לטיפול בפסולת פלסטיק בישראל

רשימת איורים

- איור 1. צפיפויות של פולמרים שונים 18
- איור 2. אלטרנטיבות למיחזור של פסולת פלסטיק 19
- איור 4. התפלגות פסולת הפלסטיק שלאחר צריכה במדינות ה-EU27, נורווגיה ושווייץ בשנת 2008 31
- איור 5. סך פסולת הפלסטיק הצפויה שתאסף מפסולת אלקטרונית בהתאם ליעדי האיסוף והגידול הצפוי בשנים 2012-2015 39
- איור 6. התפלגות סוגי הפלסטיק של פסולת טלויזיות ומכשירים לבנים שאמורים להיאסף לפי יעדי האיסוף לפסולת אלקטרונית 41
- איור 7. היקף פסולת הפלסטיק בישראל מהזרמים השונים לפי פולימרים 43
- איור 8. דוגמה למערכת ולאופן חישוב תפוקות האנרגיה והפליטות במערכת 50
- איור 9. תרשים תהליך – תרחיש הטמנה 55
- איור 10. תרשים תהליך – תרחיש מיחזור A 57
- איור 11. תרשים תהליך – תרחיש מיחזור B 57
- איור 12. תרשים תהליך – תרחיש שריפה לייצור חשמל (מבערה) 58
- איור 14. תרשים תהליך – תרחיש דש"ב (RDF) בכבשן מלט 60
- איור 14. תרשים תהליך – תרחיש ייצור דלק (פירוליזה) 61
- איור 16. תרשים תהליך – תרחיש גזיפיקציה (ייצור חשמל) 62
- איור 16. קטגוריות השלכות קיימות במודל Recipe2008 63
- איור 17. קשרים בין פרמטרי רשימת מצאי (LCI) (משמאל) אינדיקטור ביניים (אמצע) 64
- איור 18. דוגמה לאופן המידול של ההשלכות מפליטות גז חממה בהתייחסות לשינויי אקלים 66
- איור 19. פוטנציאל להתחממות גלובלית על פני 100 שנים (GWP100), בק"ג CO₂ שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק 67
- איור 20. פוטנציאל להיווצרות אוזון פוטו-כימי (POFP), בק"ג NMVOC שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק 68
- איור 21. פוטנציאל להיווצרות חלקיקים (PMFP), בק"ג PM10 שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק 69
- איור 22. פוטנציאל להחמצת קרקע על פני 100 שנה (TAP100), בק"ג SO₂ שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק 70
- איור 23. פוטנציאל לאוטרפיקציה ימית (MEP), בק"ג N שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק 70
- איור 24. פוטנציאל להדלדלות משאבים (FDP), בק"ג נפט שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק 71
- איור 25. אובדן שנות חיי אדם (DALY) בתרחישים השונים ל-1 טון פסולת פלסטיק 73
- איור 26. אובדן מינים בשנה (Species.yr) בתרחישים השונים ל-1 טון פסולת פלסטיק 73
- איור 27. אובדן משאבים פוסלים (ב-\$) בתרחישים השונים ל-1 טון פסולת פלסטיק 74
- איור 28. אובדן שנות חיי אדם (DALY) בתרחישים השונים ל-270 אלף טון פסולת פלסטיק 76
- איור 29. אובדן מינים בשנה (Species.yr) בתרחישים השונים ל-270 אלף טון פסולת פלסטיק 76
- איור 30. אובדן משאבים פוסלים (במליוני-\$) בתרחישים השונים ל-270 אלף טון פסולת פלסטיק 76
- איור 31. עלויות ישירות ועלויות חיצוניות בתרחישים השונים (ש לטון) 82
- איור 32. התרומה היחסית של מזהמים לעלויות החיצוניות בתרחישים השונים 82

רשימת קיצורים

CO -Carbon monoxide	דש"ב- דלק שמקורו בפסולת= RDF
CO ₂ - Carbon Dioxide	למ"ס - לשכה מרכזית לסטטיסטיקה
FDP -fossil depletion potential	מ"צ- מעלות צלזסיוס
HCL -Hydrogen chloride	פל"א-פסולת לאנרגיה
HDPE-PolyethyleneHigh Density	ממ"ש- מתקן מיון שאריות= MRF
IGCC-Integrated Gasification Combined Cycle	פ"פ- פסולת פלסטיק
LCA -Life Cycle Assesment	פפ"ע- פסולת פלסטיק עירונית
LDPE -PolyethyleneLow Density	קק"ל – קילו קלוריות
MEP - marine eutrophication potential	
MPa– Megapascals	
MRF –Material Recovery Facility	
MSW -Municipal Solid Waste	
N2O- Nitrous oxide	
NMVOC- non-methane volatile organic compounds	
NOx -Nitrite Oxide	
PAH-Polycyclic Aromatic Hydrocarbon	
PCDD -Polychlorinated dibenzodioxins (Dioxins)	
PCDF - Polychlorinateddibenzofurans	
PE-Polyethylene	
PET -Polyethylene Terephthalate	
PM10 -particles with diameter of 10 micrometer or less	
PMPF - particulate matter formation potential	
TAP100 -terrestrial acidification potential (100 years)	
PP -Polypropylene	
PPM -Parts Per Milions	
PS -Polystyrene	
PVC -Polyvinyl Chloride	
RDF -Refuse-Derived fuel	
SOx -Sulfur Oxide	
TPA – Terephtalic acid	
UV -Ultra Voilet	
VOC - Volatile Organic Compound	

תקציר

מטרת עבודה זאת הייתה לבחון מהו פתרון הטיפול הטוב ביותר עבור פסולת פלסטיק (עירונית, חקלאית ואלקטרונית) בישראל, בהיבט עלות-תועלת סביבתית וכלכלית, על בסיס ניתוח מחזור חיים של הטיפול בפסולת זו.

המחקר יוצא מנקודת הנחה כי עם השיפור בתשתית איסוף הפסולת היבשה, תעלה כמות, איכות וזמינות פסולת הפלסטיק.

המחקר הינו משלים למדיניות אותה נוקט המשרד תוך הבנה שעליה הצפויה בכמות ובאיכות הפלסטיק שנאסף, מחייבים הקמת מתקני טיפול נוספים והשקעות נוספות בתשתית לטיפול בפלסטיק שייאסף. העבודה מהווה בחינה מוקדמת המספקת בסיס לגיבוש מדיניות כוללת-מעבר לנדרש בחוק האריזות.

לשם הערכת פתרון הטיפול המיטבי, נסקרו פתרונות טיפול שונים וטכנולוגיות הקיימות בעולם. לאחר מכן בוצעה הערכה אודות היקף פסולת הפלסטיק בישראל על זרמיה וסוגיה, במעלה הזרם (bottom-up) ובמורד הזרם (top-down). הבחינה הסביבתית נעשתה באמצעות ניתוח מחזור חיים (נמ"ח, LCA) של תרחישים הכוללים תהליכים שונים ומגוון טכנולוגיות. התרחישים כללו: הטמנה, מבערה המייצרת חשמל, מיחזור באיכות גבוהה בשילוב הטמנה, מיחזור באיכות גבוהה בשילוב מבערה המייצרת חשמל, הפיכת הפסולת ל-RDF המנוצל בכבשן מלט בשילוב מיחזור פלסטיק מסוג PET (שערכו הקלורי נמוך ביחס לסוגי הפלסטיק האחרים אך ערכו הכלכלי למיחזור הוא הגבוה ביותר), פירוליזה (פסולת לסולר) בשילוב מיחזור PET. ותרחיש האחרון: גזיפיקציה (פסולת ההופכת לגז שמזין טורבינת חשמל) בשילוב מיחזור PET. בפסולת העירונית בישראל, פסולת הפלסטיק מהווה מרכיב משמעותי ומהווה כ-13% ממשקלה וכ-30% מערכה האנרגטי. מרביתה מועברת כיום להטמנה ובכך יוצרת השפעות שליליות על הסביבה ועל כלכלת ישראל. כאמור, בשנים הקרובות תבוצע בישראל רפורמה בתחום סילוק האשפה כאשר יישום חוק האריזות והפרדת הפסולת לזרמים יכולים להביא לעליה בהיקף ובאיכות פסולת הפלסטיק שתועבר להשבה או למיחזור. לפלסטיק יש ערך היסק גבוה ובמיחזורו הוא יכול לשמש או כחומר גלם בתעשיית הפלסטיק (עם מגבלות איכות שמפורטות בעבודה) או כתחליף לדלקים לשימושים שונים, תועלות שאינן מנוצלות עם הטמנתו.

ה-נמ"ח בחן את הפוטנציאל להיווצרות השפעות סביבתיות כוללות, בין השאר, פליטות גזי חממה, יצירת אוזון פוטו-כימי, פליטת חלקיקים, החמצת קרקע ואאוטרפיקציה של מקורות מים, וכן הדלדלות משאבים. כל אלה כתוצאה מפליטות לאוויר של תחמוצות חנקן (NO_x), פחמן חד חמצני (CO), הידרוקרבונים (HC), חלקיקים (PM_{10}), תחמוצות גופרית (SO_x) ופחמן דו חמצני (CO_2), אשר נפליטים ממקורות תחבורה, צריכת חשמל וזיקוק נפט בתהליכים השונים המופיעים בתרחישים. בוצעה הערכה של פליטות סגוליות לכל מקור ולאחר מכן סכימת הפליטות בתרחיש, בהפחתת פליטות שנחסכו כתוצאה מתחלופת דלקים או חומר גלם, שוות

ערך ליחידה פונקציונאלית (FU) של "1 טון פסולת פלסטיק הנכנסת למערכת" שאמור לייצג את תמהיל פסולת הפלסטיק האופיינית בישראל. סה"כ הפליטות תורגם באמצעות ניתוח השלכות (LCIA) שבוצע ע"י שימוש במתודולוגית Recipe2008.

בשלב האחרון בוצע ניתוח עלות-תועלת כלכלית של התרחישים. הניתוח כלל בחינה של עלויות ישירות הנבעות מהקמה ותפעול מתקן לטיפול בפסולת הפלסטיק, עלויות חיצוניות של הפליטות שנסכמו והכנסות פוטנציאליות ממכירת חומר הגלם הממוחזר או הדלק החלופי. לשם הערכת העלויות נסקרו מקורות מידע שונים בארץ ובעולם כשהעלויות החיצוניות נלקחו ממקורות, שהותאמו באמצעים אקונומטרים לישראל.

ממצאי המחקר מראים שב ישראל נוצרים מידי שנה כ-270 אלף טון פסולת פלסטיק, כאשר פוליאיתילן (PE) מהווה מרכיב עיקרי בהם. כ-90% מפסולת הפלסטיק מקורה בפסולת אריזות והשאר מגיע מפסולת בסקטור החקלאי, ופסולת אלקטרונית. קיבולת מתקני מיחזור פסולת הפלסטיק כיום, שמרביתה מיועדת ל-PET, לא תספיק ליישום יעדי המיחזור בחוק האריזות, לא כל שכן אם תעלה כמות הפסולת שתיוסף. כמו כן, עולה מהמחקר כי קיימים פתרונות כלכליים יותר וסביבתיים יותר ממיחזור לפסולת פלסטיק. לפיכך, יש לשקול ליישם פתרון של השבת אנרגיה ואף להתאים למסקנות אלה את יעדי הטיפול בפסולת פלסטיק בחוק האריזות.

מניתוח סביבתי של התרחישים עולה כי **בגזיפיקציה** מתקבלים הביצועים הסביבתיים הטובים ביותר **בכל המדדים**. אחריה המבערה המייצרת חשמל, אשר דורגה במקום השני כמעט בכל המדדים, מלבד בהיבט פליטות גזי החממה. בהיבט זה (פליטת גזי חממה), תרחיש המיחזור באיכות גבוהה ללא השבת אנרגיה (ובהפרש זניח ממנו גם ה-RDF) היה שני ואילו מבערה הציגה את הביצועים הגרועים ביותר.

מתוצאות הניתוח הכלכלי עולה שפתרונות השבת האנרגיה הם הפתרונות בעלי התועלת הגבוהה ביותר. מביניהם, לתרחיש **הפירוליזה** התועלת הגבוהה ביותר שיכולה להגיע עד לכדי כ-663 מיליון ש"ח עבור כל פסולת הפלסטיק בשנה. אחריו תרחיש ה-RDF עם תועלת של כ-451 מיליון ש"ח. אם לוקחים בחשבון את שיעור הסיכון הנובע מפרויקט פירוליזה, RDF יכול להביא לתועלת כמעט זהה לו (בפרט אם ניהול הפסולת מוכוון הפחתת פליטות גזי חממה). תרחיש **ההטמנה** מביא לתועלת שלילית בגינה מפסידים כ-37 מיליון ש"ח בשנה.

במחקר גם נבדק אם עדיף להקים מתקן בעל תועלת נמוכה יותר בצפון הארץ בהנחה ששם מרוכזים 30% מפסולת הפלסטיק, על פני הסעת פסולת מהצפון לטיפול במתקן בעל תועלת גבוהה יותר בדרום הארץ. מבדיקה זאת עלה כי רק אם מרחק הנסיעה הלך חזור גדול מ-740 ק"מ, כדאי להקים מתקן כדאי להקים מבערה בצפון על פני טיפול במתקן מיחזור A בדרום. שאר החלופות כדאיות אם המרחק גבוה מכך.

מכיוון שפסולת פלסטיק היא משאב בעל ערך אנרגטי גבוה, מומלץ לגבש מדיניות ייחודית לניהול פסולת הפלסטיק המתמקדת בניצול יעיל של פסולת זו. ממצאי המחקר מראים באופן ברור כי לשם השגת יעדי מדיניות הטיפול בפסולת פלסטיק ראוי להשתמש בטכנולוגיות להשבת אנרגיה, שהוכח כי התועלות הכלכליות והסביבתיות מהן, עולות על אלו של המיחזור.

מבוא

בשנים הקרובות תבוצע בישראל רפורמה בתחום סילוק האשפה כאשר יישום חוק האריזות והפרדת הפסולת לזרמים יכולים להביא לעליה בהיקף ובאיכות פסולת הפלסטיק שתועבר להשבה או למיחזור.

בישראל נוצרים מידי שנה כ-270 אלף טון פסולת פלסטיק, כאשר פוליאטילן (PE) מהווה מרכיב עיקרי בהם. כ-90% מפסולת הפלסטיק מקורה בפסולת העירונית, בעיקר פסולת אריזות, והשאר מגיע מפסולת בסקטור החקלאי, ופסולת אלקטרונית.

לפלסטיק יש ערך היסק גבוה (כ-8000 קק"ל לק"ג) התורם כ-30% מערך ההיסק הכולל של פסולת עירונית (שלדג, 2006) ובמיחזורו ו/או השבתו, הוא יכול לשמש כחומר גלם או דלק לשימושים שונים, תועלות שאינן מנוצלות עם הטמנתו. כיום קיימים פתרונות טכנולוגיים אשר מיושמים במקומות שונים בעולם ומאפשרים טיפול או ניצול הפסולת למטרות שונות. בישראל לעומת זאת, מלבד הטמנה ומיחזור, המתקיים בהיקף נמוך יחסית, אין שימוש בפתרונות טיפול אחרים. הנחת המחקר גורסת כי יש לשנות את התפיסה מהתייחסות לפסולת הפלסטיק כמטרד לעבר תפיסה הגורסת שהוא משאב שיש לנצל, דבר אשר יכול להקטין את היקף הפסולת המועברת להטמנה, תוך השאת תועלות סביבתיות וכלכליות. כמו כן, אין בישראל מדיניות מוגדרת לטיפול בפסולת הפלסטיק שמקורה בפסולת עירונית וחקלאית והיא מטופלת כחלק מהפסולת הכללית, בשעה שבאירופה מקודמת בימים אלה יוזמה לגיבוש אסטרטגיה לטיפול בפסולת פלסטיק (European Commission, 2013). לצורך שיפור הטיפול בפסולת הפלסטיק וניצולה יש צורך בהערכת הפתרונות האפשריים בכדי למצוא את הפתרון האופטימלי לפסולת זו. מטרת המחקר לבחון היבטים סביבתיים וכלכליים של פתרונות אלה. יחודו של המחקר בכך שבישראל מעולם לא בוצעה בדיקה מקיפה וכוללת במבט כללי, המתמקד בפסולת הפלסטיק תוך התמקדות בפתרון האופטימלי לניצול הפסולת ולא רק בסילוקה.

1 סקירת ספרות ורקע מדעי

1.1 רקע

פסולת הפלסטיק העירונית מהווה כ-13% ממשקלה השנתי וצפויה להגיע לכדי חמישית עד שנת 2015 (שלדג, 2006). בנוסף, ריכב הפלסטיק בפסולת העירונית הוא מאוד נפחי (כ-46% בממוצע מהנפח השנתי של הפסולת הביתית). לנושא הנפח משמעות עצומה באצירה ובהובלת הפסולת טרם דחיסתה, משום שהעלויות תלויות בנפח מדובר בהיקף משמעותי בזרם הפסולת. היקף מיחזור פסולת הפלסטיק (פ"פ) נכון לשנת 2010 הוא עדיין נמוך, ועומד על 12% מסך 250 אלף טון פסולת אריזות הפלסטיק המיוצרות בשנה (אילון וחוב, 2010). בישראל אין כיום השבה של פ"פ למעט לשימוש בייצור דש"ב (RDF), שהינו זניח בהיקפו. לכן, פסולת זו, שאינה ממוחזרת, מועברת להטמנה, דבר אשר יוצר עלויות סביבתיות כגון: ניצול משאב הקרקע עקב

התפרקותה האיטית (Aguado & Serrano, 1999), ועלויות כלכליות הנובעות מאי ניצול של חומר גלם ממוחזר ואנרגיה פוטנציאלית שאצורה בפסולת הפלסטיק היכולה להגיע עד לכדי כ-8000 Kcal/kg (שלדג, 2006). בעקבות הרחבת חוק הפיקדון בשנת 2010, התוכנית ליישום חוק האריזות בישראל במהלך 2011 והתוכנית של המשרד להגנת הסביבה לקידום הפרדת הפסולת במקור ל-2 זרמים (יבש ורטוב), צפויה עלייה באיכות ובהיקף פסולת הפלסטיק העירונית הנאספת והמופרדת מהזרם הרטוב. לעומת זאת, קיבולת מפעלי המיחזור העומדת כיום על כ-45 אלף טון בשנה (אילון וחוב', 2010) נותנת מענה חלקי בלבד ומאלצת להפנות שאר פסולת הפלסטיק להטמנה, אשר טומנת בחובה השלכות סביבתיות שלרוב עולות על ההשלכות הסביבתיות הנובעות מפתרונות הטיפול האחרים (Finnveden et al., 2007). מסיבה זאת יש למצוא פתרונות נוספים או חלופיים כדי להקטין את היקף ההטמנה של פ"פ וכדי לעמוד ביעדים השנתיים של מיחזור אריזות הפלסטיק שהציב לעצמו המשרד להגנת הסביבה-22.5% (החוק להסדרת הטיפול באריזות, התשע"א - 2011). למרות שהמיחזור מוגדר בעדיפות הראשונה בשלבי ניהול הפסולת בישראל (אתר המשרד להגנת הסביבה), מרבית פ"פ אינה ממוחזרת, בעיקר מסיבות של אי כדאיות כלכלית ומאי וודאות בשוק חומרי הגלם הממוחזרים (Bockhorn et al., 1998), וזאת למרות שקיימים מחקרים רבים המראים כי מיחזור עדיף כלכלית וסביבתית על הטמנה (Lavee, 2007; WRAP, 2010). מחקר זה נוקט בגישה שפ"פ יכולה לשמש כמשאב שניתן לנצלו תוך הפקת תועלות שונות לדוגמה: הגדלת הצמיחה הכלכלית (Di Vita, 2001), יצירת חלופות לחומרי גלם שאינם זמינים מקומית כמו נפט והפחתת אחוז הפסולת המוטמנת מסך הפסולת בישראל.

1.2 בעיות ומגבלות המיחזור

למרות שרוב מיחזור הפלסטיק בישראל מתבצע כיום באמצעות מיחזור מכני והוא מוגדר בעדיפות הראשונה בהיררכיית הטיפול, מיחזור מכני כפוף להתאמה בין סוגים שונים של פולימרים במידה והם מעורבים. עירוב סוגים שונים של פולימרים לדוגמה כמות קטנה של PVC עם PET מקטינים מאד את הערך המסחרי של ה-PET (Aguado & Serrano, 1999). בעיה נוספת היא צבע שונה של פסולת בעלת הרכב פלסטיק זהה. על מנת לספק את צרכי השוק, בד"כ מוסיפים גוון אפור לפלסטיק הממוחזר (Aguado & Serrano, 1999). מרבית הפולימרים סובלים מהתדרדרות בתכונותיהם במהלך השימוש בהם כתוצאה מחשיפה לחום, קרינת UV, חמצן ואוזון. לכן פולימרים ממוחזרים הם בעלי תכונות וביצועים פחותים מפולימרים בתוליים ובמרבית תהליכי המיחזור מערבבים חומר בתולי עם החומר הממוחזר.

1.3 היבטים כלכליים של מיחזור פלסטיק

חומר גלם ממוחזר ונקי שווה כלכלית כ-50% מחומר בתולי ובדרגות נקיון נמוכות יותר יכול להגיע לכרבע או שליש מערכו של חומר בתולי (אילון וחוב', 2010). שיטת המיחזור המכני היא השיטה הכמעט בלעדית בישראל, שבאמצעותה היקף המיחזור הפוטנציאלי הנאמד בישראל

יכול להגיע לכדי כ-45-40 אלף טון פלסטיק (אילון וחוב', 2010). מרבית הפלסטיק הממוחזר אינו מיועד לשימוש חוזר עבור אריזת מזון. בארה"ב למשל, השימושים העיקריים של בקבוקי HDPE ממוחזרים נכון ל-2009, היו כ- 45% לבקבוקים שאינם מיועדים למזון, 25% לצינורות ו-9% לתעשיית הרכב. הצרכנים החזירו 77% מבקבוקי ה-HDPE הניתנים להחזרה במסגרת פיקדון וסה"כ מוחזרו כ-29% מבקבוקי ה-HDPE ו-28% מכלל בקבוקי ה-PET, PETAPPR, (ACC & 2010). עבור השימושים העיקריים בבקבוקי PET ממוחזרים בעולם בשנת 2007, ניתן לראות ש-72% מוחזרו לסיבים, 10% לבקבוקים ו-10% ליריעות, מיחזור של כ-80% מסך כל בקבוקי ה-PET (Noone, 2008). לעומת ארה"ב, שהיקפי מיחזור של בקבוקי HDPE ו-PET עומדים כאמור על 25-29%, באירופה היקפי מיחזור גבוהים יחסית של בקבוקים מסוג זה שמקורם במערכת האיסוף באמצעות פיקדון (ביחד עם פילמים תעשייתיים – 40% ממוחזרים). היקף מיחזור פסולת פלסטיק מעורבת הוא נמוך ובהיקף של 10% בלבד (PlasticsEurope, 2009).

ישנם שני סוגי מיחזור (Breslin et al., 1998):

- Closed loop - מיחזור המתייחס למצב בו מוצר ממוחזר לטובת יצור מחדש, לדוגמה שימוש בבקבוקי PET לייצור בקבוקי PET חדשים. בכך מושגת הפחתה של כמות חומ"ג הבתולי הנכנס למוצר.
- Open loop - מתייחס למצב בו מייצרים מוצרים שונים מהמוצר המקורי, כמו לדוגמה שימוש בבקבוקי PET שנאספו לייצור סיבים סינטטיים או פלסטיק דמוי עץ, אשר לו שימושים מוגבלים עקב התכונות הנחותות שלו.

ההיבטים הכלכליים של שיטות טיפול אחרות, ייסקרו בהמשך.

1.4 כלים לניתוח עלויות ותועלות סביבתיות וכלכליות

1.4.1 ניתוח מחזור חיים (LCA) Life Cycle Assessment

ניתוח מחזור חיים (נמ"ח) היא גישה כמותית וכוללת בה מוערכים הפליטות, המשאבים הנצרכים ולחצים על בריאות וסביבה אשר יכולים להיות מיוחסים לטובין או שירותים, תוך לקיחה בחשבון של כל מחזור חייהם מ'עריסה' ל'קבר'. בעת שימוש ב-נמ"ח אנו שואפים לכמת את כל התחלופות הפיזיות עם הסביבה, אם זה תשומות של משאבים טבעיים או אנרגטיים או תפוקות בצורת פליטות לאוויר, למים ולקרקע. לאחר שנאסף כל המלאי של התשומות והתפוקות הם מתורגמים לאינדיקטורים הקשורים בהשלכות שונות כמו למשל הדלדלות משאבים, שינויי אקלים, החמצת מקורות מים וקרקע או רעילות לצמחים, לבעלי חיים ובני אדם (EU Commission, 2010). להרחבה, ראה פרק 7 העוסק ב-נמ"ח.

1.4.2 ניתוח עלות תועלת - (CBA) Cost Benefit Analysis

שיטה להערכת היעילות הכלכלית של מדיניות ציבורית מוצעת, על ידי חיזוי העלויות והתועלות החברתיות הנובעות ממנו. בשימוש בכלי זה יש לכלול את כל העלויות והתועלות ובכללן את

העלויות הסביבתיות. בביצוע ההערכה, משווים בין סך העלויות לתועלות ומקבלים סכום נטו, אשר מהווה מקור אחיד להשוואה בין תהליכים (אילון וחוב', 2007). לדוגמה: ניתוח העלויות והתועלות הכלכליות של מתקן סילוק אשפה, כולל כל עלות או תועלת סביבתית, Norton, (1984). בהיבט העיקרון של "המזהם משלם" כל העלויות החברתיות של ייצור וצריכה חייבות להשתקף בעלויות היצרן של תהליך הייצור ובמחיר השוק המשולם ע"י הצרכנים, (Turner, 1992). מתן ערך כספי לעלויות הסביבתיות אפשרי בעזרת שיטה אקונומטרית - העברת תועלות (Benefit Transfer), המתייחסת לשימוש בהערכת תועלת ממחקר קיים למחקר אחר, שדומה במאפייניו למחקר המקורי שיצר את הערכת התועלת (DeCivita, 1999) (Bergstrom&).

2 מטרות המחקר

- בחינת אפשרויות הטיפול וניצול פסולת הפלסטיק (בעיקר מהמגזרים - העירוניים, החקלאיים ומפסולת אלקטרונית), המקובלות בעולם על השלכותיהן הסביבתיות והכלכליות, בעזרת ניתוח מחזור חיים. תוך מתן דגש על בחינת טכנולוגיות חדישות ומוכחות שאינן מיושמות בישראל, כולל בחינת מול הטמנה.
- גיבוש בסיס מידע הכולל את פתרונות הטיפול, התשומות והתפוקות בתהליך הטיפול והשלכותיהן, בהתאם לגבולות המערכת שנקבעו.
- גיבוש מודל כלכלי להערכת חלופות המאפשר קבלת החלטה לאופן הניצול האופטימלי - סביבתי וכלכלי של פ"פ בישראל בעזרת ניתוח מחזור חיים.
- הערכת פתרון הטיפול/הניצול האופטימלי של פ"פ עבור מדינת ישראל.

3 הנחות

- כמות הפסולת עולה עם הזמן כתוצאה מעלייה ברמת החיים והגידול באוכלוסיה. כמו כן, שעור החומרים הפלסטיים בפסולת צפוי לעלות עם הזמן.
- עפ"י חוק האריזות, מדינת ישראל שואפת לאפס הטמנת פסולת אריזות בשנת 2020, למינימום ניצול של משאבים טבעיים ו/או ייבוא של חומרי גלם ולמקסימום מיחזור/השבה של פסולת.
- תשתית ההפרדה במקור של מיכלי משקה יכולה לשמש כפלטפורמה לאיסוף פלסטיק ובכך להגדיל את היקף ההפרדה במקור של פסולת הפלסטיק.

4 שיטות המחקר

לשם ביצוע העבודה בוצעו השלבים הבאים :

- **סקירת פתרונות טכנולוגיים לטיפול וניצול של פסולת פלסטיק** - נסקרו טכנולוגיות טיפול שונות ונבנה בסיס מידע בדגש על טכנולוגיות מוכחות הפועלות בהיקף תעשייתי, וניתן דגש על הצגת טכנולוגיות חדשות שאינן מיושמות בהיקף מסחרי בישראל. הנתונים כוללים את תיאור טכנולוגית הטיפול; פרטים טכניים (עד כמה שניתן) כגון: צריכת אנרגיה, גודל מתקן וכו'; יתרונות וחסרונות סביבתיים וכלכליים; מדינות בהם נעשה שימוש באמצעי זה והיקף השימוש. הנתונים נלקחו מתוך מחקרים, מאמרים מקצועיים, דו"חות ומסמכים טכנולוגיים של ספקי המתקנים.
- **בניית בסיס מידע של פסולות הפלסטיק בישראל** - נאספו נתונים סטטיסטיים הכוללים את היקף פסולת הפלסטיק בישראל, כמויות בזרמים השונים, הרכב פסולת הפלסטיק בהיבט סוג הפסולת (אריזות כו') והחומר ממנו עשויה הפסולת (PET, HDPE וכו'). הנתונים נלקחו מתוך סקר הפסולת שבוצע ע"י חברת שלדג בשנת 2005, נתוני הלמ"ס, מסמכים ומאמרים העוסקים בפסולת פלסטיק בישראל ובעולם. ההערכת היקף הפסולת על זרמיה בוצעה על בסיס top-down ו- bottom-up תוך התמקדות בזרמי פסולת: אריזות, חקלאות, אלקטרונית וכלי-רכב.
- **הערכת מצאי מחזור חיים (LCI)** - נבנתה רשימת מצאי של תשומות (חומרי גלם ואנרגיה) ותפוקות (פליטות לאויר) לתרחישים שונים הכוללים את פתרונות הטיפול. רשימת המצאי גובשה על בסיס מידע קיים בישראל ובעולם ומחקרי נמ"ח בנושא ניהול פסולת פלסטיק.
- **ניתוח השלכות מצאי מחזור חיים (LCIA)** - על בסיס רשימות המצאי כומתו מספר השלכות הסביבתיות של התרחישים השונים, באמצעות מתודולוגיה מתאימה. ההשלכות שכומתו כוללות: פוטנציאל לשינויי אקלים, פוטנציאל להיווצרות אוזון פוטוכימי, פוטנציאל להיווצרות חלקיקים, פוטנציאל להחמצת קרקע, פוטנציאל לאאוטרפיקציה ימית ופוטנציאל להדלדלות משאבים פוסילים.
- **ניתוח עלות ותועלת** - גובש בסיס מידע הכולל את העלויות החיצוניות והעלויות והתועלות הפרטיות של התרחישים השונים. הנתונים נלקחו מתוך בסיס מידע שגובש במהלך המחקר, נתוני יצרני הטכנולוגיה, מחקרים ודו"חות ומידע כלכלי ממקורות שונים. לאחר מכן בוצע ניתוח עלות-תועלת התרחישים השונים.

5 פתרונות טיפול וסילוק פסולת פלסטיק

5.1 מיחזור ראשוני

המיחזור הראשוני כולל שיחול (אקסטרוזיה), שהינו תהליך בו מתיכים חלקית בטמפ' של כ- 160-200 מעלות צלסיוס את פסולת הפלסטיק ליצירת חומר גלם בצורת גרגירים. שיטה זו אפשרית רק עם פסולת הומוגנית ונקייה (כלומר, במרבית המקרים מדובר בפסולת פנים מפעלית ולא post consumer) ובגלל העלות הגבוהה היא אינה אטרקטיבית לחברות המיחזור (Al-Salem, 2009). במפעל מיחזור הפלסטיק של אמניר ממוחזרים בשיטה זו בישראל כ-7 אלף טון פלסטיק בשנה בלבד (אילון וחוב', 2010) כ-1% מסך פסולת הפלסטיק בשנה (חושב מתוך נתוני הלמ"ס 2005 וסקר הפסולת של שלדג לשנת 2005). מחציתו של הפלסטיק הממוחזר מורכב מהחומרים שלפני צריכה כגון, שאריות ממפעלי פלסטיק ומוצרי אריזה של מפעלים שונים. המחצית השנייה מורכבת מחומרי פסולת שלאחר צריכה (post consumer) דוגמת יריעות של חממות ושאריות ממפעלים תעשייתיים. הדגש בשיטה זו הוא על הומוגניות ונקיון הפסולת מבחינת סוג הפלסטיק.

5.2 מיחזור שניוני (מכני)

בשיטה זו, פ"פ מושבת לצורך שימושה כחומר גלם ליצירת מוצרי פלסטיק חדשים, אך נחותים בדרישות הפיזיקאליות שלהם, כגון: סיבים לשטיחים, לבוש ובקבוקים. בישראל נעשה שימוש בשיטה זו למיחזור בקבוקי PET ופסולת פלסטיק אחרות. בשנת 2009 מיחזרה חברת אביב כ-8.5 אלף טון פלסטיק בשיטה זו (אילון וחוב', 2010), רק כ-1% מסך פסולת הפלסטיק. שיטה זו כוללת תהליך של מיון, קיצוץ (הקטנת גודל), הפרדת מזהמים, שטיפה ושיחול וככל שהפסולת מורכבת ומזהמת יותר כך קשה למחזרה (Al-Salem, 2010). תהליך המיחזור כולל איסוף הפסולת, הקטנת נפחה וגודלה, מיון בהתאם לסוגי הפלסטיק השונים וגרעון או גיבוב לצורך התאמת החומר הממוחזר לצורך עיבוד מחדש. להלן תיאור השלבים השונים כפי שמתוארים בספרה של Goodship, (2007) "introduction to plastics recycling":

- שלב הקטנת הגודל- שלב זה כולל שני שלבים של תהליך: שימוש בקוצץ ליצירת חלקיקים גדולים בגודל של 25-50 מ"מ ולאחר מכן חיתוך שנעשה באמצעות חותכים מכניים סיבוביים, הטכנולוגיה הנפוצה ביותר. גודל החיתוך המקובל הוא בדרך כלל 5x5 מ"מ.
- שלב השטיפה- השטיפה מסירה לכלוך ושאריות הצמודים לפסולת הפלסטיק. לאחר השטיפה מייבשים את הפלסטיק, בעזרת שיטה מכנית ע"י שימוש בכוח הכבידה (הנוזלים מחלחלים דרך המסוע) או תרמית המשתמשת באויר חם.
- שלב מיון והפרדה- קיימת חשיבות גבוהה לרמת ה"ניקיון" של הפלסטיק והיא מהווה את הקריטריון הקובע את איכות התוצר, מאחר ומזהמים שונים יכולים לפגוע במאפייניו

המכניים של מוצר ממוחזר ולגרום למשל להפחתת עמידותו בפני מאמצים. קיימות מספר שיטות מיון:

- א. מיון ידני- המיון מתבצע בעזרת עובדים ממיינים הממוקמים לאורך מסוע פסולת הפלסטיק, המיון מתבצע ע"י זיהוי סוגי הפלסטיק השונים בהתאם לתכונות החיצוניות ולקוד הזיהוי (מזהה את סוג השרף) המוטבע על האריזות.
- ב. מיון אוטומטי- נעשה ע"י עיקרון של שימוש בתכונה מסוימת של החומר למשל רמת הצפיפות של החומר, כמפורט באיור 1. הפרדת פלסטיק באמצעות ציפה - בתהליך הנקרא "float – and sink", שבו מפרידים את זרם הפוליאולפינים מפולימרים אחרים; הפרדת אינפרא אדום (IR) המובססת על אנרגיית האור השונה הנפלטת בין סוגי הפלסטיק השונים (שרפים).

איור 1. צפיפויות של פולמרים שונים

<i>Polymer</i>	<i>Density (g/cm³)</i>
HDPE	0.94–0.97
LDPE	0.91–0.93
PP	0.93–0.94
PS	1.04–1.10
PVC	1.39–1.40
PET	1.33–1.39
PMMA	1.19–1.20
Nylon-6,6	1.20–1.30

מקור: (Aguado & Serrano,1999)

- שלב הגיבוב (אגלומרציה)- מטרת שלב זה היא להגדיל את דחיסות החבילה (bulk density) כדי לשפר את כושר הזנת מכונות ייצור הפלסטיק והמיחזור. שיטה זאת מתבצעת ע"י דחיסה או התכה בלחץ (גיבוב תרמי) של שטח הפנים לזמן קצר. עבור סוגי פלסטיק מסוימים מבצעים גם שיחול (אקסטרוזיה) לצורך גירעון.
- כיום רוב מיחזור הפלסטיק בישראל מתבצע באמצעות מיחזור מכני והוא מוגדר כעדיפות הראשונה בהיררכיית הטיפול. הבעיות העקריות בשיטה זאת נובעות מעירוב סוגים שונים של פלסטיק אשר יכולים להוריד את ערכו המסחרי (Aguado & Serrano, 1999), ובעיה נוספת היא צבע שונה של פסולת בעלת מרכיב זהה אשר בד"כ גורמת להוספת גוון אפור לפלסטיק הממוחזר. (Aguado & Serrano, 1999) מרבית הפולמרים סובלים מהתדרדות בתכונותיהן במהלך השימוש בהם הנובע מחשיפה לחום, קרינת UV, חמצן ואוזון. כתוצאה מכך פולימרים ממוחזרים הם בעלי תכונות וביצועים פחותים מפולימרים בתוליים וניתנים לשימוש ליישומים פחותי תכונות ובעלי ערך כלכלי נמוך יותר.

היבטים כלכליים: עלות ההשקעה עבור מערך המטפל ב-6 טון/שעה פסולת ביתית מעורבת של אריזות פלסטיק וכולל מיון ידני, מערכת הפרדה באמצעות ציפה עם תוצר של בקבוקי PET

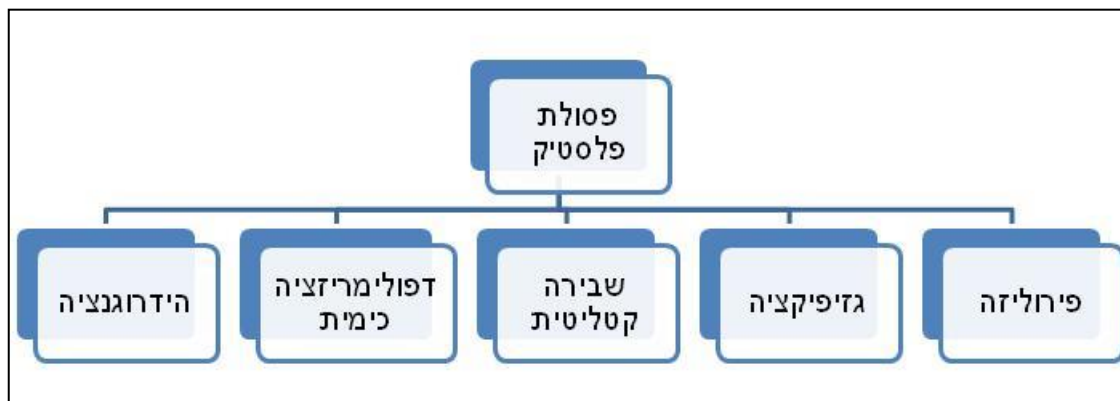
ופילמים בבאלות ופאלטות מפסולת שאינה בקבוקים, מוערכת בכ-2.7 מיליון פאונד (במונחי 2008) שהם כ-16 מיליון ש"ח (לפי שער 3/2012) (WRAP, 2008). הערכה¹ דומה להקמת מפעל מיחזור, עמדה על סדר גודל של 3 מיליון יורו, שהם כ-15 מיליון ש"ח (לפי שער 3/2012) ועלות תפעול (לא כולל איסוף) לטון כ-1500 ש"ח (מספרים דומים לאלה שנמצאו בסקירה, בהנחה שכוללים מתקן המיון). לפי אותו גורם בכדי שמפעל יהיה רווחי עליו לטפל בלפחות 10 אלף טון בשנה.

היבטים סביבתיים: היתרון בפתרון זה שאין שימוש בכימיקלים מסוכנים וכו' (מלבד דטרגנטים שבד"כ אינם מסוכנים) ולכן ההשלכות הסביבתיות של תהליך זה נמוכות. עם זאת יש לשים לב לתשטיפי ניקוי הפלסטיק שיכולים להכיל חומר אורגני ולכן מחייבים טיפול. היבט נוסף הוא פליטות גזי חממה ומזהמים שיכולים לנבוע מצריכת חשמל בעיקר בתהליכי החימום.

5.3 מיחזור שלישוני (כימי)

מיחזור שלישוני מתייחס לתהליכים טכנולוגיים מתקדמים להמרת חומרי פלסטיק באמצעות חום (שיטה תרמית), כימיקלים (שיטה כימית) או מתווך קטליטי למולקולות קטנות יותר (מיחזור מונמרי), או לפטרוכימיקלים שימושיים (feedstock recycling). בדרך כלל, לנוזלים וגזים שמתאימים כחומר הזנה (feedstock) או דלק (Mastellone, 1999). היתרון העיקרי של מיחזור כימי הוא האפשרות לטפל בפולימרים הטרוגנים ומזהמים תוך שימוש מינימלי בטיפול מקדים. טכנולוגיות המיחזור השלישוני השונות מוצגות באיור 2.

איור 2. אלטרנטיבות למיחזור שלישוני של פסולת פלסטיק



מקור: (Aguado & Serrano, 1999)

5.3.1 שיטות תרמיות

בשיטות אלה מטפלים בד"כ ב-addition polymer² לדוגמה: LDPE. טכנולוגיות הטיפול התרמיות השונות ומאפייניהן מפורטים בהרחבה בספרם של Scheirs & Kaminsky (2006). חלק מאלה הפועלים בסדר גודל תעשייתי נסקרים בקצרה בטבלה 1.

¹ שיחה שהתקיימה עם עוזי קלברמן מחברת ריפאל כימיקלים ופלסטיק, בתאריך 28/2/2012
² פולימר הנוצר באמצעות תגובת הוספה, שבה מספר מונמורים נקשרים יחד באמצעות סידור מחדש של הקשרים

טבלה 1. שיטות תרמיות לטיפול שלישוני בפסולת פלסטיק

שירק (Resin) וסוג פ"פ מתאימים	שיטה	תנאי תפעול	תוצר	טכנולוגיות קיימות ומאפייניהם ³
• PE, PVC, PS ו-PP פסולת מעורבת לא שטופה ופילמים.	פירוליזה	• טמפ' מ- 400 - 600 מ"צ. • לחץ אטמוספרי בד"כ.	• תמהילים שונים של גז, נוזל ומוצק (כתלות בטמפ'). • מהנוזל ניתן להפיק סולר דל גופרית.	• טכנולוגית BASF - 15 אלף טון/שנה יוצרים 20-30% גז, 60-70% שמנים הניתנים לזיקוק. • טכנולוגית ThermofuelTM - טון/יום מפיקים 10 אלף ליטר סולר דל גופרית.
	גזיפיקציה	• טמפ' - בין 1200-1500 מ"צ. • תנאי חימצון עדינים (בד"כ קיטור, CO₂ או O₂).	• גז סינטטי המכיל CO ו-H₂. • הגז מאפשר הפקת מתנול ואו אמוניה ומתאים לשריפה כדלק ליצור חשמל.	• טכנולוגית SVZ - קיבולת 410 אלף טון בשנה, תוצר 70% מתנול ו-20% גז ליצור חשמל. מחיר שער כ- 100 יורו/טון פסולת. פלסטיק • טכנולוגית TEXACO - 150 טון ביום הופכים לסינגז נקי שווה ערך לכ- 70 מגה-וואט חשמל (ביעילות ייצור של 20%). מחיר שער בין 90 ל-135 יורו/טון.

• גזיפיקציה -

בתהליך זה מעורבים חימצון חלקי של חומר אורגני בטמפ' גבוהה (בד"כ בין 1200-1500 מעלות צלזיוס) תחת תנאי חימצון עדינים (בד"כ קיטור, פד"ח או חמצן) ליצור גז סינטטי (סינגז). גז זה המכיל בעיקר פחמן חד חמצני ומימן, ניתן לישום בסינטזה של כימיקלים כמו מתנול ואמוניה ויכול לשמש ליצור דיזל סינטטי או יכול להשרף ישירות כדלק (Aguado et al., 2007). היתרון בשיטה זאת שהיא אינה מושפעת מלכלוכים וניתן להשתמש בה בפסולת המעורבת ברכיבים אורגניים. כמו כן, השימוש באויר במקום O₂ מפשט את התהליך ולכן מפחית עלויות, אך החיסרון הוא נוכחות של N₂ אינרטי באויר אשר גורמת לירידה בערך הקלורי של תוצרי הדלקים, שהפתרון לכך הוא שימוש בקיטור ביחס סטוכיומטרי להפחתת ה-N₂ (Al-Salem et al, 2009). בתהליך הגזיפיקציה מתקבלים שאריות צ'אר המחייבת טיפול נוסף כמו שריפה. עם תהליך זה נמנות מספר טכנולוגיות אשר מיושמות בהיקף תעשייתי ומצוינות לעיל בטבלה 1.

³ למידע נוסף ראה "Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics : Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels"

<http://www.filecrop.com/Feedstock-Recycling-And-Pyrolysis-of-Waste-Plastics.html>

מחקרם של Huffman & Shah (1997) בדק היתכנות כלכלית של מפעל גזיפיקציה פסולת המכילה פלסטיק וצמיגים בקיבולת של כ-300 טון/יום (200 פלסטיק ו-100 צמיגים) ומצא שעבור מחיר חבית נפט של \$25 החזר ההשקעה יכול להיות בין 8.6%-13.5% (ללא tipping fee עבור הטיפול בפסולת וכאשר התרחיש השמרני ביותר מדבר על תשלום עבור רכישת גרוסת הצמיגים). מאחר ונכון לשנת 2012 מחירי חבית נפט הם כ-\$100 ניתן לשאר ששיעור החזר ההשקעה יהיה גבוה יותר ובכך משפר את הכלכליות של הטכנולוגיה. יש לציין כי שימוש בפירולזה הוא בעל השלכות של פליטות מזהמות, שפכים, פסולת מוצקה ואפר המצריכים טיפול והצטיידות בטכ' מניעה מתאימות.

