

משה בן-ששון

יחידת המדען הראשי, משרד
החדשנות, המדע והטכנולוגיה

אבי רוה

יחידת המדען הראשי, משרד
החדשנות, המדע והטכנולוגיה

אולגה זלטקין

יחידת המדען הראשי, משרד
האנרגיה

אבי דומב

יחידת המדען הראשי, משרד
החדשנות, המדע והטכנולוגיה



ניסוי במחזור פסולת פלסטיק בתהליך כימי ל-PET, פולימר הפלסטיק השכיח ביותר כיום | צילום: Vivan Sachs / IBM, Flickr CC BY-ND 2.0

הררי פלסטיק וגזי חממה – אתגר הטיפול בפסולת ללא הטמנה וללא פליטה

[סקירות](#)

גיליון אביב 2022 / כרך 13(1)

31 במאי, 2022

ציטוט מומלץ

בן-ששון מ, רוה א, זלטקין א ודומב
א. 2022. הררי פלסטיק וגזי חממה
– אתגר הטיפול בפסולת ללא
הטמנה וללא פליטה. *אקולוגיה
וסביבה* 13(1): 40–48.

על קצה המזלג

- הבנת מכלול הבעיות הכרוכות בפסולת הפלסטיק חשובה ביותר, מאחר שהפתרונות המוצעים לפלסטיק שזולג ומתפזר לסביבה אינם פותרים את האתגרים הקשורים לרוב פסולת הפלסטיק שנאצרת ומטופלת בפתרונות קצה מוסדרים.
- בעוד שהפלסטיק המצטבר בסביבה הוא סכנה משמעותית למערכות האקולוגיות ולבריאות האדם, הוא מהווה אחוזים בודדים מפסולת הפלסטיק בישראל.
- רובה המכריע של פסולת הפלסטיק בישראל אינו מתפזר לסביבה, אלא נאצר ומוטמן. פתרון הקצה של הטמנת פסולת אינו בר-קיימא.
- החלופה המועדפת בעולם להטמנה היא השבת אנרגיה מפסולת, אך שרפת פלסטיק כרוכה בפליטות גזי חממה בשיעור ניכר, שעלול להגיע בשנת 2050 ל-20% מהפליטות של ישראל. זהו האתגר הסביבתי המרכזי הקשור בפסולת פלסטיק.
- התמודדות עם האתגר מחייבת השקעה במו"פ, למשל יצירת פלסטיק מביומסה מתחדשת, לכידת פחמן דו-חמצני בארובות מתקני השרפה ותהליך גזיפיקציה שממירים בו פסולת פלסטיק לחומרי גלם ליצירת פלסטיק.

מערכת אקולוגיה וסביבה

תקציר

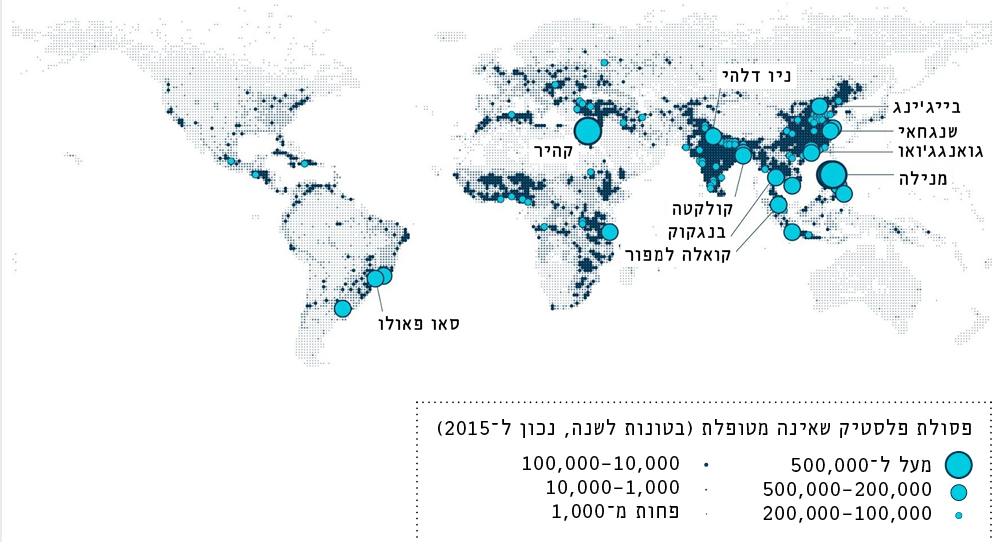
הדיון הציבורי על השימוש בפלסטיק בארץ ובעולם מתמקד בשנים האחרונות בהשפעתו השלילית של הפלסטיק עקב זליגתו לסביבה והצטברותו במערכות האקולוגיות השונות. למרות זאת, בישראל רובה המכריע של פסולת הפלסטיק אינו זולג לסביבה, אלא נאצר, נאסף, מפונה, ומטופל באופן מוסדר, והאתגרים הסביבתיים הקשורים לפלח זה נידונים פחות. הבנת מכלול בעיות פסולת הפלסטיק חשובה ביותר, מאחר שהפתרונות המוצעים לפלסטיק שזולג ומתפזר לסביבה אינם פותרים את האתגרים הקשורים לרוב פסולת הפלסטיק שנאצרת ומטופלת בפתרונות קצה מוסדרים. כיום הטמנה היא טיפול הקצה הדומיננטי בישראל לפסולת, אך נלווים לה חסרונות משמעותיים המחייבים מעבר לשיטות חלופיות סביבתיות יותר, כגון שרפת פסולת להשבת אנרגיה. מצד שני, שרפת פסולת הפלסטיק שמקורה בפחמימנים מאובנים ושמהווה רכיב משמעותי מסך הפסולת, תוביל לפליטה של גזי חממה ולהצטברותם באטמוספירה, ומכאן שהיא מנוגדת למאמץ ולמדיניות העולמיים. כדי להתמודד עם האתגר של הקטנת נפח ההטמנה על-ידי מעבר לשיטות חלופיות לטיפול קצה בפסולת ללא פליטת גזי חממה, יש צורך במחקר ופיתוח להבשלת מספר טכנולוגיות ופתרונות פוטנציאליים שייתנו מענה לאתגר. הפתרונות כוללים פלסטיק המבוסס על חומר גלם מתחדש, לכידת פחמן בארובות מתקן השרפה להשבת האנרגיה, ואף קידום תהליך גזיפיקציה שייעודו השבה והפקת חומר גלם לפלסטיק מהפסולת. מאמר זה מסב את תשומת הלב הציבורית לאתגר המרכזי של פסולת הפלסטיק שנאספת, נאצרת ומטופלת בפתרונות קצה, ומפרט את הפתרונות הדורשים מחקר ופיתוח לצורך הבשלתם ויישומם.