• פירולזה –

פירולזה הנקראת גם תרמוליזה היא תהליך פירוק תרמי וכימי אשר מוביל למולקולות קטנות יותר. ברב תהליכי הפירולזה האוויר מוצא מן המערכת למטרת בטיחות, איכות המוצר ותפוקתו. פירוליזה פלסטיק יכולה להתרחש בטמפרטורה נמוכה (<400), בינונית (400-600) וגבוהה (>600) כשהלחץ הוא בד"כ אטמוספרי (Scheirs & Kaminsky, 2006). פירוק תרמי של פולימרים מביא לתוצרת של גזים, תזקיקים וצ'אר בהתפלגויות שונות. את התוצרים ניתן להפוך לדלקים, פטרוכימיים ומונומרים, כתלות בפולמרים או בתערובת הפולימרים המהווים את חומר ההזנה. פוליאפינים מכילים פחמן ומימן ותוספות כמו אנטי אוקסידנטים ומייצבי UV. יותר מכך, המצאותם של כלורין וברומין (hetero-elements) היא בלתי רצויה מאחר ורכיבים אלה יכולים להימצא על פני שלושת תוצרי הפאזות גז, הנוזל ומוצק וגורמים לירידה בערך התוצר. לכן, מחקר שיכול להביא להסרתם הוא מרכיב חשוב מאד לשימוש בתהליך עם פסולת פלסטיק מעורבת.

פירוליזה PE מבוצעת בקצב המקסימלי בין 420 ל-500 מעלות, המוביל לסדרה של שרשרת ישרה של הידרוקרבונים. התוצר של גזים הידרוקרבונים ומוצקים בד"כ נשארים נמוכים בהשוואה לנוזלים בריאקטורים קונבציונאליים.

בהיבט ייצור גזים ודלקים נוזלים התועלת של פירולזה על פני שריפה ישירה ביחידת פסולת לאנרגיה (פל"א) היא הפחתה גדולה בנפח תוצר הגז המוביל להפחתה במורכבת הטיפול בגזי פליטה (Scheirs & Kaminsky, 2006). כמו כן, פירולזה של פסולת פלסטיק הפכה לתהליך בסדר גודל מסחרי וההתפתחות הטכנולוגית הציגה פוטנציאל כלכלי למימושה. הטכנולוגיה מאפשרת השבה של הידרוקרבונים בטווח של בנזין או דיזל. מכיוון שתוצרי הפירולזה יכולים להיות שונים ובטווח תוצרים גדול, מגז ועד לקוק⁴ (coke), חשוב למצוא את התנאים האופטימליים לפירולזה ואו קטליזטור המתאים בכדי להשיג תוצרים ברי שיווק. פירוק בעזרת קטליזטור מביא לתוצרת בטווח פחמנים צר יותר (תוצרת זהה יותר אחת לשנייה) בהשוואה ללא קטליזטור ומוריד את טמפרטורת התגובה (של התהליך). קיימים מספר תהליכים העושים שימוש בפלסטיק שלאחר צריכה והופכים אותם לבנזין או דיזל עם תכולת

⁴ קוק – חומר דלק, מוצק פחמני המיוצר מנפט או באמצעים אחרים. משמש בד"כ כחומר דלק בכבשנים.

גופרית נמוכה. דיזל שכזה עומד בדרישות ה-EPA לפליטות ומתוכנן במיוחד לתעשיית הטיפול בפסולת המוצקה העושה שימוש בציד מונע דיזל. כאשר המוקד הוא בפסולת פלסטיק שאינה ניתנת להשבה.

היתרונות הם:

- מאפשרת השבת פסולת שלא ניתנת למיחזור באמצעים אחרים
- מאפשרת מיחזור פסולת לא שטופה, מוצקה ומעורבת (פסולת חקלאות, יריעות חממות, צינורות השקייה)
- מאפשרת מיחזור פילמי אריזה (multilayer, laminates, coextrusions) במיוחד אלה עם רדיד אלומיניום
- רב סוגי הפלסטיק המשמשים את מוצרי הצריכה מתאימים לפירוליסה, באופן כללי ככל שהגודל של המתמיר בשרשרת הצדדית של המונומר, כך ניתן לפרק ביתר קלות את הפלסטיק, ל-PS גודל שרשרת הגבוה ביותר אחריו PVC, PP ו-PE אחרון.
- הסיבות שטכנולוגיה זאת אינה מיושמת באופן נרחב היא כתוצאה מהבעיות הידועות שלהלן:
- צורך בעבודה באצוות
- שיירים של השריפה ופחמן על גבי משטחי מחליפי החום (מחייב תחזוקה גבוה יותר)
- הידבקות של חלקיקי חול בעת שימוש בטכניקת fludized bed שהיא הנפוצה ביותר, דבר אשר מקטין את יעילות התהליך
- איכות לא מספקת של תוצר הדלק
- רמות גבוהות יחסית של עופרת (PPM 100-700) בתוצר הסופי
- היתרון הגדול של פירוליזה של פלסטיק הוא האפשרות שלה לטפל בפסולת פלסטיק לא שטופה ואו ממוינת, פסולת מזוהמת כמו פילמים (שלעיתים מכילים כ-20% אדמה/לכלוך), פילמים מרובי שכבות גם הכוללים שכבות אלומיניום וצבע, תערובות פולימרים וכו'. אימוץ של אחריות היצרן וחקיקה נוספת הופכת את הפירוליזה לאפשרות רלבנטית. הספרות מראה שמרבית הפולימרים בלחץ אטמוספרי אינם חייבים לעבור פירוליסה בטמפרטורה של יותר מ-600 מ"צ בכדי לעבור תהליך התפחמות.

5.3.2 שיטות כימיות

שיטות כימיות (כימוליזה)- בשיטה זאת נעשה שימוש בחומר כימי והיא מיועדת לפולימרים מעובים (condensation polymers) כגון-PET. לפי (Paszun & Spychaj, 1997) להלן השיטות:

- אמונוליזה- בשיטה זאת מיוצר TPA diamid בעזרת תגובה של אמוניה חסרת מים עם PET בסביבה של אתילן גליקול (EG).
 - אמינוליזה- בשיטה זאת מיוצרים TPA ו-EG. התגובה הכימית מבוצעת באמצעות תמיסת אמין מימית ראשונית. בדרך-כלל מתאלמין, אתילמין ואתנולמין בטמפרטורה בטווח של 20-100 מ"צ.
 - הידרוליזה- בשיטה זאת מיוצרים TPA ו-EG. שיטה זאת מחולקת לתת-שיטות: הידרוליזה חומצה (בעזרת חומצה גופריתית), הידרוליזה אלקלית (בעזרת NaOH) ואו הידרוליזה ניטרלית (בעזרת מים או קיטור). השיטה מיושמת בטמפרטורות ותנאי לחץ שונים.
 - גליקוליזה- בשיטה זאת מיוצרים בייס (הידרוקסיל) טראפלט ו-EG. בתהליך זה מפורק PET בעזרת אתילן גליקול, דיאתילן גליקול, פרופילן גליקול ו-דיפרופילן גליקול בטמפרטורות של 180-250 מ"צ.
 - מתנוליזה- בשיטה זאת מפורק PET באמצעות מתנול בטמפרטורות גבוהות תחת תנאי לחץ גבוה. התוצר הראשי שמתקבל דימטיל טראפלט (DMT) ו-EG.
- שיטות הכימוליזה השונות של PET על מאפייניהן מרוכזות בטבלה 2.

טבלה 2. שיטות הכימוליה של PET ומאפייניה

שיטות מיחזור כימי					קריטריוני הערכה
מתנוליה	גליקוליה	הידרוליה	אמינוליה	אמונוליה	גמישות בניצול פסולות שונות
נמוכה : פסולת תעשייתית מוגדרת מראש	בינונית	בינונית	בינונית	בינונית	
ערכים גבוהים; $t \leq 300$ $p \leq 4 \text{ MPa}$	$t \leq 280$	$t \leq 100$ Acidic, $t \leq 250$; Alkaline, ; Neutral $t \leq 300$ $p \leq 4 \text{ MPa}$	$t \leq 100$	$t \leq 200$ $p \leq 2 \text{ MPa}$	תנאי התפרקות (t - טמפרטורה) (p-לחץ)
דרישות גבוהות	קונבנציונאליות	דרישות גבוהות	בינוניות	בינוניות או גבוהות	תנאי בטיחות
מתנול רעיל		חומצות חזקות או אלקלנים	אמינים	אמונים	מתווכים קורוזיביים ואו רעילים
לסדרי גודל גדולים (כדאי)	לסדרי גודל קטנים או בינוניים (לא כדאי)	(כדאי)	?	(כדאי)	היבטים כלכליים (כולל כדאיות ניקוי של התוצר העיקרי)
נמוכה: DMT, EG	גבוהה : תערובות אוליגומרים	נמוכה : TPA, EG	?	נמוכה: TPA diamid, EG	גמישות ותוצר
חסר מידע	חסר מידע	כ-95%	כ-90%	כ-90%	יעילות תפוקה
9,553- Kcal 14,330	9,553-14,330 Kcal	4,777-7,165 Kcal	חסר מידע	חסר מידע	צריכת אנרגיה לטיפול בק"ג PET
מיושם תעשייתית; מתקנים גדולים	מיושם תעשייתית; מתקנים קטנים או גדולים	מיושם תעשייתית; TPA ברמת ניקיון גבוהה; כמויות של פסולת תשטיפים אנאורגנית.		TPA diamid ברמת ניקיון גבוהה	הערות

מקור: (Paszun & Spychaj, 1997)

הסיבה העיקרית ששיטת המיחזור הכימי אינה מיושמת בתפוצה גבוהה יותר ברחבי העולם, הינה מהסיבות הכלכליות ומחסור באספקה מובטחת של חומ"ג. יש צורך בתשתית והשקעות משמעותיות, אשר יבוצעו רק במקרה בו ניתן להבטיח כמות ואיכות קבועים. בישראל, תקנות משרד הבריאות (נכון לזמן כתיבת מסמך זה), אינן מתירות מגע ישיר של מזון ומשקאות (מלבד כזה הנשטף לפני צריכתו, כמו תותים ופטריות) עם אריזה ממוחזרת ולכן, אינם מאפשרים שימוש בטכנולוגיה זאת בישראל ליצור חומ"ג לאריזות מזון.

בניגוד לישראל, באירופה קיים הליך המפורט ברגולציה- ([Regulation 282/2008 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods](#))

שבו ניתן לאשר תהליך מיחזור של חומר בכדי שיותר לו לבוא במגע עם מזון.

בדומה לכך, בארה"ב קיימות הנחיות מנהל המזון הפדרלי (FDA) הנקראות: "Guidance for Industry: Use of Recycled Plastics in Food Packaging: Chemistry Considerations" ומאפשרות שימוש בפלסטיק ממוחזר לאריזות מזון.

בעקבות איסור השימוש בישראל, הופכת שיטה זאת ללא ישימה כך שיצור אריזות מזון מקומי מחייב יבוא של PET בתולי מחו"ל. ניתן לשער כי הסרת חסם זה, יכולה להגדיל את כדאיות הקמת מפעל מסוג זה בישראל, תוך הגדלת היקף מיחזור מקומי וחסכון בהובלה מחו"ל, הצורכת דלקים פוסילים ופולטת גזי חממה. אולם בחינה והחלטה כזו היא מעבר למחקר זה.

5.4 השבת אנרגיה

מונח המתייחס לשריפת פסולת לייצור אנרגיה בצורת חום, קיטור או חשמל. חומרים פלסטיים מכילים ערך קלורי גבוה (מאחר ומקורם גם מנפט גולמי) – כמתואר בטבלה 3, ולכן יכולים לשמש כדלק בתעשיות צרכניות אנרגיה גדולות ככבשני מלט ודוודים לייצור קיטור או חום.

טבלה 3. ערך קלורי של סוגי פלסטיק ודלקים שונים

סוג	ערך קלורי (MJ kg^{-1})
פוליתילן	43.3-46.5
פוליפרופילן	46.60
פוליסטירן	41.90
קירוסין	46.50
גז מנפט	45.20
נפט כבד	42.50
נפט	42.3
תערובת פסולת פלסטיק ביתית	31.8

מקור: (Al-salem, 2009)

ניתן לראות שערכם הקלורי של PE, PP ו-PS דומה מאד לערכם הקלורי של קרוסין ונפט. שריפת פסולת מאפשרת להפחית את כמות הפסולת בין 90-99% (Al-salem, 2009). היבטים סביבתיים: בשריפת פסולת פלסטיק נוצרים בעיקר פליטות מזהמים כמו CO_2 , NO_x ו- SO_x . שריפת פלסטיק ידועה גם כנזאת היוצרת VOC's, עשן (חלקיקים) חלקיקי מתכות כבדות, PHA's (הידרוקרבוני פוליציקלים ארומטיים) PCDF's ודיאוקסינים. רכיבים קרצינוגנים זהו בחלקיקים מרחפים בשריפת פולימרים סינטטים כגון PET, PVC, PS ו-PE. קיימות מספר דרכים לטפל בגז הפליטה (Flue Gas) מתהליכי שריפה, כמו כן, טמפרטורת השריפה מהווה פרמטר חשוב אשר מובילה לירידה ב- CO ו- N_2O ומלווה בגידול ב- NO_x . הפתרונות לטיפול בגזי הפליטה כתוצאה מהפקת אנרגיה מפ"פ, לפי Yassin et al., (2005):

- הוספת אמוניה לתא הבעירה
- קירור גז הפליטה
- ניטרול החומצה ע"י בסיס
- הוספת פחם פעיל ו-פילטריציה

בספרו של - Andrady - "*plastics and the environment*" (2003), ניתנת בין השאר סקירה על ניסוי של שריפת תערובות שונות של פסולות בעלות תכולה של עד 100% פלסטיק, בהיבטים: טמפ' הלהבה, פליטות חלקיקים, מתכות, דיאקסינים ותוצרי גז הפליטה. הממצאים הראו ששריפה בנוכחות אוויר נותנת טמפ' להבה גדולה יותר עבור 100% פלסטיק מאשר תערובות ביחס נמוך יותר של פלסטיק. שריפת 100% פלסטיק דורש מספר נמוך יותר של מולי החומר המחמצן לעומת תערובות המכילות פלסטיק בהיקף נמוך יותר. פלסטיק מייצר HCL ו- H_2S בריכוז של 1000 עד 10,000 PPM. פליטות של NO ו- NO_2 הראו קיטון קל עבור ה-100% פלסטיק ביחס ליחסים האחרים עבור גידול בריכוז מולי אוויר (יותר אוויר בתהליך). פליטות ה-CO היו נמוכות יותר ל-100% פלסטיק מאשר התערובות ביחסים אחרים, כאשר ריכוז דיאקסינים ופוראנים היה גבוה יותר עבור פסולת שהכילה פלסטיק מאשר כזאת שלא הכילה בכלל. רמות פליטה של חומרים אלה היו נמוכים יותר עבור דגימת הפסולת שלא הכילה PVC.

מתקני שריפת הפסולת מתחלקים לכאלה שמנצלים את השריפה להפקת חשמל או לחום וכאלה שלא. במחקר זה ההנחה היא שנעשה שימוש במתקן שריפה המשיב אנרגיה. מתקן השריפה האופייני מטפל בפסולת עם ערך קלורי של בין 2,150 ל-3,105 קק"ל/ק"ג, בשונה מפסולת פלסטיק המכילה כ-7,165 קק"ל/ק"ג. מתקני השריפה מהווים מרכיב עיקרי לטיפול בפסולת ביתית במדינות כמו דנמרק, שוודיה, הולנד וגרמניה, כאשר כ-7% מפסולת זאת הוא פלסטיק. (Tukker, 2002).

תיאור תהליך שריפת הפסולת: הפסולת מועברת לכבשן דמוי רשת סיבובית המוצבת במעין שיפוע, מבנה זה מאפשר הזנה מהירה בצורה כזאת שכל הפסולת נשרפת. לבסוף נשארת בוצה (slag) שמועברת לטיפול המיועד לנצל את המקטעים הפורים והלא-פורים (ferrous and non-ferrous). במספר מדינות נעשה שימוש בתוצרי הבוצה בעיקר לבניית כבישים. גז הפליטה מהארובה עובר דרך מנגנון ניקוי כדוגמת: אלקטרופילטר, סקראבר חומצי (acid scrubber), סקראבר בסיסי (caustic scrubber), סקראבר פחם פעיל ומתקן DeNOx (להפחתת פליטות תחמוצת חנקן) כל זאת בכדי לעמוד ברגולציה המתאימה. כמו למשל: דריקטיבת האיחוד האירופי⁵ 2000/76/EC למתקני שריפה. ניקוי גזי פליטות הארובה מביא ליצירת אפר מרחף ושאריות ניקוי גז אותם יש להטמין. מקטע גדול של כלורין (HCL) אשר מוזן למתקן ימצא את דרכו בשאריות הניקוי של הגז. בניקוי יבש של גז פליטות ארובה יכולות להיווצר שאריות של כ-66 ק"ג לטון אשפה נשרפת (Tukker, 2002). מידע עדכני אודות

⁵<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:332:0091:0111:EN:PDF>

הערכים הממוצעים של מתקני שריפה (מבערות) באירופה מצביע על יעילות אנרגטית של כ-41%, אנרגיה המושבת כחשמל עומדת על 26% וחום כ-74% (Eriksson & Finnveden, 2009). לכן במונחים גסים ניתן לומר שכאשר מדובר במערכת מחזור משולב המתקן יכול לייצר כ-80% חום ו-20% חשמל.

5.5 שימוש בפסולת פלסטיק בכבשני מלט

ייצור מלט דורש אנרגיה רבה שעלותה יכולה להגיע עד לכדי 25% מהמחזור העסקי ולעיתים לכדי כ-30-40% מעלות ייצורו (Mokrzycki & Uliasz-Bocheńczyk, 2003). לכן, בארצות רבות כמו אנגליה, בלגיה, הולנד ועוד נעשה שימוש בפסולת מטופלת אשר משמשת כדלק כבשנים. RDF (המתואר בסעיף הבא) המכיל פסולת פלסטיק משאריות מיחזור ותוצרי תעשייה משמש לכבשני מלט כדלק חלופי באוסטריה, בלגיה, דנמרק, גרמניה, הולנד ושבדיה (Gendebien et al., 2003). במאמרם של Eriksson & Finnveden, (2009) מצוין כי בשבדיה פסולת הפלסטיק שאינה במסגרת "אחריות היצרן" מושבת לאנרגיה, גם באמצעות כבשני מלט ונכון לשנת 2007 כ-35% מפסולת האריזות אשר הופרדו במקור שימשו להשבת אנרגיה (כ-56.5 אלף טון).

פ"פ יכולה להחליף עד כ-15% מהדלק הפוסילי שבשימוש הכבשן, מפעל המייצר מלט בהיקף של 1 מיליון טון בשנה יכול לצרוך בין 10 אלף עד ל-30 אלף טון פסולת פלסטיק בשנה⁶. בישראל נכון לשנת 2006 ייצרו מפעלי נשר כ-5.1 מיליון טונות של מלט⁷, צריכת אנרגיה לייצור טון מלט יכולה לנוע מ-764-836 אלף קק"ל/טון עבור תהליך יבש (המיושם בנשר) ועד לכדי 1.19-1.5 מיליון קק"ל/טון לתהליך רטוב (Vehlow et al., 1997). לפ"פ מעורבת יש תכולת אנרגיה של כ-7.4 מיליון קק"ל/טון כך שיותר מכ-86 אלף טון יכולים לספק צריכה שנתית מקסימלית אפשרית (לפי - 0.83 מיליון קק"ל/טון כפול 5.1 מיליון טון, כפול 15% תחלופה לחלק ל-7.4 מיליון קק"ל/טון).

היבטים סביבתיים: בהיבט הסביבתי לטיפול בפ"פ בכבשן יתרון גבוה. קיימים מספר מחקרי נמ"ח המצביעים על כך שטיפול בפסולת פלסטיק באמצעות כבשן מלט הוא פתרון מועדף על פני פתרונות תרמיים אחרים במיוחד בהיבט פליטות גזי החממה (CEMBUERU, 1999) ו- (Wollny & Schmied, 2000). כתוצאה מהחום הגבוה בכבשן (כ-1500 מ"צ), אין חשש להיווצרות פליטות מזהמים הנוצרים משריפת הפלסטיק (לא כולל טיפול מקדים בטמפ' נמוכות יותר שכן יכול לגרום לפליטות מזהמים). בנוסף, בתהליך ייצור הקלינקר שמהווה את אחד המרכיבים העיקריים למלט, חומרי ההזנה כגון: קלציט (CaCO_3), חימר (SiO_2 ו- Al_2O_3) וגבס (CaSO_4) משמשים כמעין סקראבר בכך שהם נקשרים למתכות ולאפר מרחף, זאת ללא פגיעה באיכות הקלינקר. פ"פ יכולה להחליף מינרלים המשמשים בתהליך ייצור הקלינקר, תכולת

⁶http://www.unep.or.jp/ietc/gpwm/data/t3/wp_1_1_plasticwaste_trainingmodule.pdf

⁷(ניתוח שוק המלט, 16 במרץ 2008, כנסת, רון תקווה)

המינרלים שלה יכולה להגיע לכדי 60% - 40% מהמינרלים הדרושים ליצור הקלינקר (Bureau, I. P. P. C., 2009).

היבטים כלכליים: פ"פ יכולה להחליף חלק מהפטקוק ובכך להוריד את רגישות יצרן המלט לשינויים במחירי הדלקים. התועלת ליצרן המלט מהחלפה חלקית של הפטקוק ע"י שימוש בפסולת פלסטיק יכולה להיות שווה לכ-3.4 מיליון דולר בשנה, בהנחה שמחיר 1 טון פטקוק ביצור מקומי הינו \$70⁸. פ"פ יכולה להחליף 15% פטקוק שהם שווי ערך לכ- 320 אלף טון/בשנה (הצריכה של מפעל נשר רמלה היא כ- 10,561⁹ טון/שנה שהם כ-317,940 טון/שנה).

5.6 דש"ב (RDF)

הדש"ב - דלק שמקורו בפסולת (RDF), הוא דלק מוצק המיוצר מפסולת עירונית ומפסולת תעשייתית לא מסוכנת. המרכיבים הם בעיקר פסולת תעשייתית ופסולת ביתית ממוינת, כאשר נכון לכתיבת המסמך הוא מתוכנן להיות מתוקן במסגרת תקנות התעשייה היפנית (Japanese Industrial Standards). ישנם שני סוגי RDF עיקריים העושים שימוש בפסולת פלסטיק:

- RDF (Refuse Derived Fuel) - דלק שמקורו בפסולת (דש"ב), יכול להקרא גם- SRF (Solid Recovered Fuel). הערך הקלורי שלו יכול להגיע גם ל- 4000 קק"ל/לק"ג¹⁰.
- RPF (Paper and Plastic densified Fuel Refuse-derived) - דלק המיוצר מפסולת פלסטיק ונייר המהווים את המרכיב העיקרי וחומרי הזנה יבשים אחרים. הערך הקלורי שלו יכול להגיע גם ל- 8000 קק"ל/לק"ג (UNEP, 2009) שמקבילים לתכולה האנרגטית של פחם.

פסולת הפלסטיק התרמופלסטית מהווה מרכיב מאחד לחומרים האחרים שלא ניתן לייצר מהם מבנה של פאלטות (pallets) או לבנים קטנות (briquettes). הכמות המינימלית של פלסטיק מתוך ה- RDF הינה 15% ויכולה לנוע עד לכדי 50% מההרכב מכיוון שכמות גבוהה מזו יכולה להוות בעיה בעת הכנת הפאלטות. הרכב הפלסטיק תלוי ויכול להשתנות בהתאם לדרישות המשתמשים וצורת הדלק תשתנה בהתאם לצידוד היצור.

היבטים סביבתיים: תכולה של פלסטיק המכיל חנקן, הלוגנים (Cl, Br, F), גופרית וחומרים מסוכנים אחרים, יכולים לגרום זיהום אוויר ואדמה עקב פליטות הארובה והטמנת אפר השריפה, הנוצרים משימוש בדש"ב. רכיבים אנאורגנים כמו אלומיניום בפילמים רב שיכבתיים

⁸<http://www.argusmedia.com/Petroleum/~media/Files/PDFs/Samples/Energy-Argus-Petroleum-Coke.ashx>

⁹בהתאם להצהרות נשר עבור הכרה כפרויקט CDM :

http://www.sviva.gov.il/Enviroment/Static/Binaries/Articals/PDD_1.pdf

¹⁰מתוך מצגת של חיריה "מפסולת לדלק". <http://www.hiriya.co.il/var/5976/553720-mala.pdf>

של אריזות מזון מייצרים אפר מרחף ואפר שקוע. מימן כלוריד (HCl) יכול לגרום לנזק בדמות קורוזיה לבוילרים.

תהליך ייצור הדלק כולל בד"כ שני שלבים עיקריים :

- טיפול מוקדם כולל קיצוץ והסרה של חומרים לא בעירים. טיפול זה אינו הכרחי תמיד במידה וליצור ה-RDF יש אפשרות לאסוף פסולת עם התכונות המתאימות.
- ייצור פאלטות כולל קיצוץ שני וייצור הפאלטות בטמפ' נמוכה מ-200 מ"צ.

5.7 כבשני ייצור פלדה

בישראל לא מתקיים ייצור פלדה מקומי אלא מיחזור בלבד הנעשה באמצעות תנורים חשמליים¹¹. למרות זאת, בעולם נעשה שימוש בפסולת פלסטיק (בצורת פאלטות) המשמשת להזרקה בכבשנים (blast furnace). ביפן, בעיקר כתוצאה מחוק האריזות שחוקק בשנת 2000, עושים שימוש בפסולת פלסטיק כתחליף לקוק (COKE) מבוסס פחם. מפעלי המתכת מנצלים כל אחד קיבולת של בין 25 ל-50 אלף טון בשנה ונכון לשנת 2006 קיבולת המיחזור בשיטה זאת הגיעה לכדי 225 אלף טון בשנה.

ככל הידוע בישראל נעשה שימוש ב-PET COKE, המיוצר מתזקי נפט, לא נראה שבארץ ייוצר בקרוב קוק מפחם ולכן אפשרות זאת לא נראית סבירה ליישום בישראל.

5.8 גזיפיקציה משולבת פחם (IGCC)

פסולת פלסטיק ניתנת לשילוב במתקן גזיפיקציה ליצור חשמל במחזור משולב (IGCC) שעושה שימוש בפחם כדלק. פסולת הפלסטיק יכולה להיות משולבת בהיקף של כ-20% מכלל הדלק, תוך העלאת יעילות המתקן בכלכליות המשתווה לזו של הפחם, בהנחה שמחירו של פחם לא יותר מ-\$2 לטון מעל מחיר פסולת הפלסטיק (Campbell et al., 2001).

6 הערכת הרכב וכמות פסולת פלסטיק בישראל

בחלק זה של העבודה נסמכנו על נתונים מחו"ל וכן על הערכות שהתקבלו מנתונים בישראל.

6.1 הרכב וכמות פסולת פלסטיק בעולם

פסולת הפלסטיק מהווה בין 10% ל-17% ממשקל הפסולת העירונית. מרבית פסולת הפלסטיק מקורה באריזות אשר מהוות בין 60% ל-70% מסך פסולת הפלסטיק. הפולימרים העיקריים הנוכחים בפסולת הביתית הם LLDPE/LDPE, PP ו-HDPE אשר מהווים כ-60% מפסולת הפלסטיק.

¹¹מקור : התכתבות ב-06.03.12 עם אלכסנדר בוך, מינהל תעשיות - משרד התמ"ת.

6.1.1 שיעור פסולת פלסטיק בעולם

מסקירת הנתונים על היקף פסולת הפלסטיק בעולם כפי שמופעים בטבלה 3, עולה כי משקלה מסך הפסולת העירונית המוצקה עומד על בין 10% ל- 17%.

טבלה 4. שיעור פסולת הפלסטיק מסך משקל הפסולת הביתית במקומות שונים בעולם

אזור/מדינה	שיעור מסך הפסולת (מהמשקל)	מקור מידע	נכון לשנת
EU-27 ¹²	16.8% מהפסולת העירונית המוצקה (פע"מ)	EUROSTAT	2008
	10.5%-13.2% ממשקל הפסולת בפחי משקי הבית	(Council of Europe) (,2007)	2003-2006
ארה"ב	12.4% ממשקל הפע"מ	מתוך דו"חות ה-EPA (2011)	2010
סין	10% מהפסולת העירונית וצפויה לגדול עד שנת 2030 לכ-14%	(WORLD BANK, 2005)	2000
ישראל	13% מהפסולת הביתית	(שלדג, 2005)	2005

6.1.2 מקורות פסולת הפלסטיק

כאשר בוחנים את מקורות הביקוש וצריכת הפלסטיק לפי סקטור, ניתן לראות בטבלה 5 שהאריזות מהוות שימוש עיקרי לפלסטיק, בסביבות ה-30% מסך הביקושים.

טבלה 5. שימושים וביקושים לפלסטיק בעולם

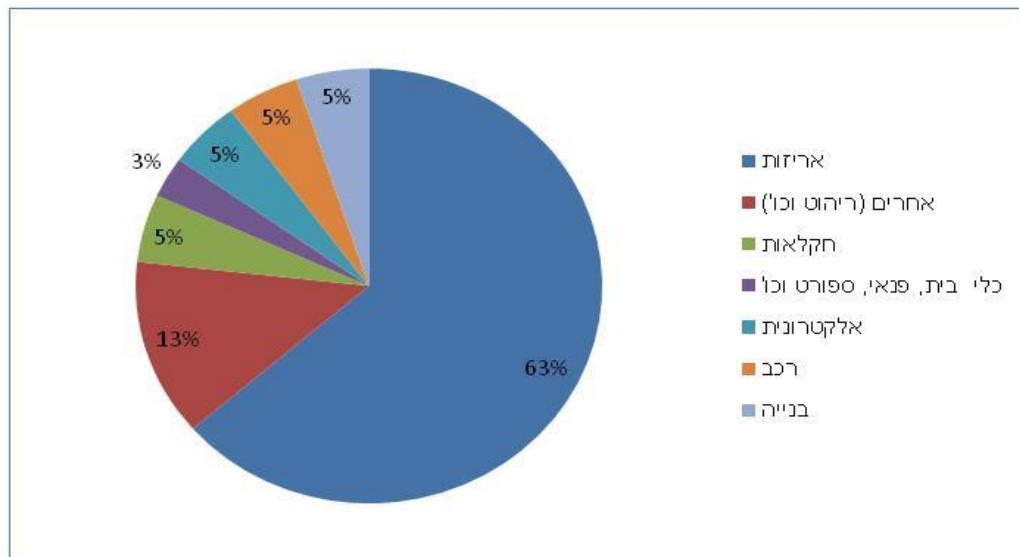
שימושים/סקטור	פולין אוסטריה – צריכת פלסטיק בהתייחס לסקטור (2004)	EU27, נורווגיה ושווייץ – הביקוש לפלסטיק לפי סקטורים (2008)	סין - יחס שימושים בפלסטיק לפי תחומים (2000)	ארה"ב- שימוש בפלסטיק למוצרים לפי תעשייה (2000)
אריזה	21%	38%	34%	26%
בנייה	21%	21%	12%	22%
אחרים (תעשייה, חקלאות, ריהוט, ציוד רפואי, מוצרים ביתיים וכו')	58%	42%	54% (מתוכם 25% ליצור מוצרים ו-13% לחקלאות)	52%

מקורות: (2007), Zhang et al., (2007), Bogucka & Brunner (2006), OECD (2006), Hannequart (2004)

¹² Supertex Consortium- <http://www.eco-supertex.eu/upload/D7.9%20-%20Neswletter1.pdf>

יש לציין כי לא כל פסולת הפלסטיק הנוצרת ע"י סקטורים אלה, מגיעה לזרם הפסולת העירונית, אלא גם ישירות למיחזור (כמו בפסולת באיכות גבוהה, מהתעשייה) או להטמנה מיוחדת (למשל במקרה של פסולת רפואית). לכן, כשבוחנים את המקורות להיווצרות פסולת הפלסטיק, הנתונים באנגליה לשנת 2000, מראים ש-67% מפסולת פלסטיק מקורה בפסולת עירונית מוצקה, 21% ע"י מערכות הפצה ותעשייה והשאר מאלקטרוניקה, תעשיית הרכב, בנייה וחקלאות (APME, 2002). לא זו בלבד שחלק עיקרי משימוש בפלסטיק מיועד לאריזות, הן גם מהוות חלק משמעותי מפסולת הפלסטיק. ממסמך שפורסם ע"י המכון למדיניות סביבתית אירופאית (PLASTICS EUROPE, 2009) עולה כי מרבית פסולת הפלסטיק שלאחר צריכה (post-consumer) במדינות ה-EU27, נורווגיה ושווייץ בשנת 2008, הינה אריזות ועומדת על כ-63% מכלל פסולת הפלסטיק, כמפורט באיור 4.

איור 3. התפלגות פסולת הפלסטיק שלאחר צריכה במדינות ה-EU27, נורווגיה ושווייץ בשנת 2008



Hannequart (2004) מציין שכ-70% מפסולת הפלסטיק המושלכת ע"י משקי הבית היא פסולת אריזות, המחולקות לקטגוריות של פלסטיק קשיח הכולל: בקבוקים ופילמים, ופלסטיק גמיש כגון שקיות ועטיפות. מנתוני התפלגות הפסולת שלאחר צריכה לעומת נתוני צריכת הפלסטיק כפי שמופיעים בטבלה 4, ניתן לראות כי קיימים הבדלים גדולים בין היקף הפלסטיק הנצרך העומד על כ-30% מסך הביקוש לבין פסולת האריזות המהווה כ-60-70% מסך פסולת הפלסטיק. הסיבה לכך היא ש-85% מאריזות הנאספות מפסולת ביתית נזרקות באותה השנה בה הן מיוצרות (Hannequart, 2004).

בהיבט הרכב פסולת האריזות, בצרפת לדוגמה היא מורכבת (משקלית) בעיקר ממכלי משקה כ-40% ואחריהם פילמים, שקיות וכו' המוערכים בכ-30%, כמפורט בטבלה 6.

טבלה 6. הרכב פסולת אריזות פלסטיק בצרפת

מוצר פלסטיק	אחוז (משקל)
בקבוקים ומיכלי משקה	39%
פילמים, שקיות ושקים	27%
צנצנות, קופסאות וצינוריות (tubes)	18%
תיבות	6%
אחר	10%

מקור: (OECD, 2011)

אורך חיי מיכלי משקה ואריזות עומד על כשנה, מוצרי צריכה ויישומים לתחבורה כ-5 שנים, כ-10 שנים לריהוט, כלי בית ומוצרי חשמל ואלקטרוניקה וכ-50 שנה או יותר כחומרי בנייה ובניין (Alter, 2005).

6.1.3 פסולת פלסטיק לפי פולימרים

כאשר מתבוננים על נתוני צריכת פלסטיק לפי פולימר, במדינות אירופאיות כגון פולין ואוסטריה (Bogucka & Brunner, 2007), אפשר לראות בטבלה 7 שמרבית הצריכה היא של פוליאוליפינים - פוליאטילן (HDPE ו-LDPE) ופוליפרופילן (PP).

טבלה 7. אחוז צריכת הפלסטיק לפי סוג פולימר - פולין, אוסטריה (2004)

פולימר	אחוז מכלל הפלסטיק הנצרך
LDPE	14.7-16.5
PP	16.1
HDPE	11.1
PVC	12-15
PET	3.9-7.8
EPS (expended polystyrene) +PS	5.9-6.4

מקור: Bogucka & Brunner (2007)

הנתונים דומים בהיבט היחס בין הפולימרים השונים, לנתוני הרכב הפולימרים מתוך פסולת הפלסטיק העירונית כפי שמופיעים בטבלה 8, ע"פ נתונים שנלקחו מתוך דו"ח של (2004) Hannequart.

טבלה 8. הרכב פולימרים מתוך פסולת פלסטיק עירונית במערב אירופה

אחרים	EPS+PS	PET	HDPE	PP	LDPE/LLDPE	
12.5%	10.9%	11.7%	17%	20%	20.6%	אחוז מתוך פסולת הפלסטיק

מנתוני טבלה 8 ניתן לראות כי שלושת הפולימרים העיקריים בפסולת הביתית הם LLDPE/LDPE, PP ו-HDPE אשר מהווים כ-60% מפסולת הפלסטיק שמקורה במשקי

הבית. אם מוסיפים לכך PET (שבישראל המיכלים הגדולים מושלכים לכלובי איסוף נפרדים והקטנים, כחלק מחוק הפיקדון נאספים בנפרד), ששת החומרים הטרמופלסטיים¹³ האלו מהווים קרוב ל-90% מהפלסטיק בפ"פ, וכ-80% מסך פסולת הפלסטיק הכללית (OECD, 2011).

6.2 יצור ויבוא פלסטיק בישראל

לפי הערכות שונות יוצרו בישראל בשנת 2010 כמיליון מוצרי פלסטיק, מתוכם 750 אלף טון יוצרו מחומר גלם (ח"ג) מיובא ו-250 אלף טון מח"ג מקומי (כמו אתילן, המיוצר ע"י חברת כרמל אוליפינים בע"מ) (התמ"ת, 2010). מתוך מיליון הטון שיוצרו כ-500 אלף טון יועדו לשימוש מקומי (עוזי קלברמן, ראיון אישי, 28.2.2012) וביחד עם מוצרים מוגמרים וארוזים מיובאים, הם מהווים את הפלסטיק בשוק הישראלי. היקף הייבוא וייצור הפלסטיק בישראל, לפי פולימרים, מוצג בטבלה 9.

טבלה 9. היקף ייבוא וייצור חומרי גלם (אלפי טון) לייצור פלסטיק, לפי סוג חומרי גלם לשנת 2010

סוג הפלסטיק וסה"כ יבוא	פולימר	אלפי טון בשנה
ייבוא פוליאתילנים	LDPE	122
	HDPE	161
	אחר	44
	סה"כ	327
ייבוא פוליפרופילנים	יבוא הומופולימר PP	60
	יבוא קופולימר PP	25
	אחר	4
	סה"כ	89
ייבוא פוליסטירנים	PS	31
	(ABS, EPS, אחרים)	23
	סה"כ	54
	PVC	53
ייבוא וינילים	אחר	12
	סה"כ	65
ייבוא אחרים	PET	63
	אחר (בעיקר אקריליים, PC, פוליאסטרנים ונילון)	155
	סה"כ	218
	סה"כ ייבוא ח"ג	~750
ייצור מקומי ח"ג	סה"כ ייצור מקומי ח"ג	~250
	סה"כ	~1,000

מקור: אתר האינטרנט של התמ"ת – סקירת תחום פלסטיק וגומי שנת 2010

לפי נתוני שימוש וייצור פלסטיק בעולם, בין כ-30% ל-40% מהייצור מיועד לצרכי אריזה, לפיכך, בישראל, לפי חישובים אלה, מדובר על בין 150-200 אלף טון אריזות, בשעה שייבוא אריזות מוגמרות¹⁴ זניח בהיקפו.

¹³ פולימרים תרמופלסטיים הופכים לנוזל בעת חימום ו"קופאים" למצב מוצק בעת קירור, לעומת פולימרים תרמוסטטים אינם ניתנים למיחזור, עקב תכונותיהם הפיזיקליות והמחקר אינו עוסק בהם.

6.3 הרכב והיקף פסולת הפלסטיק בישראל

6.3.1 אריזות – מיכלי משקה, שקיות ואחרים

פסולת האריזות בישראל מהווה יותר מ-80% מכלל פסולת הפלסטיק הנוצרת, (אם לא ניקח בחשבון את פסולת הפלסטיק התעשייתית) והכמות שלה מוערכת בהערכה גסה בכ-250 אלף טון בשנה, ממנה ממוחזרים בין 12% ל-15%.

למרות הערכה של 250 אלף הטון בשנה, מנתוני הייצור המבוססים על אחוז ייצור אריזות המקובל בעולם מסך ייצור הפלסטיק, עולה כי היקף ייצור אריזות בישראל עומד על 150-200 אלף טון בשנה.

מאידך קיים נתון אחר, גבוה יותר, המתייחס לשנת 2010 ומעריך כי מידי שנה נכנסות לשוק כ-250 אלף טון אריזות פלסטיק המיוצרות מקומית (אילון וחוב', 2010) מספר המראה גידול תיאורטי של כ-60% בין השנים 1999 ל-2010 המהווים גידול שנתי של כ-4.5%. נתון זה קרוב לשיעור הגידול השנתי בצריכת פלסטיק בעולם, העומד על -5%.

בהתאם להערכות שונות המבוססות על נתונים שונים שנאספו ומפורטים בטבלה 10, פסולת האריזות מחולקת כלהלן:

- מיכלי משקה - משקל מיכלי משקה המסולקים מידי שנה בישראל אם במסגרת חוק הפיקדון, כלובי האיסוף ו/או מיכלי איסוף אשפה רגילים עומד על כ-41 אלף טון. מתוכם נאספים במסגרת חוק הפיקדון וכלובי איסוף הבקבוקים כ-19 אלף טון המהווים כ-45% מפסולת מיכלי המשקה. מרביתם מסוג PET, ששיעור מיחזורו מזרם הפ"פ גבוה יחסית לפולימרים אחרים. מיכלי המשקה שנאספים מהווים כ-12.5% מסך האריזות המיוצרות בשנה אם נלקחת בחשבון ההערכה הנמוכה יותר של 150 אלף טון ו-7.6% עבור ההערכה של 250 אלף טון אריזות בשנה.
- שקיות - שקיות ה-PE המיוצרות בישראל בהיקף של כ-2 מיליארד בשנה, מייצרות פסולת של כ-30 אלף טון בשנה. נתון המבוסס על מקורות שונים, וזהה למקובל בעולם - צריכה ממוצעת לאדם של כ-300 שקיות בשנה (Ayalon et al., 2009).
- אריזות אחרות – כל האריזות שאינן מיכלי משקה ואו שקיות. היקף הפסולת השנתית מהם עומד על 80-180 אלף טון.

¹⁴ אריזות מוצר ואריזות שניוניות ושלישוניות. אריזה ראשונית: אריזה המכילה את המוצר הסופי עצמו; אריזה שניונית: אריזה המכילה קבוצה של מוצרים ארוזים באריזה ראשונית (כגון: קרטון חלב ועטיפות "חובקות"), משמשת לשינוע המוצר (כגון תיבות פלסטיק ליוגורטים); אריזה שלישונית: אריזה המכילה מספר אריזות שניוניות מלאות במוצרים (כגון: משטחי עץ, יריעות פלסטיק לאיגוד אריזות משניות על משטחים)

טבלה 10. היקף פסולת ומיחזור אריזות בישראל

קטגוריה	פירוט	באלפי טון לשנה	חומר	ביאור
פסולות מיכלי משקה	מיכלי משקה שאינם בחוק הפקדון	35	PET	לפי 50 גרם למיכל. נכון ל-2010.
	מיכלי משקה בחוק הפקדון	6	PET	לפי 25 גרם למיכל. מבוסס על כ-30% מ-745 מיליון (אלומיניום, זכוכית ופלסטיק) מיכלים שנמכרו והם שבמסגרת חוק הפיקדון. נכון ל-2010.
	סה"כ שיעור פסולת מיכלי משקה פלסטיק	41	PET	
פסולת מיכלי משקה שנאספה במסגרת כלובי איסוף וחוק הפיקדון	מיכלי משקה שאינם בחוק הפקדון	15	PET	לפי 50 גרם למיכל. מבוסס על הערכות של אל"ה לאיסוף של כ-300 מיליון מיכלי משקה מתוך 700 מיליון מיכלי משקה שנמכרו. לפי נתוני אל"ה אחרים נאסף נכון ל-2011 כ-12.5 טון - סטייה של כ-20% פחות, מהנתון שנלקח בחשבון.
	מיכלי משקה בחוק הפקדון	4.25	PET	לפי 25 גרם למיכל. מבוסס על איסוף כ-170 מיכלי פלסטיק שבמסגרת חוק הפיקדון.
	סה"כ פסולת פלסטיק מיכלי פלסטיק שנאספת למיחזור	19.25		
שיעור מיחזור מיכלי משקה	שיעור מיחזור מיכלי פלסטיק משקה מסך מיכלי פלסטיק שנמכרים, רובם מסוג PET	47%		
	שיעור מיחזור מיכלי פלסטיק משקה מסך האריזות	7.6%-12.5%		מבוסס על 150-250 אלף טון אריזות מיוצרות בשנה.
פסולת שקיות פלסטיק	סה"כ כמות פסולת אריזות פלסטיק	30	LDPE	בהנחה ש-30 אלף טון המיוצרים בשנה, נצרכים באותה השנה.
פסולת אריזות פלסטיק	סה"כ כמות פסולת אריזות פלסטיק מיוצרת בשנה	150-250	PE, PET, PP, PS	- ערך נמוך מבוסס על הערכות כי 30% מיוצר הפלסטיק העומד על חצי מיליון טון, הוא אריזות המיועדות לשימוש מקומי. - ערך גבוה לפי הערכות מתוך "מסמך המלצות לקראת גיבוש מדיניות כוללת לטיפול בפסולת אריזות" (מוסד נאמן, 2010), בהנחה שכל המיוצר מושלך לפסולת באותה השנה.
שיעור מיחזור כולל	סה"כ כמות פלסטיק ממוחזרת בשנה	40-45	PET, PE	למרות שידוע שמתקיים מיחזור בסדר גודל של 50-80 אלף טון, לצורך החישוב נלקח נתון הביניים, לפי מסמך המלצות של מוסד נאמן 70% מהממוחזר הינו אריזות השאר בעיקר יריעות לכיסוי חממות.
	סה"כ שיעור מיחזור אריזות מסך פסולת אריזות מיוצרת בשנה	11%-21%		- בהנחה ש-70% מ-40-45 אלף טון הממוחזרים הן אריזות. - הערך 21% מהווה הערכת חסר מכיוון שקיימות אינדיקציות שכבר בשנת 2000 היקף פסולת האריזות עמדה על 200 אלף טון. - יעד מיחזור הפלסטיק עפ"י חוק האריזות לשנת 2015 עומד 22.5%.