ליגת הפלסטיק לסביבה אינה כל הסיפור

הדיון הציבורי על השימוש בפלסטיק מתמקד בשנים האחרונות בהשפעתו השלילית עקב זליגתו לסביבה והצטברותו במערכות כגון הים [58, 28] והקרקע [43], וכן במי השתייה [38] ובמזון [20], ואף הסעתו באוויר [17]. לנוכח זאת, לאורך השנים קודמה אסדרה להתמודדות עם הפסולת המתפזרת בסביבה, ולצמצומה (למשל בישראל: חוק הפיקדון, חוק הארזות, חוק השקיות, מיסוי על חד-פעמי), וכן הושקע מאמץ בפיתוח תחליפים מתכלים לפלסטיק ה"קונבנציונלי" שיתפרקו ספונטנית (פלסטיק מתכלה ביולוגי, bio-degradable plastic) תוך מניעת הצטברותו בסביבה. למרות המאמץ והמודעות הסביבתית רק כ-0.6% מהפלסטיק המיוצר בעולם הוא פלסטיק מתכלה [23]. בעוד שהפלסטיק המצטבר בסביבה מהווה איום משמעותי למערכות האקולוגיות, מדובר באחוזים בודדים מסך פסולת הפלסטיק. לדוגמה, בהקשר של זיהום פלסטיק בים: ההערכות המדעיות סוברות שבין 1.7% ל-11% מסך פסולת הפלסטיק העולמית מוסעים ומתפזרים בים [35, 16]. גם התרומה של כל מדינה ומדינה משתנה, ותלויה בעיקר במערכת האיסוף ובכמות הפסולת שמוצרת בה או מיובאת אליה. באופן כללי, מחקרים הצביעו שככל שהתל"ג של המדינה גבוה יותר, כך כמות הפלסטיק (לנפש) שאזרחיה צורכים (ובהתאמה גם כמות הפסולת) גבוהה יותר, אבל מצד שני, ככל שהתל"ג של המדינה נמוך יותר, כך אחוז פסולת הפלסטיק שאינה מטופלת באופן מסודר ועל כן בעלת סיכון גבוה להתפזר לסביבה, גבוה יותר. בהתאם לכך, המוקדים העולמיים של פסולת פלסטיק שאינה מטופלת ונמצאת בסכנה להתפזר ולזיהם את הסביבה הם בעיקר בארצות מתפתחות בעלות אוכלוסייה גדולה [41] (איור 1). מחקרים נוספים מיקדו את מקור רוב רובה של פסולת הפלסטיק באוקיינוסים בהסעה ממספר נהרות בדרום-מזרח אסיה [51]. גם בישראל נמצא שחלק משמעותי של הפסולת בים ובחופים אינו מקומי, ומקורו בהסעה ממדינות שכנות [11]. ומכאן שבישראל כמדינה מתקדמת, שמערכת איסוף הפסולת שלה מפותחת, וקיימים בה הליכי אסדרה מתקדמים, מקובלת ההנחה שרק אחוזים בודדים מפסולת הפלסטיק המקומית מתפזרים בסביבה.