היקף הטיפול בפסולת אריזות - מיחזור פסולת אריזות: בהעדר נתונים מסודרים ובהעדר הגדרות מדויקות, עפ"י ניתוח נתוני המיחזור שבטבלה 9 ההערכות האופטימיות ביותר מדברות על מיחזור של כ-21% מסך האריזות, אולם, סביר להניח ששיעור זה הוא רחוק מהערכה של היקף המיחזור בפועל. בעבודה זאת הנחנו כי היקף המיחזור של אריזות הפלסטיק כיום בישראל הוא בין 12%-15%.

היקף המיחזור במפעלי המיחזור מתבסס על הערכות שונות כלהלן:

- מפעלי המיחזור- צריכת פסולת פלסטיק למיחזור ע"י מפעלי המיחזור (כ-5 גדולים המעבדים בסביבות 10 אלף טון לשנה ו-10 בינוניים המעבדים בסביבות 5 אלף טון בשנה), נעה בין 30 ל-80 אלף טון בשנה. טווח גדול אשר נובע כנראה מהכללה או אי הכללה של פסולת ופחת מתעשייה ששיעור המיחזור ממקורות אלה בד"כ גבוה במיוחד ועמד נכון לשנת 2004 במדינות ה-EU על 90% מכלל שאריות הפלסטיק של התעשייה (OECD, 2011).
- המשרד להגנת הסביבה- על פי מקורות מהמשרד להגנת הסביבה (קאופמן, פגישה אישית, 26.12.11) מיחזור ע"י מפעלי המיחזור בשנת 2009 עמד על 30 אלף טון. נתון שבמידה ו-70% ממנו אכן מקורו מאריזות תואם את היקף מיכלי המשקה למיחזור ועוד אריזות מסוגים אחרים כמו שקיות ואו יריעות חממות.
- מסמך המלצות לטיפול בפסולת אריזות- מסמך ההמלצות של מוסד נאמן (אילון, 2010) מדבר על סך מיחזור פלסטיק של 40-45 אלף טון ש-70% ממנו אריזות והשאר יריעות חממות.
- מקור מהתעשייה - מפעלי המיחזור ממחזרים בין 50 ל-80 אלף טון בשנה הכוללים פסולות ושיירי מפעלי תעשייה (עוזי קלברמן, ראיון אישי, 28.2.2012).

התשתיות הקיימות כיום אינן מספיקות בכדי להגיע ליעד ולכן אם ברצוננו להרחיב יש לבחון את העלויות הישירות והסביבתיות של כלל הפתרונות הקיימים, לרבות הפקת אנרגיה. הנתונים מראים שקיימת אי וודאות מסוימת לגבי פוטנציאל היקף הפסולת המיועדת למיחזור האריזות. מפעלי המיחזור אינם עובדים בקיבולת מלאה/מעדיפים פסולת באיכות הומגנית מהתעשייה ושהכלכליות הידועה להפעלת מפעל מיחזור עומדת על כמינימום 10 אלף טון בשנה (עוזי קלברמן, ראיון אישי, 28.2.2012). לצד זה, פסולת האריזות שאינה באיכות המתאימה למיחזור (יכולה להגיע עד לכ-30% מפסולת פלסטיק נתונה (WRAP, 2008)) תהיה ככל הנראה בהיקף משמעותי מאחר ואמורים להתווסף בשנים הקרובות מנגנונים וטכנולוגיות מיון.

היבטי אי הוודאות ואיכות פסולת נמוכה מחייבים אימוץ פתרון מבוצר (לא ריכוזי כמו למשל עידוד הקמת מפעל מיחזור שתלוי בהיקף ואיכות הפסולת) המתבטא בקידום מגוון פתרונות אחרים. פתרונות נוספים למיחזור, שיכולים להסתמך על תשתיות ומתקנים קיימים או כאלה המטפלים גם בסוגי פסולת אחרים (כגון RDF למלט ופסולת לאנרגיה).

6.3.2 פסולת חקלאית – יריעות

פסולת פלסטיק חקלאית בישראל עומדת על כ-12 אלף טון בשנה. מספר זה מתחלק ל-7 אלף טון יריעות המוחלפות מידי שנה, צנרת כ-5 אלף טון והשאר אריזות. מוצרי הפלסטיק המשמשים את סקטור החקלאות מהווים כ-4% ממוצרי הפלסטיק הנצרכים באירופה וארה"ב, מרבית פסולת הפלסטיק החקלאית מורכבת מיריעות פלסטיק (Briassoulis et al., 2012). היריעות עשויות מ-PE שאליהם מוסיפים בעיקר EVA¹⁵ שיכול להגיע עד לכדי כ-15% מהרכב היריעה. אחד המאפיינים של פסולת זאת שהיא הומוגנית בהרבה מפסולת הפלסטיק שמגיעה מזרם הפסולת העירונית. היריעות מתחלקות ליריעות לחיפוי קרקע (מאלצ'ים) שמהם מיוצרים כ-5 אלף טון (כולל רשתות (הצללה וחרקים)) ומושלכים בסדר גודל של 1 אלף טון בשנה (אסקווירה, ראיון אישי, 30.5.12), יריעות מנהרות נמוכות ויריעות חממה. פסולת היריעות מאופיינת בכך שהיא יכולה להכיל שאריות לכלוך וחומר אורגני כאשר משקל המוצקים יכול להגיע לכדי כ-42% ממשקל היריעה עבור יריעות חיפוי קרקע ועד לכ-7% ממשקל היריעה עבור יריעות לחממות ואריזות פלסטיק אחרות לחקלאות. דבר זה מחייב את יריעות חיפוי הקרקע בטיפול יחודי לסילוק המזהמים בכדי להביאם למצב נקי ככל האפשר. ממחקרים שבוצעו נמצא שפסולת זאת בעלת רמות נמוכות של כלור ומתכות כבדות מזה שנדרש לשימוש פוטנציאלי עבור תעשיית המלט. ניהול פסולת מסוג זה הינו אטרקטיבי מכיוון שהוא נוצר ברמה איזורית, הומוגני, מרוכז באיזור גיאוגרפי ספציפי ומתהווה בתקופת זמן מסוימת בכל שנה (במהלך מספר שבועות).

לצורך הערכת כמות פסולת היריעות נעשה שימוש במידע המופיע במתווה ליישום תוכנית האב לטיפול אזורי בפסולת חקלאית של המשרד להגנת הסביבה (משרד הגנ"ס, 2012), המבוסס על הערכות משנים שונות. לפי הנתונים היקף כמויות פסולת הפלסטיק לסוגיה המורכבת מ: יריעות (כ-64% מהסה"כ), אריזות וצנרת עומדת על כ-11 אלף טון בשנה, ומתפלג כמפורט בטבלה 11.

טבלה 11. התפלגות פסולת פלסטיק חקלאית לפי מחוזות וסוגי הפסולת (טון/שנה)

מחוז	אריזות	יריעות	צנרת
דרום	82	4068	1161
חיפה	6	179	1500
ירושלים	42	120	472
מרכז	9	2217	533
צפון	16	264	72
סה"כ	155	6848	3738

מקור: (משרד הגנ"ס, 2012)

¹⁵ EVA - ראשי תיבות של Ethylene-Vinyl Acetate. פולימר המשמש כתוסף לחומרים גמישים ורכים, שקוף ועמיד ל-UV.

המספרים קרובים מאד להערכות המבוססות (בהנחה שתכנית האב הגדירה את היריעות כיריעות החממה) על היקף היריעות המיוצרות ונמכרות מידי שנה בישראל, כ-7 אלף טון. סימוכין נוספים לכך נמצא ע"י מכפלת משקל יריעת חממה העומד על כ-150 ק"ג/דונם בשטח החממות בישראל. ממנה נקבל כי המשקל עומד על כ-6 אלף טון, המאשרים את ההערכות השונות.

6.3.3 פסולת אלקטרונית

פסולת פלסטיק מסוג זה צפויה להגיע עד לשנת 2015 (שנה בה יהיה חובה למחזר פסולת אלקטרונית) לכ-18.5 אלף טון בשנה. מרבית הפסולת היא מסוג PP, PS ו-אחרים. פסולת אלקטרונית וציוד אלקטרוני הנקראים (WEEE Waste Electrical and Electronic Equipment) (E-waste) הם מונחים המתארים מכשירים העושים שימוש בחשמל. E-Waste משמש להגדרת מוצרים אלקטרוניים כגון: מחשבים, טלוויזיות וטלפונים סלולרים בשעה ש- WEEE מתייחס גם למוצרים שבאופן מסורתי אינם מזוהים כמוצר אלקטרוני כגון: מקררים ותנורים.

לפי הערכות של אדם טבע ודין והמשרד להגנת הסביבה, היקף הפסולת האלקטרונית הנוצרת בשנה בישראל עומד על 75-100 אלף טון בשנה, כאשר לפי אותן הערכות, ישראלי מייצר כ-14 ק"ג פסולת אלקטרונית בשנה (אט"ד, 2011). מספר זהה למקובל באירופה (Goosey, 2004) שבה שיעור הגידול ביצור פסולת זו עומד על 3%-5% בשנה. נכון לכתיבת עבודה זאת טרם אושרה "הצעת חוק הפחתת פסולת אלקטרונית ומיחזור" שמטרתה להפחית את כמות הפסולת האלקטרונית המועברת להטמנה. החוק קובע כי עד 2015, יושגו יעדי המיחזור שלהלן:

- מוצרים גדולים (מקרר, מכונת כביסה וכו') – 80%
 - מוצרים דיגיטליים וביתיים (מחשב, טלפון, טלפוניה, טאבלטים וכו') – 75%
 - מוצרים מסוג נוסף (רכבות, צעצועים, תאורה, רכבים חשמליים) – 70%
- מסגרת החוק קובעת שהיבואן, יצרן ואו משווק יהיו מחויבים לנהל רישום של הציוד המועבר למיחזור כולל משקלו.

טבלה 12. מכירות "מוצרים לבנים" בישראל נכון לשנת 2011 באלפים, משקלם הכולל באלפי טון, האחוז המשקלי היחסי ומשקל הפלסטיק הצפוי בהם באלפי טונות

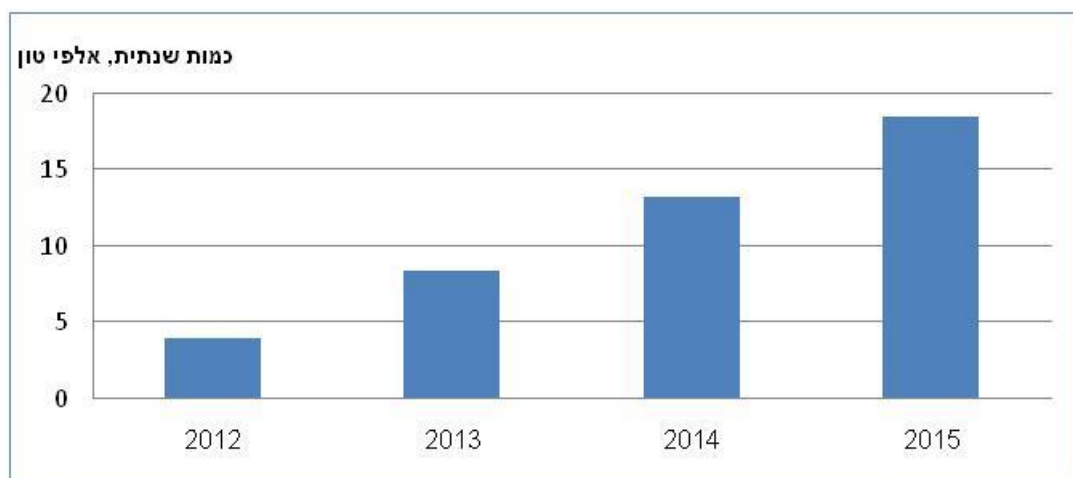
מקרים	יעד מיחזור עד 2015	יחידות באלפים שיובאו	משקל כולל באלפי טון	משקל הפלסטיק הצפוי באלפי טונות*
מקרים	80%	279	10	2
מכונות כביסה		275.5	18	3.6
מיבשי כביסה		52	0.5	0.1
מדיחי כלים		82	4	0.8
טלויזיות	70%	741	22	4.4
וידאו DVD+		424	2	0.4
סה"כ			56	11.2

מקורות: (אתר רשות המיסים - יבוא מוצרים לשנת 2011), (Robinson, 2009), * פלסטיק מהווה כ-20% מהמשקל

מבדיקת התפלגות יחסי המשקלים של המוצרים השונים ניתן לראות בטבלה 12 כי מרבית משקל המוצרים הנמכרים הינו מסוג המוצרים שיעד המיחזור שלהם עד 2015 הוא כ-80%. נתון זה מבוסס על ההנחות הבאות:

- לא כל המוצרים הנרכשים באותה שנה מחליפים מוצרים המושלכים לפסולת.
 - מידי שנה מתווספים כ-40 אלף משקי אב חדשים.
 - אורך חיי המוצרים הגדולים כגון מקררים הוא כ-10 שנים, טלויזיות כ-5 שנים ומחשבים שלא נלקחו כאן בחשבון בעלי אורך חיים קצר יותר של כ-3 שנים (Robinson, 2009).
- לפי הערכות אלה, פ"פ יכולה להגיע לכדי כ-18.5 טון לשנת 2015 בהתבסס על כמות שנתי צפויה לפי 100 אלף טון פסולת אלקטרונית בשנת 2012, יעדי האיסוף והגידול הצפוי בפסולת של כ-5%, כמתואר באיור 5.

איור 4. סך פסולת הפלסטיק הצפויה שתאסף מפסולת אלקטרונית בהתאם ליעדי האיסוף והגידול הצפוי בשנים 2012-2015



למרות שאיסוף הפסולת האלקטרונית יהיה מנדטורי רק בשנת 2015, למטרות העבודה נתייחס לפסולת הפלסטיק האלקטרונית כאילו היא כבר נוכחת בזרם הפסולת.

סוגי הפלסטיק המרכיבים את הפסולת האלקטרונית: מעבודה שהוכנה עבור הממשלה הקנדית ובדקה בין השאר את הרכב החומרים של פסולת מוצרים לבנים (מקררים, מכונות כביסה וכו') עולה כי יותר מ- 50% מחומרי הפלסטיק משויכים לסוגי הפלסטיק הנפוצים, כפי שניתן לראות בטבלה 13, (CAMA, 2005).

טבלה 13. התפלגות סוגי הפלסטיק של פסולת "מכשירים לבנים"

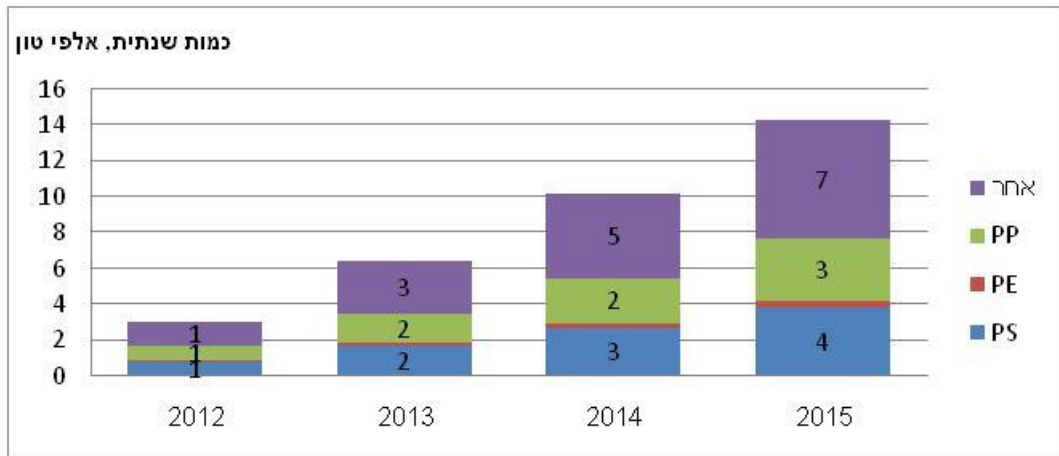
סוג החומר	אחוז
Polypropylene (PP)	33%
Polyurethane (PUR)	19%
PS&HIPS	15%
ABS	10%
Other plastics	10%
Asst. Mixed Plastics	9%
PVC	5%
Rubber	4%
Fiber & Paper	1%

מתוך: (CAMA, 2005)

במחקר שהשווה את מיחזור פסולת הפלסטיק לעומת השבת אנרגיה של פסולת מקלטי טלוויזיה באמצעות נמ"ח נמצא שפלסטיק מהווה כ-10.3% ממשקל המכשיר, ה-PS מהווה כ-6%, PVC כ-3.5 אחוז ו-PE כ-1% (Dodbibia et al., 2008). מתוך משקל של כ-30 ק"ג למקלט בעל מסך 25 אינץ', תכולת הפלסטיק עומדת על כ-1.8 ק"ג של PS, 1.05 ק"ג של PVC ו-0.3 ק"ג של PE.

איור 6 מציג את היקף סוגי פסולת הפלסטיק הצפוי להיאסף מתוך סך משקל הפסולת האלקטרונית. לפי יעדי האיסוף והגידול הצפוי של 5% מידי שנה בהיקף הפסולת, בהנחה ש-40% ממשקל הפסולת האלקטרונית השנתית נובע מטלוויזיות ניתן לשער שבשנת 2015 יושלכו כ-2.2 אלף טון PS, וכ-0.4 אלף PE. עבור המוצרים הלבנים המהווים כ-57% מכלל המשקל יושלכו כ-3.5 אלף טון PP וכ-1.6 אלף טון PS ועוד כ-5.5 אלף טון פלסטיק מעורב או מסוג אחר.

איור 5. התפלגות סוגי הפלסטיק של פסולת טלויזיות ומכשירים לבנים שאמורים להיאסף לפי יעדי האיסוף לפסולת אלקטרונית



6.3.4 רכבים מגריטה

כמות פסולת הפלסטיק שיכולה להאסף מגריטת רכבים הינה זניחה ועומדת על כ-1 אלף טון בשנה. בישראל קיימת תוכנית לגריטת רכבים שבה רכב ישן נמסר לגריטה תמורת תשלום, המהווה בעצם את התמריץ לסילוק הרכב באופן בלעדי באפיק זה. 12% ממשקל רכב מסולק הוא פלסטיק (GHK – Bio Intelligence Service, 2006) כ-100-140 ק"ג פלסטיק לרכב, המורכב מכ-15 סוגי פלסטיק שונים (מהפלסטיקים הזחים לזה בפסולת העירונית מדובר בעיקר ב-PP ו-PE) מלבד רכיבי הפלסטיק השונים העשויים מתערובת של סוגי פלסטיק שונים (ובשל כך מקשים על מיחזורם). המגינים עשויים מ-PP בלבד ושוקלים בממוצע כ-10 ק"ג ומהווים כ-40 אחוז מכלל הפלסטיק ברכב¹⁶. נכון לשנת 2010 נגרטו בישראל כ-11 אלף רכבים שייצרו כ-1.1 אלף טון פלסטיק מתוכו כ-0.5 טון מסוג PP. בנוסף לרכבים הנגרטים מתוכנית הגריטה, קיימת גם גריטה טבעית של רכבים מתאונות (אינם עומדים בקריטריון הגיל עבור הגריטה) אשר יכולה לספק מספר זהה, מידי שנה (המשרד להגנת הסביבה, 2008). סה"כ ניתן להעריך כי היקף פסולת הפלסטיק מרכבים עומד על כ-2 אלף טון בשנה.

6.3.5 הערכות המבוססות על היקף הפסולת בישראל ובעולם

לפי הערכות המבוססות על סקר הפסולת של שלדג, משקל פסולת הפלסטיק עומד על כ-370 אלף טון (המחושבים לפי 13% מתוך 5.7 מיליון טון פסולת מוניציפלית בשנת 2010¹⁷ שהם כ-740 אלף טון, בהפחתת הרטיבות המהווה כמחצית מהמשקל). נתון אחר אך דומה ל-370 אלף הטון המסתמך על היקף פסולת אריזות הפלסטיק לנפש באירופה בממוצע מצביע על כך שבישראל פסולת פלסטיק יכולה להגיע לכ-378 אלף טון בשנה¹⁸. בעבור הנתונים המבוססים

¹⁶ <http://www.greenvehicledisposal.com/environment/recyclable-materials/>

¹⁷ המספר שדווח במסגרת דיווחי היטל ההטמנה לשנת 2010.

¹⁸ חושב לפי 30.6 ק"ג פסולת אריזות פלסטיק בשנה לאדם ב-EU27, כפול אוכלוסיית ישראל העומדת על 7.8 מיליון נכון ל-2011 ופסולת אריזות הפלסטיק המהווה כ-63% מסך פסולת הפלסטיק

על ארה"ב בה נתוני ייצור פסולת לאדם בשנה דומים לישראל¹⁹, נראה שפסולת הפלסטיק יכולה להגיע גם לכ-470 אלף טון בשנה, מספר הדומה גם להערכות המבוססות על נתוני מדינות אירופאיות כגון: ספרד (37.8 ק"ג פסולת אריזות פלסטיק לנפש/שנה), פורטוגל (35.7 ק"ג) ואיטליה (38.4 ק"ג). לסיכום הערכות השונות ראה טבלה 14.

טבלה 14. סיכום הערכות להיקף פסולת פלסטיק הנוצרת בישראל בשנה

פסולת פלסטיק (טון/לשנה)	שיטת החישוב ומקור נתונים
270 אלף	Bottom - up. מבוסס על ממוצע בין ערך מינימום למקסימום של סכימת כל הזרמים, כמפורט בפרקים הקודמים (אריזות, אלקטרוניות וחקלאיות).
370 אלף	Top - Down. מבוסס על 13% אחוז פסולת פלסטיק (שלדג, 2005) מכלל הפסולת העירונית שיוצרה בשנת 2010, על בסיס חומר יבש.
378 אלף	Top - Down. מבוסס על ממוצע פסולת אריזות פלסטיק (שהם 63% מכלל פסולת הפלסטיק) לשנה לנפש באירופה (30.6 ק"ג) (EU, 2011), מותאם למספר הנפשות בישראל ל-2011 העומד על כ-7.8 מיליון.
470 אלף	Top - Down. מבוסס על ממוצע פסולת אריזות פלסטיק (שהם 63% מכלל פסולת הפלסטיק) לשנה לנפש בארה"ב (38 ק"ג) (EU, 2011), מותאם למספר הנפשות בישראל.
442-475 אלף	Top - Down. מבוסס על ממוצע פסולת אריזות פלסטיק (שהם 63% מכלל פסולת הפלסטיק) לשנה לנפש בפורטוגל (35.7 ק"ג), ספרד (37.8 ק"ג) ואיטליה (38.4 ק"ג) (EU, 2011), מותאם למספר הנפשות בישראל.

מלבד אריזות, הפסולת שנלקחה בחשבון כוללת: פסולת יריעות חקלאיות, פסולת אלקטרונית ופסולת מרכבים לגריטה. זרם נוסף הידוע בספרות כמכיל פלסטיק הוא פסולת בנייה שיכול להוות כ-2% משקלית מפסולת הבניין (Prestes et al., 2012) (ולכן על סמך ערך זה, בישראל יכול להוות פוטנציאל של כ-40 אלף טון לפי נתוני שנת 2009 בה מוחזרו כ-2 מיליון טון פסולת בניין) אך בד"כ פסולת זאת אינה נלקחת בחשבון בעת ביצוע הערכות מסוג זה. בנוסף, PVC מהווה חלק גדול מפסולת זאת והוא בעייתי למיחזור ואו השבת אנרגיה בגלל תכולת הכלורין שלו, למרות שכיום נמצאו מספר פתרונות לנושא כמתואר ב- Sadat-Shojai & Bakhshandeh, (2011).

סוג פסולת הפלסטיק:

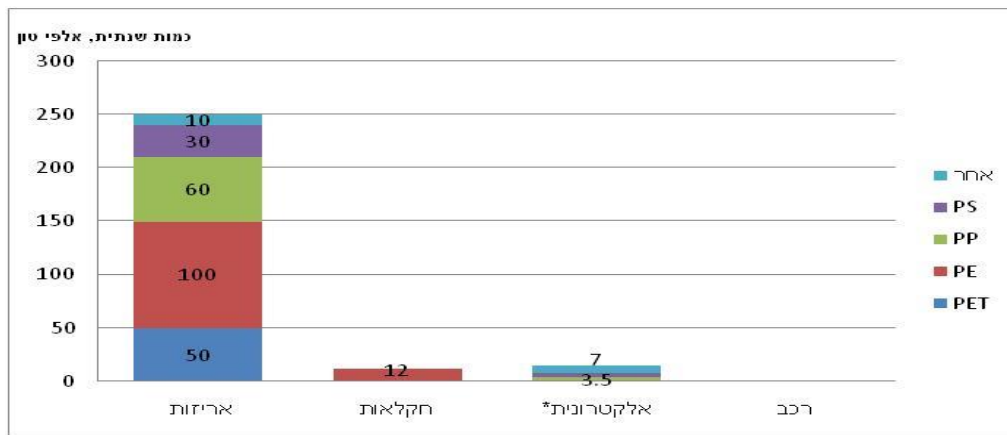
מרבית פסולת הפלסטיק בפ"פ מקורה באריזות אשר לפי סקר הפסולת שבוצע ב-2005 ע"י חברת שלדג, מורכבת בעיקר מהסוגים:

- PET - בקבוקי משקה גדולים ואישיים וקופסאות/סלסילות פירות מחומר ממוחזר.
 - PE - שקיות פלסטיק העשויות מ-HDPE ומ-LDPE (Low Density Polyethylene).
- PE על סוגיו מהווה את הפולימר הנפוץ ויכול להגיע עד לכדי 100 אלף טון בשנה מסך פסולת האריזות. היקף הפסולת והרכב הפולימרים מתוארים באיור 7.

בהתאם להערכה, היקף פסולת הפלסטיק הנוצרת בישראל עומד בהערכה גסה על 270 אלף טון בממוצע בשנה המפולח.

¹⁹ 38 ק"ג פסולת אריזות פלסטיק לאדם בשנה בארה"ב, שחושבו מתוך דוחות ה-EPA לשנת 2010, כאשר פסולת אריזות פלסטיק מהווה 5.5% מסך הפסולת וישראלי מייצר בממוצע כ-1.9 ק"ג ביום

איור 6. היקף פסולת הפלסטיק בישראל מהזרמים השונים לפי פולימרים



*בהנחה שפסולת פלסטיק מזרם פסולת אלקטרונית לשנת 2015 נכללת בחישוב.

6.3.6 סיכום

היקף פסולת הפלסטיק הנוצרת בישראל כפי שמוצג בטבלה 15 עומד על 230-310 אלף טון בשנה, ובממוצע 270 אלף טון, המתפלגים כמפורט באיור 7, מתוכה ממוחזרים בין 21%-28% (כאמור, לא כל פ"פ הממוחזרת מקורה באריזות).

פסולת אריזות מהווה את המרכיב העיקרי של פסולת הפלסטיק ממוחזרת בשיעור של 12-15%, רחוק מיעד המיחזור שהוגדר במסגרת חוק האריזות העומד על 22.5% ולכן מחייב גם איסוף של עוד כמחצית מהפסולת הנאספת (לפחות עוד 15-36 אלף טון פסולת אריזות) כשהיא נקייה ומופרדת. לא ניתן להגיע ליעד זה באמצעים העומדים לרשותנו כיום ולכן חובה לבחון יישום של השבת אנרגיה, זאת מאחר והנתונים מראים שאין ביכולתם של מפעלי המיחזור לטפל בכל הפסולת שאמורה להאסף.

בנוסף לפסולת הממוחזרת כיום, קיים שיעור של לפחות עוד 40% (לאחר שהפחתנו כ-30% שכבר ממוחזרים ו-30% שאינם ברי מיחזור או השבה) מסך הפסולת המהווים 80-100 אלף טון נוספים. לא כולם בני מיחזור אך בעלי איכות גבוהה המאפשרת ניצולם לצרכי הפקת אנרגיה/תחליף דלק, ומטרת עבודה זאת היא לבדוק זאת בין השאר.

רגולציות המחייבות איסוף של זרמי פסולת המכילים פלסטיק כגון: פסולת אלקטרונית וגרוטאות רכב מהוות הזדמנות לאיסוף, ריכוז, מיון וניצול פסולת פלסטיק ע"י שימוש בתשתית הקיימת שהועמדה לטובת מימוש הרגולציה.

שיפור בהיקף השבת PE יגדיל באופן יחסי לשאר סוגי הפולימרים את היקף ההשבה של פסולת פלסטיק בכלל. לדוגמה: השבת כל יריעות החממות, שהן כמעט ללא שאריות אורגניות יכולה להוות תוספת משמעותית אשר שקולה לשליש ממשקל מיכלי המשקה לאחר שימוש שנאספים היום במסגרות השונות.

טבלה 15. סיכום היקפי פסולת פלסטיק ושיעור המיחזור לפי זרמים

זרם פסולת	סוג פסולת	כמות (אלף טון/שנה)	היקף מיחזור משוער (אלף טון/שנה)	אחוז מיחזור מתוך אותה קטגוריה
אריזות	מיכלי משקה (בחוק הפקדון המורחב)	41	20	48%
	שקיות (לאחר שימוש)	30	0	0%
	אריזות אחרות	130-180	9	5%-7%
	סה"כ	200-250*	30	12%-15%
חקלאית		11	7	64%
אלקטרונית		18	0	0%
רכבים		2	0	0%
סה"כ		230-310	66	21%-28%

*הכמות 200 אלף שמשמשת להערכה נובעת מהממוצע בין תרחיש המקסימום (250 אלף) והמינימום (150 אלף) שאינו סביר.

לפיכך, ובהמשך העבודה, נתייחס לסך כמות פסולת הפלסטיק בישראל בכמות שנתית של 270 אלף טון.

7 ניתוח מחזור חיים (LCA)

7.1 שלבי יישום הנמ"ח

דו"ח תוכנית הפעולה לפסולת ומשאבים של בריטניה (WRAP, 2010) מציין שמתודולוגית ה-נמ"ח הפכה לתקן ע"י ארגון ה-ISO (תקני 14040 ו-14044). בהתאם לתקן, נדרש מה-נמ"ח לכלול את השלבים הבאים:

א. הגדרת המטרה והיקף העבודה - שלב זה כולל את הגדרת מטרת העבודה והיקפה הכוללים את גבולות המערכת. אלה קובעים אילו יחידות תהליך (למשל: תהליך הובלה, תהליך מיון ומיחזור וכו') יכללו ב-נמ"ח. בהתאם לכך, יש להחליט אילו יחידות מערכת (למשל: מתקן מיון, ייצור חשמל וכו') לכלול במחקר, מהי רמת הפירוט שיחידה זו תחקר וזיהוי ברור היכן מתחילה ונגמרת כל יחידה. עבור תשומות חומרים, המטרה היא לזהות את התשומות המשמעותיות הכרוכות עם כל יחידת התהליך. תשומות ותפוקות אנרגיה השונות יכללו תשומות ותפוקות רלבנטיות לייצור והובלה של דלקים, חומ"ג לאנרגיה וזרמי אנרגיה (צריכה וייצור) בתהליך.

כחלק מהמטרה יש גם להגדיר את הדברים הבאים לפי סדר הופעתם:

- התפקוד של הפונקציות השונות, הזרימה במערכת ויחסי הגומלין.
- המידע הדרוש לביצוע ההערכה ואיכותו.
- טכנולוגיה ופרמטרי ההערכה שלה (למשל: ייצור חשמל – יעילות אנרגטית).

- היחידה הפונקציונלית (FU) שאחת ממטרותיה הראשיות הוא לספק נקודת ייחוס לפיה התשומות והתפוקות ינורלמו. ה-FU נותנת בסיס להשוואה בין מערכות שונות ולפיכך היא צריכה להיות מדידה ומוגדרת בבהירות.
 - מתודולוגית ה-LCIA (הערכת השלכות על הסביבה במהלך מחזור החיים) שתשמש להערכת ההשפעה האפשרית על הסביבה.
 - סוגי וקטגוריות ההשלכות הסביבתיות שימדדו (למשל : פוטנציאל להתחממות גלובלית, החמצת קרקעות וכו').
 - תרגום בפועל של ההשלכות בהתאם לקטגוריות ההשלכות.
 - הנחות שיכולות להשפיע על התוצאות.
 - שיטות הערכה של ההשלכות.
 - מגבלות היכולות להשפיע על התוצאה ומידת אמינותה.
- ב. הערכת מצאי מחזור חיים (Life Cycle Inventory - LCI) - כולל איסוף מידע על תשומות (משאבים ומוצרים מתווכים), תפוקות (פליטות ופסולות) עבור כל התהליכים במערכת. עם המלאי ניתן למנות משאבים כגון מים ואנרגיה ו- CO_2 אשר נפלט בתהליך.
- ג. הערכת השלכות (Life Cycle Impact Assessment - LCIA) - תרגום המידע אודות מצאי התשומות והתפוקות לאינדיקטורים של השלכות פוטנציאליות על הסביבה, בריאות האדם, ועל זמינות משאבי טבע. לדוגמה: פליטות CO_2 יהוו אינדיקטור המתאר את ההשפעה הפוטנציאלית על ההתחממות הגלובלית וכיצד זו יכולה להשפיע על בריאות האדם.
- ד. פירוש התוצאות - תרגום תוצאות המצאי וההשלכות בהתאם למטרות המחקר. בנוסף נערכים ניתוחי רגישות ואי-וודאות בכדי לכמת את התוצאות והמסקנות.
- גבולות המערכת לצורך המחקר יהיו ממתקן המיון (MRF) ועד לטיפול/תוצר וההשלכות של תהליך ייצורו.**

7.2 מחקרי נמ"ח על ניהול פסולת פלסטיק – סקירת ספרות

7.2.1 מטרות המחקרים

מטרות המחקרים העוסקים בפסולת פלסטיק על סוגיה, בד"כ הן ביצוע השוואה בין פתרונות טיפול שונים או מערכות ניהול פסולת. לרוב, בהיבט ההשלכות הסביבתיות, תוך התמקדות בשיעור החסכון באנרגיה, פליטות ה- CO_2 ופוטנציאל להתחממות גלובלית בעקבותיהן.

מסקירת המחקרים עולה שמטרתם העיקרית היא בד"כ קבלת ערך כמותי כולל של הפליטות/תשומות/תפוקות. כמעט תמיד ללא ביצוע השוואה בין השלבים השונים המרכיבים את תהליך ניהול הפסולת (למשל: שלבי ההובלה והאיסוף וכו'). הסיבה היא ששלבי ההובלה והאיסוף משותפים לפתרונות הקצה השונים שנבחנים, ולכן עיקר ההבדל טמון בתהליך הטיפול עצמו (פתרון הקצה). בנוסף לעובדה שעיקר ההשלכות מקורן באותו פתרון קצה ולא בתהליכים הנלווים (למשל: מתקן שריפת פסולת הפולט את עיקר הפליטות ביחס להובלת הפסולת וכו').

השלכות סביבתיות שנבחנות: למרות התמקדות המחקרים בפליטות ה- CO_2 ובשיעור החסכון באנרגיה, קיים מספר לא מבוטל של מחקרים שלוקחים בחשבון השלכות סביבתיות נוספות. לדוגמה: פוטנציאל להתרחשות אירועים או השלכות כגון החמצת קרקעות ואוטורפיקציה, רעילות לאדם, התדלדלות אוזון וכו'.

אופן תרגום ההשלכות וערכי נירמול: ערכי הנירמול והמשקול שהם ערכים המאפשרים לתרגם את תוצאות ההשלכות הסביבתיות (פליטות לאויר ולמים וכו') לקטגוריות פוטנציאל ההשלכות (למשל פוטנציאל להתחממות גלובלית והפגיעה בבריאות האדם בשל כך). בסיס ההערכה-מנגנון פעולה-תגובה. המחקר להלן מבוסס על מידע ומחקרים שנעשו בפרספקטיבה אירופית [Guinée et al., (2002), Goedkoop & Spriensma, (2000) ו-(Goedkoop, (2009), אמריקאית (Bare, (2002) או יפנית (Itsubo & Inaba, (2004)].

תרגום פוטנציאל ההשלכות למונחים של פגיעה בבריאות האדם (אובדן שנות חיי אדם) ובמגוון ביולוגי (במונחי היעלמות מינים), מתבצע על בסיס מידע מתוך מחקרים, עבודות ופורומי מומחים המיועדים במיוחד למטרה הזאת, דבר שאינו קיים בישראל. לכן, בעת ביצוע ניתוח השלכות בנקודת מבט ישראלית, קטגוריות פוטנציאל ההשלכות משקפות ערכים המשמשים לצרכי השוואה ולא ניתן להתייחס אליהם באופן אבסולוטי (אין משמעות מעשית לתוצאות שמתקבלות מלבד לצרכי השוואה, אם לא ניתן לתרגמם למונחים של אובדן חיי אדם, פגיעה ביבולים חקלאיים, פגיעה במקורות מים וקרקע או מגוון ביולוגי רלבנטיים לישראל).

תרגום השלכות לערכים מוניטרים: תרגום ההשלכות נעשה ע"י מתן ערך לפגיעה בבריאות האדם ובמגוון הביולוגי על בסיס מידע מקומי (אירופה וכו') של עלויות של אשפוז, אובדן חיי אדם וכו'. ערכים כספיים, כפי שינתנו בהמשך העבודה, מאפשרים תרגום ההשלכות אך עושים זאת באופן חלקי, מאחר ואינם יכולים להכיל את כל ההשפעות הסביבתיות הנובעות מהשלכות אלו.

כלי תוכנה: רוב המחקרים עושים שימוש בתוכנת מדף ייעודית כגון-www.gabi-software.com, GaBi (www.simapro.co.uk) SimaPro וכו' מאחר והנתונים ורשימות מצאי תשומות/תפוקות מובנים בתוך התוכנות.

7.2.1 יחידה פונקציונאלית (FU)

היחידה הפונקציונאלית (FU) עקרונית להבנת תוצאות ה-נמ"ח ומאפשרת בסיס משותף להשוואה. היא משמשת כנקודת ייחוס אליה מנורמלות התשומות והתפוקות. המחקר של Cleary, (2009) שסקר מספר מחקרי נמ"ח של ניהול פע"מ, מצוין שרק כמחצית מתוך עשרים המחקרים שנסקרו הגדירו יחידה פונקציונאלית מפורשת וכולם היו וריאציות שונות של 'טון פע"מ מטופלת לשנה'. חלק מהמחקרים לא כללו הגדרת זמן (כלומר 'לשנה') ביח' הפונקציונלית. מסקירת מחקרי נמ"ח בנושא פ"פ נראה כי רוב היח' הפונקציונליות הוגדרו על בסיס משקלי, כמפורט בטבלה 16.

טבלה 16. היחידה הפונקציונאלית מבוססת משקל במחקרי נמ"ח שונים

מקורות	יחידה פונקציונלית (FU) שהוגדרה במחקר הנמ"ח
Arena et al., (2003) Perugini et al., (2005)	'ניהול פסולת פלסטיק מסוג PET/PE אשר מובילה ליצור של 1 ק"ג פתיתי PET'
Chilton et al., (2010)	'ניהול 1 טון של PET מבקבוקי פלסטיק שלאחר צריכה'
Rigamonti et al. (2010)	'1 טון פסולת אריזות'
Garraín et al., (2007)	'1 ק"ג של HDPE'
WRAP (2008)	'עיבוד או סילוק 1 טון פסולת פלסטיק מעורבת (וחומר שאריתי אחר) הנוצרת כפסולת ממתקן מחזור'.

7.2.2 גבולות המערכת

לגבולות המערכת חשיבות רבה, מכיוון שהגדרתם יכולה להשפיע על תוצאות המחקר. הגבולות מחולקים לסוגי גבולות עיקריים (Gentil et al., 2010) כלהלן:

- המערכת הטכנית והסביבה - הטכנולוגיה, שרשרת האספקה סוג הפסולת וכו'.
- גבולות אופק זמן - מהלך הזמן בה פועלת המערכת, זמן הייחוס של ההשלכות הסביבתיות (למשל תרומת גזי חממה לפוטנציאל התחממות הגלובלית במהלך-100 שנה וכו').
- המערכת הטכנית ומערכות טכנולוגיות אחרות (מערכות במעלה הזרם ובמורד הזרם, כמו מע' אנרגיה) - למשל טכנולוגיית ייצור החשמל, מערכת מיון פסולת וכו'.
- תוספות משמעותיות ולא משמעותיות - תנאי הגבול לקריטריון בגינו מסירים או מזניחים מרכיב מהניתוח (למשל והוגדר קריטריון כניסה של 1%. במקרה כזה אם תהליך הובלה אינו פולט יותר מ-1% מהפליטות במערכת, הוא יזנח מהניתוח).

מחקרי נמ"ח אשר בוחנים ניהול פסולת פלסטיק, בד"כ מבצעים השוואות בין מספר טכנולוגיות או תפישות, לרוב בכדי לזהות מהו הפתרון/טכנולוגיה (Cherubini et al., 2009 ; Khoo, 2009) המתאימה והיעילה ביותר עבור המערכת ו/או האיזור/מדינה הנסקרת (Blengini et al., 2012), (Cherubini et al., 2008). כאשר ההתייחסות לפליטות וכו' היא בהיבט של כיצד הן משפיעות על הסביבה הקרובה. לכן, מרבית המחקרים קובעים את גבולות המחקר למדינה או לעיר אליה המחקר מתייחס וכתוצאה מכך סכימת הפליטות מבוצעות או משויכות לרמה המקומית (למשל: ייצור חשמל מקומי הכולל את פליטות הארובה, תחבורה הנעה באיזורים השונים, איסוף וטיפול בפסולת).

שלבי מחזור חיים הנכללים בניתוח: מרבית המחקרים לוקחים בחשבון את שלבי הטיפול והובלת הפסולת. שלב בניית המתקנים אינו נכלל לרוב בניתוח כנראה מהסיבות של קושי בהשגת מידע ברור על התשומות להקמת המבנים. בנוסף לבעיות שיכולות לעלות בכימות וייחוס השלכות ממתקנים עתידיים מול קיימים. ובעיקר מכיוון שבד"כ ההשלכות הסביבתיות מבניית המתקנים ביחס לתהליך הטיפול הן זניחות.

7.2.3 מחקרי נמ"ח בניהול פסולת פלסטיק

מרבית מחקרי ה-נמ"ח משווים פתרונות טיפול שונים לטיפול בפסולת פלסטיק, בעיקר פסולת אריזות מסוג PE ו-PET. פתרונות הטיפול כוללים בד"כ מיחזור מכני, השבת אנרגיה, לעיתים גם מחזור כימי או שילוב בין פתרונות הטיפול השונים והשוואה מול הטמנה. תוצאות המחקרים מראים בד"כ עדיפות למיחזור מכני, אך זאת לרב עקב יחס התחלופה בין חומר ממוחזר לבתולי העומד על 1:1 במחקרים אלה. יחס חלופה נמוך יותר מ-0.5 יכול להביא להעדפת פתרונות השבת אנרגיה. פתרון הטמנה נמצא תמיד כפתרון הגרוע מכולם. פתרון המיחזור המכני מוגדר בד"כ ראשון, אחרי הפחתה בשלבי ניהול הפסולת מכיוון שהוא מהווה אמצעי יעיל לניצול חומרי גלם, משאבי טבע ולחסכון באנרגיה. זאת בעזרת שימוש מקומי של החומר הממוחזר, חומר שחוסך שימוש בחומר גלם בתול, יבוא, תהליכי ייצור והובלה עתירי צריכת אנרגיה וזיהום. למרות זאת, בישראל חלק מהחומר הממוחזר ומפסולת הפלסטיק נשלחים לחו"ל ולכן איננו מפנימים את תועלתו (כל שכן את העלויות עקב הובלתו לחו"ל). לא נמצא שום מקור מידע אמין המפרט את שיעור הפלסטיק הממוחזר שנשאר בארץ, כך שהכלים והמידע הקיימים אינם מאפשרים לבצע את הערכה של התועלת הנילווית למיחזור פלסטיק בישראל. לכן, בעבודה זאת הוגדר שיעור תחלופה של 1:0.5 על בסיס ערך כלכלי (שווי הערך של החומר בשוק) בין החומר הבתולי לממוחזר, בהנחה שהוא משקף את איכות החומר היחסית.

לסקירת מחקרי ה-נמ"ח ראה נספח I.

7.2.4 קטגוריות השלכות שנבחנו במחקרי ה-נמ"ח

קטגוריות השלכות סביבתיות (impact categories) כוללת את כל קבוצת ההשלכות הפוטנציאליות הנובעות מהתהליכים השונים (הובלה, שריפת פסולת וכו'). מחקר של et al., (2010) Lazarevic סקר את מחקרי ה-נמ"ח שבחנו אפשרויות ניהול פסולת פלסטיק. המחקר מצא שבחירה של קטגוריות השלכות מיוחסת למספר גורמים:

- א. רלבנטיות- השלכות המשויכות לצריכת אנרגיה (פוטנציאל התחממות גלובלית - GWP, פוטנציאל אסידיפיקציה²⁰ AP- ופוטנציאל אוטרפיקציה²¹ EP) הוערכו ביותר ממחצית המחקרים, מדגישים את השימוש באנרגיה וחסכון בה בניהול פסולת פלסטיק.
- ב. מניע פוליטי- מספר מחקרים מתמקדים בשינוי אקלים, דבר המראה את החשיבות לציבור בנושא.

²⁰ החמצה (Acidification) – לדוגמא, פליטות SO₂ לאויר הנוצרות משריפת דלקים יכולות לגרום בתנאים מסוימים לגשם חומצי.

²¹ אוטרפיקציה (Eutrophication) – תופעה שמתייחסת להעשרה של מערכת טבעית בניטריטים ופוספטים. פליטות NOx לאויר יכולות, בין השאר, לגרום לתופעה זאת.