איור 1. כמויות פסולת הפלסטיק שאינה מטופלת, לפי מדינות, ב-2015

במוקדים (המסומנים בעיגולים) הפלסטיק לא נאצר ולא מטופל באופן מסודר, ולכן קיים סיכון גבוה שיתפזר בסביבה. לרוב, ככל שהמדינה מפותחת יותר (תל"ג גבוה), כך כמות הפסולת המיוצרת בה לאדם גבוהה יותר, אך המוקדים של פלסטיק שאינו נאצר ומטופל, ממוקמים בעיקר במדינות מתפתחות (תל"ג נמוך), שם יש ריכוז אוכלוסייה גבוה, ונדירים יותר במדינות מתפתחות. האיור מתוך Lebreton and Andradhy^[41].



איור 1

כמויות פסולת הפלסטיק שאינה מטופלת, לפי מדינות, ב-2015

במוקדים (המסומנים בעיגול) הפלסטיק לא נאצר ולא מטופל באופן מסודר, ולכן קיים סיכון גבוה שיתפזר בסביבה. לרוב, ככל שהמדינה מפותחת יותר (תל"ג גבוה), כך כמות הפסולת המיוצרת בה לאדם גבוהה יותר, אך המוקדים של פלסטיק שאינו נאצר ומטופל, ממוקמים בעיקר במדינות מתפתחות (תל"ג נמוך), שם יש ריכוז אוכלוסייה גבוה, ונדירים יותר במדינות מתפתחות. האיור מתוך Lebreton and Andradhy^[41].

בעוד שהדיון הציבורי ממוקד באותם אחוזים בודדים של הפלסטיק המתפזרים בסביבה, רובה המכריע של פסולת הפלסטיק בישראל – כמיליון טונות בשנה^[2] – נאצר ונאסף ביחד עם שאר מרכיבי הפסולת לצורך טיפול סופי מוסדר. עם זאת, הבעיות הסביבתיות הקשורות לטיפול בפסולת הפלסטיק הנאספת, שהיא עיקר פסולת הפלסטיק, נידונות פחות. מאמר זה נועד להפנות זרקור אל האתגר הסביבתי המרכזי הקשור לרובה המכריע של פסולת הפלסטיק שנאצרת ואינה מתפזרת לסביבה, וכן לתאר גישות אפשריות לפתרון שרצוי למקד מ"פ (מחקר ופיתוח) לצורך קידומן.



רובה המכריע של פסולת הפלסטיק נאצר ונאסף – אומנם הוא אינו מתפזר במערכות אקולוגיות, אך טיפול הקצה בו – בין אם בהטמנה או בהשבת אנרגיה – יוצר בעיות סביבתיות משמעותיות מאוד

נתגר הפלסטיק שנאצר: פליטת גזי חממה

בהקשר להפחתת פסולת בכלל ופסולת פלסטיק בפרט, מקובל שלושת ה-Rים – 1. הפחתה במקור (Reduce), 2. שימוש חוזר (Reuse), ו-3. מחזור (Recycling) – הם גישות עדיפות שתפקידן לצמצם את כמות הפסולת שתטופל בשלבים סופיים, ועל כן מושקע מאמץ רב בקידום, והן הבסיס לעקרונות הכלכלה המעגלית^[53]. עם זאת, גם אם הגישות הללו אכן יצליחו לצמצם משמעותית את פסולת הפלסטיק, עדיין צפויות כמויות גדולות של פסולת פלסטיק, שכבר לא תהיה בת-מחזור או תצלה לשימוש חוזר. הפסולת הזו תיאצר, ויהיה צורך לשנע אותה לשם טיפול קצה סופי.