ג. אילוצי מידע והערכת השלכות- חוסר במידע ואי ודאות לאדם והשלכות אקו-רעילות והצורך בשיפור מתדולוגיות הערכה מביאות להוצאה של קטגוריות מסוימות ממספר מחקרים.

בנוסף, המחקר מצא שצריכת אנרגיה הוצגה במספר מחקרים והיא מהווה אינדיקטור טוב להשלכות סביבתיות אחרות.

7.3 הגדרות ותיאור המערכת במחקר

7.3.1 הגדרת מטרת וטווח ניתוח ה-נמ"ח

מטרת ה-נמ"ח היא למדל ולהשוות בין אפשרויות הטיפול השונות בפסולת פלסטיק שלאחר שימוש (מוניציפלית, אריזות, חקלאות ואלקטרונית) מסוג PE, PP, PS, PET ופסולת פלסטיק אחרת.

אפשרויות הטיפול הוערכו על בסיס מידע מהספרות ובסיסי מידע של מצאי מחזור חיים (LCI). אפשרויות הטיפול שנלקחו בחשבון כללו :

- הטמנה
- מיחזור (עם או בלי הפקת אנרגיה חלקית)
- מבערה- שריפה עם השבת אנרגיה (פל"א)
- RDF (דש"ב) בכבשן מלט
- פירוליזה (feedstock recycling; המרה לדלק מסוג סולר)
- גזיפיקציה (feedstock recycling; המרה לגז סינטטי המפיק חשמל)

7.3.2 תרחישים

קיים קושי לבצע השוואה בין אפשרויות הטיפול השונות ולהביאם לבסיס השוואה משותף, זאת מכיוון שאופי המערכות שונה. הטמנה למשל, אינה כוללת בתוכה מערך של טיפול מקדים. כמו כן, ההטמנה יכולה לכלול את כל סוגי הפלסטיק מכל הזרמים ללא התייחסות לאיכותם או למקור שלהם, בשעה שמאפיינים אלו נלקחים בחשבון בעת השימוש בטכניקות הטיפול השונות. לכן, בכדי לאפשר השוואה בין טכנולוגיות הטיפול גובשו מספר תרחישים המשקפים את שרשרת האספקה המתאימה של השבה וניצול פסולת הפלסטיק. במספר תרחישים שולבו מספר אפשרויות וטכניקות טיפול בכדי לייצג שרשרת אספקה מלאה, בת מימוש.

7.3.3 תרחישי מיחזור

תרחישים מסוג זה מתייחסים לתהליך בו פסולת אריזות ומיכלי משקה או מזרם אחר מגיעה ממערך איסוף ייעודי (כגון: כלובי בקבוקים, גריטת פסולת אלקטרונית וכו'), מהפרדת זרם הפלסטיק מהזרם היבש ואו מפסולת ביתית מעורבת. פסולת שאינה באיכות מספקת למיחזור תועבר להטמנה או לשריפה לאנרגיה.

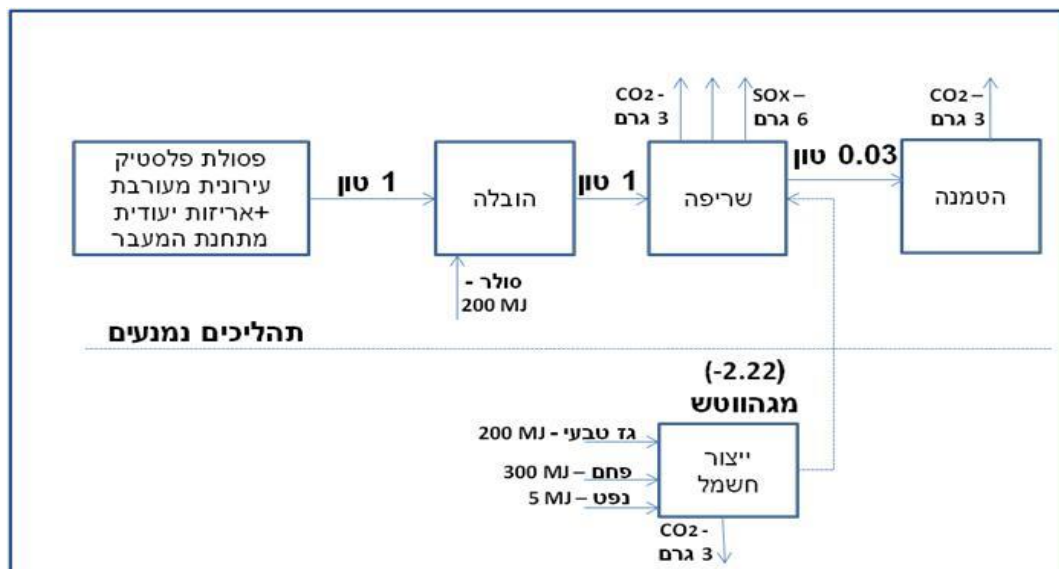
7.3.4 אפשרויות השבת אנרגיה והטמנה

תרחישים אלה כוללים: הטמנה, שריפת פסולת לאנרגיה (מבערה) והשבת אנרגיה באמצעות דש"ב (RDF) בכבשן מלט. תרחיש ההטמנה והמבערה ממודל באופן שבו לא נדרש לבצע מיון ראשוני. המרה לדש"ב, ושאר אפשרויות הטיפול מחייבת מיון ראשוני להפרדת ה-PVC. נוכחות PVC במשרפה ושריפתו יכולה להגביר את היקף פליטות הדיאוקסינים והמתכות הכבדות (Baitz et al., 2009), (Buekens & Cen, unknown) ולכן מחייבת טיפול בגז הפליטה של המשרפה ובאפר הנוצר מהשריפה, אך אינה מחייבת את סילוקו בטרם נכנס למבערה.

7.3.5 גבולות המערכת

בכדי לבצע השוואה בין פתרונות הטיפול לסוגי הפלסטיק השונים, נקבעו גבולות מערכת המשקפים את זרימת התשומות והתפוקות שהם: צריכת אנרגיה (חשמל ודלקים פוסילים) ופליטות לאוויר. לצורך הצגת המערכת הוגדר מודל נמ"ח המייצג את זרמי פסולת הפלסטיק, האנרגיה, הפליטות והתחלופה בין פתרונות הטיפול השונים ויחסם עם הסביבה (כמתואר באיור 8).

איור 7. דוגמה למערכת ולאופן חישוב תפוקות האנרגיה והפליטות במערכת



*המספרים והזרמים לשם המחשה בלבד

שלב איסוף הפסולת והובלתו לתחנת המעבר אינו נכלל בגבולות המערכת, זאת מכיוון שהוא משותף לכל פתרונות הטיפול. מיקום מתקני טכנולוגיות הטיפול זהה עבור כל האפשרויות, מלבד תרחיש ה-RDF בכבשן המלט הממוקם ברמלה, מיקום מפעלי המלט "נשר". גבולות תרחישי השבה או מיחזור כוללים את השלב בו פסולת הפלסטיק הניתנת למיחזור יוצאת ממתקן המיון (ממ"ש, MRF), ועד ליצירת פתיתים או גרוסת המתאימה ליצירת חומר חדש או להשבת אנרגיה, באחד ממתקני הטיפול המחייבים טיפול מקדים. חומר באיכות נמוכה שאינו מתאים למיחזור (שאריות וכו') עובר למתקן השבת אנרגיה או הטמנה.

תרחישי ההשבה/מיחזור כוללים את האנרגיה וחומר הגלם מסוג נפט (המשמש ליצור אתילן ממנו מפיקים פלסטיק) הנחסכים כתוצאה מהימנעות מיצור פלסטיק בתולי או שימוש בדלק. הפליטות בתרחיש חושבו לפי הפליטות בפועל פחות הפליטות הנחסכות. התרחישים במודל חולקים תהליכים שונים, להלן התהליכים הנכללים במסגרת גבולת המערכת:

- מיון
 - הובלה:
 - ממתקן המעבר להטמנה או מבערה
 - ממתקן המיון בתחנת המעבר למתקן מיחזור מכני, RDF, פירוליזה או גזיפיקציה
 - ממתקן המיחזור מכני, RDF, פירוליזה וגזיפיקציה למטמנה או מבערה (כתוצאה מפסולת תהליך) (נכלל כחלק מהדרך אותה עובר אמצעי ההובלה)
 - טיפול מקדים: גריסה, שטיפה וגירעון (כולם בהתאם לצורך. יכולים לבוא לידי ביטוי בצריכת חשמל נוסף בתרחיש או בהשפעה על יעילות תהליך)
 - מיחזור מכני
 - ייצור חשמל ודלקים
 - זיקוק נפט לסולר או פטקוק וכחומר מוצא ליצור פלסטיק
 - סילוק פסולת, באמצעות הטמנה או שריפה
- להלן התהליכים שהוצאו מגבולות המערכת ולא נלקחו בחשבון במודל ה-נמ"ח:
- הקמה ותפעול של מתקני טיפול, ייצור והפקת חומ"ג להקמתם. (עלויות התפעול וההקמה של המתקנים נלקחו בחשבון בשלב ההערכה והמודל הכלכלי)
 - כריית דלקים ושינועם לצורך הפקת אנרגיה
 - איסוף והובלה של פסולת למתקן המיון
 - כל תהליך המתרחש מחוץ לגבולות ישראל

7.4 הנחות בסיס למחקר

מחקר זה מנסה לבחון מה המדיניות הכדאית בהיבט הכלכלי והסביבתי לניהול פסולת פלסטיק בישראל. ההנחה המרכזית של המחקר היא שחוק האריזות ומימון פתרונות ההפרדה ישפרו את כמות ואיכות פסולת הפלסטיק הזמינה למטרות מיחזור והשבת אנרגיה ולכן יש לבחון מה פתרון הטיפול המתאים ביותר באמצעות תרחישים המבוססים על פתרונות טיפול שונים.

7.4.1 מידול התרחישים

עקב ריבוי התהליכים, הטכנולוגיות, סוגי שרפי הפלסטיק ומקורות הפסולות, נקבעו מספר הנחות שנועדו לפשט את המודל ולהביא את התרחישים לבסיס השוואה משותף, עד כמה שניתן.

ההנחות בהם נעשה שימוש במודל ה-נמ"ח:

- המרחק בין מקור הפסולת (פח אשפה עירוני, פח אשפה עירוני לזרם יבש, כלוב מיכלי משקה, מרכז איסוף אריזות ומיכלי משקה, פח אשפה חקלאי ייעודי לפסולת פלסטיק, מרכז גריטה של פסולת אלקטרונית או רכב) למתקן המיון זהה בין כל מקורות הפסולת ולכן אינו נלקח בחשבון במודל.
- צריכת החשמל מבוססת על תמהיל יצור החשמל בישראל נכון לשנת 2011.
- בכפוף לזמינות המידע, ההשלכות הסביבתיות מתמקדות בפליטות ישירות לאוויר של פתרונות הטיפול (SO_x , NO_x , PM), מפליטות בלתי ישירות משימוש בדלקים פוסילים ומזיקוק נפט (CO , NO_x , SO_x , CO_2 , HC - PM_{10}).
- כל הפליטות הנוצרות מתהליכי הטיפול השונים עומדות בדרישות הרגולציה הרלבנטיות.
- פסולת פלסטיק מעורבת יכולה להגיע לאחר שמוינה מיון ראשוני מפסולת עירונית או לאחר שהגיע מזרם יבש. מאחר ותהליך מיון ראשוני זה הוא משותף לכל סוגי הטיפול, הערכת השפעתו או הכללתו בתהליכים הוזנחה ולא תלקח בחשבון במודל.
- אפשרויות וטכנולוגיות הטיפול שהוגדרו במודל הן כלהלן:

1. הטמנה
2. מיחזור מכני A- פלסטיק קשיח מועבר למיחזור, פילם פלסטיק ו-PVC מועברים להטמנה ;
3. מיחזור מכני B- פלסטיק קשיח מועבר למיחזור, פילם פלסטיק להפקת אנרגיה וה-PVC מועבר להטמנה
4. מבערה- שריפה של כלל פסולת הפלסטיק ללא מיון, במתקן המיועד ליצור חשמל (WTE)
5. המרה של פסולת הפלסטיק ל-RDF ושימוש בו בכבשן מלט. PET מועבר למיחזור (עקב הערך הקלורי הנמוך יחסית והערך הכלכלי הגבוה למיחזור)
6. פירוליזה (פסולת לדלק)- PET מועבר למיחזור וה-PVC מועבר להטמנה
7. גזיפיקציה (פסולת לחשמל) - PET מועבר למיחזור וה-PVC מועבר להטמנה

7.4.2 הרכב פסולת הפלסטיק

אחת ממטרות העבודה הוא לבצע הערכה של היקף פסולת הפלסטיק על מקורותיה וסוגיה הנוצרים בשנה. על בסיס ההערכה בעבודה זאת, פסולת אריזות מהווה את הזרם העיקרי של מקור פסולת הפלסטיק ומוערכת בכ-86% מכלל פסולת הפלסטיק שנסקרה בעבודה זאת (כמפורט בפרק היקף פסולת פלסטיק בישראל). לכן, לצורך קביעת הרכב ותמהיל הפסולת המעורבת (שמקורה בפחי האצירה של הזרם היבש או הפסולת המעורבת) והפסולת מכלובי מיכלי המשקה אשר מגיעה למתקן המיון בתחנת המעבר. הנחנו כי פסולת הפלסטיק שנכנסת

למערכת היא פסולת אריזות פלסטיק. תמהיל פלסטיק קשיח (rigid) ופילמים (film) לצורך התרחישים הוערך בהתאם למצב הקיים שנסקר בישראל ומקורות מהספרות בעולם. תמהיל סוגי שרפי הפלסטיק (resin) והתפלגות לפי פילם או קשיח מפורטים בטבלה 17:

טבלה 17. הרכב פסולת מעורבת ומיכלי משקה לפי פלסטיק קשיח ופילם

פסולת	סוג פולימר	אחוז מכלל הפסולת
מעורבת*	PE קשיח	20%
	PE פילם**	20%
	PP קשיח	15%
	PP פילם	5%
	PET קשיח	13%
	PS קשיח	11.5%
	אחר	12.5%
	PVC	2.5%
	PET קשיח	65%
אריזות	PE קשיח	35%

*מבוסס על הערכות מתוך נתוני דיגום פסולת אריזות באנגליה לשנת 2006 (WRAP, 2008) ומתוך הרכב פולימרים מתוך פסולת פלסטיק עירונית במערב אירופה (Hannequart, 2004).
 ** לצורך נוחות החישוב בכדי לעשות הפרדה בין פילמי PE שאינם ברי מיחזור לבין PE מחקלאות שהוא בר מיחזור, פסולת יריעות מחקלאות הוגדרה כפלסטיק קשיח ולכן היא נכללת בחישוב ה-PE הקשיח.

7.4.3 הובלה ותחבורה

מאחר והתחבורה מהווה חלק משרשרת האספקה של ניהול הפסולת, היא צורכת אנרגיה ופולטת זיהום לאוויר, נדרש להגדיר מספר הנחות עבור המודל.

בתרחישי ההטמנה, השריפה, המיחזור ופסולת לדלק וגז אנו מניחים כי ההובלה של הפסולת היא מאתר חיריה שנבחר מאחר והוא משמש כתחנת מעבר. הובלה מחיריה למתקני הטיפול שמוקמו לצורך המודל באיזור אתר ההטמנה דודאים, מחייבת מרחק נסיעה של 220 ק"מ הלוך חזור.

בתרחיש ה-RDF בכבשן המלט מרחק הנסיעה מחיריה לאתר נשר ברמלה הינו 50 ק"מ הלוך חזור.

ההובלה למתקנים השונים מבוצעת באמצעות משאית של 30 טון מונעת סולר שערכי מקדמי הפליטה שלה נלקחו ממקורות ישראלים ומפורטים בנספח II.

7.4.4 ייצור חשמל

צריכה או תחלופה של חשמל במודל מבוססים על תמהיל ייצור החשמל נכון לשנת 2011, מאחר וזאת השנה המאוחרת ביותר עבורה קיים מידע אודות הפליטה הסגולית של המזהמים השונים²², כפי שמופיעים בטבלה 18. תמהיל ייצור החשמל בשנת 2011, מפורט בטבלה 19.

²²חברת החשמל (2011). אומדן פליטות לאוויר משריפת דלק בתחנות הכח של חברת חשמל -

<http://www.iec.co.il/environment/Documents/Emissions2010.pdf>

טבלה 18. ערכי פליטה סגולית לאויר מייצור חשמל בתחנות הכח של חברת החשמל (גרם לקילו-

וואט שעה מיוצר) בהתאם לתמהיל ייצור החשמל בישראל לשנת 2011

CO ₂	PM	NO _x	SO ₂	
733	0.05	1.7	1.6	גרם לקילו-וואט שעה מיוצר

* חישוב הפליטות מסולר ומזוט מבוסס על ממוצע ערכי הפליטה של שריפת מזוט וסולר במחזור משולב.

טבלה 19. תמהיל ייצור החשמל בישראל לשנת 2011

סוג הדלק	שיעור מסך הדלקים
פחם	62%
גז טבעי	32%
סולר ומזוט	6%

תמהיל ייצור החשמל העתידי של מדינת ישראל מתוכנן לכלול אחוז גבוה יותר של גז טבעי על חשבון השימוש בפחם, עד לכדי 65% לצד 10% אנרגיות מתחדשות לשנת 2020²³, שהמשמעות היא הפחתת פליטות מזהמי אוויר וגזי חממה מייצור חשמל עם השנים. תמהיל עתידי זה, לא נכלל במודל אך ניתן להסיק מכך שכלל שהטכנולוגיות הנסקרות בעבודה זו, שאמורות להוות תחליף לייצור חשמל, ייושמו בשלב מאוחר יותר כך התועלת היחסית בהיבט הקטנת הפליטות, תקטן.

7.4.5 מיון פסולת פלסטיק

תהליך המיון מתקיים בכל התרחישים מלבד הטמנה ומבערה. מערך המיון בתרחישים מחולק לשני תהליכים: (א) מיון ראשוני ומקדים של קשיחים ופילמים ולאחר מכן (ב) מיון שני לפי סוגי שרפים. קיימות בשוק מספר טכנולוגיות מיון בעלות יעילויות מיון שונות, כאשר לצורך מידול התרחישים הנחנו שטכנולוגית המיון הראשוני ממיינת ביעילות של 100%. נתון המבוסס על מידע שיעילות מיון ראשוני עומדת על 97% - 99.5% (Foster, 2008). מיון שניוני לפי סוגי שרפים, הינו מיון מסוג אינפרא אדום (NIR) בעל יעילות מיון של 70% (לכן נקרא גם near infra-red, כתוצאה מהיעילות שאינה גבוהה מספיק). תהליך המיון כולל בתוכו הנחה שמיון מקדים ידני או דומה בוצע לצורך הפרדת מתכות ונייר מזרם פסולת הפלסטיק. לפירוט הנחות תהליך המיון ששימשו במודל ה-נמ"ח ראה נספח II.

7.4.6 מיחזור מכני

תהליך המיחזור המכני כולל בתוכו את שלב הגריסה, שטיפה וייבוש עבור PET. עבור סוגי השרפים האחרים מבצעים בנוסף לאלה אקסטרוזיה לצורך יצירת פתיתים. למרות שבשוק קיימת משמעות לצבע החומר הממוחזר ולאילויות, בעבודה זאת לא ניתנת התייחסות למאפייני החומר הממוחזר ואנו מניחים כי הפסולת היא מרובת צבעים (מעורבת). בישראל כתוצאה מאילוצי רגולציה לא ניתן להשתמש בחומר ממוחזר ליצור מוצרים הבאים במגע ישיר עם מזון

²³ מתוך מצגת של ד"ר יהודה ניב ראש מינהל החשמל :

<https://www.google.co.il/search?q=%D7%99%D7%94%D7%95%D7%93%D7%94+%D7%A0%D7%99%D7%91+%D7%9E%D7%A0%D7%94%D7%9C+%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C&sugexp=chrome,mod=9&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

הנצרך ללא שטיפתו, כך שההנחה היא כי אין במצב השוק כיום מניע כלכלי ליצור פתיתים ממוחזרים שקופים. סוג הפתיתים או הגרסת המתקבלים הוא מסוג לא שקוף, שהוא גם בעל ערך כלכלי נמוך יותר מהשקוף או בעל הצבע האחיד. לצורך הגדרת רשימות מצאי תשומות ופליטות עבור תהליכי המיחזור בוצעה סקירת ספרות שתוצאותיה מפורטים בנספח II. מאפייני תהליך המיחזור שבמודל מתמקדים בצריכת החשמל של המיחזור ויעילותו, כלומר כמה מחומר הגלם ממוחזר וכמה מוגדר כפסולת שאינה מתאימה למיחזור.

7.4.7 שיוך (allocation)

לצורך חישוב הביצועים הסביבתיים הכוללים עבור כל תרחיש, החישוב בוצע לפי הנוסחה הבאה:

ביצועים סביבתיים – P;

השלכות מתהליך – I;

השלכות נמנעות מתהליך – E

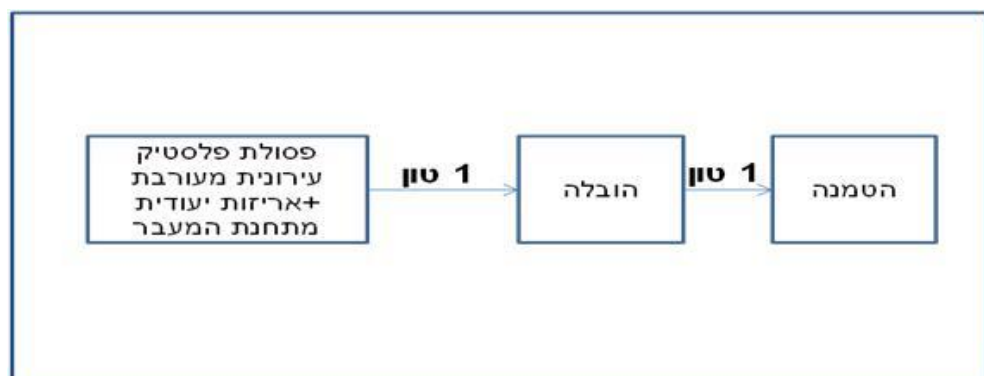
$$(1) \quad P = I - E$$

- 'השלכות מתהליך' - כוללות את הפליטות וצריכת האנרגיה של התהליכים השונים בתרחישים השונים למשל: פליטות מיצור חשמל המיועד לתהליך מיון פסולת.
- 'השלכות נמנעות מתהליך' - הפליטות וצריכת האנרגיה שנחסכים כתוצאה משימוש באפשרויות הטיפול השונות, למשל: פליטות נחסכות מיצור חשמל עקב ייצור חשמל ע"י שריפת פסולת לאנרגיה (שגם פליטותיה מחושבות במסגרת המודל).

7.5 תיאור התרחישים ורשימות המצאי (LCI)

7.5.1 תרחיש 1 – הטמנה

איור 8. תרשים תהליך – תרחיש הטמנה



תרחיש ההטמנה כפי שמתואר באופן סכמטי באיור 9, כולל בתוכו את ההשלכות מהובלת פסולת פלסטיק מעורבת ופסולת מהזרם היבש בתחנת המעבר שהועברה להטמנה במטמנה. מלבד פליטות הנובעות מהובלת הפסולת תרחיש ההטמנה כולל את פליטות גזי החממה

(מהטמנת הפסולת במטמנה) במונחי פחמן דו חמצני (CO_2) בלבד במהלך 100 שנים ואינו כולל השבת אנרגיה מניצול גז מטמנות.

מצאי מחזור החיים (Life Cycle Inventory) עבור התרחיש, מבוסס על הערכת ההשפעה הסביבתית במונחי פליטות לאוויר של פסולת הפלסטיק במטמנה ומהובלתה.

לצורך חישוב פליטות גזי החממה מפלסטיק במטמנה נבחר הערך השמרני יותר העומד על 3% פליטות מסך תכולת הפחמן של פסולת פלסטיק מסוג PE נתונה במטמנה, במהלך 100 שנים (Finnveden et al., 1995).

פליטות ה- CH_4 הן 25 ק"ג לטון פלסטיק מסוג PE שווים לכ-625 ק"ג CO_2 /טון פסולת פלסטיק הנפלטת במהלך 100 שנים במטמנה (לפירוט החישובים ראה נספח II). הערכה זאת היא הערכת יתר מכיוון שהיא מחושבת על בסיס ערך תכולת הפחמן ב-PE שהוא הגבוה מבין כל השרפים, ולמרות שהוא מהווה מרכיב עיקרי מזרמי הפסולת הוא אינו היחיד.

לצורך אומדן מרחק הנסיעה של משאית הפסולת הערכנו שהמשאית מובילה את הפסולת להטמנה מחירה לאתר דודאים ועוברת מרחק של 220 ק"מ הלך חזר לכל 30 טון פלסטיק (לפי תכולת משאית של 30 טון). לצורך חישוב הפליטות מההובלה נסקר חומר רקע הכולל מקדמי פליטות שחושבו או נמצאים בשימוש במקורות המידע בישראל. לרשימות המצאי המלאות ופירוט החישובים ראה נספח II. סיכום רשימת המצאי (LCI) כפי שחושבה לתרחיש זה מופיעה בטבלה 20 כלהלן:

טבלה 20. תרחיש הטמנה – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם)						תשומה	
$\text{CO}_2 \text{ eq}$	SO_x	PM	HC	CO	NO_x	שווה ערך אנרגיה (^{24}MJ)	
626,341.12	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3,141.60	סה"כ

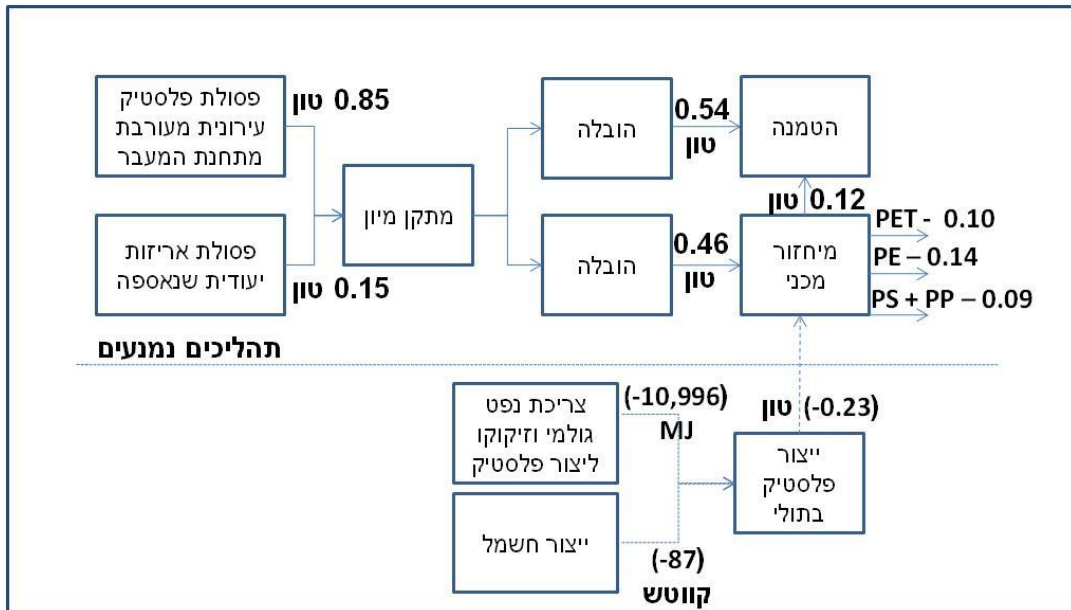
7.5.2 תרחיש 2 – מיחזור

תרחיש המיחזור כולל בתוכו את ההשלכות מתהליך המיחזור, ההטמנה ואו השריפה של שאריות המחזור או פלסטיק שאינו בר מיחזור. לצורך מידול תרחיש המיחזור הוגדרו שני תתי תרחישים כלהלן:

- A – פסולת פלסטיק מזרם מעורב המייצגת כ-85% מפסולת הפלסטיק ופסולת אריזות מיכלי המשקה מגיעים לתחנת המעבר שם הם ממוינים לפי סוגי שרפי הפלסטיק. הפלסטיק הקשיח מועבר למיחזור שבסופו מתקבל פלסטיק ממוחזר בחלוקה לשרפים ופלסטיק הפילם וה-PVC מועברים להטמנה, כמפורט באיור 10.

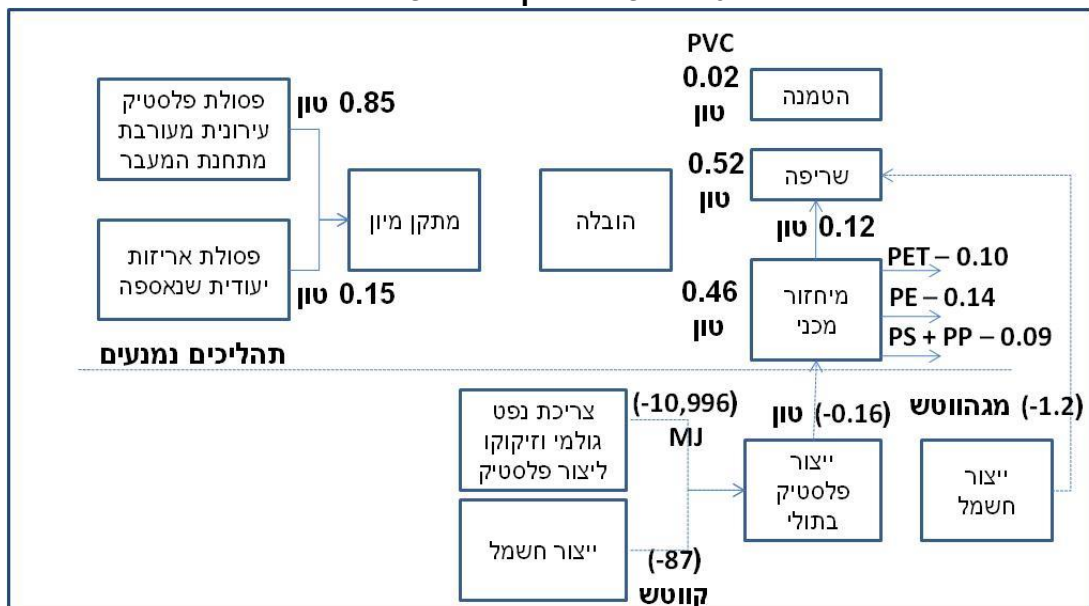
²⁴ מגה ג'אול (MJ) 1 שווה ערך ל- 238.84 קילו-קלוריות (Kcal)

איור 9. תרשים תהליך – תרחיש מיחזור A



- B – כמו בתרחיש A, רק שכאן פסולת ה-PVC בלבד מועברת להטמנה והפסולת שאינה ממוחזרת מועברת למתקן שריפה לאנרגיה, כמפורט באיור 11:

איור 10. תרשים תהליך - תרחיש מיחזור B



למרות שפסולת אריזות עוברת בד"כ דחיסה מקדימה לבאלות, בטרם היא מגיעה למתקן המיון, הנחנו כי הדחיסה מהווה חלק מהובלת הפסולת למתקן המיון ולכן היא אינה נלקחת בחשבון בתרחיש. המיון כולל בתוכו מיון ראשוני לפילמים וקשיחים, מיון שניוני לפי סוגי השרפים, קיצוץ, ניקוי מכני בעזרת לחץ אוויר ואקסטרוזיה. יעילות המיחזור של סוגי הפלסטיקים לצרכי המודל הוגדרה כלהלן: PET ל-75%, PE ל-90% (Rigamonti et al., 2009) ו-60% עבור הסוגים האחרים. שאריות מתהליך המיחזור מועברות להטמנה או שריפה.

שיעור התחלופה של PE ו-PET בתולי מול ממוחזר הוא: 0.5 ומבוסס על הערך הכלכלי של מרבית סוגי הפלסטיק (שרפים) הממוחזרים לעומת בתוליים²⁵. שיעור תחלופה זה הוגדר באופן גורף לכל סוגי הפלסטיק. מקדמי הפליטה שנבחרו ומקורות המידע שעל פיהם נבחרו המקדמים מפורטים בנספח II. רשימות המצאי כפי שחושבו לתרחישים A ו-B, הן כלהלן :

טבלה 21. תרחיש מיחזור A – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם/טון פסולת פלסטיק)						תשומה	
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	סה"כ
468,039	111	-32	-269	-90	202	-6,697.50	

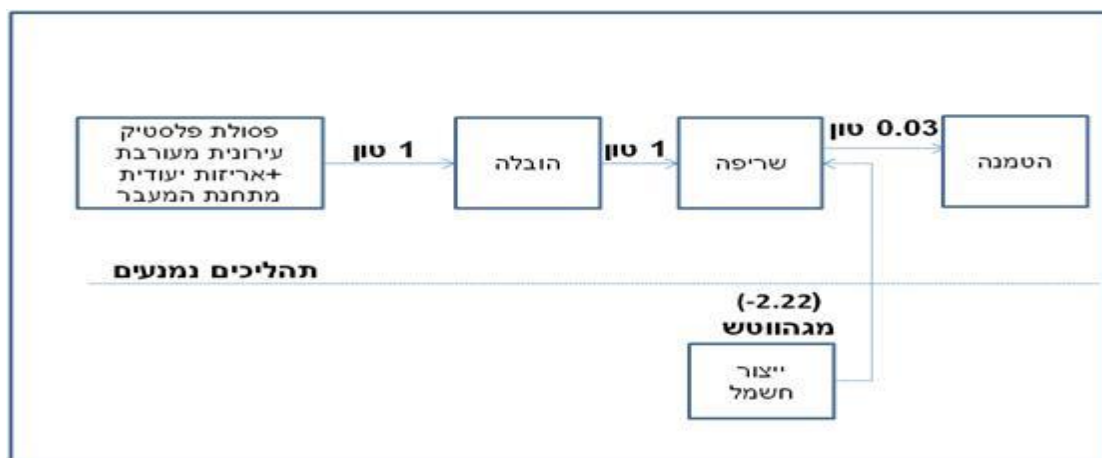
טבלה 22. תרחיש מיחזור B – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם/טון פסולת פלסטיק)						תשומה	
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	סה"כ
836,687	-1,865	-92	-269	99	-1,682	-25,735	

7.5.3 תרחיש 3 – שריפה לייצור חשמל (מבערה)

תרחיש השריפה לאנרגיה כפי שמתואר באופן סכמטי באיור 12, כולל בתוכו את ההשלכות מהובלת פסולת פלסטיק מעורבת שמוינה מיון ראשוני מתוך הפסולת (אם זה מהזרם המעורב או מזרם יבש) בתחנת המעבר ופסולת משאר הזרמים (מיכלי משקה, חקלאית וכו'). ולאחר מכן הועברה למתקן השריפה שמפיק חשמל. יעילות יצור החשמל עומדת על 23% מהערך הקלורי הנקי של 1 טון פסולת פלסטיק העומד על כ- 34.8 מגהוואט-שעה/טון, שהם כ-2.22 מגהוואט-שעה/טון. לרשימת המצאי המלאה ופירוט החישובים ראה נספח II.

איור 11. תרשים תהליך - תרחיש שריפה לייצור חשמל (מבערה)



²⁵ מבוסס על מידע אודות שוק שרפי הפלסטיק באירופה ליולי 2012, מתוך אתר : <http://www.plasticker.de>

טבלה 23. תרחיש שריפה לאנרגיה (מבערה) – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם)						תשומה	
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	
983,896	-3,621	-110	3	304	-3,474	-31,702	סה"כ

7.5.4 תרחיש 4 – דש"ב (RDF) בכבשן מלט

תרחיש ה-RDF בכבשן המלט כולל בתוכו את ההשלכות מהובלת פסולת פלסטיק מעורבת שמוינה מיון ראשוני מתוך הפסולת העירונית בתחנת המעבר ופסולת משאר הזרמים. כולם עברו תהליך קיצוץ, ייצור RDF והובלתו למפעל המלט. לאחר אלה הוא עובר לשימוש כדלק בכבשן הצמנט כתחליף לחלק מדלק הפטקוק.

ה-RDF בתרחיש זה מורכב מתערובת של פסולת מוצקה שהפלסטיק לצרכי התרחיש מהווה כ-22.5% ממנו, זאת למרות שלפלסטיק פוטנציאל שימוש בשיעור גבוה יותר מתוך ה-RDF כאשר הוא יכול להגיע עד לכדי כ-50% ממנו (UNEP, 2009).

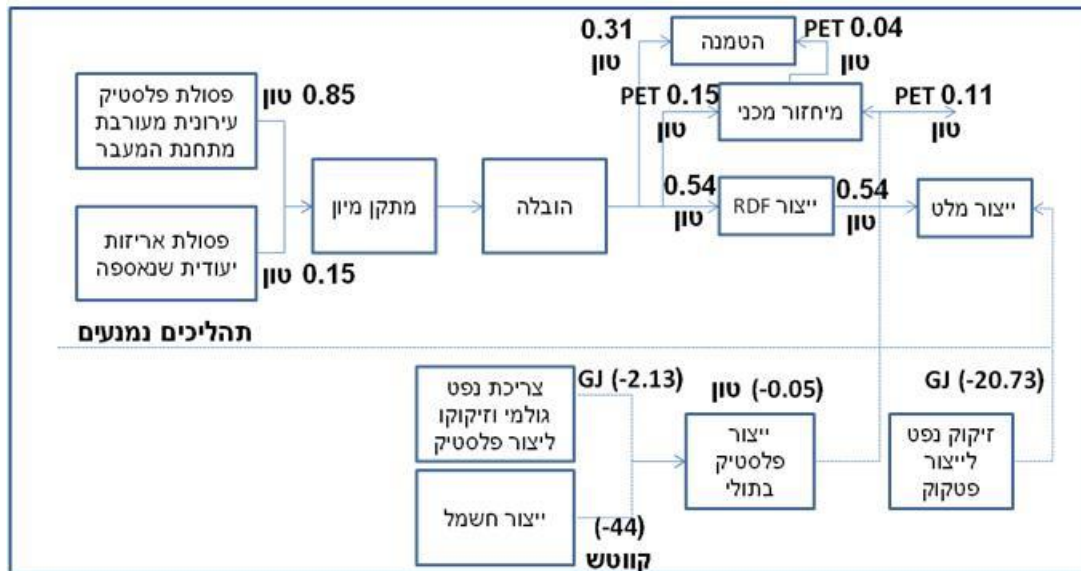
עבודה זאת מתייחסת לתשתית הקיימת בישראל ולסוג ה-RDF שבשימוש בישראל במתקן המלט של נשר. לכן, שיעור הפלסטיק מ-RDF מתייחס למצב הקיים, בו הערך האנרגטי של ה-RDF מגיע רובו מפסולת שערכה הקלורי נמוך מזה של הפלסטיק.

תרחיש זה אינו לוקח בחשבון את סוגי הפסולת האחרים כגון נייר, קרטון וטקסטיל המשמשים להכנת ה-RDF והם אינם מהווים חלק מהמודל, גבולות המערכת ואו התרחישים. לצורך חישוב תחלופת הפטקוק בידי פלסטיק, הוגדרה תחלופה של 0.71 טון פטקוק לכל 1 טון פלסטיק שנכנס למערכת (נטו כ-RDF המהווה תחליף לפטקוק, כלומר החלפה של 0.71 טון פטקוק – שקולים ל-0.54 טון פלסטיק שנכנסים למתקן ה-RDF). הפליטות בתרחיש כוללות:

- פליטות מהובלה ומצריכת האנרגיה הדרושה להכנת ה-RDF
 - פליטות משימוש ב-RDF אשר מבוסס על מקדמי הפליטה של פטקוק בכבשן
 - פליטות מזיקוק נפט לצורך הפקת פטקוק שנחסכו עקב חסכון בשימוש בפטקוק
- מכיוון שהרכב ה-RDF משפיע על רמת והרכב פליטות המזהמים ומקורות המידע²⁶ ממפעלי נשר מעידים כי כתוצאה מהשימוש ב-RDF אין שינוי מהותי ברמת פליטות המזהמים. הנחנו כי פליטות המזהמים להכנת קלינקר משימוש ב-RDF ופטקוק זהות. לפירוט חישובי רשימת המצאי ראה נספח II.

²⁶ מסמך "נשר רמלה – פרק 4: סקר פערים לעומת ה-BAT (תרגום של דו"ח ENVIRON איטליה) (פברואר 2012)

איור 12. תרשים תהליך – תרחיש דש"ב (RDF) בכבשן מלט



טבלה 24. תרחיש דש"ב (RDF) בכבשן מלט – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

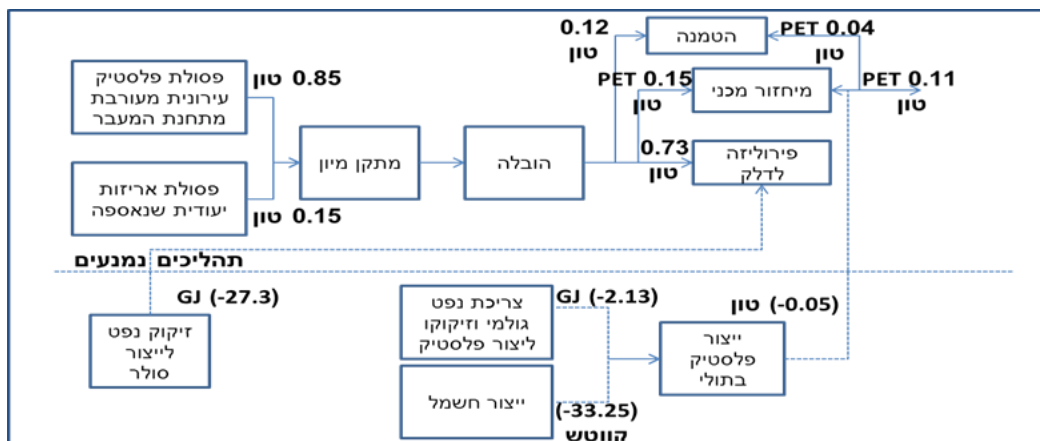
תפוקה (גרם)						תשומה	
CO2 eq	SOx	PM	HC	CO	NOx	אנרגיה (MJ)	
419,735	-207	8.35	-367	-22,900	507	-18,901	סה"כ

7.5.5 תרחיש 5 – פירוליזה (ייצור דלק נוזלי)

התרחיש כפי שמתואר בצורה סכמטית באיור 14, כולל בתוכו את ההשלכות מהובלת פסולת פלסטיק מעורבת שמוינה מיון ראשוני מתוך הפסולת העירונית ופסולת משאר הזרמים שמוינה בתחנת המעבר. לאחר שמוינה עברה קיצוץ וטיפול בתהליך (Scheirs & Ozmotech, 2006), Kaminsky, 2006) אשר יכול להפיק ביום כ-10,500 ליטר סולר מ-10 טון פסולת פלסטיק.

בכדי למדל במערכת את החסכון באנרגיה מהדלק המופק, הנחנו כי צריכת הסולר של המשאיות המובילות את הפסולת מתחנת המעבר למתקן הטיפול, מבוססת על תוצר הסולר. למרות שקיימים נתונים המראים כי תוצאות הפליטות מהסולר המופק הוא טוב מהסולר הרגיל, לצורך חישוב הפליטות מנסועה נעשה שימוש בנתוני הפליטות כאילו היה זה סולר רגיל. הפליטות לאוויר המחושבות במערכת, הן מההובלה ומיצור הדלק הנוזלי. לפירוט חישובי רשימת המצאי ראה נספח II.

סיכום רשימת המצאי של התרחיש, מופיעה בטבלה 25.



טבלה 25. פירוליזה (תרחיש ייצור דלק) – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

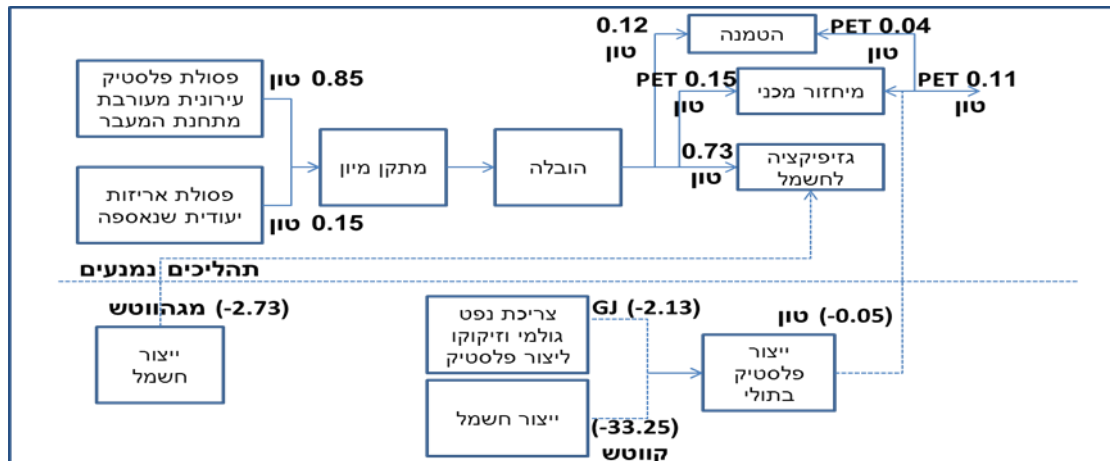
תפוקה (גרם)						תשומה	
CO2 eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	
-103,350	-1,692	-397	-1,804	-21,695	57	-18,999	סה"כ

7.5.6 תרחיש 6 – גזיפיקציה (ייצור חשמל)

התרחיש כולל בתוכו את ההשלכות מהובלות פסולת פלסטיק מעורבת שמוינה מיון ראשוני מתוך הפסולת. ופסולת שמוינה בתחנת המעבר ופסולת משאר הזרמים, אשר עברו תהליך קיצוץ וטיפול בגזיפיקציה בטכנולוגית SVZ (Erdmann et al., 1999), (Tukker, 2002). הטכנולוגיה מפיקה מתנול, סינגז וחשמל ומהווה תחלופה לשימוש בגז טבעי בכל אחד מאלה. מכיוון שהמידע הקיים הוא עבור תהליך המנצל במקביל לפסולת פלסטיק, פסולות ודלקים אחרים, והתוצר אינו חשמל בלבד, הוגדר עבור התרחיש כי ייצור חשמל בגזיפיקציה נעשה ביעילות של 35% מפסולת הפלסטיק (לפי ערך אנרגטי) הנתונה, בהתאם לתמהיל הפסולת וערכה האנרגטי, כפי שהוגדרו בתרחישים האחרים. זאת לאחר שהוצאו מהפסולת מרכיב ה-PET שהועבר למיחזור עקב הערך הקלורי הנמוך יחסית וה-PVC שהועבר להטמנה עקב תכולת הכלור שיכולה לפלוט גזים רעילים ולגרום לקורוזיה במתקן הגזיפיקציה. יעילות שלב הכנת הפסולת למתקן הגזיפיקציה הכולל מיון וקיצוץ (צריכת החשמל לצרכי חישוב תשומות לא נלקחה בחשבון) לצרכי המודל הוגדרה כ-95% (Jenseit et al., 2003), שאריות שלב זה מועברות להטמנה.