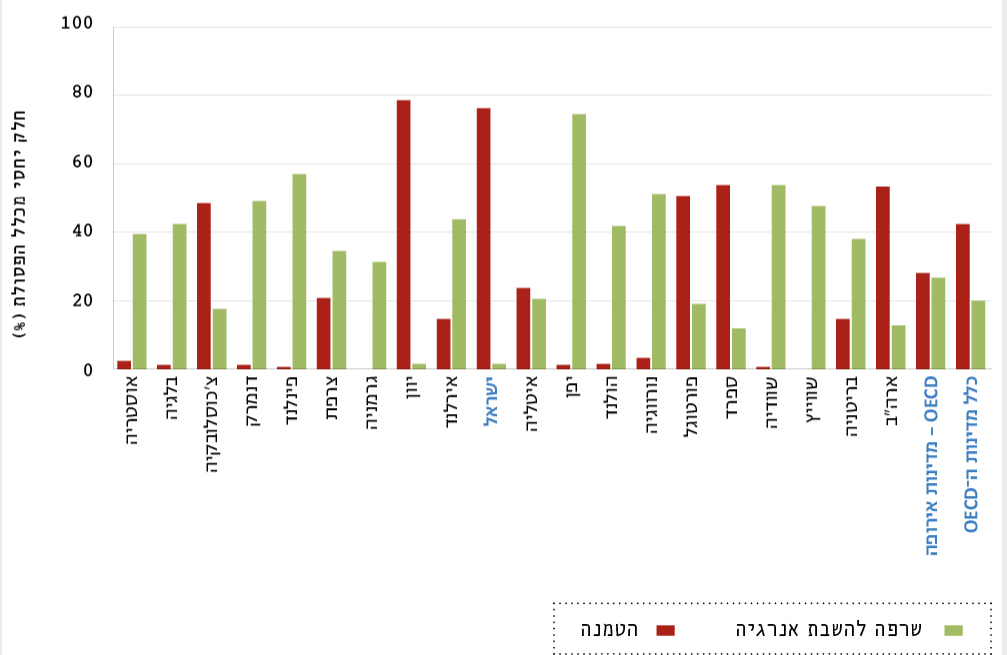
בעוד שהטמנה היא שיטת הקצה הדומיננטית בישראל המטפלת כיום ב-80% מהפסולת^[2], היא טומנת בחובה חסרונות משמעותיים. קודם כול, השטח שיועד למטמנות בישראל הולך ומתמלא^[1]. מסיבה זו ובשל זמינות הקרקע ועלוותה, המטמנות ממוקמות לרוב בפריפריה, מה שמצריך שינוע אינטנסיבי של הפסולת אליהן, על כל המשמעותיות הנלוות לכך מבחינת פליטת גזי החממה, זיהום אוויר ומטרדי תנועה. נוסף על כך, התנאים בהטמנה העמוקה אל-אווירניים (ללא חמצן) ומובילים לפירוק החומר האורגני ולשחרור מתאן לאטמוספירה, והשפעתו חמורה מבחינת אפקט החממה (פי 30 מ-CO₂, [פחמן דו-חמצני])^[22]. פתרון מורכב יחסית של איגום מתאן ושרפתו לצורכי השבת אנרגיה שיוכל "רק" לפליטת CO₂, אינו יעיל מבחינת השבת האנרגיה יחסית לשיטות השבת האנרגיה שמתוארות בהמשך^[36, 21]. ראוי לציין שלהבדיל מהפסולת המבוססת על חומרים ביולוגיים טבעיים (ביומסה), המכונה בציבור גם פסולת אורגנית רטובה, פסולת הפלסטיק עמידה בפני פירוק ביולוגי, ובפועל אינה מתפרקת במטמנה אלא מצטברת בקרקע. קצב פליטת גזי החממה ממנה זניח, אולם יש חשש שתוצרי הלואי או מיקרו-חלקיקים של הפלסטיק יחלחלו למי התהום ויזהמו אותם^[30].

בשל השיקולים שצוינו לעיל, השבת אנרגיה מפסולת מקובלת כיום בעולם כאסטרטגיית קצה לטיפול בפסולת, המועדפת על פני הטמנה^[3]. שרפה ישירה של הפסולת במשרפות ייעודיות (incineration) היא שיטת השבת האנרגיה הנפוצה ביותר בעולם כיום^[54, 42] והיא מיושמת באופן נרחב במדינות המתקדמות והירוקות ביותר באירופה ובעולם. במדינות אלה (כגון אוסטריה, בלגיה, דנמרק, פינלנד, הולנד, נורווגיה, שוודיה, שווייץ ובייחוד יפן), שיותר מ-40% מהפסולת שלהן נשרפת, אחוזי ההטמנה בודדים אם בכלל. מנגד, במדינות ששרפת פסולת להשבת אנרגיה מיושמת בהן באופן מצומצם יותר (צ'כיה, פורטוגל, ספרד, ארה"ב, ובייחוד יוון וישראל), ההטמנה משמעותית ביותר (איור 2)^[47]. אם כן, כיום הימנעות מהטמנה מלווה לרוב במעבר לחלופה של שרפה להשבת אנרגיה. במשרפות אלה הפסולת על סוגיה השונים נשרפת בכבשנים, והחום שנוצר מנוצל לייצור אנרגיות חשמל או חום. היתרון המשמעותי ביותר של שרפת הפסולת להשבת אנרגיה הוא צמצום משמעותי של נפח הפסולת המוטמנת בסופו של דבר (כאפר) לכ-20%-5 מהנפח המקורי^[15, 40]. יתרונות משמעותיים נוספים הם הערך הכלכלי של

האנרגיה המושבת והחיסכון בצורך בהפקת אנרגיה אחרת, וספציפית – במקרה של חיסכון בהפקת אנרגיה שמקורה בפחמימנים מאובנים (במאמר זה נשתמש במונח 'פחמימנים מאובנים' בהתייחס לגז טבעי, לפחם ולנפט), גם הימנעות מפליטות גזי חממה לאטמוספירה. מתקני שרפה אלה ממוקמים כיום במרכזי הערים באירופה (ומכאן החיסכון הכלכלי והיתרון הסביבתי הנובעים מביטול הצורך בשינוע האשפה להטמנה מרוחקת) תוך שמירה על קריטריונים סביבתיים מחמירים על-ידי סדרה של מתקני טיהור לאוויר שנפלט מהשרפה [32]. לטכנולוגיה זו שתי מגבלות: עלות הקמה ותפעול גבוהה, הכדאית רק במתקנים המטפלים בכמות גדולה של פסולת [55], ופליטות CO₂.

איור 2. החלק היחסי של הפסולת המוטמן מול הנשרף להשבת אנרגיה במדינות הארגון לשיתוף פעולה כלכליים (OECD)

החלק היחסי של הפסולת שעובר הטמנה אל מול החלק היחסי שנשרף להשבת אנרגיה מכלל הפסולת בכל מדינה (באחוזים מכלל הפסולת). בעוד שבישראל החלק היחסי של הפסולת שעובר שרפה להשבת אנרגיה הוא אחוזים בודדים, בחלק גדול ממדינות מערב אירופה הוא גדול מ-40%, ובממוצע של מדינות OECD באירופה ובמדינות OECD בכלל העולם הוא עומד על 26% ועל 20% בהתאמה. עיבוד של נתוני ה-OECD לשנת 2018 [47].



איור 2

החלק היחסי של הפסולת המוטמן מול הנשרף להשבת אנרגיה במדינות הארגון לשיתוף פעולה כלכליים (OECD)

החלק היחסי של הפסולת שעובר הטמנה אל מול החלק היחסי שנשרף להשבת אנרגיה מכלל הפסולת בכל מדינה (באחוזים מכלל הפסולת). בעוד שבישראל החלק היחסי של הפסולת שעובר שרפה להשבת אנרגיה הוא אחוזים בודדים, בחלק גדול ממדינות מערב אירופה הוא גדול מ-40%, ובממוצע של מדינות OECD באירופה ובמדינות OECD בכלל העולם הוא עומד על 26% ועל 20% בהתאמה. עיבוד של נתוני ה-OECD לשנת 2018 [47].



שרפת פלסטיק מובילה לתוספת נקייה (נטו) של פליטת גזי חממה, מאחר ש-99% ממקורו של הפלסטיק הוא בפחמימנים מאובנים ממאגרים גאולוגיים

בשנת 2018 הושקה בישראל תוכנית אסטרטגית לטיפול בפסולת עירונית של המשרד להגנת הסביבה, שכללה הקמת שלושה מתקני שרפת פסולת מרכזיים^[4], אך ב-2020 בתוכנית מעודכנת^[2] הוסט הדגש להתמקדות בהגדלת נפח מחזור הפסולת המופרדת במקור, ללא הקמת מתקני שרפה גדולים. אי לכך, אין כיום מתקני שרפת פסולת משמעותיים או הליכים להקמתם, מלבד שני מתקני מיון מקומיים לייצור^[7] RDF (Refuse Derived Fuel) לשרפה בנשר כתחליף לדלק מחצבים. לכן, רובה המוחלט של הפסולת העירונית העשירה בפלסטיק, מוטמן. ואומנם, לא מעט מומחי פסולת מתקשים להבין כיצד ישראל תצליח לעמוד ביעדים השאפתניים בתוכנית האסטרטגית המעודכנת להפחתת ההטמנה מ-80% ל-20% בלבד ללא הקמת מתקני שרפה להשבת אנרגיה^[12].

בהקשר לפליטות גזי חממה בתהליך השרפה להשבת אנרגיה, שרפת פסולת ביומסה, כמו גם עץ ופסולת ביתית רטובה, שנוצרו בתהליך הפוטוסינתזה תוך הפיכת CO₂ לסוכרים, מייצרת אנרגיה ופולטת CO₂ בכמות דומה ל-CO₂ שנוצל בתהליך הטבעי של ייצור הביומסה, כך שבפליטות האלה אין תרומה נקייה (נטו) נוספת לעלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה^[9,34]. כמו כן, הפקת אנרגיה בשרפה של ביומסה מקובלת בעולם כמקור אנרגיה מתחדשת^[24]. עם זאת, בעוד שהערך הקלורי של פלסטיק, ומכאן גם יכולת השבת האנרגיה שלו, גבוהים יותר משל הפסולת הביתית הרטובה או ביומסה אחרת, שרפתו כן מובילה לתוספת נקייה של פליטת גזי חממה, מאחר ש-99% ממקורו של הפלסטיק הם בפחמימנים מאובנים ממאגרים גאולוגיים. ההערכה היא שכל שרפת טונה פלסטיק מסוג פוליאטילן או פוליפרופילן מוסיפה לאטמוספירה עד 2.7 טונות CO₂ שאין מתקזזות עם CO₂ שמשמש בתהליך הפוטוסינתזה^[25].