כתוצאה מכך שטכנולוגיות מסוג גזיפיקציה אינן נפוצות בקנה מידה גדול, קיים מחסור במידע וקיימים מגוון ביטויים וסוגים שונים של טכנולוגיה זו. לכן, המידע על ביצועי המערכת, בהיבט מאזני אנרגיה ופליטות יתבסס גם על מידע אודות טכנולוגיות גזיפיקציה אחרות. לפירוט חישובי רשימת המצאי ראהנספח 11. סיוכום רשימת המצאי לתרחיש נמצאת בטבלה 26.

איור 14. תרשים תהליך – תרחיש גזיפיקציה (ייצור חשמל)



טבלה 26. גזיפיקציה (תרחיש ייצור חשמל) – סיכום רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם)						תשומה	
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	
-778,028	-5,088	-520	-346	-21,677	-3,862	-26,927	סה"כ

7.6 הערכת השלכות מחזור חיים (LCIA)

שלב ה-LCIA (Life Cycle Impact Assessment), שלב הערכת ההשלכות הוא השלב שמאפשר כימות והערכה של ההשלכות הסביבתיות אשר זוהו וכומתו במהלך ניתוח מחזור החיים. "לאחר יצירת רשימת המצאי מבוצעת הערכת ההשלכות שבה נלקחות בחשבון גורמי בריאות האדם, הסביבה הטבעית והיבטים הקשורים בצריכת משאבי טבע. השלכות הנלקחות בחשבון בהערכת השלכות כוללות: פוטנציאל להתחממות גלובלית, התדלדלות שכבת האוזון, אוטרפיקציה, החמצה (acidification), רעילות לאדם מחומרים אנאורגניים בחשיפה נשמית (גורמים או לא גורמים לסרטן), קרינה מייננת, רעילות לסביבה (eco-toxicity), היווצרות אוזון פוטוכימי, שימוש בקרקע והדלדלות משאבים. הפליטות והמשאבים משויכים לכל אחת מהקטגוריות השלכות אלה ולאחר מכן מומרים לאינדיקטורים באמצעות מודלים של הערכת השלכות" (EC & JRC, 2010).

7.6.1 מתודולוגית העבודה

לצורך ההערכת ההשלכות הסביבתית נבחרה מתודולוגית ReCiPe2008 של Goedkoop et al. (2009). שיטה זאת נבחרה בגלל שהיא מבוססת על מתודולוגית ה-Eco-indicator99 אשר נעשה בה שימוש רב בקרב מחקרי נמ"ח ובעקבות השימוש הנרחב בה מחקרים. בכדי לבצע את ההערכה נבחרו ערכי ברירת המחדל של Midpoint (מדד ביניים) ו-Endpoint (מדד קצה) שמציע המודל, בפרספקטיבה ההיררכית (Hierarchist) (לקריאה נוספת על פרספקטיבה זאת ראה: Thompson 1990 "Cultural Theory"). המשמעות לכך היא שפרספקטיבה זאת קובעת את מידת ההפמנה של המודל את השלכות הסביבתיות, למשל

מסגרת הזמן שבה יבואו לידי ביטוי ההשלכות מפליטות גזי החממה: 20, 100 או 500 שנה וכו'.

נחלק מתהליך ה-LCIA בוצעו השלבים שלהלן:

- סיווג (Classification) - מטרתו איחוד מידע של מצאי פליטות שונות למספר קבוצות של השלכות סביבתיות (למשל כל פליטות גזי החממה כמו CO_2 ו- CH_4 יכנסו לרשימת 'שינוי אקלים').
- איפיון (Characterization) - המרה של פליטות ליחידות סטנדרטיות, למשל שווה ערך - $\text{CO}_2 \text{ eq}$ כפוטנציאל להתחממות גלובלית.

לשם ביצוע החישובים נעזרנו בגיליון האקסל: "ReCiPe Mid/Endpoint method, version 1.07 July 2010" שמצורף למסמכי המתודולוגיה. קטגוריות ההשלכות והיחידות שלהן מוצגים באיור 16. לקריאה נוספת והרחבה יש לפנות למסמך "ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. FIRST EDITION".

שימוש בקרקע וניצול מים לא נלקחו בחשבון בעבודה זאת. בחירת המדדים והקטגוריות לעבודה מבין אלה הקיימים במתודולוגיה, מייצגת ומבוססת על הפליטות והתשומות המופיעים ברשימות המצאי של התרחישים השונים.

איור 15. קטגוריות השלכות קיימות במודל Recipe2008

Table 2.1: Overview of the midpoint categories and indicators.			
Impact category		Indicator	
Name	abbr.	name	unit*
climate change	CC	infra-red radiative forcing	$\text{W} \times \text{yr} / \text{m}^2$
ozone depletion	OD	stratospheric ozone concentration	$\text{ppt}^\dagger \times \text{yr}$
terrestrial acidification	TA	base saturation	$\text{yr} \times \text{m}^2$
freshwater eutrophication	FE	phosphorus concentration	$\text{yr} \times \text{kg} / \text{m}^3$
marine eutrophication	ME	nitrogen concentration	$\text{yr} \times \text{kg} / \text{m}^3$
human toxicity	HT	hazard-weighted dose	—
photochemical oxidant formation	POF	Photochemical ozone concentration	kg
particulate matter formation	PMF	PM_{10} intake	kg
terrestrial ecotoxicity	TET	hazard-weighted concentration	$\text{m}^2 \times \text{yr}$
freshwater ecotoxicity	FET	hazard-weighted concentration	$\text{m}^2 \times \text{yr}$
marine ecotoxicity	MET	hazard-weighted concentration	$\text{m}^2 \times \text{yr}$
ionising radiation	IR	absorbed dose	$\text{man} \times \text{Sv}$
agricultural land occupation	ALO	occupation	$\text{m}^2 \times \text{yr}$
urban land occupation	ULO	occupation	$\text{m}^2 \times \text{yr}$
natural land transformation	NLT	transformation	m^2
water depletion	WD	amount of water	m^3
mineral resource depletion	MRD	grade decrease	kg^{-1}
fossil resource depletion	FD	upper heating value	MJ

* The unit of the indicator here is the unit of the physical or chemical phenomenon modelled. In ReCiPe 2008, these results are expressed relative to a reference intervention in a concrete LCA study.

† The unit ppt refers to units of equivalent chlorine.

מקור: (Goedkoop et al., 2009)

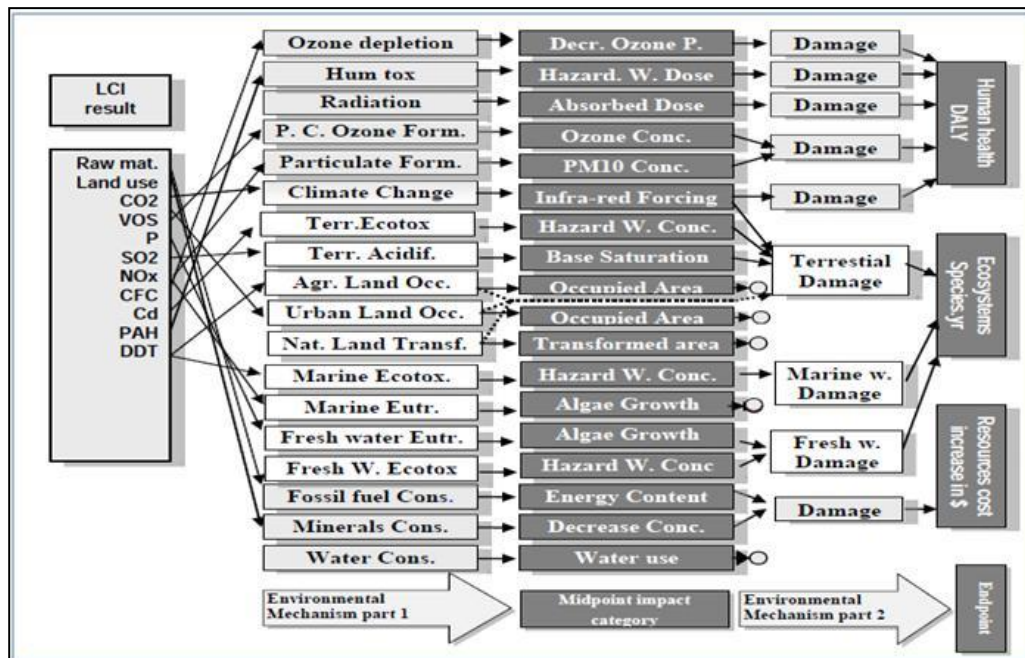
ReCiPe עושה שימוש בשלוש קטגוריות של מדדי הקצה (Endpoint): נזק לבריאות האדם, נזק למגוון האקוסיסטמה ונזק לזמינות משאבים. לתיאור סכמטי של הקשרים בין פליטות

²⁷ can be retrieved from <http://www.lcia-recipe.net/>

ברשימת המצאי לבין מדדי הביניים והקצה ראה איור 17. למידע נוסף ראה את הדו"ח של et Goedkoop al., (2009).

איור 16. קשרים בין פרמטרי רשימת מצאי (LCI) (משמאל) אינדיקטור ביניים (אמצע)

ואינדיקטור/ניקוד סופי



מקור : (Goedkoop et al., 2009)

7.6.2 התמודדות עם אי ודאות

מחקר זה עושה שימוש במספר הנחות יסוד. ההנחות מבוססות על הערכות הנובעות מנתונים שלעיתים יכולים להיות שונים באופן מובהק בין מקורות מידע שונים. או שהם באים לידי ביטוי בצורה שונה בעקבות תפיסה מוקדמת של כותב או קורא העבודה. לכן, יש לקחת בחשבון כי התוצאות יכולות להשתנות, במיוחד עבור יעילות טכנולוגיות המפיקות חשמל (כגון משרפה וגזיפיקציה), יעילות ההפרדה והמיון והרכב הפסולת. אלה מהווים את הגורמים העיקריים והמשפיעים על תוצאות התרחישים. שינוי או שיפור מהותי באחד מהם יכול לשנות את התוצאות, כמו גם שינוי ערך התחלופה של פלסטיק בתולי מול ממוחזר.

7.6.3 תרגום השלכות סביבתיות של התרחישים השונים הערכת השלכות באמצעות מדדי ביניים (MidPoints)

שלב זה כולל קיבוץ (אגרגציה) כל הפליטות לקטגוריות ההשלכות שלהם (למשל CO₂ ו-CH₄ ישיכו ל"שינוי אקלים" - Climate Change) והמרה לפליטה שוות ערך באמצעות מקדם איפיון (characterization factor) (למשל ל-CH₄ פקטור השפעה פי-25 לאורך 100 שנים ביחס ל- CO₂), כפי שדפי המידע של ReCiPe מציינים. מכיוון שעבודה זאת מתמקדת בפליטות לאוויר של מזהמים מסוג: PM₁₀, SO_x, NO_x, CO ו-HC, פליטות גזי חממה (בעיקר

(CO₂) וצריכת ארגיה פוסילית מסוג: נפט, גז טבעי ופחם ההעבודה תתמקד בקטגוריות ההשלכות הרלבנטיות שלהלן (כפי שמופיעות בטבלה 27):

טבלה 27. קטגוריות מדדי ביניים (MidPoint)

מקדם איפיון ב-ReCipe	יח' הקטגוריה	קטגורית ההשלכה
GWP100	ק"ג CO ₂ eq	פוטנציאל לשינויי אקלים לאורך 100 שנים (climate change)
POFP	ק"ג NMVOC	פוטנציאל להחמצה פוטוכימית (photochemical oxidant formation)
PMFP	ק"ג PM10 eq	פוטנציאל להיווצרות חלקיקים (Particulate matter formation)
TAP100	ק"ג SO ₂ eq	פוטנציאל להחמצה קרקעית לאורך 100 שנים (terrestrial acidification)
MEP	ק"ג N eq	פוטנציאל לאאוטרפיציה ימית (marine eutrophication)
FDP	ק"ג oil (oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg, in ground)	פוטנציאל להדלדלות משאבים פוסילים (fossil depletion potential)

למרות שהמתודולוגיה מבדילה בין פליטות המתרחשות באיזור עם צפיפות אוכלוסין גדולה לבין איזורים עם צפיפות אוכלוסין נמוכה. המודל מניח שכל פתרונות הטיפול בפסולת ממוקמים באותה נקודה ולכן הפליטות מתרחשות באופן תיאורטי באותם סוגי צפיפות. זאת הסיבה שבמודל פרמטר הצפיפות הוא מסוג 'לא מוגדר'.

הערכת השלכות באמצעות מדדי קצה (EndPoints)

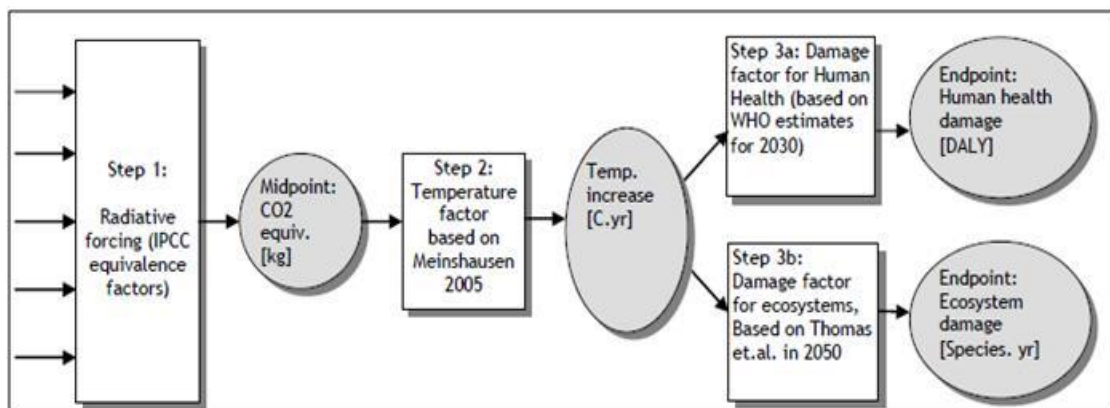
שלב זה כולל תרגום מדדי הביניים לשלוש קטגוריות השלכות עיקריות המבטאות באמצעות מדדי הקצה, כמפורט בטבלה 28:

טבלה 28. קטגוריות מדדי קצה (Endpoints)

קטגורית השלכה (category)	יח'	קטגוריות מדדי קצה (MidPoints categories)	מדד (indicator)
פגיעה בבריאות האדם (Damage to human health)	DALY	- התחממות גלובלית (GWP) - אוזון פוטוכימי (POFP) - היווצרות חלקיקים (PMFP)	אובדן שנות חיי אדם (disability-adjusted loss of life years)
פגיעה מגוון (Damage to ecosystem diversity)	Species.yr	- התחממות גלובלית (GWP) - החמצת קרקע (TAP100)	אובדן מינים במהלך שנה (Loss of species during a year)
פגיעה בזמינות משאבים (Damage to resource availability)	עלות ב-\$	הדלדלות משאבים (FDP)	גידול בעלות (increased cost)

קטגוריות מדדי הקצה (Endpoint) מתרגמת את קטגוריות ההשלכות של מדדי הביניים שנשכמו. כך למשל קטגורית 'אובדן שנות חיי אדם' מאפשרת הערכה על סמך הפוטנציאל להתחממות גלובלית. היווצרות אوزון פוטו כימי ואו היווצרות חלקיקים יכולים לתת אינדיקציה מהי מידת הפגיעה בבריאות אדם במונחי 'אובדן שנות חיי אדם'. כל אלה באמצעות מודל מובנה בתוך מתודולוגית ה-Recepie. דוגמה לכך אפשר לראות בעת התרגום של פוטנציאל להתחממות גלובלית, המתודולוגיה משלבת מודל המעריך מהו שיעור הגידול השנתי בטמ' ומתרגמת את הגידול הזה באמצעות גורם נזק (Damage Factor), המבוסס על הערכות אירגון הבריאות העולמי לשנת 2030. כמתואר באיור 18:

איור 17. דוגמה לאופן המידול של ההשלכות מפליטות גז חממה בהתייחסות לשינויי אקלים



מקור : (Goedkoop et al., 2009)

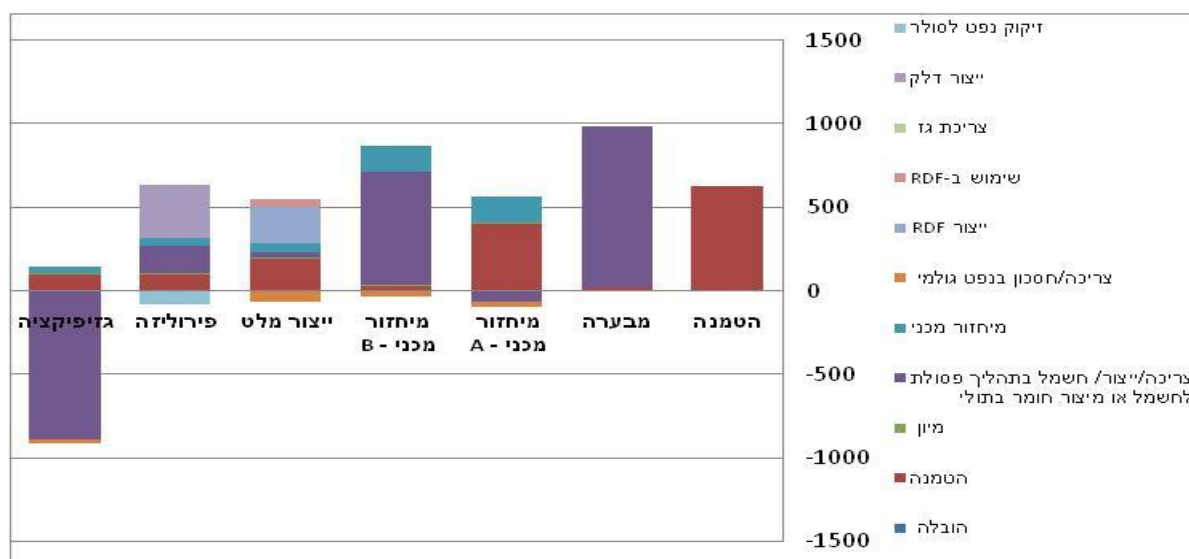
בשונה מממד פגיעה בבריאות האדם ובמגוון המתרגמים השפעות סביבתיות (כמפורט בטבלה 28), מדד פגיעה בזמינות משאבי טבע משקף את הנזק לסביבה כתוצאה מהדלדלות המשאב ולא מזיהום. מודל ה-Recipe2008 מחשב את הנזק במונחי דולר לק"ג משאב שניכרה לזמן אין סופי. נזק שהוא תוצאה של הגידול השולי בעלויות המשאב כתוצאה מהגידול בהיקף כריית המשאב. למטרות מחקר זה ערך הנזק המבוטא בדולרים הוא אינו ערך אבסולוטי. זאת מכיוון שהערך הכלכלי הינו ביחס לכמות העולמית של המשאב הניכרה והוא אינו לוקח בחשבון שינויים משאבים תחליפיים. ההנחה היא כי הביקוש למשאב קשיח. כל אלה אינם באים בחשבון במודל שבמתודולוגית ה-Recepie ולכן השפעת הנזק מהדלדלות המשאב לא יכולה להיות מתורגמת למונחים מקומיים בישראל (לא ניתן לבצע העברת תועלות) ובשל כך לא שימשה לניתוח הכלכלי במחקר זה. ערך הנזק הבא לידי ביטוי בעלות שוות ערך דולרי, משמש מעין ערך יחסי לצורך השוואה בין היקף הדלדלות המשאבים הפוטנציאלית בתרחישים השונים.

8 תוצאות ניתוח ה-נמ"ח

8.1 פוטנציאל להתחממות גלובלית (GWP)

בהיבט פוטנציאל להתחממות גלובלית, כפי שניתן לראות באיור 19, עבור טיפול ב-1 טון פסולת פלסטיק באמצעות שריפה, הפוטנציאל לפליטות גזי החממה מגיע מתרחיש השריפה לפסולת בו תהליך ייצור החשמל משריפת הפסולת מחליף ייצור חשמל קונבנציונאלי. לפי תוצאות הניתוח בסדר יורד (התרחיש בעל התוצאות הסביבתיות הטובות ביותר ראשון ואחריו הטובים הפחות), התוצאות הטובות ביותר הן של תרחיש הגזיפיקציה שמביא לחסכון כולל בפליטות של כ-778 ק"ג פד"ח לטיפול ב-1 טון פסולת פלסטיק. ייצור החשמל מהווה את מרכיב החסכון העיקרי, זאת מכיוון שטכנולוגית הגזיפיקציה מנצלת בצורה יעילה יותר את הפחמן האצור בפסולת הפלסטיק ומחליפה תמהיל ייצור חשמל סטנדרטי הפולט CO_2 בשיעור יחסי גבוה יותר. אחריו תרחיש ייצור המלט (RDF) שמביא לפליטות כוללת של כ-419 ק"ג פד"ח, ובו שלבי ההטמנה וייצור ה-RDF מהווים את המקור העיקרי לפליטות הפד"ח ואחריו תרחיש מיחזור מכני-A עם פליטות של 468 ק"ג פד"ח. התרחיש הנמוך ביותר הוא המבערה, בו ייצור החשמל במבערה מהווה את המרכיב הכמעט בלעדי בתרחיש ומביא לפליטה של כ-984 ק"ג פד"ח לטיפול ב-1 טון פסולת פלסטיק. זאתמאחר וייצור חשמל במבערה פולט יותר פד"ח באופן יחסי מהחשמל המיוצר בהתאם לתמהיל בישראל.

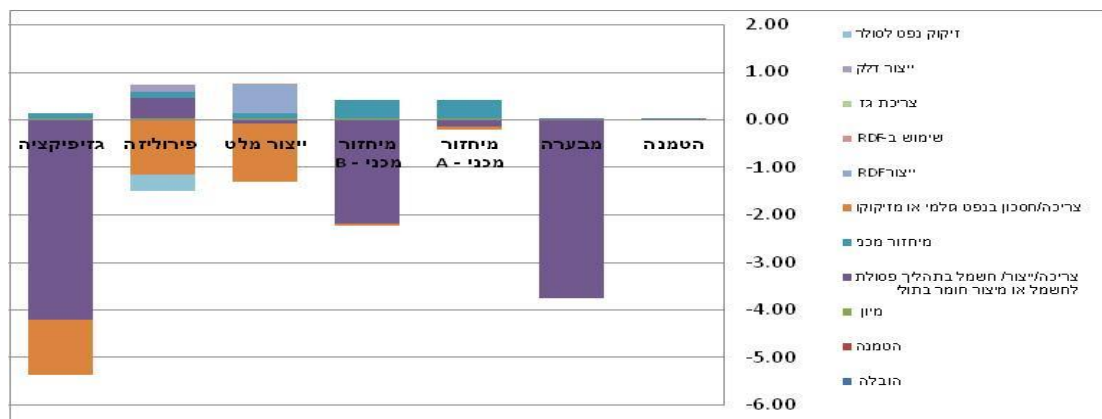
איור 18. פוטנציאל להתחממות גלובלית על פני 100 שנים (GWP100), בק"ג CO_2 שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק



8.2 פוטנציאל להיווצרות אוזון פוטו-כימי (POFP)

אוזון אינו נפלט לאטמוספירה אלא נוצר באופן פוטו-כימי באמצעות ריאקציה בין תחמוצות חנקן לחומרים אורגנים נדיפים שאינם מתאן. בהיבט של פוטנציאל להיווצרות אוזון פוטוכימי ניתן לראות באיור 20 כי לכל התרחישים השפעה חיובית כוללת (כלומר מורידים את הפוטנציאל להיווצרת אוזון פוטו כימי) מלבד תרחישי המיחזור המכני- A וההטמנה. זאת מכיוון שמלבד תרחישים אלה, כל האחרים מביאים לחסכון בפליטות מייצור חשמל או מזיקוק נפט, תהליכים הפולטים תחמוצות חנקן. מלבד תרחיש הגזיפיקציה אשר מביא לחסכון הגבוה ביותר, ניתן לראות שיש עדיפות גבוהה לתרחיש המבערה, המביא לחסכון בפליטות תחמוצות החנקן (כתוצאה מהחלפת יצור חשמל בתמהיל היצור הסטנדרטי). מאחר ובמתקן שריפת הפסולת מיושם פתרון המצמצם את פליטות תחמוצות החנקן. מעבר לכך, ניתן לראות כי דווקא לתרחיש המחזור המכני- A השפעה שלילית כוללת. הסיבה היא שהתהליך צורך חשמל מתמהיל היצור הסטנדרטי, שלו היקף פליטות תחמוצות חנקן גבוה לקוויט"ש חשמל יחסית לזה שבמבערה מודרנית.

איור 19. פוטנציאל להיווצרות אוזון פוטו-כימי (POFP), בק"ג NMVOC שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק

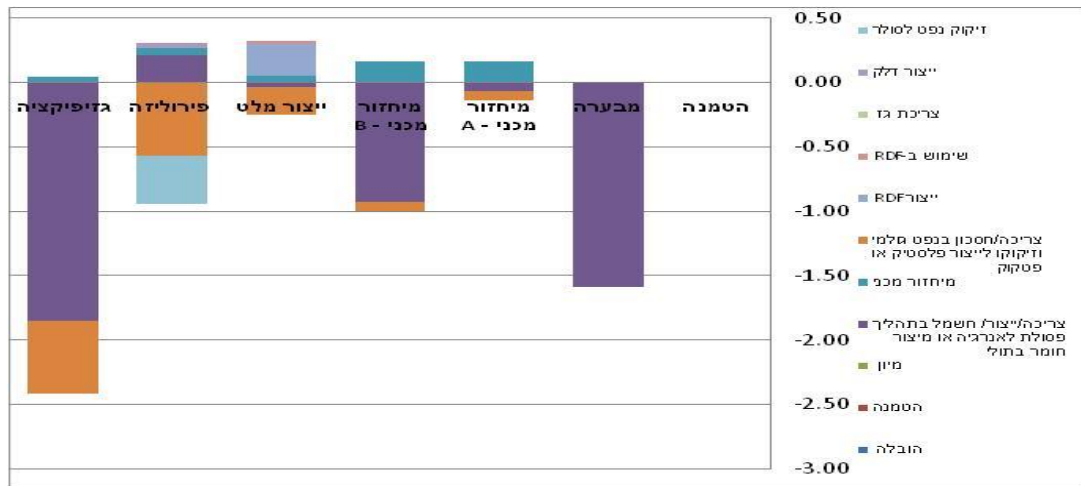


8.3 פוטנציאל להיווצרות חלקיקים (PMFP)

חלקיקים בעלי קוטר נמוך מ-10 מיקרון (PM_{10}) מתייחסים לתערובת של חומרים אורגנים ואנאורגנים (בין השאר: SO_2 , NO_x ו- NH_3) (Goedkoop et al., 2009). לפי אתר האינטרנט של המשרד להגנת הסביבה האמריקאי (EPA) חשיפה ל- PM_{10} יכולה לגרום ל: השפעות על מערכת הנשימה והריאה, נזק לרקמת הריאה, סרטן ומוות בטרם עת. מבוגרים וילדים עם מחלות ריאה כרוניות, שפעת או אסטמה רגישים במיוחד להשפעות חלקיקים אלה.

מניתוח תוצאות התרחישים כפי שמתוארות באיור 21 עולה כי לתרחיש הגזיפיקציה התוצאות הטובות ביותר, ואחריו תרחיש המבערה הנמוך ממנו בכ-30%. תרחישי המיחזור מכני- B והפירוליזה נמצאים אחריהם ומביאים לתועלת חיובית. הטמנה, מיחזור מכני- A וייצור המלט הם התרחישים בעלי השלכות שליליות: כ-0.01, 0.03 ו-0.07 ק"ג שווה ערך PM_{10} ל-1 טון פסולת פלסטיק בהתאמה.

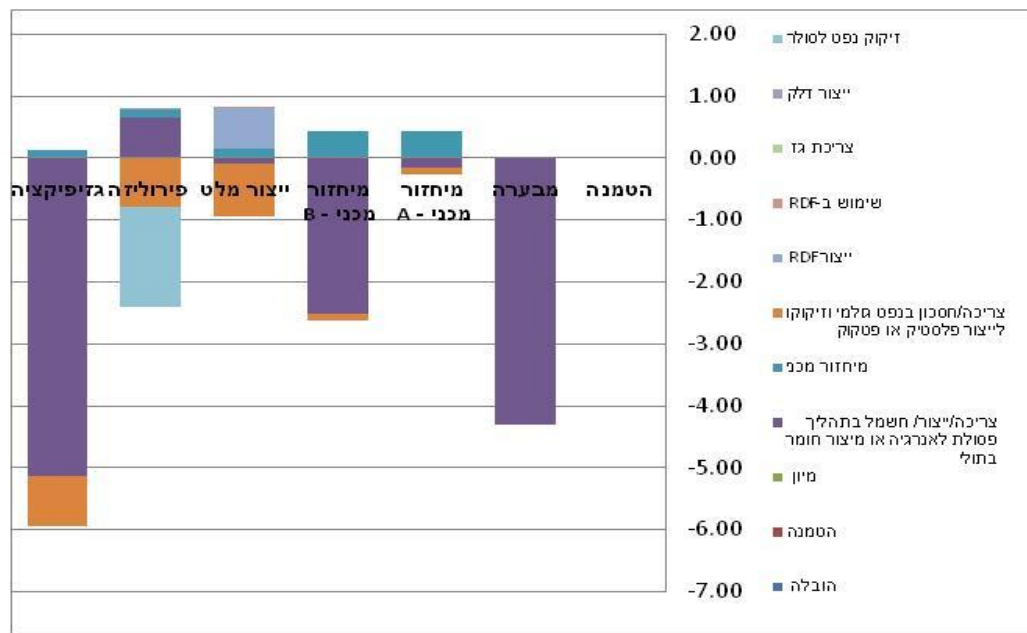
איור 20. פוטנציאל להיווצרות חלקיקים (PMFP), בק"ג PM_{10} שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק



8.4 פוטנציאל להחמצת קרקע (TAP100)

פליטות לאטמוספירה של חומרים אנאורגניים, כמו ניטרטים ופוספטים גורמים לשינויים ברמת החומציות של הקרקע שיכולה לגרום בסופו של דבר להעלמות מינים. מדד זה נותן אינדיקציה לפוטנציאל החמצה של הקרקע כתוצאה מפליטות שוות ערך מנורמלות לאורך 100 שנים. כפי שניתן לראות באיור 22, כמו במדדים האחרים יש עדיפות לתרחיש הגזיפיקציה מאחר והוא מביא לחסכון בחשמל. היבט מעניין שניתן לראות מגרף זה הוא ששריפה לאנרגיה (מבערה) התרחיש השני בטיבו, נותן תוצאות טובות יותר מהתרחישים האחרים. זאת מאחר וייתכן כי הפקת חשמל במבערה עדיף על יצור חשמל בתחנת כח מבוססת גז טבעי/פחם, מכיוון שבמשרפה ישנם אמצעים כמו סקראברים שתפקידם להפחית את רמת פליטות תחמוצות הגופרית. לתרחיש המחזור המכני- A ללא השבת אנרגיה תוצאות שליליות אף יותר מתרחיש ההטמנה, זאת בעקבות צריכת חשמל המיוצר בהתאם לתמהיל יצור חשמל הקונבנציונאלי.

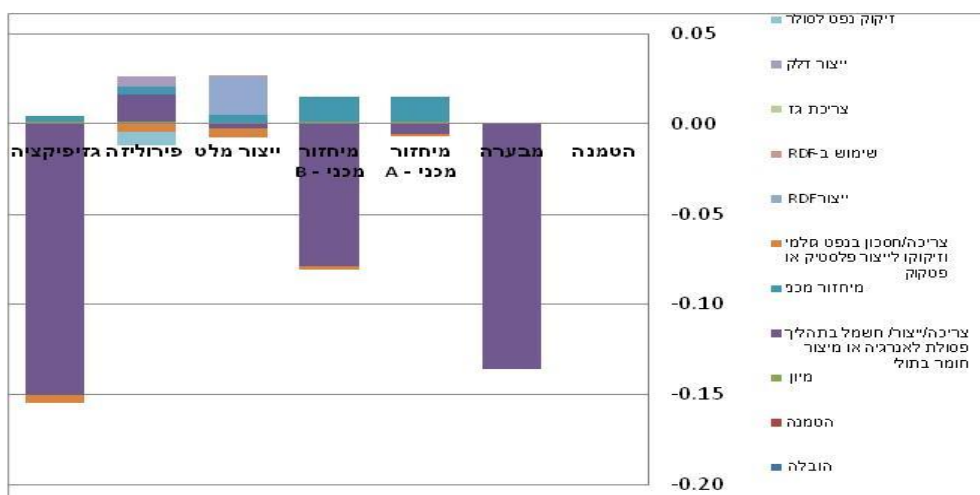
איור 21. פוטנציאל להחמצת קרקע על פני 100 שנה (TAP100), בק"ג SO₂ שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק



8.5 פוטנציאל לאטרפיקציה ימית (MEP)

אטרופיקציה ימית היא הצטברות חומר אורגני במקווי מים. הצטברות של חומר אורגני בסביבה ימית יכול להביא לפריחת אצות הגורמת לפגיעה במגוון מינים ימיים ובאיכות המים. מבין מספר גורמים כמו פוספטים וחנקן, פליטות של NO_x לאוויר (מופיעים ברשימות מצאי התרחישים) הם גורם המהווה פוטנציאל לאטרופיקציה. מניתוח התוצאות כפי שמופיעות באיור 23 ניתן לראות כי קיימת עדיפות לתרחישים בהם יש תהליכים החוסכים בייצור חשמל בגזיפיקציה צמוד לו תרחיש המבערה ואחריהם מיחזור מכני-B. לתרחישי ההטמנה, הפירוליזה, מיחזור מכני-A וייצור המלט השפעה שלילית. כמו כן, תהליך ייצור ה-RDF מביא למרבית פליטות ה-NO_x בתרחיש ייצור המלט.

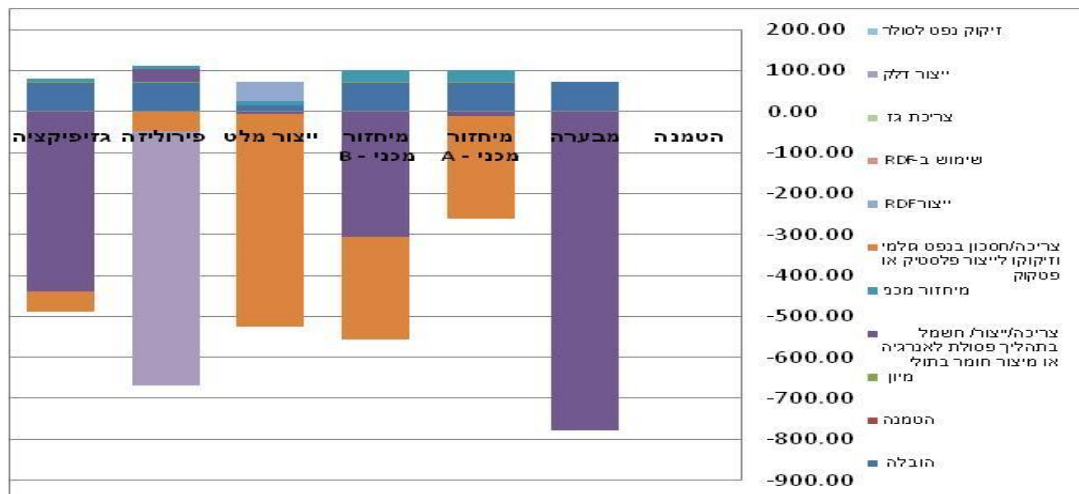
איור 22. פוטנציאל לאטרופיקציה ימית (MEP), בק"ג N שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק



8.6 פוטנציאל להדלדלות משאבים (FDP)

מדד ה-FDP (fossil depletion potential) מביא לידי ביטוי את תוספת העלות השולית של המשאב הפוסילי (הדלק) פחם, גז טבעי נפט וכו' כתוצאה מכריית משאב שאינו מתחדש. לצורך הפשטת תרגום ההשלכות מצריכת המשאבים הפוסיליים בתרחישים השונים, השתמשנו במונחי צריכת אנרגיה ב-מגה ג'אול (MJ) עבור כל אחד מהדלקים שווי ערך לק"ג נפט. כלומר צריכת קווט"ש חשמל במונחי MJ תהיה שוות ערך ל-MJ נפט שנצרך ויתורגם למונחי ק"ג נפט. מניתוח התוצאות באיור 24, ניתן לראות כי תרחיש ה-מבערה מביא לחסכון בדלקים פוסילים של כ-0.7 טון שווה ערך נפט ל-1 טון פלסטיק שנכנס למערכת, ערך הגדול במקצת מתרחיש הפירוליזה שהוא שני בטיבו ואחריו ייצור מלט.

איור 23. פוטנציאל להדלדלות משאבים (FDP), בק"ג נפט שווה ערך עבור 1 טון פסולת פלסטיק



8.7 סיכום תוצאות מדדי הביניים

תוצאות מדדי הביניים של התרחישים השונים, כפי שמופיעים בטבלה 29 המסכמת את איורים 19-24 מראות כי תרחיש הגזיפיקציה הוא היחיד בעל השפעה חיובית (כלומר חוסך בפליטות) לאורך כל מדדי הביניים. ניתן לייחס זאת לכך שיצור חשמל באמצעות גזיפיקציה מזהם פחות ויעיל יותר מיצור חשמל קונבנציונאלי אותו הוא מחליף.

טבלה 29. תוצאות מדדי הביניים של התרחישים השונים, עבור 1 טון פסולת פלסטיק

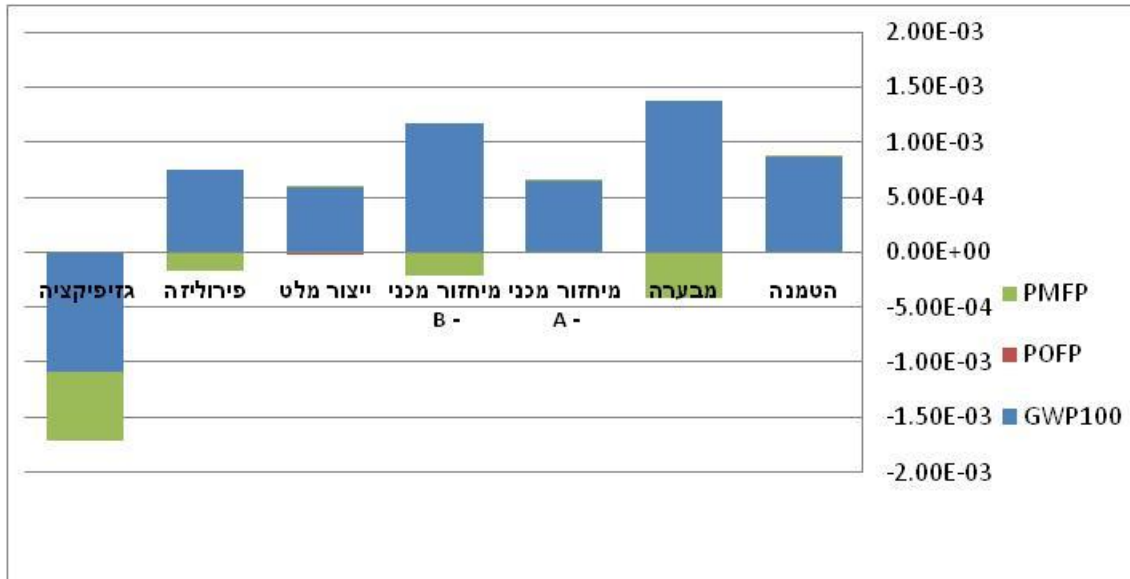
תרחישים								
מדד ביניים		הטמנה	מבערה	מיחזור - מכני - A	מיחזור - מכני - B	ייצור מלט	פירוליזה	גזיפיקציה
GWP100	בק"ג שווה ערך CO2	626	984	468	836	420	532	-778
POFP	בק"ג שווה ערך NMVOC	0.02	-3.75	0.21	-1.83	-0.55	-0.77	-5.26
PMFP	בק"ג שווה ערך PM10	0.01	-1.60	0.03	-0.84	0.08	-0.63	-2.39
TAP100	בק"ג שווה ערך SO2	0.00	-4.39	0.16	-2.24	-0.10	-1.61	-5.94
MEP	בק"ג N שווה ערך	0.00	-0.14	0.01	-0.07	0.02	0.01	-0.15
FDP	בק"ג שווה ערך נפט	0.00	-706	-160	-454	-453	-555	-408.12

8.8 נזק לבריאות האדם

מניתוח הנתונים באיור 26, ניתן לראות שפוטנציאל להתחממות גלובלית מהווה את מרכיב ההשלכה הסביבתית העיקרי שאחראי לאובדן שנות חיי אדם. לכן, תרחישים בהם יש יותר פליטות גזי חממה, בעיקר אלה שמתבצע בהם תהליך של שריפת דלקים או פסולת ליצור חשמל (תרחישי המבערה ומיחזור מכני - B) מהווים גורם לאובדן שנות חיי אדם. מאידך, תרחיש הגזיפיקציה בניגוד לתרחישים האחרים מביא בסה"כ לחסכון באובדן שנות חיי אדם, ניתן להסביר זאת בכך שביחס לתרחישים האחרים הוא מביא לחסכון הגבוה ביותר יצור חשמל סטנדרטי והטכנולוגיה שלו מאפשרת ניצול טוב יותר של דלקים.

לפי תוצאות אלה ניתן לראות כי במונחי נזק לבריאות האדם, מלבד תרחיש הגזיפיקציה המביא לחסכון בשנות אדם, התרחיש בעל פוטנציאל הנזק הנמוך ביותר לפי סדר יורד (התרחיש בעל התוצאות הסביבתיות הטובות ביותר ראשון ואחריו הטובים הפחות), הוא תרחיש הפירוליזה. אחריו ייצור המלט (RDF), מיחזור מכני-A, הטמנה, מיחזור מכני-B ואחרון המבערה. לכן, טיפול בפסולת פלסטיק באמצעות מתקן ה-RDF עדיף על פני תפעול משרפת פסולת לחשמל (מבערה), לפחות בנצילות האנרגטית של מבערה כיום. בנוסף, במונחי אובדן שנות חיי אדם יש להעדיף הקמת מתקן גזיפיקציה ליצור חשמל על פני משרפה ולנצל את הגמישות הטכנולוגית שלו בכך שהוא יכול לעשות שימוש בדלק פוסילי ואו פסולת.

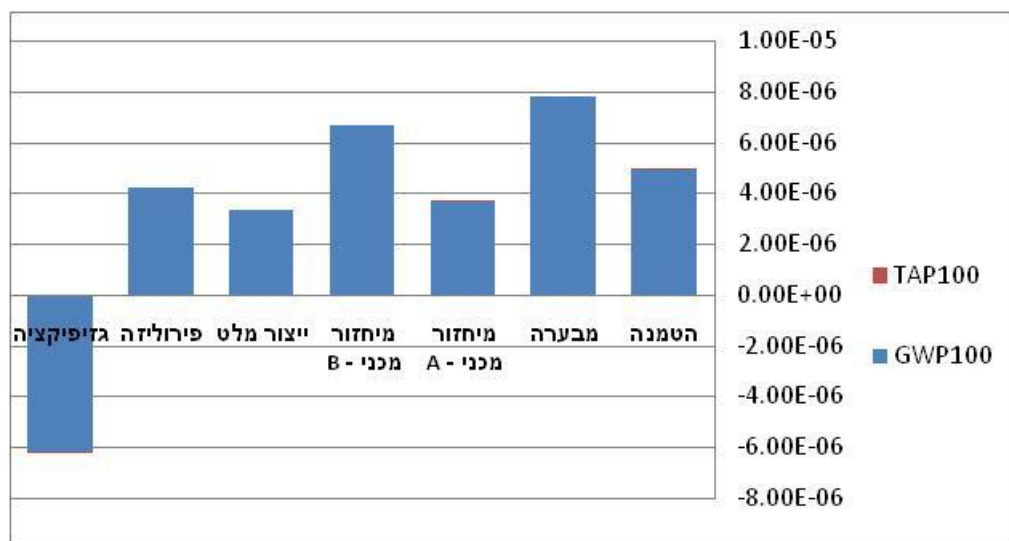
איור 24. אובדן שנות חיי אדם (DALY) בתרחישים השונים ל-1 טון פסולת פלסטיק



8.9 נזק למגוון ביולוגי ולאקוסיסטמה

כמו בקטגוריית הנזק לבריאות האדם, שפי שניתן לראות באיור 26, עיקר הפוטנציאל לנזק עבור המגוון באוקוסיסטמות מגיע מפליטות גזי חממה, כאשר החמצה של קרקע מהווה מרכיב נמוך יחסית מסך פוטנציאל הנזק. תרחיש השריפה לאנרגיה יכול להביא לאובדן מינים בשנה הגדול ביותר ביחס לתרחישים האחרים, אחריו תרחיש מיחזור מכני-B ואחריו בהפרש קטן תרחיש השימוש בפלסטיק לייצור המלט. גם בקטגוריה זאת לגזיפיקציה יתרון על פני כל התרחישים האחרים והוא אף מביא להקטנה של מספר המינים שיכולים להיעלם בשנה.