מלבד שרפה ישירה במשרפות, קיימות שיטות קצה נוספות של השבת אנרגיה מפסולת, כגון פירוליזה (התפרקות תרמית, pyrolysis) או גזיפיקציה (gasification). בתהליכים אלה מתרחש פירוק תרמי של הפסולת בתנאים של היעדר חמצן או בקרת חמצן ובקרת לחצים וטמפרטורות (300–1,200 מעלות צלזיוס), בעיקר לקבלת תוצרים של דלקים סינתטיים נוזליים או גזים דלקיים ואף דלק מימן^[14,19,49]. הדלקים משמשים להנעת כלי תחבורה, והגזים להפקת חשמל או חום. עם זאת, בהקשר של פליטת גזי חממה (ומבלי להתייחס כלל ליעילות השבת האנרגיה) רוב השיטות התרמיות האלה להשבת אנרגיה דומות במהותן לשרפה ישירה במשרפות, מאחר שהתוצרים של התהליך – דלקים או גזים – נשרפים להפקת אנרגיה. מכאן, שאם בפסולת שהוזנה יש גם פלסטיק שמקורו בפחמימנים מאובנים, הדבר יביא בסופו של דבר לפליטת CO₂ נוספת בעת שרפת התוצרים^[37].

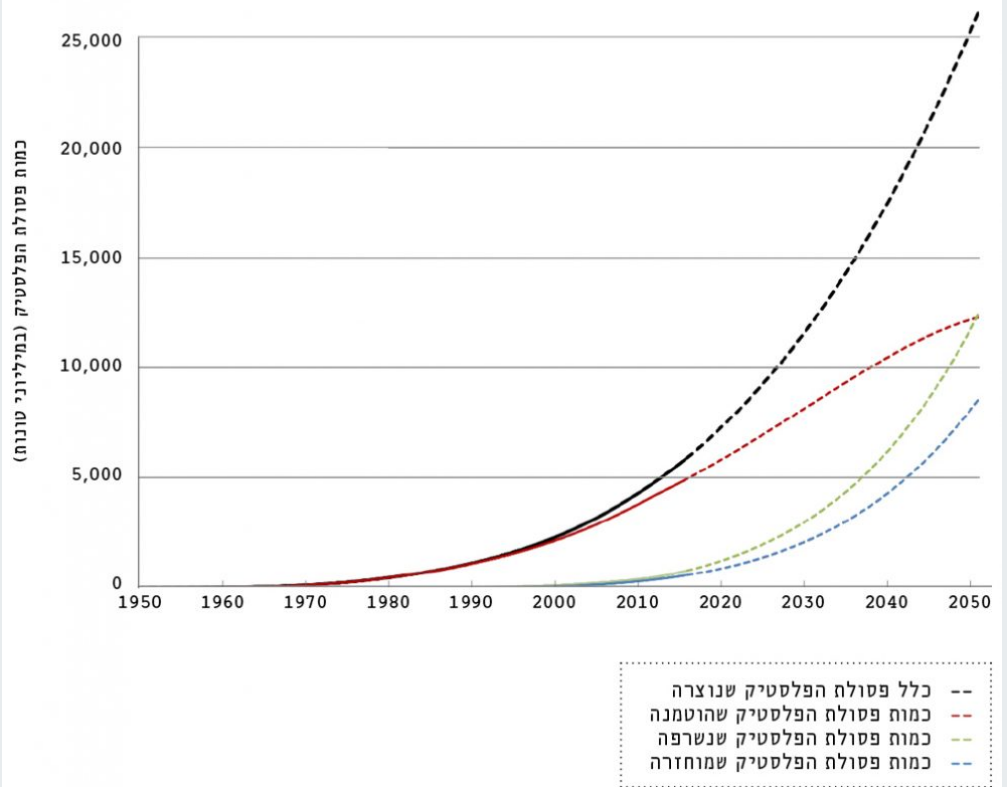


מתקן להשבת אנרגיה מפסולת, הגדול מסוגו בגרמניה. בישראל טרם הוקם מתקן שכזה, אך בהנחה שזהו פתרון הקצה שישראל תאמץ לפסולת, יש להביא בחשבון שבתהליכי השבת אנרגיה מפסולת פלסטיק (שמקורה בפחמימנים מאובנים) נפלט פחמן דו-חמצני המצטבר באטמוספירה. מקור פליטות גזי חממה זה עלול להגיע עד 2050 ל-20% מסך הפליטות של ישראל | Norbert Nagel, Wikimedia, CC BY-SA 3.0

כך או אחרת, בסוף כל תהליכי השבת האנרגיה מהפסולת עקב שרפה ישירה או עקיפה (של התוצרים) של פסולת פלסטיק שמקורה בפחמימנים מאובנים, ייפלט CO_2 שיצטבר באטמוספירה ולא יתקזז בתהליך הפוטוסינתזה. תובנה זו משמעותית לאור תשומת הלב העולמית הגוברת בשנתיים האחרונות לצורך בצמצום דרסטי של פליטות גזי חממה בשל שינוי האקלים הנצפה. ישראל, כמו מדינות רבות בעולם, מקדמת מדיניות להפחתת פליטת גזי חממה (החלטת ממשלה 171 [10]). כמו כן, היא התחייבה פומבית בוועידת האקלים בגלזגו 2021 ל-0 פליטות פחמן עד לשנת 2050. מאמץ זה להפחתת הפליטות מתמקד ברובו בהמרת מקורות האנרגיה המבוססים על פחמימנים מאובנים, למקורות מתחדשים. למרות זאת, כבר כיום ההערכות הן שכ-6% מהפחמן שמקורו בפחמימנים מאובנים משמש לייצור פלסטיק [59], ובעוד שבשנת 2015 4% מסך פליטות גזי החממה העולמיות יוחסו לשימוש בפלסטיק [60], ההערכה היא שבשנת 2050 השימוש בפלסטיק יוביל לכ-15%-10 מסך גזי פליטת גזי החממה העולמיים [2, 29]. חישוב זה כולל את הפליטות מהאנרגיה שכרוכה בהפקת הפחמימנים המאובנים, בהליך ייצור הפלסטיק וכן בטיפול הקצה, ואינו מביא בחשבון את המאמץ העולמי השאפתני למניעת שימוש בפחמימנים מאובנים לצורכי אנרגיה עד לשנת 2050. ועל כן, שילוב התחזיות של העדפת פתרונות השבת אנרגיה מפסולת על פני ההטמנה [29] (איוור 3) בתוספת גידול משוער פי 3-4 עד 2050 בכמות פסולת הפלסטיק שתיוצר [46], יוביל לעלייה משמעותית בפליטות גזי החממה מפסולת הפלסטיק. עלייה זו תהיה משמעותית יותר באופן יחסי גם בשל הירידה הצפויה בפליטות פחמן לאור המעבר לאנרגיה מתחדשת. כלומר, אם הפלסטיק יישאר ממקור של פחמימנים מאובנים, ייצור הפלסטיק ופתרונות השבת הפסולת שלו לאנרגיה יספקו בעתיד תרומה משמעותית שתלך ותגדל לפליטות גזי חממה לאטמוספירה. לדוגמה, בישראל פליטות גזי החממה המדווחות כיום הן 78 מיליוני טונות שווה ערך פחמן דו-חמצני (MtCO_2e) [5]. בעוד שכמות פסולת הפלסטיק נאמדת בכמיליון טונות [2]. בהנחה שעד שנת 2050 ישראל תצליח להפחית ב-80% את פליטות גזי החממה שלה (כזכור, הממשלה הצהירה על הפחתה מלאה של פליטות גזי החממה ב-2050) בעיקר בזכות מעבר לאנרגיה מתחדשת, פליטות גזי החממה שלה יהיו $15.6 \text{ MtCO}_2\text{e}$. אם בשנת 2050 40% מהפסולת תישרף להשבת אנרגיה (שיעור שקיים במערב אירופה כיום), ובהתחשב בגידול של פי שלושה בצריכת הפלסטיק ומכאן גם גידול באותו שיעור בכמות הפסולת, ובהנחה שעדיין מקור רוב הפלסטיק יישאר מפחמימנים מאובנים, ייפלטו ב-2050 כ- $3.2 \text{ MtCO}_2\text{e}$ בשל שרפת הפלסטיק, שיהוו כ-20% מסך הפליטות של ישראל. חישוב זה מתייחס רק לפליטה בטיפול הקצה להשבת אנרגיה ואינו מביא בחשבון את גזי החממה שייפלטו במהלך ייצור הפלסטיק.

איור 3. תצפיות כמות פסולת הפלסטיק העולמית שיוצרה בשנים 1950 עד 2015 (קו רציף) וחיזוי כמות פסולת הפלסטיק עד 2050 (קו מקווקו)

הצבעים אדום, ירוק וכחול מייצגים את חיזוי כמות הפסולת (ביחידות של מיליון טונות) שתטופל בהטמנה, בשרפה ובמחזור בהתאמה. ניתן לראות את המגמה של העלייה בחלקה היחסי של השרפה (וכמובן עלייה בכמות הכללית של פסולת הפלסטיק) ביחס לירידה בחלק היחסי של ההטמנה. האיור מתוך Geyer et al.^[29]



איור 3

תצפיות כמות פסולת הפלסטיק העולמית שיוצרה בשנים 1950 עד 2015 (קו רציף) וחיזוי כמות פסולת הפלסטיק עד 2050 (קו מקווקו)