איור 25. אובדן מינים בשנה (Species.yr) בתרחישים השונים ל-1 טון פסולת פלסטיק

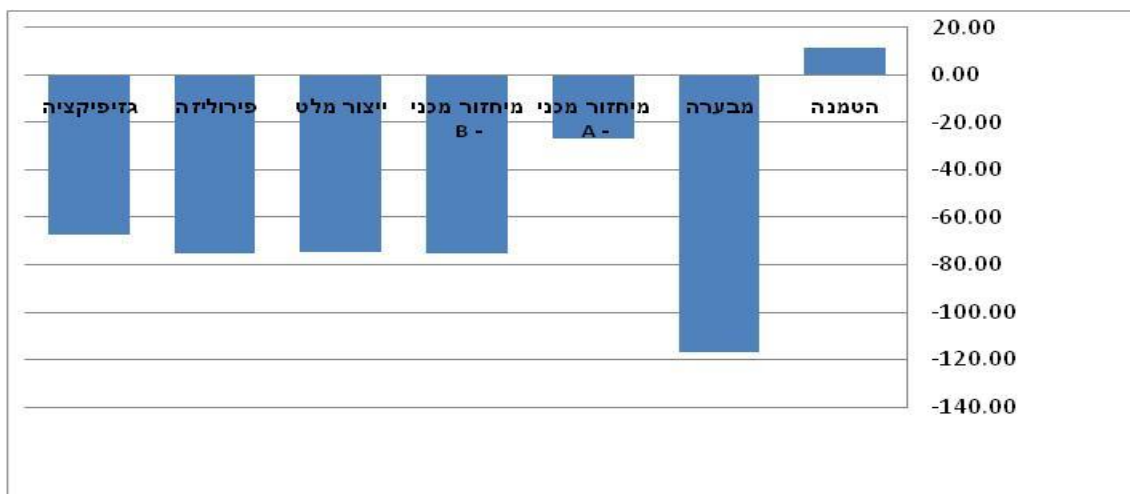


8.10 נזק לזמינות משאבים

מדד זה משקף את הפוטנציאל להדלדלות של משאבים טבע פוסילים המשמשים ליצור אנרגיה ומשקף את הסיכון שבאזילת המשאבים הזמינים לאדם למטרת יצור אנרגיה והמחיר הכלכלי של אזילת משאבים אלה, במונחי גידול בעלות המשאב לחברה (מבוטא בדולרים)-גידול במחיר המשאב (\$/ק"ג) כתוצאה מהיקף כרייתו (ק"ג). ערך זה הוא ערך מוניטרי שהמתודולוגיה לחישובו כוללת חישוב היצע כמויות הנפט הזמינות לעומת הביקוש העתידי. התייחסות קצרה למדד ניתנת בסעיף 7.6.3 ומידע מלא על אופן חישובו, במסמך מתודולוגית ה-Recipe2008.

מניתוח התוצאות כפי שמופיעות באיור 27, עולה כי מלבד תרחיש ההטמנה כל התרחישים מביאים לחסכון כולל. תרחיש המבערה מביא לחסכון הגדול ביותר כ-\$115 לכל 1 טון ואחריו תרחישי הפירוליזה וה-RDF המביאים לחסכון בשיעור של כ-70% מסכום זה. ניתן לראות שבמקרה זה תרחיש הגזיפיקציה אינו מבעלי היתרונות הגבוהים, זאת מכיוון שאל מול תרחיש השריפה לאנרגיה, הוא דורש טיפול מקדים בפסולת והכמות הכוללת מ-1 טון פסולת פלסטיק שנכנס למערכת שהוא מנצל ליצירת אנרגיה היא נמוכה יותר.

איור 26. אובדן משאבים פוסלים (ב-\$) בתרחישים השונים ל-1 טון פסולת פלסטיק



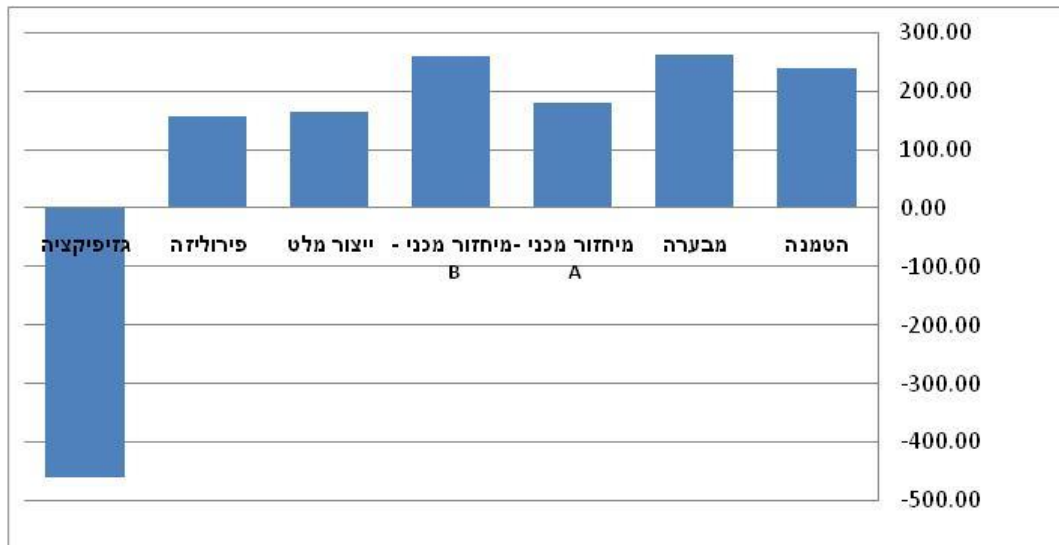
8.11 סיכום תוצאות מדדי הקצה

תוצאות מדדי הקצה של התרחישים השונים, כפי שמופיעים באיורים 25-27 מראות כי תרחיש הגזיפיקציה הוא היחיד בעל השפעה חיובית בכל המדדים במיוחד במונחי חסכון בשנות חיי אדם ובמגוון מינים ביולוגי. ניתן לייחס זאת לכך שייצור חשמל באמצעות גזיפיקציה מזהם פחות ויעיל יותר מייצור חשמל קונבנציונאלי אותו הוא מחליף. בנוסף, בקטגוריית הדלדלות המשאבים הפוסלים, לתרחיש המבערה הפוטנציאל הגבוה ביותר לחסכון במשאבים פוסילים. תרחישי הפירוליזה, ייצור המלט והמיחזור מכני-B בעלי פוטנציאל חסכון זהה פחות או יותר.

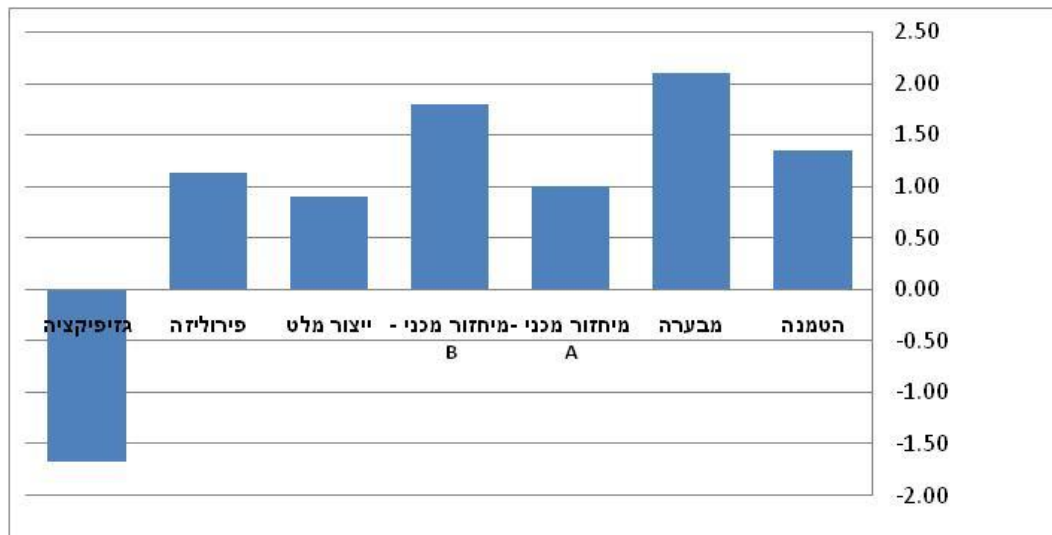
8.12 הערכת ההשפעה הסביבתית הפוטנציאלית הסופית (מדדי קצה) בשנה בישראל

מטרת העבודה היא להעריך את העלות מול התועלת של התרחישים עבור המצב הקיים בישראל. בוצעה הערכה של השלכות התרחישים השונים עבור היקף פסולת שנתי של 270 אלף טון. מניתוח התוצאות כפי שמופיעות באיורים 28, 29 ו-30, ניתן לראות כי אם לוקחים בחשבון את שלושת המדדים: אובדן חיי אדם, אובדן מינים בשנה ועלות אובדן משאבים פוסילים- מלבד תרחיש הגזיפקציה, שמראה תועלות מובהקות בשלושת המדדים, תרחיש הפירוליזה ואחריו ייצור המלט (RDF) הם הפתרונות הטובים ביותר. בנוסף, אם נותנים חשיבות גבוהה לחסכון במשאבים פוסיליים, הפירוליזה הופכת לפתרון העדיף על פני RDF. מדד העלמות המינים היה זהה עבור שני המדדים, ועמד על היעלמות של מין אחד בשנה.

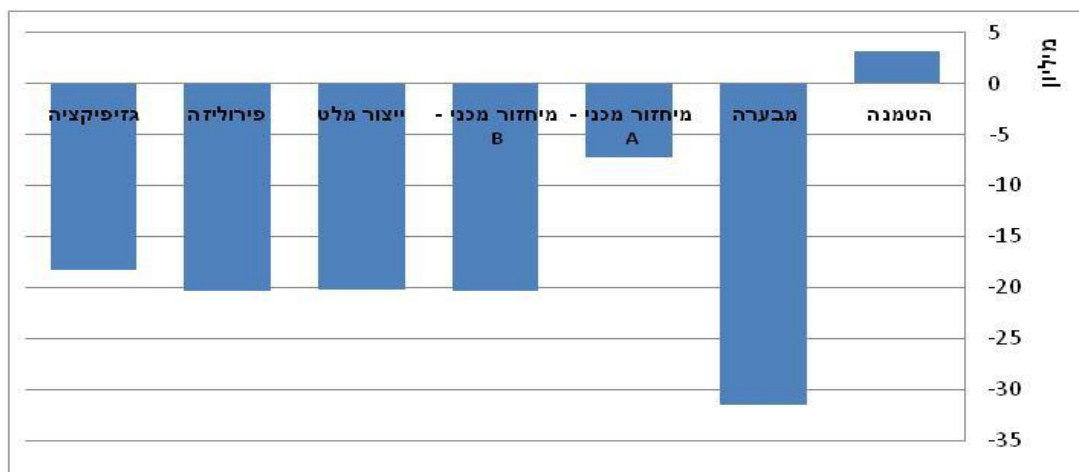
איור 27. אובדן שנות חיי אדם (DALY) בתרחישים השונים ל-270 אלף טון פסולת פלסטיק



איור 28. אובדן מינים בשנה (Species.yr) בתרחישים השונים ל-270 אלף טון פסולת פלסטיק



איור 29. אובדן משאבים פוסלים (במליוני \$) בתרחישים השונים ל-270 אלף טון פסולת פלסטיק



ניתן לראות מהתוצאות כי תרחיש המבערה הוא התרחיש הגרוע ביותר בקטגוריות אובדן שנות חיי אדם והיעלמות מינים. למרות זאת תרומת תרחיש זה למניעת הדלדלות משאבים פוסילים היא הגבוהה ביותר מכיוון שתרחיש זה מחליף שימוש בדלקים פוסילים ליצור חשמל בתחנות הכח. תרחיש ההטמנה הוא התרחיש היחידי בעל תרומה להדלדלות משאבים פוסילים.

חשוב לציין כי, בהיבט המשמעויות האבסולוטיות של כל תרחיש, קטגוריות אובדן חיי אדם ושנות אדם במודל הן גנריות ואינן מתורגמות למונחים מקומיים, **פרט לנושא פליטות גזי חממה, שהשפעתם גלובלית ולא מקומית**. מאידך, ניתן לקבוע על סמך הניתוח כי שינוי מדיניות הטיפול בפסולת פלסטיק **ומעבר מהטמנה שיטת הטיפול העיקרית לתרחיש גזיפיקציה, ייצור מלט (RDF), פירוליזה ואו מיחזור מכני- A יכול להביא לחסכון באובדן שנות חיי אדם ומינים בשנה**.

כמו כן, חשוב לציין כי אחת ממגבלות המחקר היא שהמחקר בחן תרחיש אחד שלם ולא ערוב פתרונות טכנולוגיים. אולם הכלי מאפשר הרצת תרחישים מותאמים למגוון פתרונות.

9 ניתוח עלות - תועלת כלכלית

9.1 מטרה

מטרת העל של עבודה זאת היא לקבוע מהי אפשרות הטיפול הטובה ביותר בפסולת פלסטיק בישראל, בכדי להפוך אותה ממטרד למשאב. כחלק מבחינת התרחישים, התהליכים והטכנולוגיות השונות לניהול ולטיפול בפסולת פלסטיק בוצע הערכת עלות-תועלת שמטרתה לאפשר קבלת החלטה המבוססת על פי קריטריונים כלכליים.

9.2 מתודולוגיה

לשם הערכת עלות-תועלת מהתרחישים השונים, נבנה מודל כלכלי הלוקח בחשבון את העלויות והתועלות שהלן:

- עלויות טיפול- עלויות הטיפול הישירות בפסולת הפלסטיק, אשר מבוססות על עבודות שבדקו כלכליות של פתרונות טיפול שונים בין השאר בהתאם לעלויות ההקמה, התפעול וההובלה, בהם: עבודת פארטו (2011) שבדקה כלכליות של הקמת מתקני קצה מסוגים שונים לטיפול בפסולת עירונית מוצקה, כיוון (2011) שהעריכה היתכנות כלכלית של טכנולוגית גזיפיקציה לטיפול פסולת ו- (2009) WRAP שביצעה הערכה כלכלית של מתקן מחזור פסולת פלסטיק מעורבת. בנוסף, לשם השוואה והיתכנות נתוני העלויות בוצעה סקירה קצרה ממקורות שונים אשר מופיעה בנספח III.
- עלויות חיצוניות- העלויות החיצוניות מבוססות על עלויות הנובעות מפליטות מזהמים כפי שנסכמו בתרחישי ה-נמ"ח. עלויות הפליטות מבוססות על מידע מתוך:

- דוח בקר וחוב' (2011) - לשם הערכת עלות הפליטות מייצור חשמל וזיקוק נפט
- הכנסות - ההכנסות נובעות ממכירה או מחסכון בתוצרי התהליך בהם פלסטיק ממוחזר, חשמל, סולר ונפט כתוצאה מחסכון ביצור פלסטיק בתולי. המחירים של התוצרים השונים נקבעו כלהלן:
 - פלסטיק ממוחזר - כמחצית ממחיר השוק של טון חומר בתולי ושוה לערך ליטר נפט המיועד ליצור פלסטיק בתולי
 - חשמל - מבוסס על תעריף מרכיב הייצור שניתן ליצרני חשמל פרטיים, כפי שמפורסם ע"י חברת החשמל.
 - סולר - מבוסס על מחירו התיאורטי בשער בית הזיקוק, כפי שמפורסם משרד האנרגיה והמים.
 - RDF כתחליף לפטקוק- שווה ערך אנרגיה לפי מחיר חבית נפט.
- כל המחירים אינם כוללים מע"מ.

9.3 עלויות ישירות לטיפול בפסולת

עלויות שישמשו לחישוב העלות של התרחישים השונים הן העלויות הכרוכות בסילוק הפסולת ועד להפיכתה למשאב או להטמנתה. העלויות מורכבות מעלות הקמת מתקני טיפול ותפעולם (להרחבה ראה נספח III) ומחסכון בעלות הובלה עבור תרחיש ה-RDF שהמרחק בו בין מתקן המיון למתקן הטיפול קצר יותר מבשאר התרחישים העומדים כולם על אותו ערך.

לשם קביעת העלויות שבמודל נסקרו מספר מקורות עם דגש על עבודות שבוצעו בהקשר הטיפול בפסולת בישראל. העלויות מוצגות במחיר לטון ואינן כוללות מע"מ, עלויות מיסוי וכו', אלא אם צויין אחרת. במספר מקומות נעשה שימוש במונח 'מחיר שער' אשר משקף את המחיר הכדאי ליזם המתקן, לאחר שחושבו הוצאותיו והכנסותיו לטיפול בפסולת, ללא הכנסות ממכירת תוצרי לוואי בכדי להמנע מחישוב כפול (double accounting). עלויות הטיפול במודל, הנחות היסוד ששימשו לגיבושם והמקורות שעליהם התבססו מרוכזים בטבלה 30 שלהלן :

טבלה 30. עלויות ישירות לטיפול בפסולת פלסטיק (מחירים לא כוללים מע"מ)

פתרון טיפול	עלות טיפול לטון פסולת פלסטיק (₪)	הנחות יסוד	מקור מידע עיקרי
הטמנה	135	- מחיר שער מטמנה (Tipping Fee) - 45 ש"ח/טון. מבוסס על מטמנה בדרום הארץ. - היטל הטמנה – 90 ש"ח/טון	מחירי הטמנה והיטל הטמנה לשנת 2012.
מבערה המייצרת חשמל	495	- מבוסס על עלות שער ממוצעת בין מחיר שער חציוני לשנת 2012 באנגליה למתקנים חדשים (474 ש"ח לטון במונחי 2012), לבין מחיר בדו"ח של DHV MED בע"מ (2005) ללא הכנסות ממכירת חשמל (517 ש"ח לטון במונחי 2012). - למתקן עם קיבולת שנתית של 300 אלף טון.	סקירה שנתית של מחירי שער לפתרונות טיפול שונים באנגליה. WRAP (2012). קדם היתכנות ראשונית למתקן טיפול תרמי DHV (2004).
מיחזור מכני	2,972	מחיר של מיחזור משולב לשרפים שונים.	הערכה כלכלית של מיחזור פסולת מעורבת באנגליה. WRAP (2009)
RDF	260	מבוסס על עלות ייצור RDF לשימוש כתחלופה לפחם	החלטת רשות החשמל בנוגע להתייעצות אודות שילוב ביומאסה בתחנות הפחמיות (2011)
פירוליזה	845	לפי חישוב עלות שער ללא הכנסה ממכירת חשמל (עומד על 30% מעלות כוללת של טכנולוגית SVZ).	RTI International (2012).
גזיפיקציה	522		לפי התכתבות פנימית עם משרד להגנת הסביבה. הערך מבוסס על עבודת חברת כיוון (2011). שילוב טכנולוגיות הפירוק הגזי במערך הטיפול בפסולת בישראל
מתקן מיון	1,073	מיון חצי אוטומטי לפי פילמים, קשיחים ושרפים. עלות תפעול ממוצעת ל-10 שנים. ללא עלות הקמה.	הערכה כלכלית של מיחזור פסולת מעורבת באנגליה. WRAP (2009)
מיחזור PET	815	לפי חישוב מחיר משוער של קניית PET ע"י מפעל מיחזור ²⁸ בשנת 2007 לפי ערכי 2012 + מרווח מכירה של 20%.	

9.4 עלויות חיצוניות של טיפול בפסולת פלסטיק בישראל

עלויות אלה מייצגות את עלויות ההשפעות הסביבתיות של מתקני הטיפול השונים. העלויות החיצוניות שהוערכו במודל יהיו העלויות החיצוניות של פליטות מזהמים לאוויר, כפי שנסכמו ברשימת המצאי בניתוח ה-נמ"ח. לשם קביעת ערכי עלויות המזהמים ממקורות נייחים נבחר הדוח בקר וחוב' (2011). הדוח ביצע הערכת עלות של מזהמי האויר (SO_2 , NO_x , PM_{10}) ו- CO על בסיס שילוב גישת העברת התועלות (Benefit Transfer) ושיטת תגובה-מינון (Dose Response –) תוך תרגום ממצאי מחקרים עפ"י מאפייני ישראל. מחיר ה- CO_2 נקבע לפי המקובל במדינות מפותחות בעולם. עלויות הפליטות מופיעות בטבלה 31.

טבלה 31. עלויות חיצוניות של מזהמי אוויר בישראל

CO_2	**HC	CO	PM_{10}	NO_x	* SO_x	
103	-	6,118	72,308	29,736	41,836	ייצור חשמל ותעשייה בש"ח/טון פליטה
103	4,254	6,118	88,773	70,733	41,836	תחבורה בש"ח/טון פליטה

מקור: בקר וחוב' (2011)

*לפי מחירי SO_2

**לפי הערך בדוח הוועדה בין משרדית למיסוי "ירוק" משרד האוצר, משרד התחבורה והבטיחות בדרכים, משרד התשתיות והמשרד להגנת הסביבה (2008). החישוב בוצע בעזרת שער המרה ממוצע לשנת 2000 של ש"ח ליורו, ולאחר מכן הצמדה למדד המחירים לצרכן (25%) עד לשנת 2011 מהמחיר לשנת 2000.

9.5 הכנסות

מתקני הטיפול השונים מייצרים תוצרים אשר להם ערך שוק ותועלת כלכלית. מחירי השוק לצורך הניתוח הכלכלי מופיעים בטבלה 32:

טבלה 32. מחירי תוצרים

תוצר	מחיר	הנחות יסוד
סולר	3.2 ש"ח/ליטר	מחיר שער בית זיקוק ממוצע לשנת 2012. לפי המחיר התיאורטי של מוצרי דלק שאינם בפקוח ²⁹ .
נפט	2.24 ש"ח/ליטר	\$100 לחבית אשר מכילה כ-159 ליטר, מחיר ממוצע לשנת 2011. חושב לפי שער דולר ממוצע לשנת 2011 של 3.57 ש"ח לדולר.
פלסטיק ממוחזר	- PET - 4500 ש"ח/טון - PET טון- 3750 ש"ח/טון - PE - 4500 ש"ח/טון - PS - 6000 ש"ח/טון - PP - 5294 ש"ח/טון	חצי ממחיר שוק של פלסטיק בתולי עבור PE ו-PET, PS ו-PP לפי 0.7 ממחיר בתולי. PE- הוערך לפי מחיר ממוצע בין HDPE ל-LDPE ³⁰ . חושב לפי שער יורו של 5 ש"ח ליורו. חומר ממוחזר באיכות פאלטות (עברו אקסטרוזיה), מלבד ה-PET הטחון.
חשמל	0.36 ש"ח/לקווטש	לפי רכיב ייצור של יצרני חשמל פרטיים ³¹ . תעריף משוקלל.

מלבד ההכנסות ממכירת תוצרי לוואי, גם החסכון בצריכת חשמל ושימוש בנפט לצורך הפקת פלסטיק חושבו כהכנסה.

9.6 תוצאות המודל הכלכלי

9.6.1 עלויות חיצוניות

העלויות החיצוניות הנובעות מפליטות מזהמים קריטריונים וגלובלים במרבית תהליכי הטיפול השונים, מהוות חלק קטן מהעלויות הכוללות. כפי שניתן לראות באיור 31 (לפירוט העלויות החיצוניות ראה נספח III עלות-תועלת) החסכון הגבוה ביותר בעלויות החיצוניות מושג באמצעות תרחיש הגזיפיקציה (מהווה כ-85% מעלות הטיפול במונחים מוחלטים). הסיבה לכך היא שתרחיש זה מביא להפחתה משמעותית בפליטות במיוחד ה- SO_x מאחר והוא מחליף ייצור חשמל מזהם יותר. לתרחישים האחרים מלבד הפירוליזה תרומה זניחה לעלות הכוללת או ביחס לעלות הטיפול. יש להדגיש כי עלויות פליטות HC ו-CO ממתקנים נייחים (זיקוק נפט או ייצור חשמל) לא נלקחו בחשבון, דבר שהיא יכול להביא לשינוי מסוים בתוצאות, במיוחד עבור תרחיש המבערה שפליטות ה-CO בו גבוהות מאד (בערך פי - 70) ביחס לפליטה ממקור נייח. בהיבט שיעור התרומה היחסית של כל מזהם לעלות החיצונית כפי שמופיע באיור 32, ניתן להבחין שעלויות ה- CO_2 וה- SO_x מהוות בד"כ את מרכיב העלות העיקרי. עלויות חיצוניות

²⁹ מתוך פרסום באתר משרד האנרגיה והמים. עבור סולר דל גופרית.

<http://energy.gov.il/Subjects/Fuel/Pages/GxmsMniTheoreticPrices.aspx>

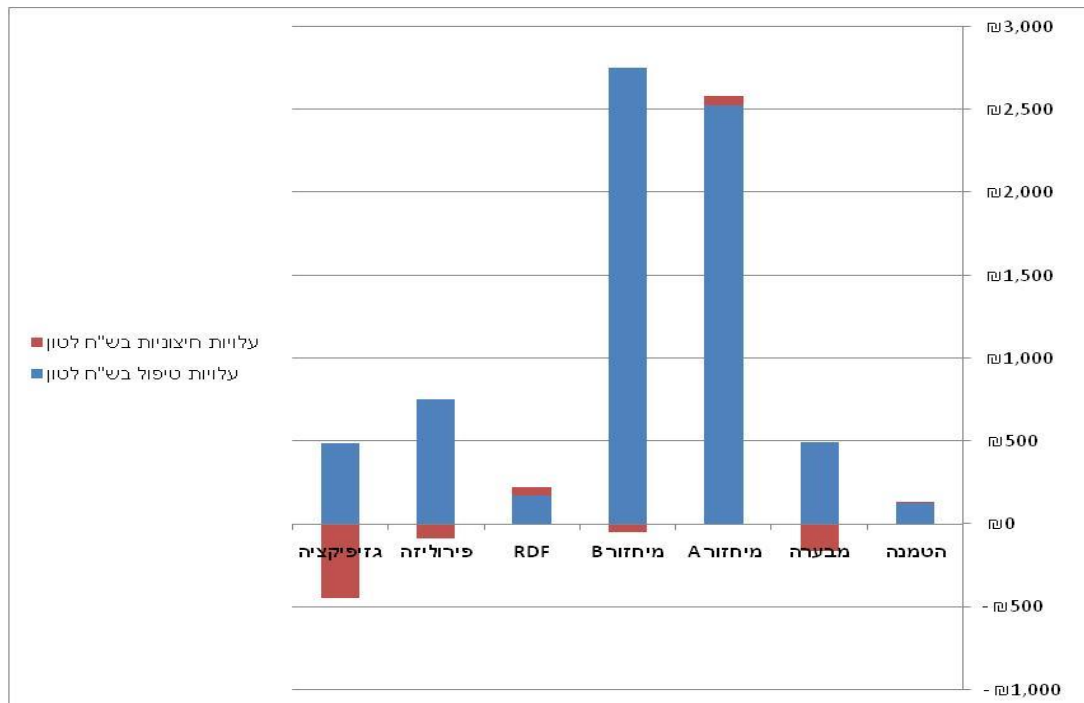
³⁰ Market Report Plastics – October 2012.

http://plhasticker.de/preise/marktbericht2_en.php?j=12&mt=10&quelle=bvse

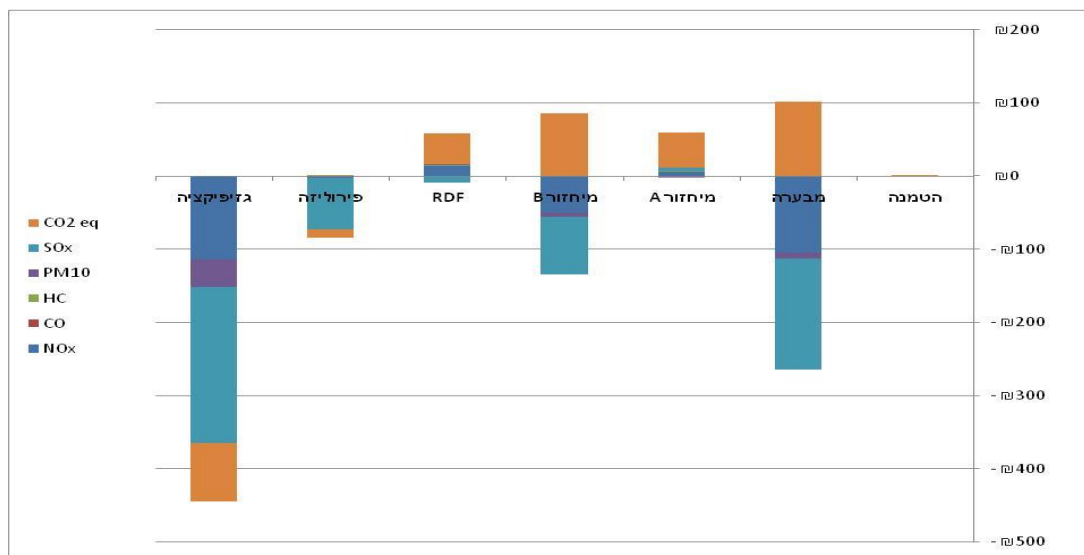
³¹ מתוך אתר רשות החשמל. http://80.70.129.192/Sip_storage/FILES/6/2386.pdf

מפליטות ה- CO_2 במטמנה בתרחיש ההטמנה הופנמו בהיטל ההטמנה שמהווה חלק מעלות הטיפול של המטמנה.

איור 30. עלויות ישירות ועלויות חיצוניות בתרחישים השונים (ש"ח לטון)



איור 31. התרומה היחסית של מזהמים לעלויות החיצוניות בתרחישים השונים



9.6.2 תועלת כוללת

כפי שניתן לראות בטבלה 33 בהנחה שכל פסולת הפלסטיק מנוהלת באמצעות תרחיש אחד, לתרחישי הטיפול התרמי עדיפות על פני השיטות האחרות, בהם תרחיש הפירוליזה בעל התועלת הגבוהה ביותר ואחריו תרחיש ה-RDF והגזיפיקציה. תרחיש ההטמנה הוא היחיד שבו קיימת עלות, ללא כל תועלת.

טבלה 33. עלויות ותועלות כוללות לסך פסולת הפלסטיק בישראל בתרחישים השונים

תרחיש	עלות טיפול כוללת במתקן בש"ח לטון	הובלה	עלויות חיצוניות בש"ח לטון			הכנסות בש"ח לטון	
			טיפול במתקן	סה"כ (עלויות בערך שלילי מייצגות תועלות חיצוניות)	הכנסות ממכירת חשמל ותוצרי לוואי	סה"כ הכנסות	סה"כ תועלות ש"ח (באלפים) ל-270 אלף טון פסולת פלסטיק בשנה
הטמנה	135	1.93	*0	1.93	0.00	-136.93	-36,970
מבערה	498.38	1.93	(-163.94)	(-162.02)	816.76	480.4	129,707
מיחזור - A	2,525.21	1.93	55.67	57.60	3,193.18	610.37	164,798
מיחזור - B	2,752.20	1.93	(-49.38)	(-47.45)	3,639.42	934.68	252,363
RDF	173	0.43	50.05	50.49	1,895.35	1,671.86	451,401
פירוליזה	755.35	1.93	-84.32	(-82.39)	3,129.04	2,456.08	663,140
גזיפיקציה	490.59	1.93	-446.35	(-444.42)	1,549.37	1,503.30	405,891

(*) עלות חיצונית של הטמנה מופנמת בהיטל ההטמנה

בנוסף, מאחר ותרחיש המיחזור המכני-B הוא תרחיש הכולל בתוכו טיפול במבערה שהקמתה ותפעולה אינם מגולמים בעלויות הטיפול של התרחיש, ניתן להניח שתועלתו בפועל נמוכה יותר.

9.6.3 היבטי זמינות

המודל הכלכלי לוקח בחשבון כי כל פסולת הפלסטיק מטופלת באמצעות תרחיש בודד. מאחר ובמציאות קיימים מספר גורמים כמו קיבולת מקסימלית של פתרון טיפול ומרחקי שינוע אשר יוכלו לשנות את תוצאות המודל, בוצעה הערכה לגבי כדאיות פתרון הטיפול עבור פסולת הנמצאת במרחק גדול יחסית ממיקום פתרון הטיפול, כפי שהוצע בתרחישים השונים. בחינה זאת אמורה לענות על שתי שאלות:

- האם במקרה של יישום תרחיש - RDF המחייב את הסעת הפסולת למתקן מרוחק, כדאי להקים מתקן חלופי באזור הצפון (בהנחה ש-RDF הוא הפתרון המיושם ואין כוונה להקים בזמן הקרוב מתקן פירוליזה בצפון הארץ)?
 - מה המרחק המינימלי ממתקן הקליטה בצפון למתקן המיון בחיריה כדי להעדיף הקמת מתקן בצפון שרמת התועלת שלו נמוכה מזה שנמצא בדרום (למשל מתי עדיף להקים מתקן מסוג מיחזור - MR-B בצפון מקום להעדיף טיפול בגזפיקציה בדרום)?
- עבור ניתוח זה הוגדרו מספר הנחות:
- ניתן להקים כל מתקן בצפון הארץ, מלבד ה-RDF שמיקומו נשאר כמו בתרחיש.
 - 30% מפסולת הפלסטיק ממוקמת בצפון המדינה (81 אלף טון מתוך 270 אלף טון).
 - פסולת מהצפון שתטופל דרך מתקן המיון בחיריה (כמו בתרחישים) תעבור מרחק של 220 ק"מ הלוך חזור, כלומר תוספת עלות נסועה של 220 ק"מ לתרחישים.
 - עלות נסועה שווה ל-0.75 ש"ח/ק"מ.
 - המרחק מתחנת מיון בצפון למתקן טיפול מקומי זהה לזה שבתרחישים (220 ק"מ עלוך חזור).
 - כל תרחיש יכול לטפל בכל היקף של קיבולת.
- מניתוח התוצאות בטבלה 36 עולה כי אם פתרון ה-RDF ברמלה הינו בעל קיבולת המספיקה לטיפול בכל פסולת הפלסטיק מכל אזורי הארץ, הוא עדיף על הקמת מתקן ייעודי בצפון הארץ שהתקבל כבעל תועלת נמוכה יותר לכל טון פסולת פלסטיק מטופלת. תוצאת אלה תקפות כל עוד מרחקי השנוע נמוכים מ-1600 ק"מ הלוך חזור עד לחיריה – נתון שאינו רלוונטי כלל למרחקי השינוע בישראל.
- עבור פתרונות הטיפול האחרים, רק אם המרחק מתחנת המיון בצפון עולה על 740 ק"מ הלוך חזור למתקן המיון בחיריה כדאי להעדיף טיפול במתקן מבערה בצפון הארץ על פני טיפול בדרום הארץ במתקן מיחזור-A שלו תועלת גבוהה יותר.

טבלה 34. עלויות טיפול כוללות בתרחיש פסולת בצפון

תרחיש	תועלת כוללת (מגלמת הפחתת תועלת מסיכון)	שיעור השינוי בתועלת בעקבות טיפול במתקן בדרום על פני מתקן בצפון (220 ק"מ נסיעה מהצפון)	שיעור השינוי הנדרש בתועלת כדי להעדיף פתרון בעל דירוג תועלת נמוך יותר	מה המרחק הנדרש מתחנת המיון בצפון לחיריה כדי להעדיף הקמת מתקן טיפול בצפון שמדורג כנמוך יותר בדירוג רמת התועלת.
הטמנה	(-36,970,898)	-27%	-381%	לא רלבנטי
מבערה	103,766,023	-15%	43%	740 ק"מ הלוך חזור על פני שימוש במתקן מיחזור A קיים בדרום
מיחזור A	148,319,043	-10%	45%	1100 ק"מ הלוך חזור על פני שימוש במתקן מיחזור B קיים בדרום
מיחזור B	214,509,155	-7%	42%	1470 ק"מ הלוך חזור כדי להעדיף הקמת מתקן זה על פני שימוש במתקן גזיפיקציה קיים בדרום
RDF	406,261,296	-4%	22%	1450 ק"מ הלוך חזור כדי להעדיף הקמת מתקן RDF על פני שימוש במתקן פירוליזה קיים בדרום
פירוליזה	497,355,285	-3%	-	לא רלבנטי
גזיפיקציה	304,418,562	-5%	33%	כ- 1600 ק"מ הלוך חזור כדי להעדיף הקמת מתקן גזיפיקציה על פני שימוש במתקן RDF קיים בדרום

9.6.4 אי וודאות

המודל מציג תוצאות המבוססות על מספר הנחות. מאחר וקיימת אי וודאות הנובעת בעיקר ממחיר השער הסופי לטיפול ב-1 טון שמגלם בתוכו את עלויות ההקמה והתפעול של פתרון טיפול, בוצע ניתוח בסיסי הבודק מה מידת השפעתה של אי הוודאות על התוצאות. עבור כל תרחיש הוגדר שיעור סיכון המשקף את אי הוודאות בתועלת הכוללות ממנו. שיעור הסיכון נקבע בהתאם לניתוח האיכותי שבוצע בדוח של בקר וחוב' (2011) בה התייחס למידת מורכבות טכנולוגית ומורכבות לוגיסטית. שיעור הסיכון המתאים לרמת הסיכון מפורט בטבלה 34. בתרחיש ה-RDF הופחתה רמת הסיכון מאחר ופרויקט ההקמה של מתקן ה-RDF עבר את כל הבדיקות הכלכליות ואושר.

טבלה 35. רמות הסיכון של התרחישים השונים

תרחיש	הטמנה	מבערה	מיח' A	מיח' B	RDF	פירוליזה	גזיפיקציה
רמת מורכבות לוגיסטית ושיעור סיכון	נמוכה (0%)	גבוהה (10%)	בינונית (5%)	בינונית (5%)	בינונית (5%)	גבוהה (10%)	גבוהה (10%)
רמת מורכבות טכנולוגית ושיעור סיכון	נמוכה (0%)	גבוהה (10%)	בינונית (5%)	גבוהה (10%)	בינונית (5%)	גבוהה (15%)	מאד (15%)
שיעור סיכון מצרפי	0%	20%	10%	15%	10%	25%	25%

מניתוח התוצאות כפי שמתוארות בטבלה 35, עולה כי אם נניח שיכולה להיות סטייה בתועלת הכוללת של תרחיש (או פרויקט), בשיעור מקובל של 20%, אזי בעת בחינת חלופות שונות יש לקחת בחשבון כי תרחיש ה-RDF יכול להיות זהה בתועלתו לתרחיש הפירוליזה. אם לא מפנימים את שיעור הסיכון המצרפי של הראשון. עבור התרחישים האחרים עולה מהניתוח כי הם לא יוכלו להשתוות לתרחיש הטוב מהם בדירוג התועלות, במיוחד תרחישי המבערה והגזיפיקציה.

טבלה 36. דירוג רמת תועלות התרחישים בגילום שיעור הסיכון

דירוג לפי רמת תועלת בש"ח/לטון	תרחיש	תועלת כוללת בש"ח לטון	שיעור סיכון אפשרי, באחוזים	תועלת בש"ח לטון פחות שיעור הסיכון	שיעור ההפרש בתועלת מול הטוב ממנו בדירוג רמת התועלת
1	פירוליזה	2,456.08	25%	1,842.06	-
2	RDF	1,671.86	10%	1,504.67	22%
3	גזיפיקציה	1,503.30	25%	1,127.48	33%
4	מיחזור - B	934.68	15%	794.83	42%
5	מיחזור - A	610.37	10%	549.33	45%
6	מבערה	480.90	20%	384.32	43%
7	הטמנה	-136.93	0%	-136.93	-381%

10 מסקנות

מטרות המחקר היו לכמת את פ"פ הנוצרת בשנה בישראל על זרמיה, ולבחון מהי אפשרות הטיפול הטובה ביותר לפסולת פלסטיק בישראל בהיבט הסביבתי והכלכלי, תוך התמקדות בתועלת האנרגטית שניתן להפיק ממנה. לשם כך בוצע נמ"ח השוואתי אשר כלל מספר תרחישים שהתייחסו לטכנולוגיות טיפול שונות. עבור רוב התרחישים הונח שהם מטפלים בלעדית בכל פסולת הפלסטיק השנתית, במתקן אחד. בנוסף בוצע לכל התרחישים ניתוח עלות-תועלת כלכלי שכלל הערכת עלויות פרטיות, עלויות חיצוניות והכנסות צפויות מהתרחישים השונים.

הניתוח הסביבתי בוצע באמצעות מתודולוגיה מתאימה אשר מוגבלת באפשרותה להציג את התמונה המלאה של ההשפעות הסביבתיות מהתרחישים השונים. זאת מכיוון שלא קיימים כיום מקורות מידע המאפשרים את תרגום התוצאות לתנאים היחודיים הקיימים בישראל. לכן, הערכים שהתקבלו בתוצאות הניתוח הסביבתי משמשים כאמצעי להשוואה בין התרחישים השונים והם מתאימים רק עבור ההנחות והמערכת שהוגדרו ועליהם מתבססת עבודה זאת. פסולת הפלסטיק עומדת על כ-270 אלף טון בשנה, מרביתה מאריזות, וסוג הפלסטיק הנפוץ ביותר הוא PE. היקף מיחזור פסולת האריזות עומד כ-15%-12%. **המסקנה היא כי בהינתן פתרונות טיפול הקצה הקיימים בישראל- ללא השבת אנרגיה אין אפשרות להגיע ליעדי המיחזור שהוגדרו בחוק האריזות, מאחר ופתרונות הטיפול (מפעלי המיחזור, בעיקר של PET), אינם בקיבולת מספקת.**

בנוסף, כפי שהוצג במחקר, קיימים פתרונות אחרים, המבוססים על השבת אנרגיה מפסולת הפלסטיק, כלכליים יותר וסביבתיים יותר, כמו שעולה מתוצאות ה-נמ"ח והניתוח הכלכלי. למרות זאת, כל מדיניות המקדמת השבה של פלסטיק צריכה לקחת בחשבון את תעשיית המיחזור הקיימת ולהמנע מפגיעה בה.

מניתוח תוצאות דירוג הביצועים הסביבתיים של התרחישים כפי שמופיעים בטבלה 37, בהנחה שלכל הקטגוריות משקל זהה, עולה שמרבית תרחישי השבת אנרגיה עולים בביצועיהם הסביבתיים על תרחיש המיחזור ללא השבת אנרגיה.

מבין תרחישי השבת האנרגיה, תרחיש הגזיפיקציה (המנצלת את כל פסולת הפלסטיק מלבד ה-PET שמועבר למיחזור מכני) הוא הטוב ביותר לכל המדדים הסביבתיים, מלבד מדד הפוטנציאל להדלדלות משאבים. תוצאה זאת ניתן להסביר בכך שייצור החשמל באמצעות גזיפיקציה נקי יותר מייצור חשמל קונבנציונאלי, אותו הוא מחליף.

מיחזור מכני-A (ומאד קרוב אליו ה-RDF בהפרש של כ-3%) שני במדרג בהיבט פליטות גזי החממה, כך שאם ניהול הפסולת מוכוון הפחתת גזי חממה, מיחזור מכני-A ו-RDF יכולים להוות פתרון מתאים. מבערה לעומת זאת, למרות דירוגה כשנייה בטיבה במספר מדדים-בהיבט פליטות גזי חממה היא בעלת הדירוג הנמוך ביותר. נמצא שההשלכות שיכולות להשפיע משמעותית על בריאות האדם והמגוון הביולוגי נובעות מפליטות גזי חממה שהם מזהם גלובלי ולכן לא יכולות לבטא אבסולוטית את היקף הפגיעה האפשרית בתחומי מדינת ישראל.

הניתוח הכלכלי הראה שלתרחיש הפירוליזה התועלת הגבוהה ביותר ויכולה להגיע עד לכדי כ-663 מיליון ש"ח עבור כל פסולת הפלסטיק העירונית בשנה. אחריו תרחיש ה-RDF עם כ-451 מיליון ש"ח, ואם לוקחים בחשבון את שיעור הסיכון מפרויקט פירוליזה, RDF יכול להביא לתועלת כמעט זהה לו. תרחיש ההטמנה מביא לעלות של כ-37 מיליון ש"ח בשנה.

במחקר גם נבחן אם עדיף להקים מתקן בעל תועלת נמוכה יותר בצפון הארץ בהנחה ששם מרוכזים 30% מפסולת הפלסטיק, על פני נסיעה לטיפול במתקן בעל תועלת גבוהה יותר בדרום הארץ. מבדיקה זאת עלה כי אם מרחק הנסיעה הלך חזור גדול מ-740 ק"מ כדאי להקים מבערה בצפון על פני טיפול במתקן מיחזור מכני-A בדרום.

מחקר זה מראה כי גיבוש מדיניות לניהול פסולת פלסטיק הכוללת בתוכה שילוב של מיחזור והשבה לאנרגיה בהתאם לסוג הפסולת, איכותה והזרם שממנה היא מגיעה, יכולים להביא לתועלת סביבתית וכלכלית גבוהה. לכן, מומלץ לגבש מדיניות המתמקדת בניהול פסולת פלסטיק לצורך הפחתת השלכותיו וליצול יעיל יותר של משאבים וחומר גלם, כפי שמתבצע בימים אלה ביוזמת האיחוד האירופי.

טבלה 37. דירוג סביבתי מסכם של החלופות לטיפול בפסולת פלסטיק בישראל

קטגוריה	הטמנה	מבערה	מיחזור מכני - A	מיחזור מכני - B	RDF	פירוליזה	גזיפיקציה
פוטנציאל להתחממות גלובלית	3	1	5	2	6	4	7
פוטנציאל להיווצרות אוזון פוטוכימי	2	6	1	5	3	4	7
פוטנציאל להיווצרות חלקיקים	3	6	2	5	1	4	7
פוטנציאל להחמצת קרקע	2	6	1	5	3	4	7
פוטנציאל לאוטרפיקציה ימית	4	6	3	5	1	2	7
פוטנציאל להדלדלות משאבים פוסילים	1	7	2	5	4	6	3
דרוג כולל	15	32	14	27	18	24	38

10.1 המלצות להמשך מחקר

מחקר זה מידל את הטיפול בכל פסולת הפלסטיק בישראל באמצעות תרחיש אחד, לרוב ללא שילוב בין פתרונות טיפול וללא התחשבות בקיבולת המקסימלית האפשרית של כל טכנולוגית טיפול. לפיכך, מומלץ לבצע מחקר הבוחן שילוב פתרונות שונים באזורים שונים בהתאם למגבלות קיבולת המתקנים והתכנון העומדים בפניהם. כמו כן, יש להגדיר ערכי נירמול לתוצאות הנמ"ח כך שיתאימו לישראל ובמיוחד כיצד מתרגמים מקומית השלכות של מזהמים, כמו לדוגמה, מזהמים המביאים להחמצת קרקעות- בעיה שכמעט ואינה קיימת בישראל. ערכי הנירמול יאפשרו לשפר את תקפות תוצאות הנמ"ח כך שיהפכו אותו למתאים יותר ככלי לקבלת החלטות, עבור סוגיות הנבחנות בגבולות ישראל.

מקורות

- אדם טבע ודין (אט"ד) (2011). פסולת אלקטרונית הבעיות, הסיכונים, הפתרונות וההזדמנויות. אילון, א., נחמני, מ., גולדרט, ט., רוזנטל, ג., דורפמן, ע., גרוסמן, מ., שכטר, מ. (2010). מסמך המלצות לקראת גיבוש מדיניות כוללת לטיפול בפסולת אריזות בישראל – מוסד שמואל נאמן. בקר, רוזנטל וגבאי (2011). *חישוב העלויות החיצוניות של זיהום אוויר מתחבורה, תעשייה ומייצור חשמל בישראל* - דוח סופי דצמבר 2011.
- המשרד להגנת הסביבה ופארטו הנדסה בע"מ (2008). תמחור גריטת כלי רכב – דוח מצב כללי אודות שוק מגרשי הגרוטאות בישראל וניתוח כלכלי של תמחור התרומה הראויה לגריטת רכב. זמין ב: http://www.environment.gov.il/Enviroment/Static/Binaries/ModulKvatzim/grita-price_pareto_1.pdf
- המשרד להגנת הסביבה (הגנה"ס) (2012). *מתווה ליישום תוכנית אבי לטיפול אזורי בפסולת חקלאית*. טיוטא 24.5.2012.
- למ"ס (2011). *שנתון סטיסטי לישראל 2011 - פסולת ממוחזרת לפי סוג*. זמין ב: http://www1.cbs.gov.il/shnaton62/st27_15.pdf
- משרד התעשייה, המסחר והתעסוקה (התמ"ת) (2010). *סקירת תחום פלסטיק וגומי שנת 2010*. פארטו (2011) – *בדיקה כלכלית של הקמת מתקני קצה לטיפול בפסולת עירונית מוצקה בשיטת PPP*. מרץ 2011.
- שלדג (2006). *הרכב הפסולת הביתית, סקר ארצי 2005*, חברת שלדג. http://www.sviva.gov.il/Enviroment/Static/Binaries/ModulKvatzim/p0423_2.pdf
- American Chemistry Council (ACC) and Association of Postconsumer Plastic Recyclers (APPR) (2010). *2009 UNITED STATES NATIONAL POSTCONSUMER PLASTICS BOTTLE RECYCLING REPORT*. Available at: http://www.americanchemistry.com/s_plastics/sec_content.asp?CID=1593&DID=11513. [Accessed 6th.May. 2011]
- Aguado, J., Serrano, D. P., & Clark, J. H. (1999). *Feedstock recycling of plastic wastes*. Royal Society of Chemistry, Clean Technology Monographs. Cambridge, UK.
- Al-Salem, S., P. Lettieri, et al. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* 29(10): 2625-2643.
- Al-Salem, S., P. Lettieri, et al. (2010). The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science* 36(1): 103-129.
- Alter, H. (2005). The recovery of plastics from waste with reference to froth flotation. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(2), 119-132.
- Andrady, A. L. (2003). *Plastics and the Environment* (Vol. 20). A. L. Andrady (Ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.

- APME, (2002). *An analysis of plastics consumption and recovery in Western Europe in 2000*. Available at: <http://pieweb.plasteurope.com/members/pdf/PIE5139.PDF> [Accessed 8th.May. 2011]
- Arena, U., Mastellone, M., & Perugini, F. (2003). Life Cycle assessment of a plastic packaging recycling system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(2), 92-98.
- Ayalon, O., Goldrath, T., Rosenthal, G., & Grossman, M. (2009). Reduction of plastic carrier bag use: An analysis of alternatives in Israel. *Waste Management*, 29(7), 2025-2032.
- Baitz, M., Kreißig, J., Byrne, E., Makishi, C., Kupfer, T., Frees, N., et al. (2009). Life cycle assessment of PVC and of principal competing materials. Commissioned by the European Commission.
- Baker, G. (2005). Process for conversion of waste material to liquid fuel: EP Patent 1,577,366.
- Bare, J. C. (2002). Traci. *Journal of Industrial Ecology*, 6(3-4), 49-78.
- Bergstrom, J. C. and P. De Civita (1999). Status of Benefits Transfer in the United States and Canada: A Review. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie* 47(1): 79-87.
- Blengini, G. A., Fantoni, M., Busto, M., Genon, G., & Zanetti, M. C. (2012). Participatory approach, acceptability and transparency of waste management LCAs: Case studies of Torino and Cuneo. *Waste Management*.
- Bockhorn, H., Hornung, A., Hornung, U. (1998). Stepwise pyrolysis for raw material recovery from plastic waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 46(1): 1-13.
- Boesch, M. E., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production. *Environmental science & technology*, 43(19), 7578-7583.
- Bogucka, R., & Brunner, P. (2007). *Evaluation of plastic flows and their management in Austria and Poland: Challenges and opportunities: Project: KST-APL*. Institut für Wasserge, Ressourcenmanagement und abfallwirtschaft, Technical University of Vienna. Performed for ARGEV Verpackungsverwertungs-Ges.mmbH, Vienna, Austria. Available at: http://www.iwa.tuwien.ac.at/htmd2264/publikat/aws-publikationen/Publikationen/2007/KST_APL_Endbericht%202007.pdf . [Accessed 8th.May. 2011]
- Breslin, V. T., Senturk, U., & Berndt, C. C. (1998). Long-term engineering properties of recycled plastic lumber used in pier construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 23(4): 243-258.
- Briassoulis, D., Hiskakis, M., Babou, E., Antiohos, S. K., & Papadi, C. (2012). Experimental investigation of the quality characteristics of agricultural plastic

- wastes regarding their recycling and energy recovery potential. *Waste Management*, 32(6), 1075-1090.
- Briassoulis, D., Hiskakis, M., Scarascia, G., Picuno, P., Delgado, C., & Dejean, C. (2010). Labeling scheme for agricultural plastic wastes in Europe. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 2(2), 93-104.
- Buekens, A., & Cen, K. (PVC and waste incineration-modern technologies solve old problems. Available at: <http://www.pvcinfo.be/bestanden/A002%20-%20PVC%20and%20waste%20incineration%20-%20prof%20Buekens.pdf> [Accessed 30th.Nov. 2012]
- Bureau, I. P. P. C. (2009). Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. *European IPPC Bureau*. Available at: http://www.mst.dk/NR/rdonlyres/0409AE3D-B44D-4B0C-9375-053BFD9A696D/0/clm_bf_0509_public.pdf [Accessed 30th.Nov. 2012]
- Buttke, B., Giering, R., Schlotter, U., Himmelreich, B., Wittstock, K., (2005). *FULL SCALE INDUSTRIAL trials of shredder residue in high temperature slagging-bed-gasifier in Germany*. PlasticEurope.
- CAMA - The Canadian Appliance Manufacturers Association (2005). *Generation and Diversion of White Goods from Residential Sources in Canada*.
- Campbell, P. E., Evans, R. H., McMullan, J. T., & Williams, B. C. (2001). The potential for adding plastic waste fuel at a coal gasification power plant. *Waste management & research*, 19(6), 526-532.
- CEMBUERU (1999). *Environmental benefits of using Alternative Fuels in Cement Production - A Life-Cycle approach*.
- Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2008). Life cycle assessment of urban waste management: Energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy. *Waste Management*, 28(12), 2552-2564.
- Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, 34(12), 2116-2123.
- Cleary, J. (2009). Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. *Environment international*, 35(8), 1256-1266.
- Cockshott, J. (2005). *Independent Engineer's Due Diligence Report ThermoFuel Process Technology. Report prepared for Axiom Energy Ltd 17 August 2005 Final Report*.
- Council of Europe (2007) *Management of municipal solid waste in Europe*. Doc. 11173. Available at:

- <http://assembly.coe.int/Documents/WorkingDocs/Doc07/EDOC11173.pdf>[Accessed 30th.Nov. 2012]
- DEFRA (2004). *Review of Environmental and Health Effects of Waste Management: Municipal Solid Waste and Similar Wastes.*
- Di Vita, G. (2001). Technological change, growth and waste recycling.. *Energy Economics* 23(5): 549-567.
- Dodbiba, G., Takahashi, K., Sadaki, J., & Fujita, T. (2008). The recycling of plastic wastes from discarded TV sets: comparing energy recovery with mechanical recycling in the context of life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 16(4), 458-470.
- Doka G. (2009) *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services*. Final report ecoinvent v2.1 No. 13. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Erdmann, C., Liebner, W., Seifert, W., "Lurgi's MPG and BGL gasifiers at SVZ Schwarze Pumpe status and experiences in IGCC application," 1999 gasification technologies conference, October 17-22, 1999 San Francisco California.
- Eriksson, O., & Finnveden, G. (2009). Plastic waste as a fuel-CO₂-neutral or not?. *Energy & Environmental Science*, 2(9), 907-914.
- EU commission (2010). *Making sustainable consumption and production a reality: a guide for business and policy makers to Life Cycle Thinking and Assessment.* Luxembourg: EUR-OP, 2010. Available at: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/Making%20sustainable%20consumption%20and%20production%20a%20reality-A%20guide%20for%20business%20and%20policy%20makers%20to%20Life%20Cycle%20Thinking%20and%20Assessment.pdf/view>. [Accessed 6th.May. 2011]
- European Commission (DG Environment). (2011) PLASTIC WASTE IN THE ENVIRONMENT Final report November 2010 from the European Commission DG ENV in association with BIO Intelligence Service, AEA Technology, Institute for European Environmental Policy.
- European Commission, Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability. ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment . *Life Cycle Thinking and Assessment*. [Online] 3 12, 2010. [Cited: 12 3, 2011.] <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>.
- European Commission. (2006). Reference document on the best available techniques for waste incineration. *BAT Reference Document (BREF), Final Draft, August.*
- European Commission (2013). GREEN PAPER – On European Strategy on Plastic Waste in the Environment.

http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/green_paper/green_paper_en.pdf.

[Accessed 5th.April. 2013]

- Finnveden, G., A. Björklund, et al. (2007). Flexible and robust strategies for waste management in Sweden. *Waste Management* 27(8): S1-S8.
- Finnveden, G., Albertsson, A.-C., Berendson, J., Eriksson, E., Höglund, L. O., Karlsson, S., et al. (1995). Solid waste treatment within the framework of life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 3(4), 189-199.
- Foster, S. (2008). *An assessment of the technical, environmental and economic viability of recycling domestic mixed plastics packaging waste in the UK.*: WRAP.
- FRANKLIN ASSOCIATES (2010). *LIFE CYCLE INVENTORY OF 100% POSTCONSUMER HDPE AND PET RECYCLED RESIN FROM POSTCONSUMER CONTAINERS AND PACKAGING*. APRIL 7, 2010.
- Garg, A., Smith, R., Hill, D., Simms, N., & Pollard, S. (2007). Wastes as co-fuels: the policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications. *Environmental science & technology*, 41(14), 4868-4874.
- Garraín, D., Vidal, R., Martínez, P., & Bellés, M. J. (2007). *LCA of thermoplastics recycling*.
- Gendebien, A., Leavens, A., & Godley, A. (2003). Refuse derived fuel, current practice and perspectives. Final report.
- Gentil, E. C., Damgaard, A., Hauschild, M., Finnveden, G., Eriksson, O., Thorneloe, S., et al. (2010). Models for waste life cycle assessment: Review of technical assumptions. *Waste Management*, 30(12), 2636-2648.
- GHK – Bio Intelligence Service(2006).A study to examine the benefits of the end of life vehicles directive and the costs and benefits of a revision of the 2015 targets for recycling, re-use and recovery under the ELV directive – final report to DG Environment. “*Annex 2: arisings and treatments of end of life vehicles*” and “*Annex3: post-shredder technologies – review of the technologies and costs*”.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2000). The Eco-Indicator 99, A Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment Methodology Report. *PRé Consultants BV, Amersfoort, The Netherlands*.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.: Report I: Characterisation*. s.l. : A report to the Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), 2009.
- Goodship, V. (2007). *Introduction to plastics recycling*: Smithers Rapra Technology.

- Goosey, M. (2004). End-of-life electronics legislation-an industry perspective. *Circuit World*, 30(2), 41-45.
- Guinée, J.B.; Gorée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background*. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp.
- Hannequart, J. (2004). *Good practice guide on waste plastics recycling: A guide by and for local and regional authorities*. Association of cities and regions for recycling (ACRR), Belgium. Available at: <http://www.pvc.org/content/download/1003/7741/file/ACRRReport.pdf>. [Accessed 8th.May. 2011]
- Huffman, G. P., & Shah, N. (1997). Feasibility Study for a Demonstration Plant for Liquefaction and Coprocessing of Waste Plastics and Tires.
- Houghton, J. T. (1997). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual – chapter 2*. IPCC WGI Technical Support Unit. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch2ref1.pdf>
<http://www.gasification.org/uploads/downloads/Conferences/1999/GTC99040.pdf> [Accessed 30th.Nov. 2012]
- ISO. (1997). *Environmental management—life cycle assessment—principles and framework*. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardisation.
- Itsubo, N., & Inaba, A. (2004). *LIME-A Comprehensive Japanese LCIA Methodology based on Endpoint Modeling*.
- Jenseit, W., Stahl H., Wollny, V., Wittlinger, R. (2003). *Recovery Options for Plastic Parts from End-of-Life Vehicles: an Eco-Efficiency Assesment*. For APME, Brussels.
- Kääntee, U., Zevenhoven, R., Backman, R., & Hupa, M. (2004). Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. *Fuel Processing Technology*, 85(4), 293-301.
- Khoo, H. H. (2009). Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies. *Waste Management*, 29(6), 1892-1900.
- Klein, A., & Themelis, N. J. (2003). *Energy Recovery from Municipal Solid Wastes by Gasification*.
- Kremer, M., Goldhan, G., & Heyde, M. (1998). Waste treatment in product specific life cycle inventories. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(1), 47-55.

- Lavee, D. (2007). Is municipal solid waste recycling economically efficient?. *Environmental Management*, 40(6), 926-943.
- Lazarevic, D., Aoustin, E., Buclet, N., & Brandt, N. (2010). Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 246-259.
- Levin, N., Lugassi, R., Ramon, U., Braun, O., & Ben-Dor, E. (2007). Remote sensing as a tool for monitoring plasticulture in agricultural landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, 28(1), 183-202.
- Lewis, C., A., (1997). *Fuel and Energy Production Emissions Factors. MEET Project: Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport*.
- Mastellone, M. (1999). *Thermal treatments of plastic wastes by means of fluidized bed reactors*, Ph.D. Thesis. Italy: Department of Chemical Engineering, Second University of Naples.
- Mokrzycki, E., Uliasz-Bocheńczyk, A., & Sarna, M. (2003). Use of alternative fuels in the Polish cement industry. *Applied Energy*, 74(1), 101-111.
- Miskolczi, N., Bartha, L., Deák, G., & Jóver, B. (2004). Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. *Polymer degradation and Stability*, 86(2), 357-366.
- NETL (2010) Life Cycle Analysis: Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Power Plant. Appendix : Process Modeling Data Assumptions and GaBi Modeling inputs
- Nishtala, S. R., & Solano, E. (1997). Description of the material recovery facilities process model: Design, cost, and life-cycle inventory. *Internal Rep.* Available at: https://mswdst.rti.org/docs/MRF_Model_OCR.pdf [Accessed 30th.Nov. 2012]
- Noone, A. (2008) *Collected PET bottles*. In: Proceedings of 13th International Polyester Recycling Symposium, Summary of the Conference Proceedings - Press Release 10.10.2008
- Norton, G. A. (1984). *Resource Economics*. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London.
- OECD. (2006). *Improving recycling markets*: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD. (2011). *SUSTAINABLE MANAGEMENT AND RECOVERY POTENTIAL OF NON-PACKAGING PLASTIC WASTE FROM THE COMMERCIAL AND PRIVATE HOUSEHOLD SECTORS*: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Paszun, D., & Spychaj, T. (1997). Chemical recycling of poly (ethylene terephthalate). *Industrial & engineering chemistry research*, 36(4), 1373-1383.

- PE Americas(2009). *Comparative Life Cycle Assessment Ingeo™ biopolymer, PET, and PP Drinking Cups*.
- Perugini, F., Mastellone, M. L., & Arena, U. (2005). A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. *Environmental Progress*, 24(2):137-154.
- PLASTICSEUROPE (2009). The Compeelling Facts About Plastics 2009- An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008.
- Prestes, S. M. D., Mancini, S. D., Rodolfo, A., &Keiroglo, R. C. (2012). Construction and demolition waste as a source of PVC for recycling. *Waste management & research*, 30(2), 115-121.
- Ratafia-Brown, J., Manfredo, L., Hoffmann, J., & Ramezan, M. (2002). Major environmental aspects of gasification-based power generation technologies. *Prepared for DOE/NETL*.
- Reimann, D. (2006). CEWEP Energy Report (Status 2001–2004). *CEWEP, Bamberg, Germany*. Available at:
http://www.cewep.eu/storage/med/media/statements/106_11_07_06_CWEP-Report_Final_Version.pdf[Accessed 30th.Nov. 2012]
- Reimann, D. (2009). CEWEP Energy Report II (Status 2004–2007). *CEWEP, Bamberg, Germany*. Available at:
http://avfallnorge.web123.no/article_docs/09_04_29%20final%20version%20CEWEP-Report.pdf[Accessed 30th.Nov. 2012]
- Rigamonti, L., Grosso, M., & Sunseri, M. (2009). Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(5), 411-419.
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 408(2), 183-191.
- RTI International (2012). *Environmental and Economic Analysis of Emerging Plastics Conversion Technologies*. Prepared for American Chemistry Council
- Sadat-Shojai, M., &Bakhshandeh, G.-R.(2011). Recycling of PVC wastes. *Polymer degradation and Stability*, 96(4), 404-415.
- Scheirs, J., & Kaminsky, W. (2006). *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*: John Wiley & Sons.
- Scheirs, J., & Kaminsky, W. (2006). *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*. John Wiley & Sons.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*: McGraw-Hill.

- Tukker, A. (2002). *Plastics Waste-Feedstock Recycling, Chemical Recycling and Incineration* (Vol. 148): Smart Pubns.
- Turner, R. K. (1992). Municipal Solid Waste Management: an Economic Perspective. *The Treatment & Handling of Wastes*. Chapman & Hall, London, 83-102.
- Yassin, L., Lettieri, P., Simons, S., & Germanà, A. (2005). Energy recovery from thermal processing of waste: a review. *Proceedings of the ICE-Engineering Sustainability*, 158(2), 97-103.
- United Nations Environment Programme, (2009). *Converting Waste Plastics into a Resource*. Compendium of Technologies.
- United Nations Environmental Program (UNEP) (2009). *Converting Waste Plastics into Resource, Compendium of Technologies*.
- United Nations Environmental Program. *TRAINING MODULE for the ASSESSMENT OF PLASTIC WASTE*. Available at:
http://www.unep.org/ietc/Portals/136/Other%20documents/Waste%20Management/Waste%20Plastic/WP_1_1_PlasticWaste_TrainingModule.pdf [Accessed 30th.Nov. 2012]
- UN's (2010). Making sustainable consumption and production a reality: a guide for business and policy makers to Life Cycle Thinking and Assessment. Luxembourg"
- USEPA, (1995). Compilation of Air Pollutants Emissions Factors, AP-42 Vols. I and II. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Vehlow J, Mark F. APME. (1997). *Electrical and electronic plastics waste co-combustion with municipal solid waste for energy recovery*.
- Wäger, P., Schluep M. and Müller, E. (2010) *RoHS Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment*. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa). September 17, 2010
- Wang, M., Lee, H., & Molburg, J. (2004). Allocation of energy use in petroleum refineries to petroleum products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(1), 34-44.
- White, P., Franke, M., & Hindle, P. (1999). *Integrated solid waste management: a lifecycle inventory* (pp.136-152). Aspen Publishers.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., & Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), 436-458.
- Wollny, V., & Schmied, M. (2000). Assessment of plastic recovery options. *The Öko-Institut eV, EEB*.
- World Bank (WB). (2005). *Waste management in China: issues and recommendations*. Available at:

<http://siteresources.worldbank.org/INTEAPREGTOPURBDEV/Resources/China-Waste-Management1.pdf> [accessed 6th.May. 2011]

WRAP (2008). *LCA of Management Options for Mixed Waste Plastics*. Available at: <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/LCA%20of%20Management%20Options%20for%20Mixed%20Waste%20Plastics.pdf> [Accessed 30th.Nov. 2012]

WRAP (2009). *A financial assessment of recycling mixed plastics in the UK - financial modeling and assessment of mixed plastics separation and reprocessing on a commercial scale in the UK*. June 2009.

WRAP (2010). *Environmental benefits of recycling-2010 update*. London, UK: Waste & Resources Action Programme. Available at: www.wrap.org.uk/document.rm?id=8816. [Accessed 6th.May. 2011]

WRAP (2012). *Gate Fees Report, 2012 – Comparing the cost of alternative waste treatment options*.

Zhang, G. H., Zhu, J. F., & Okuwaki, A. (2007). Prospect and current status of recycling waste plastics and technology for converting them into oil in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(3), 231-239

11 נספח I- מחקרי LCA בניהול פסולת פלסטיק

קיימים מחקרים רבים בעולם, ובדדים בלבד בישראל העוסקים בחקר ניהול פסולת פלסטיק בעזרת ניתוח מחזור חיים. במחקר של Perugini et al., (2005) נבחנו אפשרויות לניהול פסולת אריזות פלסטיק באמצעות מיחזור והשבה. פתרונות הטיפול שנבחנו כללו מיחזור מכני, מיחזור כימי ומיחזור שלישוני (feedstock) והשבה לאנרגיה. סוג מחקר ה-נמ"ח היה מסוג קונבנציונלי או הנדסי שהוגדר כ"תהליך להערכה של המעמסות הסביבתיות הכרוכות עם מוצר, תהליך פעילות ע"י זיהוי וכימות אנרגיה וחומרים שנעשה בהם שימוש ופסולות משוחררות לסביבה", תוך אפשרות להעריך את ההשלכות של השימוש בחומרים ובאנרגיה והפסולות, לזהות ולהעריך את אפשרויות השיפור הסביבתיות". המחקר עסק בעיקר בפסולת מיכלי משקה מסוג PET ו-PE. היח' הפונקציונאלית (FU) שעל בסיסה הושו המערכות הוגדרה כ- ניהול של מיכלי משקה שלאחר שימוש, העשויים בעיקר מ-PET ו-PE אשר מובילים ליצור של 1 ק"ג פתיתי PET, כאשר ההנחה היא שיש ביקוש לכל לכל מוצרים הממוחזרים והערך של חומר בתולי זהה. הנחה זו מהווה בעיה במתן ערך לחומ"ג נחסך מכיוון שערכו של חומ"ג ממוחזר אינו זהה מבחינת שוויו הכלכלי, מאפייניו הפיזיכיים ואינו משמש ליצור אותם מוצרים המחייבים חומ"ג בתולי שאותו הוא חוסך כביכול. זה עולה גם במחקרו של Chilton (2009) שבו הוא מציין שבמפעל בקבוקי PET היחס המקסימלי שהחומר הממוחזר יכול להוות הוא כ-5% בלבד.

גבולות המערכת של מחקר של Perugini et al., (2005) כללו את שלב איסוף הפסולת ועד לשלב העיבוד הסופי/שריפה/הטמנה/טיפול והובלה נדרשת בתוך המערכת. נבחנו 5 תרחישים שכללו: (1) הטמנה (שבה לא נלקח בחשבון תשטיפים וייצור של גז מטמנות מכיוון שרק 1-3% מתכולת ההידרוקרבון יכולה להתפרק במהלך 100 שנה), (2) שריפה עם השבת אנרגיה, (3) מיחזור מכני, (4) מיחזור מכני + פירוליזה בטמפ' נמוכה (מחזור מכני של PET ופירוליזה של ה-PE) באמצעות טכנולוגיה מסוג BP קיימת ופועלת בהיקף תעשייתי, (5) מחזור מכני + שבירה בעזרת מימן (מיחזור מכני של ה-PET ופירוליזה של ה-PE) באמצעות טכנולוגיה VEBA קיימת שיכולה לטפל בכ- 200Kton בשנה. התשומות שנבדקו לפי שלבים בכל תרחיש היו צריכת אנרגיה (MJ) והמשאבים שנצרכו להפקתה, צריכת מים (בתהליך ולקירור), היווצרות גזי חממה (אקוואלנטי CO₂), פליטות לאוויר (אורגניים, אבק ומתכות), פליטות למים (BOD ו-COD, אורגניים מסיסים ומוצקים מרחפים) ופסולת מוצקה מיוצרת. תוצאות המחקר הראו כי תרחישי המיחזור הפחיתו את גזי החממה בכ-70%, עבור פליטות לאוויר ולמים של מזהמים והיווצרות פסולת המיחזור המכני מציג את הביצועים הסביבתיים הטובים ביותר. המסקנות הן כי להטמנה יש את הביצועים הרעים ביותר, אפשרות המיחזור המכני היא המועדפת סביבתית מלבד היבט צריכת האנרגיה, למיחזור שלישוני (בעיקר לפירוליזה) יש מספר תועלות סביבתיות משמעותיות. מחקר אחר של Moberg et. al, (2005) בחן את הטיפול בפסולת בשבדיה תוך התמקדות בפסולת נייר ופלסטיק מסוג PET, קטגוריית השלכות שנבחנו כללה היווצרות החממה פוטוכימית, משאבים אביוטיים, התחממות גלובלית, החממה, איוטרופיקציה והדלדלות שכבת האוזון, תוך בחינה של 3 תרחישים הכוללים: מיחזור, שריפה כולל השבת אנרגיה (מבוסס על מפעל קיים בשבדיה) והטמנה (כולל אפשרויות והסתברויות להיווצרות שריפות, טיפול ב-80% ממי הנגר במהלך ה-100 שנים הראשונות, טיפול בחלחול של בוצה ואיסוף גז מתאן ביעילות של 50% לצרכי שריפה

ליצירת אנרגיה וחם. הנחות. המחקר השתמש במונח של ייצור נמנע ובעצם בחן את ההשלכות הנמנעות בעת שימוש בפתרון זה או אחר התוצאות הראו עדיפות כוללת לטובת המיחזור.

בדו"ח סקירת ספרות שפורסם ע"י Schmied & Wollny (2000) שמטרתו הייתה לבחון עבור האיחוד האירופי, את האפשרויות לשינוי דירקטיבת האריזות ע"י בדיקה האם היררכית הטיפול בפסולת המקובלת (הימנעות, מיחזור, שריפה והשבה ולבסוף הטמנה) עבור פסולת אריזות פלסטיק צריכה להישאר באותו הסדר, באמצעות נמ"ח. הדו"ח מצא שלמיחזור מכני יתרון אקולוגי גבוה יותר מאשר מיחזור שניוני, השבת אנרגיה או הטמנה כאשר החומר הממוחזר מחליף חלק יחסי של פולימר בתולי והאיבודים בתהליך מינימלים. מיחזור מכני בעל תועלת במיוחד בהיבט צריכת אנרגיה ראשית ופליטות גזי חממה. הדו"ח ציין שמחקרים מראים שתהליכי האיסוף, מיון וטיפול מוקדם בפסולת תורמים השלכות סביבתיות מועטות מס"כ מערכת המיחזור. בהנחה שחומרים ממוחזרים מחליפים חומרים לא פלסטיים כגון עץ, בטון, או ברזל התועלות הסביבתיות קטנות יותר והחלפה של מוצרים בעלי ערך נמוך יכולה אף לדרדר את המצב הסביבתי. בנוסף, המחקרים שנסקרו מראים כי מיחזור (שינוי ושלישוני) הוא בעל יתרונות גדולים יותר מהשבת אנרגיה, כמו כן ניתוח מפורט הראה שמיחזור שניוני ושלישוני שמחזיר למונומר, הוא בעל תועלות סביבתיות גבוהות על פני החזרה ל-feedstock (החזרה לחומ"ג המחליפים דלקים). ניצול אנרגיה של פסולת פלסטיק למפעל מלט מביא להפחתת CO₂ גדולה יותר משריפה ביעילות גבוהה, אך החסכון באנרגיה ראשית בכבשני מלט נמוך יותר (הדלק בכבשן פולט הרבה CO₂ מאשר הדלקים במשרפה בנוסף תקני הפליטות עבור מפעלי מלט נמוכים ממתקני שריפה. המסקנות של הדו"ח הראו שאין עדיפות לשריפה על פני הטמנה אלא אם כן לוקחים בחשבון השבה של אנרגיה ביעילות גבוהה.

המסמך העדכני ביותר שנמצא הוא הדו"ח המפורט של WRAP (2010) אשר סקר עבודות נמ"ח מרחבי העולם, להערכת ההשלכות של אפשרויות אלטרנטיביות לניהול פסולת באנגליה לחומרים שונים וביניהם פלסטיק. הניתוח סקר 28 מחקרי נמ"ח אפשרויות ניהול וטיפול בפסולת פלסטיק ומתוכם נבחרו 8 אפשרויות. קטגוריות ההשלכות שנבחרו לצורך ההערכה כללו: הדלדלות משאבי טבע, פוטנציאל שינויי אקלים, צריכת אנרגיה כוללת וצריכת מים. מסקירת המחקרים עלה שפוטנציאל שינויי אקלים וביקוש לאנרגיה הופיעו בכולם. התוצאות הראו שמיחזור מכני הינו אופציות הטיפול בפסולת פלסטיק הטובה ביותר ביחס להשפעות פוטנציאליות לשינויי אקלים, הדלדלות משאבי טבע וביקוש לאנרגיה. הניתוחים השונים מציינים שהתועלות של מיחזור מושגות בעיקר ע"י מניעה של ייצור חומ"ג בתולי. התוצאות הסביבתיות ממוקסמות ע"י איסוף חומר מאיכות טובה וע"י החלפה של חומ"ג בתולי ביחס גבוה (אחד לאחד). לשריפה עם השבת אנרגיה ביצועים סביבתיים נמוכים בהתייחס להשלכות שינויי אקלים, אך פירוליזה היא אפשרות שעולה ביחס לכל האינדיקטורים שנסקרו. ישנה הסכמה לשהטמנה ההשלכות הסביבתיות הרעות ביותר ברב המקרים. עם המעבר של בריטניה לתמהיל אנרגיה מופחת פחמן, מיחזור יהפך למועדף.

בהיבט ההתייחסות לחומ"ג ממוחזר כמחליף ביחס של 1:1 חומ"ג בתולי, Shonfield (2008), בדק תרחיש ובו חומ"ג הממוחזר מחליף את החומ"ג הבתולי בכ-20% כאשר תוצאות השוני הנ"ל לפוטנציאל ההתחממות הגלובלית היו גדולות. שני התרחישים (20% ו-100% החלפה של חומ"ג בתולי) מצביעים על חסכון בהשלכות לתרומה נטו לפליטות, דבר אשר מביא לכך שפירוליזה היא האפשרות המועדפת, אחריה הטמנה ורק אחריה מיחזור.

בסקירה של Lazarevic (2010), נסקרו מחקרים שבדקו השלכות סביבתיות של טיפול סוף חיים עבור פסולת שלאחר צריכה, תוך שימוש ב-נמ"ח. מתוך הסקירה מספר מחקרים הראו ששיעור התחלופה בין חומ"ג ממוחזר לבתולי צריך להיות בשיעור של 1:0.8, כאשר למידת התחלופה יש השפעה על התוצאות עד כדי שמיחזור יכול להפוך לפתרון הפחות טוב, כאשר התחלופה הייתה נמוכה מ-0.5 מרבית התרחישים העדיפו שריפה לאנרגיה על פני מיחזור בהיבט אנרגיה, פוטנציאל לאוטרפקיזיה והחמצה. גם כאן יש עדיפות לשימוש בפסולת כ-SRF בכבשני מלט מאשר שריפתו במשרפה עם השבת אנרגיה. בהיבט אי הוודאות בנושא מומלץ לבצע ניתוח רגישות כדי לאתר את שיעור התחלופה בגינו תהיה העדפה לסוג טיפול זה או אחר.

12 נספח II- רשימות מצאי (LCI)

הובלה

לצורך הערכת מצאי פליטות מתחבורה בישראל, המקור המקיף ביותר שנמצא הוא "הערכת מקדמי פליטה ממשאיות דיזל כבדות בישראל (זבירין וחוב', 2005)" אך הוא אינו כולל מקדמי פליטה עבור SO_x ו- CO_2 ונראה שערכיו נמוכים יותר ממקדמי הפליטה שנמצאו במקורות אחרים. לכן, מקור המידע שהוחלט לעשות בו שימוש לצורך חישובי פליטות מזהמי אוויר מתחבורה הוא דוח הפליטות של עיריית פתח תקווה³² אשר בוצע בעזרת חברת לשם שפר איכות סביבה בע"מ. חישוב צריכת הדלק הינו לפי 0.4 ליטר לק"מ. הובלה של 1 טון פסולת פלסטיק חושבה בעזרת חילוק 220 ק"מ שהוא המרחק בין אתר דודאים לחיריה, ב-30 טון קיבולת המשאית מתחנת המעבר. עבור חישוב זה מתאן (CH_4) שווה ערך 25 פעמים פד"ח לאורך 100 שנים.

מקדמי פליטה עבור הובלת 1 טון פסולת פלסטיק מתחנת המעבר למתקן טיפול קצה*

פליטה	מקדמי פליטה (גרם/ק"מ)	מקדמי פליטה (גרם/ק"מ/1 טון פלסטיק)	הערות
NO_x	16.9	0.563	
CO	3.51	0.117	
HC	2.34	0.078	
PM	1.18	0.039	
SO_x^*	0.04	0.001	
$CO_2 eq$	1143	38.100	פליטות CO_2 חושבו מתוך נתוני שינוע פסולת למטמנה – היקף צריכת סולר (ליטר)/ סך CO_2 אקוולנטי (טון). 2858 גרם/ליטר.

*מבוסס על מקדמי הפליטות לטיפול בפסולת ממסמך "דוח פליטות של עיריית פתח-תקווה":

http://www.forum15.org.il/art_images/files/111/petach%20tikva%20nispachim.pdf

מיון

תהליך המיון כולל בתוכו שימוש בטכנולוגיות המאפשרות מיון והפרדה בין פסולת הפלסטיק לפי שרפים ומצב פיסי (קשיח או פילם), על בסיס מספר טכנולוגיות כגון: מיון באמצעות אינפרא אדום, הפרדה באמצעות תווך מימי וכו'. בתהליך זה ההשלכות הסביבתיות שנלקחו בחשבון במודל נובעות מהשימוש

³²http://www.forum15.org.il/art_images/files/111/petach%20tikva%20nispachim.pdf

בחשמל ומהפסולת שנוצרת בתהליך המיון, ומועברת להטמנה. לצורך בניית התרחישים הוחלט כי מיקום תהליך המיון הוא בתחנת המעבר. מסקירת הספרות נמצאו כי שני הפרמטרים הטכניים העיקריים המשפיעים על ביצועי מערך המיון ויעילותו הם: יעילות מיון וצריכת חשמל בתהליך. יעילות המיון שנבחרה למודל עומדת על - 70% וצריכת החשמל למיון תעמוד על 4.3 קוואטש הכולל את החשמל הנצרך להפעלת מכונת המיון, הממיינת לפי קשיחים ופילמים ובנוסף מיון לפי שרפים באינרפא אדום, שהינו חסכוני יותר משיטת התווך המימי מאחר ולא נדרש להשקיע אנרגיה לצורך יבוש החומר לאחר המיון. ערכים אלה נקבעו בהתאם לסקירת ספרות שבוצעה ומפורטת בטבלה שלהלן:

יעילות מיון וצריכת אנרגיה בתהליך המיון* – ריכוז נתונים ממקורות מידע

מקור	תיאור התהליך/הערות	צריכת אנרגיה	יעילות מיון
(Molgaard, 1995)	מבוסס על צריכת אנרגיה למחזור יריעות LDPE	חשמל – 150 קוואטש/טון פלסטיק	na
(Arena et al., 2003)	מבוסס ממוצע על מידע משלוש חברות באיטליה המטפלות בפסולת אריזות.	• דיזל – 110 (טון/MJ) • חשמל – 160 (טון/MJ)	56%
(Perguni et al., 2005)		• דיזל – 84 (טון/MJ) • חשמל – 122 (טון/MJ) פלסטיק	75%
(FRANKLIN ASSOCIATS, 2010)	מבוסס על הערכה לפיה 80% מהמיחזור בארה"ב מתבצע עבור זרם אחד (למשל: רק נייר מתוך פסולת אריזות מעורבת) או מרובה זרמים. צריכת האנרגיה מבוססת על ממוצע של תמהיל מגובה סטטיסטיקה אמיתית סוגי טכנולוגיות המיון	• PET – 232.8 (טון/MJ) • HDPE – 349.2 (טון/MJ)	na
(Nishtala, 1997)		צריכה ממוצעת של טרומל: 0.129 קוואטש/טון פסולת	70%
(WRAP, 2008)	מיון באינרפא אדום מסוג 'Qinetiq':	חשמל – 3.1 קוואטש/טון פסולת פלסטיק מעורבת (27 MJ שווה ערך לפי יעילות יצור חשמל 40%)	70%
	מיון באמבטיה לפי דחיסות טכנולוגיה מסוג 'TLT', מרבית צריכת האנרגיה נובעת מהצורך לייבש את הזרמים לאחר הטבילה.	חשמל – 15.1 קוואטש/טון (135 MJ שווה ערך לפי יעילות יצור חשמל 40%)	98% (פוליאפינים)
	מיון מסוג 'STADLER' – מיון בין פילמים לקשיח.	חשמל – 1.2 קוואטש/טון	98.7% הצלחה בהסרת פלימים מזרם קשיח

תרחיש - הטמנה

ההשלכות הסביבתיות מתרחיש ההטמנה הן מפליטות גז החממה הנובעות מהתפרקות החומר הפחמני של הפסולת במטמנה. שיעור ההתפרקות של פסולת פלסטיק במטמנה לאורך 100 שנים לצורך מצאי מחזור החיים עומד על 3%. מכיוון שהידרוקרבונים המרכיבים את פסולת הפלסטיק מתפרקים בשיעור של 1-3% בלבד במהלך מאה שנים (Kremer et al., 1998) ו- (Doka, 2009). לשם המחשה 3% התפרקות, כאשר 70% מהפחמן מתפרק, יוצרים מתאן בשיעור של 2.5 ק"ג CH₄ לטון פלסטיק על פני 100 שנים (0.025 ק"ג CH₄ לק"ג¹ פלסטיק) (Eriksson & Finnveden, 2009) שהם כ- 625 אלף

גרם שווה ערך CO₂/טון פסולת פלסטיק (לפי חישוב של פי 25 מ- CO₂). רשימת המצאי מופיעה בטבלה שלהלן:

תרחיש הטמנה – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם)						תשומה			
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	שווה ערך אנרגיה (MJ)	כמות	סוג	
									תהליך
1,341	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3,141	88	סולר (ליטר)	הובלה
625,000	-	-	-	-	-	-	-	-	הטמנה
626,341	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3,141	88		סה"כ

תרחיש מיחזור

1. רשימות מצאי

תרחיש מיחזור A – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם/טון פסולת פלסטיק)						תשומה			
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	כמות	סוג	
									תהליך
1,341.12	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3,141.60	88.00	סולר (ליטר)	הובלה
3,151.90	7.03	0.23			7.32	38.67	4.30	חשמל (קוואטש)	מיון
155,072.75	345.77	11.55			360.28	1,902.51	211.56	חשמל (קוואטש)	מיחזור
407,356.25							0.65	פסולת פלסטיק (טון)	הטמנה
63,866.90	142.41	4.76			148.38	783.55	87.13	חשמל (קוואטש)	חסכון בחשמל מתחלופת חומר בתולי
35,015.38	98.96	40.61	272.12	94.02	37.20	10,996.73	285.63	נפט גולמי (ליטר)	חסכון בנפט מיהמיועד ליצור פלסטיק בתולי
468,039	111.48	-32	-269	-90	202	-6,697			סה"כ

תרחיש מיחזור B – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם/טון פסולת פלסטיק)						תשומה			
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	כמות	סוג	
									תהליך
1341.12	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3141.60	88.00	סולר (ליטר)	הובלה
3151.90	7.03	0.23			7.32	38.67	4.30	חשמל (קוואטש)	מיון
155072.75	345.77	11.55			360.28	1902.51	211.56	חשמל (קוואטש)	מיחזור
28906.25							0.05	פסולתפל סטיק (טון)	הטמנה
1,639,352.00	12.61	6.31		189.16	189.16		0.63		שריפת פסולת במשרפה
63,866.90	142.41	4.76			148.38	783.55	87.13	חשמל (קוואטש)	חסכון בחשמל מתחלופת חומר בתולי
892,253.93	1,989.49	66.46			2,073.00	19,037.59	1217.26		חסכון בחשמל מייצור חשמל במתקן שריפת פסולת לאנרגיה
35,015.38	98.96	40.61	272.12	94.02	37.20	10,996.73	285.63	נפט גולמי (ליטר)	חסכון ובנפט גולמי המיועד ליצור פלסטיק בתולי
836,687	-1,865	-92.35	-269.37	99	-1,682	-25,735			סה"כ

2. הנהלות ונתונים ששימשו להכנת רשימת המצאי

תהליך המיחזור המכני משקף את הפיכת פסולת הפלסטיק לפתיתים (flakes) או פאלטות (palletes) המהווים תחלופה לחומר גלם בתולי. חומ"ג העיקרי ליצור פלסטיק הוא נפטא שהיא תוצר זיקוק של נפט או גז טבעי. בנוסף לחומ"ג זה קיימים מספר חומ"ג משלימים המשמשים ליצור הפלסטיק. חומ"ג הדרוש לייצור ק"ג פלסטיק במונחי אנרגיה נע בין 46-54 מגה-ג'אול (Plastic Europe, 2008). לצורך מידול היקף נפט גולמי נדרש עבור סוגי הפלסטיק השונים נעשה שימוש ברשימת המצאי של PlasticEurope³³ הזמינה עבור כל סוגי שרפי הפלסטיק ואשר נמצאת גם בשימוש רשימות המצאי של

³³ רשימות המצאי של סוגי הפלסטיק מופיעות ב: <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles/browse-by-list.aspx>

ECOINVENT, כפי שמופיעות בטבלה שלהלן. לכן, בעבור מידול התרחישים מיחזור פלסטיק מביא לחסכון בצריכת נפט גולמי ופליטות מזיקות.

חומ"ג נדרש (נפט גולמי/גז טבעי) במונחי אנרגיה ושווה ערך לנפט גולמי לייצור טון פלסטיק, לפי

סוגי שרפים

סוג שרף פלסטיק	MJ/טון פלסטיק	שווה ערך לליטר נפט גולמי (מספר חביות נפט*)	הערות
PE	54,300	1410 (8.9)	
PP	52,600	1366 (8.6)	
PS	46,230	1200 (7.5)	לפי EPS
PET	39,000	1012 (6.4)	איכות לבקבוקים (Bottele grade). בין 35-39 מגה ג'אול/לק"ג נבחר הערך הגדול

* 1 חבית נפט גולמי = 159 ליטר נפט גולמי. ערך אנרגטי נפט גולמי = (38.5MJ/L)

בהמשך, לצורך חישוב הפליטות מזיקות הנפט, נעשה שימוש במקדמי פליטה הידועים מה-EPA של זיקוק נפט גולמי בטכנולוגית ה-FCC (Fluid Catalytic Cracking) הנמצאת בשימוש בית הזיקוק של אשדוד³⁴ כלומר לצורך בניית התרחיש הנחנו שהזיקוק משמש ליצור אתילן שממנו מיצרים את שרפי הפלסטיק, כלומר הפליטות המחושבות הן בעבור תהליך זיקוק הנפט לאתילן כפי שמופיעות ברשימות המצאי של PlasticEurope. החישוב בוצע לפי המרה של פליטות לק"ג אתילן בשלב הייצור ל-1 MJ נפט, בהנחה שנדרשים 54.3 MJ לייצור 1 ק"ג של אתילן. כך גם עבור פליטות הפד"ח שהוערכו לפי ערכיפליטות גזי החממה מתהליך ייצור האתילן.

בהתאם לכך, להלן פירוט מקדמי הפליטות שישמשו למצאי:

פליטות מזיקות נפט גולמי (מ"ג/MJ), מתהליך הזיקוק בלבד

PM ₁₀ *	SO _x *	CO*	HC*	NO _x *	CO ₂ **
3.7	9	8.54	24.74	3.38	3184.16

*מקור: USEPA, (1995). ערך אנרגטי נפט גולמי = (38.5MJ/L).

**מקור: Jacobs Consultancy inc.(2009). Life Cycle Assessment Comparison of North American and Imported Crudes. Prepared for Alberta Energy Research Institute

³⁴ לפי מסמך "פז בתי זיקוק אשדוד. פרק 7: סקר סביבתי"

מבערה**1.רשימת מצאי****תרחיש שריפה לאנרגיה (מבערה) - רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)**

תפוקה (גרם)						תשומה			
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	כמות	סוג	
									תהליך
1,341.12	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3,141	88	סולר (ליטר)	הובלה
2,600,000.00	20.00	10.00		300.00	300.00		1	פסולת פלסטיק (טון)	שריפה
15,625.00							0.03	פסולת פלסטיק ממשרפה (טון)	הטמנת שאריות משריפה
1,633,069.52	3,641.32	121.64			3,794.16	34,844.01	2,227.93	יצור חשמל (קוואטש)	חסכון מייצור חשמל
983,897	-3,621	-110	2.75	304	-3,474	-31,702			סה"כ

2.הנחות ונתונים ששימשו להכנת רשימת המצאי

מתקן שריפה לאנרגיה מודרני פועל ביעילות אנרגטית של כ-41%, אנרגיה המושבת כחשמל עומדת על 26% וחם כ-74% (Eriksson & Finnveden, 2009). סקר שנערך בין השנים 2004-2007 בקרב 231 מתקני פסולת לאנרגיה (פל"א) הראה מקדם יעילות אנרגטית³⁵ ממוצעת למתקן שריפה של 0.75 (Reimann, 2009). מידע מוקדם יותר מאותו המתייחס לשנים 2001-2004 הראה שממוצע יצור החשמל בקרב 97 מתקני פל"א היה 302 קוואטש/טון פסולת ו-878 קוואטש חם/טון פסולת (Reimann, 2006), מתקני הפל"א שנסקרו היו מסוג: ייצור חשמל/חם/מחז"ם. ה-BREF (Best Available Techniques Reference Document) לשריפת פסולת מעריך קיבולת ייצור הפקת חשמל של בין 400-700 קוואטש/טון פסולת (EU, 2006). אותו המקור מצביע על ייצוא נטו ממוצע של 396 קוואטש חשמל, עם יעילות ממוצעת של 13% (18% יעילות לייצור חשמל ו-13% לייצוא) מהפסולת ומהדלקים להפעלת המתקן, שיכולה להגיע אף ליעילות ייצוא מקסימלית של 18%. מאחר וה-BREF נסמך על מקורות משנת 2002, סביר להניח שיעילות ייצור החשמל במתקני השריפה החדשים השתפרה עם השנים. מכיוון שניתן להניח שמתקן פל"א חדש שיוקם יהיה בעל יעילות גבוהה יותר מזאת ב-2002, לצרכי המודל נניח שמתקן הפל"א מנצל חם ואנרגיה שהוא מפיק מהסוג שמייצר בעיקר חשמל ביעילות של -23% מהערך הקלורי של הפסולת, מספר הדומה למופיע במקור אחר WRAP (2008) ושעשה שימוש בערך זה לרשימת מצאי, כחלק מה-נמ"ח. מאחר וקיימים מתקנים רבים השורפים סוגי פסולת בהרכבים שונים קיים קושי לאתר במקורות רשימת מצאי המייצגת את תכולת הרכב ותכולת הפלסטיק שהוגדרה במודל, נוסף על כך לא יודע על מתקן ששורף רק פסולת פלסטיק מסוג אחד, בד"כ מדובר בשריפת MSW המכילה רכיבים אורגניים ורטיבות

³⁵נקרא מקדם יעילות (R1- Efficiency Indicator) מתקני שריפה עבור פסולת מוצקה ביתית לפי הדרכתביה האירופית – (Waste Framework Directive 2000/98/EC, Annex II, R1 formula)

שגורמים לכך שהערך הקלורי של הפסולת יהיה נמוך מזה הפוטנציאלי של הפלסטיק. בנוסף, קיימים מספר רשימות מצאי לדוגמה : ECOINVENT ו-רשימת המצאי של האיחוד האירופי ה-ILCD שמציגים את רשימת המצאי מלאות שכוללת כבר את ההתחשבות לאחר ייצוא חשמל והחלפת חשמל מקומי על ערכי הפליטה שלו. ערכים אלה אינם ידועים לנו ויכולים להקשות על החישוב, בנוסף לכך שהחישוב בעבודתנו אינו לוקח בחשבון מחזור חיים מלא של חומרי גלם וכו'. לכן רשימת המצאי וערכי הפליטות ממתקן פל"א התבססו על מידע קיים מה-BREF האירופי, ה-EPA, מאמר ורשימות מצאי קיימות. במיוחד מידע מתוך (Doka, 2003) הכולל רשימת מצאי פליטות: PM , SO_x , NO_x ו- CO_2 משריפת פוליאטילן, כולל התהליכים בתחתית הזרם (למשל הובלה של פסולת אשר מהווה מרכיב זניח וכו') וה-BREF לשריפת פסולת של ה-EU, (2006).

כחלק מהרגולציה הסביבתית שהתפתחה עם השנים מתקני פל"א יישמו ספר טכ' להפחתת פליטות NO_x , כגון SCR (Selective Catalytic Reduction) או SNCR (Selective Non - Catalytic Reduction) היכולים להביא להפחתה של כ-81% (Doka, 2003) ועושים שימוש באמוניה ובגז טבעי, אשר מגדילים את פליטות גזי החממה של המתקן. בנוסף לפליטות, תוצר השריפה מכיל פסולת מוצקה מאפר תחתי ומרחף המחייבת את הטמנתה ומוערכת בכ-2.5% ממשקל פסולת פלסטיק מסוג PE, מספר הנמוך באופן ניכר מהיקף הפסולת שנוצרת משריפת ה-MSW ועומד על 19% בממוצע, בעיקר מכיוון שהיא מכילה רכיבים אנרטיים (Doka, 2003). להלן טבלה המרכזת את רשימת המצאי לשריפת פסולת במתקן שריפה, רשימת ערכי הפליטה לצורך בניית התרחיש ומקורות המידע שנסקרו.

מקדמי פליטות ממתקן שריפת פסולת – ריכוז נתונים ממקורות מידע ומקדם פליטה שנבחר

לתרחיש

מקור	פליטות לאוויר (ק"ג/טון פסולת)					פסולת מוצקה משריפה (ק"ג/טון פסולת)
	NO_x	SO_x	PM	CO	CO_2	
מקדמי הפליטות שנבחרו לתרחיש	0.3	0.02	0.01	0.3	2,600	25
מאמר מ-1998 הבודק בין השאר רשימת מצאי פליטות לאוויר של פסולת פלסטיק טכנית. (Kremer et al, 1998)	1.03	0.017	na	0.3	2,509	na
רשימת מצאי ECOINVENT עבור שריפת MSW. (Doka, 2003). רשימת המצאי כוללת פליטות מהובלה וכו'.	0.515	0.048	0.022	na	498	190 מחושב לפי 19% מטון פסולת
רשימת מצאי ECOINVENT עבור שריפת PE. (Doka, 2003). רשימת המצאי כוללת פליטות מהובלה וכו'.	0.398 *(0.318)	0.02	0.013 *(0.006)	Na *(0.223)	3,000	25 מחושב לפי 2.5% מטון פסולת

200-350	na	0.101	0.007	0.024	0.189	ערכי פליטה אופייניים מתוך סקר ב-2002 של מתקני פל"א MSW באוסטריה, מתוך ה-BREF לשריפת פסולת. (EU, 2006)
na	na	2.5	3	0.566	1.03	מקדמי פליטה ממתקני שריפת פסולת רפואית. מסתמך על מקור מ-1992. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)
220	1,206	0.0864	0.06	0.198	2.26	מקדמי פליטות לפי מסמכי ה-A-42 EPA. מבוסס על שריפת RDF, תוך שימוש בפילטר בד ומיבש בהתזה. (EPA,1996)

*מקדם הפליטה ששימש את כותבי מסמך ה-BREF לצורך לחישוב. במקרה של NO_x ללא שימוש בטל הפחתה (DeNox) ערך של 1.05, עם טל שונות להפחתת NO_x המקדם המקדם הוא 0.201 (גרם/ק"ג פסולת).

RDF 1.רשימת מצאי

תרחיש דש"ב (RDF) בכבשן מלט – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם)						תשומה			תהליך
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	כמות	סוג	
304.80	0.01	0.31	0.62	0.94	4.51	714.00	20.00	סולר (ליטר)	הובלה
3,151.90	7.03	0.23			7.32	38.67	4.30	פסולת פלסטיק (טון)	מיון
196,000.00							0.31	פסולת פלסטיק (טון)	הטמנה
49,330.57	109.99	3.67			114.61	605.21	67.30	חשמל (קווטש)	מיחזור PET
244,388.30	544.92	18.20			567.79	2,998.28	333.41	חשמל (קווטש)	ייצור RDF
47,167.76	28.54	12.19			7.71			פסולת (טון) (כ-0.54 זמין ל-RDF שמחליף את הפטקוק)	שימוש ב-RDF בקלינקר
64,260.90	43.96	21.62	19.60	1,219.62	6.35	20,729.32	538.42	נפט גולמי (ליטר)	חסכון בנפט גולמי מהחלפת פקטוק
32,497.70	72.46	2.42			75.50	398.70	44.34	חשמל (קווטש)	חסכון בחשמל מתחלופת חומרבתולי

23,849.28	781.52	2.22	348.45	21,681.16	112.83	2,129.40	55.31	נפט גולמי (ליטר)	חסכון בנפט גולמי ליצור פלסטיק בתולי (MJ)
419,735	-207	8.35	-367	-22,900	507	-18,901			סה"כ

2. הנחות ונתונים ששימושו להכנת רשימת המצאי

לצורך חישוב ומידול תחלופת פטקוק ע"י ה-RDF, תכולתו לשימוש בכבשן מלט בנשר הוגדרה כ-3300 קילו-קלוריות/ק"ג³⁶ שהם כ- 13,820 מגה ג'אול/טון (לפי 13.82 מגה-ג'אול/ק"ג). לצרכי המודל והתרחיש, פלסטיק מהווה כ-22.5% מתכולת ה-RDF ולכן לפי החישוב, לאחר הסרת ה-PET וה-PVC מ-1 טון פסולת פלסטיק שנכנס למערכת, שאר החומרים שאינם פלסטיק (כגון נייר, בד וכו') ומרכיבים את ה-RDF מהווים כ-77.5% מתכולת ה-RDF. מכיוון שתכולת האנרגיה הכוללת של החלק היחסי מ-1 טון הפלסטיק נכנס למערכת שחלקו מיועד להשבה כ-RDF ושאר חומרי ה-RDF (שהם ממקור אורגני) גדולה יותר מהמפרט הנדרש של RDF, הנחנו כי החלק היחסי הזמין (לאחר שמיינו והסרנו מהטון שנכנס למערכת את ה-PET, PVC וכו') להפקת RDF עומד על 0.54 טון פלסטיק שהם 20,729 מגה-ג'אול המחושבים בהתאם להרכב פסולת הפלסטיק (ערכה האנרגטי היחסי לאחר שהסרנו את ה-PVC וה-PET). פסולת הפלסטיק הזמינה לייצור RDF יכולה לשמש להפקת 6.67 טון RDF (כמפורט בטבלת החישוב), אך מכיוון שמודל זה לוקח בחשבון רק את פסולת הפלסטיק הוא יכול להחליף (לפי ערך אנרגטי של פטקוק כ-29,000 מגה ג'אול/טון) כ-0.71 טון פט-קוק המהווים את שיעור התחלופה עבור 1 טון פסולת פלסטיק נכנסת למערכת. בהיבט צריכת החשמל ל-1 טון פסולת נכנסת למערכת הנ"ל חושב עבור יצור 6.67 טון RDF, כלהלן: צריכת חשמל ליצור 1 טון RDF X 6.67 טון RDF.

פלסטיק ב-RDF כתחלופה לפטקוק – טבלת חישוב

מרכיב	טון	ערך קלורי (מגה ג'אול)	אחוז מקסימלי מכלל ה-RDF
חישוב תכולה	פסולת פלסטיק ללא PET ו-PVC	0.54 (עבור 1 טון פסולת פלסטיק שנכנסה למערכת)	22.5%
אנרגטית	מרכיבי RDF ללא פלסטיק	3.97	77.5%
RDF-ב	סה"כ – RDF	6.67**	100%
חישוב תחלופת פטקוק ב-RDF	סה"כ פטקוק שווה ערך RDF שהתקבל מ-1 טון פלסטיק שנכנס למערכת	9.9***	-
	סה"כ RDF נדרש להחלפת 1 טון פטקוק	2.1	-
	סה"כ פט קוק שווה ערך ל-1 טון שנכנס	0.71	-

³⁶ מתוך מסמך סקר הפערים מול ה-BAT של מפעלי נשר רמלה -

			למערכת (0.54 טון מתוכם ל-RDF), שהם שיעור התחלופה מול 1 טון פלסטיק שנכנס למערכת
--	--	--	--

*לפי תכולה אנרגטית (LHV) ממוצעת של 18,000 מגה ג'אול/טון

**חושב יחסית כאשר תכולה אנרגטית של RDF היא 13,820 מגה ג'אול/טון.

***לפי תכולה אנרגטית (LHV) של 29,000 מגה ג'אול/טון

לשם הגדרת וחישוב מצאי פליטות נעשה שימוש במידע מתוך מסמכי מפעל הנשר מלט אודות תרשים מאזן מסה³⁷ המפרט את כמות הפטקוק הדרושה לצורך הכנת קליקר/מלט אשר עומדת על 0.069 טון פטקוק לייצור 1 טון מלט (0.769 טון קלינקר). לפי סקר הפערים³⁸ של מפעל נשר רמלה עולה כי שילוב ה-RDF כתחלופה לפטקוק לא יגרום שינויים בפליטות ה-NO_x וה-SO_x ולכן לצרכי המודל הנחנו שמקדמי פליטות מניצול הפלסטיק בכבשן זהים למקדמי הפליטות שווה ערך פטקוק. סקירת המקורות ששימשו לגיבוש רשימת המצאי מופיעים בטבלה שלהלן:

מקדמי פליטות ליצור קלינקר ומצריכת פטקוק – ריכוז נתונים ממקורות מידע

מקור מידע	מקדם פליטה CO ₂	פליטה SO ₂	מקדם פליטה NO _x	מקדם פליטה PM	הערות
IPCC	507.1 ק"ג 1/CO ₂ קלינקר 498.5 טון 1/CO ₂ טון מלט.	0.3 ק"ג SO ₂ ליצור 1 טון מלט	-	-	(Houghton, 1997) (לא ברור האם מדובר בפליטות מדלק פט קוק בלבד)
נשר מפעלי מלט	610 ק"ג 1/CO ₂ טון קלינקר	-	2.76 ק"ג/טון קלינקר	-	מסמך "נשר רמלה – פרק 4: סקר פערים לעומת ה-BAT (תרגום של דו"ח ENVIRON 2012) איטליה) (פברואר 2012)
נשר מפעלי מלט	-	4.96 ק"ג/טון פטקוק	1.34 ק"ג/טון פטקוק	0.19 ק"ג/טון קלינקר	מסמך "נשר מפעלי מלט ישראלים בע"מ, מפעל נשר רמלה - בקשה להיתר פליטה, פרק 2 – סקר תהליכים". חושב באמצעות נתוני דיגום ארובה של תחנת פטקוק צפונית - צריכת פטקוק בטון/שנה לחלק לפליטות שנדגמו בטון/שנה. ליצור 1 ק"ג קלינקר נדרש 695 קילוקלוריות.
נשר מפעלי מלט	860.85 1/CO ₂ טון קלינקר	-	-	-	מצגת "מיחזור פסולת לצרכי אנרגיה WTE 2009–cleantech נשר מפעלי מלט ישראלים בע"מ. (30.06.09). לפי 662 CO ₂ לייצור טון מלט בנשר.

³⁷ מתוך מסמך "נשר מפעלי מלט ישראלים בע"מ, מפעל נשר רמלה - בקשה להיתר פליטה, פרק 2 – סקר תהליכים".

³⁸ מתוך נשר רמלה – פרק 4: סקר פערים לעומת ה-BAT (תרגום של דו"ח ENVIRON איטליה) (פברואר 2012)

מחקר	937 ק"ג לטון קלינקר	-	2.6 ק"ג לטון קלינקר (תהליך ה-Long Dry -1) 1.5 ק"ג לטון קלינקר (תהליך precalciner (	-	(Boesch et al., 2009)
------	---------------------	---	--	---	-----------------------

מקדמי הפליטה לשימוש בטון פטקוק ליצור קלינקר שנבחרו לטובת התרחיש, הן כלהלן :

מקדם פליטה של פטקוק ליצור קלינקר

מקדם פליטה של פטקוק ליצור קלינקר (גרם/טון פטקוק)*			
CO2 eq	PM	SOx	NOx
65,986.97	17.05	39.93	10.79

*לפי 0.089 טון פטקוק דרושים ליצור טון קלינקר

ולכן מקדמי הפליטה עבור טון פלסטיק שנכנס למערכת ומשמש ליצור קלינקר הן כלהלן :

מקדם פליטה של טון פסולת פלסטיק נכנס למערכת כ-RDF המשמש ליצור קלינקר

מקדם פליטה של טון פסולת פלסטיק נכנס למערכת לטובת קלינקר (גרם/טון פלסטיק)*			
CO2 eq	PM	SOx	NOx
29,994.08	7.75	18.5	4.90

*לפי 0.45 טון פסולת פלסטיק שווה ערך ל-טון פטקוק

על מנת לייצר RDF נדרש תהליך הכולל בתוכו טיפול פיסי לשינוי גודל הפסולת וייבושה. לצורך הערכת צריכת האנרגיה ליצור RDF שתשמש למודל, נסקרו מספר מקורות ספרות המופיעים בטבלה שלהלן:

צריכת אנרגיה, תשומות פליטות ליצור RDF מ-MSW – ריכוז נתונים ממקורות מידע

מקור	תשומות ופליטות
(Khoo, 2009)	- צריכת אנרגיה: 18.4 קווטש - פסולת מתהליך : 97.4 ק"ג 1 ton product gas יח' פונקציונלית (הדורשים 1.16 טון RDF)
(White et al., 1999)	- צריכת אנרגיה : - תהליך קיצוץ – 12.5 קווטש/טון - קיצוץ שני - 9.5 קווטש/טון פסולת נכנסת. סה"כ צריכת אנרגיה ל-dRDF מוערכת בכ- 55 קווטש/טון - אנרגית חם לייבוש מוערכת ב-400 MJ לטון. עבור cRDF נדרש רק 6 קווטש לטון פסולת. ול BcRDF האיכותי יותר מדובר ב-21 קווטש
(Arena et al., 2003)	- עבור 26.783 טון פסולת נכנסת מתקבלים 10 טון DRDF (כ-27%) - צריכת אנרגיה : 0.01 MJ דיזל+0.083 MJ חשמל/ק"ג RDF (שהם כ-57 קווטש חשמל לטון)
(Garg et al., 2007)	- צריכת אנרגיה : 30 קווטש לטון פסולת נכנסת

החסכון בשימוש בפטקוק מביא לחסכון בפליטות הנבעות מזיקוק נפט. מכיוון שפטקוק מהווה מעין תוצר לוואי מזיקוק נפט ולא תוצר עיקרי, לא ניתן לייחס להפקת פטקוק את כל הפליטות מזיקוק הנפט. לפי (Wang et al., 2004), מק"ג נפט כחלק מתהליך הזיקוק מופקים כ-0.5% פטקוק על בסיס מסה או תכולת אנרגיה. לכן, חישוב הפליטות המשויכות ליצור פטקוק בוצע כאילו 0.5% מסך מהפליטות של זיקוק נפט (לפי ה- EPA) שייכות לפטקוק כלהלן :

פליטות מייצור פטקוק (מ"ג/MJ)

CO ₂ **	NO _x *	HC*	CO*	SO _x *	PM*
3100	0.3	0.94	58.83	2.12	1.04

*מקור: USEPA, (1995).

** Jacobs Consultancy inc.(2009). Life Cycle Assessment Comparison of North American and Imported Crudes. Prepared for Alberta Energy Research Institute לפי נתון של פליטות במנחי גז"ח לייצור מגה-ג'אול של פט-קוק.

פירוליזה

1.רשימת מצאי

טבלה 18 – פירוליזה (תרחיש ייצור דלק) – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם)						תשומה			
CO ₂ eq	SO _x	PM	HC	CO	NO _x	אנרגיה (MJ)	כמות	סוג	
									תהליך
1,341.12	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3,141.60	88.00	סולר (ליטר)	הובלה
3,160.50	9.89	0.26			7.32	38.67	4.30	חשמל (קווטש)	מיון
99,202.26							0.16	פסולת (טון)	הטמנה
49,330.57	109.99	3.67			114.61	605.21	67.30	חשמל (קווטש)	מיחזור PET
						4,623.91		גז טבעי	צריכת גז לתהליך הפירוליזה
189,262.50	592.25	15.45			438.52	2,315.65	257.50	חשמל (קווטש)	צריכת חשמל לתהליך הפירוליזה
317,739.16	3.75	12.55			150.62	27,295.64	764.58	סולר (ליטר)	תהליך פירוליזה לייצור דלק
79,684.92	1,564.19	18.89	1,457.94	17.71	203.64		764.58	סולר (ליטר)	חסכון בפליטות לזיקוק סולר
24,373.28	54.35	1.82			56.63	299.02	33.25	חשמל (קווטש)	חסכון בחשמל ובפליטות מייצור מתחלופת חומר בתולי PET

23,849.28	781.52	384.40	348.45	21,681.16	112.83	2,129.40	55.31	נפט (ליטר)	חסכון בנפט גולמי ובפליטות לזיקוקן עבור פלסטיק בתולי (MJ)
-103,350	-1,692	-397	-1,804	-21,695	56	-18,999			סה"כ

2.הנחות ונתונים ששימשו להכנת רשימת המצא

תהליך ה- Ozmotech (הנקרא גם: ThermoFuel Process Technology) הוא תהליך בו ניתן להפוך פסולת פלסטיק לדלק דיזל באמצעות טכנולוגיית פירוליזה העושה שימוש ב- 6.35 ג'גיה ג'אול גז טבעי. מאחר והמידע הגולמי היחיד שנמצא אודות פליטות לאוויר מתהליך הפיכת פסולת פלסטיק לדלק נוזלי, נמצא במסמכי הפטנט שאינם מפורטים מספיק עבור פליטות המזהמים וגזי חממה, בוצעה סקירה של פליטות מטכנולוגיות פירוליזה אחרות המנצלות פסולת פלסטיק כפי שנסקרו ב- RTI International, (2012) שהמידע שבו מבוסס על מענה אנשי מקצוע מחברות הטכנולוגיות השונות וממידע אמפירי המבוסס על דגימות שנלקחו ממתקני הפירוליזה השונים. להלן ריכוז נתונים ממקורות המידע:

פליטות למתקני פירוליזה פסולת פלסטיק (גרם/טון פסולת פלסטיק) – ריכוז נתונים ממקורות מידע. מתוך: (RTI International, 2012)

תהליך /מפעל/מקור	מקדם פליטה CO2	מקדם פליטה SO2	מקדם פליטה NOX (N ₂ O+NO ₂)	מקדם פליטה PM	הערות
Ozmotech	na	5.145	206.85	na	מבוסס על 10 טון פלסטיק ביום של 24 שעות (43%, 40%PP, 40%PE) לניילון שיעור פליטות NOX גבוה יחסית ולכן פליטות NOX לפסולת פלסטיק במודל יכולות להיות נמוכות יותר במציאות.
P2O	131.54	6.35	1093.15	17.23	לפי דברי החברה התהליך עובד ביעילות של 92%. טון פלסטיק מייצר כ-790 ליטר דיזל ובניין, כ-82 ק"ג סינגז ושאריות עם ערך קלורי של 10,600 BTU.
Agilyx	436350	na	725.74	na	פסולת פלסטיק מכל הסוגים (1-7) מטון פלסטיק אפשר ליצור כ-6 חביות נפט סינטטי בעלות ערך אנרגטי של 19,250 BTU.
Envion	3356-8391	זניח	16420-41050	זניח	פסולת פלסטיק מכל הסוגים (PE, PP, PS) כולל PET וכמות קטנה של PVC. טון של פלסטיק מייצר 4.22 חביות נפט בעלת ערך אנרגטי של 18,374 BTU. התהליך עובד ביעילות המרה של כ-62%.
Climax	226796	na	na	9071	המתקן עושה שימוש בפסולת פלסטיק שלאחר צריכה, מטון פסולת אפשר להפיק 5 חביות נפט סינטטי.

לפיכך פליטות מתהלך פירוליזה עבור רשימת המצאי הוגדרו כלהלן :

מקדמי פליטה לתרחיש Ozmotech - יצור דלק מפירוליזה של פסולת

מקדמי פליטה ליצור דלק מפירוליזה של פסולת (גרם/טון פלסטיק)			
CO2 eq	PM	SOx	NOx
436,350	17.23	5.145	206.85

מכיוון שתהליך הפירוליזה מייצר דלק סינטטי הוא מביא לחסכון בזיקוק נפט והפיכתו לסולר ולכן יצור סולר מגזיפיקציה אמור לחסוך פליטות מתהליך זיקוק. למרות שזיקוק נפט לסולר קיים בישראל, מניתוח המידע מתוך הסקר הסביבתי של פז בתי זיקוק אשדוד³⁹ לא ניתן להעריך מהם מקדמי הפליטות מכיוון שהמידע חסר את היקף התוצרים, התשומות וזרמי התהליך המיועדים ליצירת סולר. לכן, לצורך הערכת מקדמי הפליטות מזיקוק נפט ליצור דיזל התבססנו על מידע על זיקוק מסוג Hydrocracking מאחר ובתהליך זה מרבית התוצר הוא סולר (Lewis, 1997). מקדמי הפליטה מוצגים בפליטות בגרם לליטר סולר(שווה ערך 38.6 מגה-ג'אול), כלהלן :

מקדמי פליטה ליצור סולר מפירוליזה של פסולת

מקדמי פליטה ליצור סולר (גרם/ליטר סולר)					
CO2 eq	HC	CO	PM	SOx	NOx
104.22	1.9	0.02	0.02	2.04	0.26

גזיפיקציה

1.רשימת מצאי

גזיפיקציה (תרחיש ייצור חשמל) – רשימת מצאי (ל-1 טון פסולת פלסטיק)

תפוקה (גרם)						תשומה			תהליך
CO2 eq	SOX	PM	HC	CO	NOX	אנרגיה (MJ)	כמות	סוג	
1,341.12	0.05	1.38	2.75	4.12	19.83	3,141.60	88.00	סולר (ליטר)	הובלה
3,151.90	7.03	0.23			7.32	38.67	4.30	חשמל (קוואטש)	מיון
99,196.77							0.16	פסולת (טון)	הטמנה
36,997.93	82.50	2.76			85.96	453.91	50.47	חשמל (קוואטש)	מיחזור PET
1,135,953.00	131.80	10.92			856.33		0.73	פסולת פלסטיק (טון)	גזיפיקציה
2,006,446.03	4,473.85	149.46			4,661.63	28,132.65	2,737.31	חשמל (קוואטש)	חסכון מייצור חשמל מגזיפיקציה
24,373.28	54.35	1.82			56.63	299.02	33.25	חשמל (קוואטש)	חסכון בחשמל מתחלופת חומר בתולי PET
23,849.28	781.52	384.40	348.45	21,681.16	112.83	2,129.40	55.31	נפט גולמי (ליטר)	חסכון בנפט גולמי ליצור פלסטיק בתולי (MJ)
-778,028	-5,088	-520	-346	-21,677	-3,862	-26,927			סה"כ

³⁹ פז בתי זיקוק אשדוד, פרק 7 : סקר סביבתי. הוכן ע"י ENVIRON עבור PAZ Ashdod Refinery. January 31, 2012

2. הנהלות ונתונים ששימושו להכנת רשימת המצאי

תהליך ה-SVZ הוא תהליך המשתמש בטכנולוגית גזיפיקציה ומייצר מתנול, סינגז וחשמל כתוצרים, מפסולת פלסטיק, שמנים ובוצה כאשר מ-120 אלף טון פסולת בשנה מתקבלים כ-120 אלף טון מתנול ו-75 מגה ווט חשמל בנוסף לתוצרים אחרים. היעילות הארגטית של המתקן עומדת על כ-44.7%. תהליך ה-SVZ מתועד בספרות במקומות שונים, אך רמת הפירוט אודות רמת הפליטות בתהליך מוגבלת. לצורך חישוב מקדמי הפליטה נסקר מידע על תהליך ה-SVZ ומידע על טכנולוגיות גזיפיקציה שונות. לפי Buttker et al., (2006) תהליך זה מוזכר בהקשר של ניסוי פיילוט בו נוסה הרכב הזנה של 50% פאלטות (לאחר קיצוץ ופלאטיזציה) של פסולת פלסטיק מרכבים (ELV) מעורבות עם MSW ביחס של 50:50, 30% פאלטות פלסטיק מעורב ו-20% פחם. כאשר 30 טון הזנה לשעה התחלקו כלהלן: 16.4 טון לשעה הפאלטות המעורבות (כלומר 8.2 טון פסולת ELV), 9.9 טון לשעה פלסטיק מעורב ו-3.7 טון פחם. שהביאו במהלך 24 שעות להפקה של 750,000 מטר מעוקב של גז גולמי סינטטי (כ-31,250 מטר מעוקב בשעה) שניתן לנקותו לסינגז איכותי. לצרכי חישוב היקף קיבולת הפלסטיק והתוצר הנחנו את ההתפלגות הבאה:

התפלגות פסולת לשימוש במתקן SVZ

חומר הזנה	טון לשעה	חלק יחסי
MSW	8.2	27%
פחם	3.7	12%
פסולת פלסטיק	18.1	61%

לכן לפי חישוב של הנוסחה {טון הזנה לשעה / (תוצר גז סינטטי בשעה X חלק יחסי של פסולת פלסטיק)}, 1 טון פסולת פלסטיק שיכול להגיע לכ-18,200 קילו-ג'אול לטון יכול להביא ליצור של כ-1053 מטר מעוקב גז סינטטי בשעה. מקור זה אינו מספק מידע מה הערך הקלורי של התוצר ובאיזה יעילות עבד המתקן בשעת הניסוי ולכן קשה לחשב מתוכו את הערך האנרגטי היחסי של מקטע הפלסטיק המעורב מהפסולת שבה נעשה שימוש במתקן ה-SVZ. לכן לצרכי המודל נגדיר שמ-1 טון פסולת פלסטיק ניתן להפיק גז סינטטי המשמש לייצור חשמל ביעילות המבוססת על סקירה של Klein & Themelis, (2003) ובה נסקרו מספר טכ' גזיפיקציה משולבות טורבינה ליצור חשמל (IGCC- Integrated Gasification Combined Cycle) שמתוכנן עולה כי מ-MSW ניתן להפיק תוצר גז עם ערך היסק גבוה של 18.6 מגה ג'אול למטר-מעוקב גז, שהוא מספר העומד בסדרי הגודל (בהנחה שהערך הקלורי של MSW יכול להגיע לכדי כשליש מהערך הקלורי מפסולת פלסטיק) לזה שהתקבל בפיילוט ה-SVZ, בו כ-60% מחומר הדלק הוא פסולת פלסטיק. לכן, בהתאם למקור זה ועל סמך חישוב היקף החשמל המופק נקבע כי לצרכי המודל יעילות הפקת חשמל ממתקן גזיפיקציה משולב עומד על כ-35% מהערך הקלורי של הפסולת, ערך הנחשב לשמרני מאחר וקיימים מקורות המצביעים על יעילות הפקת חשמל גבוהה יותר שיכולה לעמוד גם על 44% (Ratafia-Brown et al., 2002). פסולת מוצקה או הבוצה מהתהליך שלפי ההנחה שלנו מהווה כ-5% מממשקל מועברת להטמנה.

בהיבט פליטות המזהמים, מכיוון שאין מידע ברור שיכול להעיד על היקף הפליטות הישיר מפסולת פלסטיק נתונה, נעשה שימוש במידע מתוך הדוח של RTI International, (2012) הסוקר בין השאר פליטות של מזהמים ממתקני טיפול בפסולת פלסטיק ביניהם במתקן גזיפיקציה, כמפורט בטבלה שלהלן:

מקדמי פליטות למתקן גזיפקציה פסולת פלסטיק (גרם/טון פסולת פלסטיק) – ריכוז נתונים

ממקורות מידע. מתוך : (RTI International, 2012)

הערות	מקדם פליטה PM	מקדם פליטה NO _x (N ₂ O+NO ₂)	מקדם פליטה SO ₂	מקדם פליטה CO ₂	תהליך /מפעל/מקור
חומר המוצע מורכב מ-MSW, דש"ב מפסולת MSW ממוינת, פסולת עץ ופסולת תעשייתית ומסחרית אחרת. סה"כ מורכב מ-20% פסולת פלסטיק. CO ₂ פוסילי מהווה כ-20% מהמשקל	160.11	NO ₂ = 503.48 N ₂ O = 179.16	84.36	183196.9	Enerkem
93 טון פסולת מוצקה ביום מייצרים 4 מגוונ"ש חשמל.	19.95	NO ₂ = 746.15 N ₂ O = 430.46	52.61	321143	Plasco
חומר המוצא מורכב מ: אריחי רכבת, פלסטיק שאינו בר מחזור ופסולת עץ נקיייה.	4.53	NO ₂ = 86.18 N ₂ O = na	172.36	156489	Ze-Gen
תהליך המפיק מ-600 טון ביום כ-22 מגוונ"ש חשמל. חומר המוצא כולל : פסולת בניין, צמיגים וגזם ביתי.	90.71	NO ₂ = 113.4 N ₂ O = na	58.96	na	Geoplasma
מבוסס על תמהיל ה-MSW בארה"ב לשנת 2008 – 31% נייר, 12% פלסטיק, 13% אינרטי והשאר מזון אורגני אחר.	158.75	NO ₂ = 453.59 N ₂ O = 181.43	181.43	475365	LCI (בסיס המידע שגובש לביצוע ה- LCA במסמך)
מבוסס על תוצאות 2 מתקני פירולוזה ו- 2 מתקני גזיפקציה המטפלים ב- MSW. הערכים המוצגים הם ה- best estimate מתוך ערכי מקסימום ומינימום. (DEFRA 2004).	12	780	52	na	DEFRA*
מתקן SVZ המטפל בפסולת אריזות פלסטיק. מפיק מפסולת פלסטיק של בערך של 604 ק"ג מתנול, ו- 800 קוונטש חשמל	na	265	16	1560000	SVZ**
מתקן גזיפקציה של פחם. מובא לצרכי השוואה. חושב כאילו פסולת הפלסטיק המיועדת לגזיפקציה במודל, החליפה פחם. חישוב הפליטות מבוסס על ערך קלורי, הפליטות לערך קלורי של פחם תורגמו לפסולת NETL (2010).	64.2	544.36	11.44	1814539	IGCC***

קיימת שונות בסדרי הגודל בין עבור החלקיקים (PM) במתקנים השונים דבר זה ייתכן מנוכחות או אי נוכחות של משקע אלקטרוסטטי. לפי מקדמי הפליטה עבור מתקני שריפה חסרי אויר (Starved Air Combustores) המתאימים למתקני גזיפקציה, ערך פליטות חלקיקים למתקן עם משקע אלקטרוסטטי עומד על עשירית מזה ללא משקע. לכן לצרכי המודל הנחנו כי למתקן הגזיפקציה יש משקע אלקטרוסטטי וכי שיעור פליטות ה- NO_x אמור להיות גבוה באופן יחסי עבור פסולת פלסטיק. לכן מתוך הנתונים שנאספו מקדם הפליטה שהוגדרו לצורך התרחיש יהיו כלהלן:

מקדמי פליטה ליצור חשמל מגזיפקציה של פסולת פלסטיק (גרם/טון פסולת פלסטיק) – ריכוז נתונים ממקורות מידע

מקדם פליטה ליצור חשמל מגזיפקציה של פסולת (גרם/טון פלסטיק)			
CO ₂ eq	PM	SO _x	NO _x
1,560,000	15	181	1176

13 נספח ו- עלות-תועלת
עלויות חיצוניות

מחיר לטון פליטה

CO ₂	SO _x	PM ₁₀	HC	CO	NO _x	
0.000103	0.041836	0.088773	0.004254	0.061183	0.070733	הובלה
0.000103	0.041836	0.072308	-	-	0.029736	ייצור חשמל

עלויות חיצוניות לתרחישים שונים (ש"ח/טון פלסטיק)

סה"כ	CO ₂ eq	SO _x	PM ₁₀	HC	CO	NO _x	
1.93	0.14	0.00	0.12	0.01	0.25	1.40	הטמנה**
(-162.02)	101.34	(-151.50)	(-8.00)	0.01	0.25	(-104.13)	מבערה
57.60	48.21	4.66	(-2.35)	0.01	0.25	6.82	מיחזור A
(-47.45)	86.18	(-78.04)	(-6.66)	0.01	0.25	(-49.20)	מיחזור B
50.49	43.23	(-8.68)	0.61	0.00	0.06	15.27	RDF
(-82.39)	(-10.65)	(-70.77)	(-2.10)	0.01	0.25	0.86	פירוליזה
(-444.42)	(-80.14)	(-212.88)	(-37.65)	0.01	0.25	(-114.02)	גזיפקציה

* ערכים בסוגריים מהווים תועלת נטו כתוצאה מחישובי הפליטות בתרחיש

** עלויות חיצוניות של תרחיש הטמנה כוללות רק עלויות חיצוניות מהובלה. היטל ההטמנה שהינו עלות ישירה כולל את העלויות החיצוניות של הטמנה, ביניהם פליטות פחמן דו-חמצני.

עלויות ותועלות לתרחישים שונים (ש"ח/טון פלסטיק)

תרחיש	עלויות טיפול בש"ח לטון	עלויות חיצוניות בש"ח לטון	הכנסות	סה"כ הכנסות בש"ח לטון	סה"כ ש"ח ל-270 אלף טון
הטמנה	135	2	0	-137	-36,970,898
מבערה	498	-162	817	480	129,707,529
מיחזור A	2525	58	3193	610	164,798,936
מיחזור B	2752	-47	3639	935	252,363,712
RDF	173	50	1895	1672	451,401,440
פירוליזה	755	-82	3129	2456	663,140,381
גזיפקציה	490	-444	1549	1503	405,891,416

* ערך שלילי בעלויות חיצוניות פירושו חסכון בעלויות חיצוניות (כלומר תועלת)

חישוב טיפול משולב בצפון ובדרום

שיעור הפרש בתועלת מתחתיו	תועלת כוללת במידה ופתרון קיים בצפון	תועלת כוללת תרחיש נסיעה מצפון דרומה	תועלת לפסולת מצפון המטופלת במרכז, כולל עלות נסועה נוספת	תועלת במרכז (189 אלף טון)	
-	-36,970,898	-50,335,898	-24,456,269	-25,879,629	הטמנה
-381%	103,766,023	90,401,023	17,764,807	72,636,216	מבערה
43%	148,319,043	134,954,043	31,130,713	103,823,330	מיחזור A
45%	214,509,155	201,144,155	50,987,746	150,156,408	מיחזור B
33%	406,261,296	389,858,796	105,475,889	284,382,907	RDF
22%	497,355,285	483,990,285	135,841,586	348,148,700	פירוליזה
42%	304,418,562	291,053,562	77,960,569	213,092,993	גזיפיקציה

*שדה 'תועלת לפסולת מצפון המטופלת במרכז, כולל עלות נסועה נוספת' מתייחס לתועלת בהפחתת הסיכון כפול 8100 טון פחות עלות נסועה על סך 13.36 מיליון ש"ח ו-16.4 לתרחיש ה-RDF.

התפלגות ההכנסות ממכירת חשמל ותוצרי לוואי

הכנסות (ש"ח לטון)				
סה"כ	נפט- חסכון או מכירת תוצר על מבוסס נפט	מכירת פלסטיק ממוחזר	חשמל (ייצור או חסכון)	תרחיש
817	0	0	817	מבערה
3,193	641	2,520	32	מיחזור A
3,639	641	2,520	478	מיחזור B
1,895	1333	546	16	RDF
3,129	2571	546	12	פירוליזה
1,549	124	410	1016	גזיפיקציה

עלות נוספת		עלות ישירה		עלות לטיפול בטון פלסטיק (לפי טבלה 33)	
עלויות טיפול בש"ח (כפי שמופיעות בטבלה 31)	ביאור	מרכיב עלות נוסף בש"ח	ביאור עלות	מרכיב בש"ח	
135	-	-	-	-	הטמנה
498	עלות הטמנת פסולת ממבערה	0.03 x 115=2.8	כל הפסולת במבערה מלבד	495	מבערה
2,525	0.65 טון פסולת ממתקן מיון המועברת להטמנה (הכמות הכוללת גדולה מ-1 טון מפני שחומר יכול להכנס למתקן מיון ומיחזור ולצאת כפסולת בגלל שיעילות מתקן המחזור אינה 100%)	0.65 X 115=75	לפי עלות ישירה לטיפול X 0.46 טון (סה"כ מתאים למיחזור מתוך טון נכנס למערכת)	1364	מחזור - A
	מחיר מיון טון פלסטיק במתקן מיון	1073		2972	
2,752	PVC 0.02 טון פסולת המועברת למטמנה	0.02 X 115=2.3	לפי עלות ישירה לטיפול X 0.46 טון (סה"כ מתאים למיחזור מתוך טון נכנס למערכת)	1364	מחזור - B
	מחיר מיון טון פלסטיק במתקן מיון	1073		2972	
173	PET 0.15 טון פסולת שאינה משמשת ל-RDF ומועברת למיחזור	815 X 0.15=118	עלות ייצור RDF כפול 0.54 טון פסולת פלסטיק זמין לייצור RDF.	260 X 0.54=139	RDF
	חסכון מקיצור הדרך. חושב לפי חסכון של 170 ק"מ כפול 0.75 ש"ח לק"מ הובלה	-127			
	עלות הטמנת 0.31 טון שיירים מתהליכים בתרחיש	X 0.31=41.85 135			
755	הטמנה מימחזור, שאריות מיון וקיצוץ, פסולת מפירולוזיה	135 X 0.16=21.6	עלות לטיפול בטון כפול 0.73 טון נכנס למתקן פירולוזיה.	845 X 0.73=615	פירולוזיה
	PET 0.15 טון פסולת שאינה משמשת ל-פירולוזיה ומועברת למיחזור	815 X 0.15=118		845	

גזיפיקציה	522	X 0.73=381.06 522	עלות לטיפול במתקן גזיפיקציה בטון כפול 0.73 טון נכנס למתקן גזיפיקציה.	X 0.16 =21.38 135	הטמנה מימחזור, שאריות מיון וקיצוץ, פסולת מפירולוזיה	
	522			X 0.11=89.65 815	0.11 טון פסולת PET שאינה משמשת ל- פירוליזה ומועברת למיחזור	490
עלויות נוספות המשמשות לחישוב בטבלה זאת						
מתקן מיון	1073					
מחזור PET	815					

תיאור התפלגות הרכב פסולת פלסטיק לתהליכים בתרחישים השונים

תרחיש MR-A		
תהליך	סוג	טון
להטמנה	PVC	0.02
להטמנה	אחר	0.11
להטמנה	פילם PP	0.04
להטמנה	פילם PE	0.17
למיחזור	קשיח PE	0.22
למיחזור	קשיח PP	0.13
למיחזור	קשיח PET	0.21
למיחזור	קשיח PS	0.10
למיחזור	סה"כ למיחזור אחרי מיון (כולל יעלויות מיון)	0.46
להטמנה	PVC	0.02
שריפה	סה"כ פילמים ואחר	0.32
שריפה	סה"כ שיירים ממיון	0.20
שריפה	סה"כ שיירים מחזור	0.12
שריפה	סה"כ	0.63

תרחיש MR-B		
תהליך	סוג	טון
להטמנה	PVC	0.02
שריפה	אחר	0.11
שריפה	פילם PP	0.04
שריפה	פילם PE	0.17
למיחזור	קשיח PE	0.22
למיחזור	קשיח PP	0.13
למיחזור	קשיח PET	0.21
למיחזור	קשיח PS	0.10
למיחזור	סה"כ למיחזור אחרי מיון (כולל יעלויות מיון)	0.46
להטמנה	PVC	0.02
שריפה	סה"כ פילמים ואחר	0.32
שריפה	סה"כ שיירים ממיון	0.20
שריפה	סה"כ שיירים מחזור	0.12
שריפה	סה"כ	0.63

פירוליזה		
תהליך	סוג	טון
הטמנה	PVC	0.02
מיחזור	PET	0.15
הטמנה ממחזור	PET	0.06
הטמנה משאריות מיון וקיצוץ	פסולת פלסטיק	0.04
הטמנת פסולת מתהליך הפירוליזה		0.04
פירוליזה	PE קשיח	0.21
	PE פילם	0.16
	PP קשיח	0.12
	PP פילם	0.04
	PS קשיח	0.09
	אחר	0.10
סה"כ לשימוש בפירוליזה		0.73

RDF תרחיש		
לצרכי חישוב פליטות או השבת אנרגיה		
תהליך	סוג	טון
הטמנה	PVC	0.02
מיחזור	PET	0.15
הטמנת PET ממיון ומשיירים ממחזור	PET	0.06
הטמנת פסולת מיון ושיירי מ-RDF		0.23
RDF	PE קשיח	0.16
RDF	PE פילם	0.12
RDF	PP קשיח	0.09
RDF	PP פילם	0.03
RDF	PS קשיח	0.07
RDF	אחר	0.07
סה"כ לשימוש כתחליף פטקוק		0.54
סה"כ כמות פסולת במערכת		1.00

גזיפקציה		
תהליך	סוג	טון
הטמנה	PVC	0.02
מיחזור	PET	0.11
הטמנה ממחזור	PET	0.10
הטמנה משאריות מיון וקיצוץ	פסולת פלסטיק	0.04
גזיפקציה	PE קשיח	0.21
	PE פילם	0.16
	PP קשיח	0.12
	PP פילם	0.04
	PS קשיח	0.09
	אחר	0.10
סה"כ לשימוש בגזיפקציה		0.73