הצבעים אדום, ירוק וכחול מייצגים את חיזוי כמות הפסולת (ביחידות של מיליון טונות) שתטופל בהטמנה, בשרפה ובמחזור בהתאמה. ניתן לראות את המגמה של העלייה בחלקה היחסי של השרפה (וכמובן עלייה בכמות הכללית של פסולת הפלסטיק) ביחס לירידה בחלק היחסי של ההטמנה. האיור מתוך Geyer et al.^[29]

זהו היבט קריטי בשיקולים לקידום פתרונות קצה בטיפול בכלל הפסולת העירונית בישראל (שכ-20% ממנה הוא פלסטיק) ולקביעת סדר עדיפויות לפתרונות^[2]. ועל כן, הבעיה של רוב רובו של הפלסטיק אינה שהוא אינו מתכלה ביולוגית, אלא העובדה שמקורו בפחמימנים מאובנים. היות שכך, פליטות ה- CO_2 הצפויות משרפת פסולת הפלסטיק בטיפול קצה להשבת אנרגיה, שהם החלופה הפוטנציאלית הראשית להטמנה, עומדות בניגוד למאמץ העולמי למניעת פליטות של גזי חממה.

חשוב לציין שמעבר לעובדה שהאנושות התמכרה לפלסטיק, ובתחומים רבים קשה מאוד למצוא תחליפים לפלסטיק בשל מגוון תכונותיו, גם כשיש חלופה, היא לא בהכרח סביבתית יותר. לדוגמה, לחלופות בתעשיית האריזות, שאחראית לכ-40% מכלל ייצור הפלסטיק (כגון אריזות קרטון, זכוכית, מתכת ועוד), יש השפעה סביבתית גדולה יותר בשל צריכת אנרגיה ומים, וכן בגלל כמות הפסולת שהן מייצרות, וזאת מלבד השימוש המוגבל יותר שלהן^[13]. מכאן, נראה שצריכת הפלסטיק תמשיך ותעלה ללא חלופה ראויה.

דרכי התמודדות אפשריות

ישנם ארבעה כיוונים עיקריים אפשריים להתמודדות עם האתגר של מציאת שיטות טיפול בפסולת שהן חלופיות להטמנה, וגם ימנעו פליטות גזי חממה לאטמוספירה:

הפרדה של פסולת פלסטיק במקור לטובת שימוש בחומר בתעשייה

הרעיון הראשון הוא הפרדה במקור בין זרמי הפסולת, ובפרט הפרדת הפלסטיק מסוגי הפסולת האחרים, גריסתו ושימוש בו בתעשייה כחומר מילוי נחות. בדרך זו ניתן להימנע מפליטת גזי החממה הכרוכים בשרפתו. עם זאת, מאחר שהערך הקלורי של הפסולת האורגנית הרטובה נמוך משמעותית מפלסטיק (1,435 לעומת 8,700 קילו-קלוריות לק"ג^[7]), הפרדת הפלסטיק משאר זרמי הפסולת תוביל להקטנה משמעותית של הכדאיות הכלכלית להקמת מתקני השבת האנרגיה, וזה יוביל להיצמדות ולשיבה לפתרון הקצה של הטמנה לכלל הפסולת. נוסף על כך, הליך ההפרדה במקור בין זרמי הפסולת איננו טריוויאלי, ועד כה מדיניות ההפרדה בישראל לא נחלה הצלחה^[8]. על כן, נראה שקיים ספק לגבי הצלחת היישום בשטח של כיוון זה.



תהליך כימי קטליטי המפרק פלסטיק מסוג פוליאסטר לחומר שניתן להשתמש בו בייצור פלסטיק. "כדי להתמודד עם האתגר של הקטנת נפח ההטמנה על-ידי מעבר לשיטות חלופיות לטיפול קצה בפסולת ללא פליטת גזי חממה, יש צורך במחקר ופיתוח להבשלת מספר טכנולוגיות ופתרונות פוטנציאליים שייתנו מענה לאתגר" | צילום: Vivan Sachs / IBM, Flickr CC BY-ND 2.0

פיתוח פלסטיק מחומר גלם מתחדש

מאחר שהאתגר נובע מהעובדה שפסולת הפלסטיק המושבת לאנרגיה מקורה בפחמימנים מאובנים, ניתן לפתח פלסטיק מתכלה ביולוגית שחומר הגלם שלו מתחדש, כלומר מביומסה (bio-based plastic), כך ששרפתו לא תוסיף גזי חממה לאטמוספירה שלא יתקזזו בתהליך הפוטוסינתזה. ראוי לציין שאם בסופו של דבר פסולת הפלסטיק אכן נאצרת ומטופלת בתהליכי קצה של השבת אנרגיה, אין זה משנה אם הפלסטיק מתכלה ביולוגית או לא, אלא רק אם הפלסטיק ממקור מתחדש או שמקורו בפחמימנים מאובנים, כלומר – אם תהיה תוספת גזי חממה לאטמוספירה בעת הפליטה ללא קיזוז עם תהליכים ביולוגיים.

כיום הפלסטיק שמקורו מתחדש כולל גם פיתוח של פלסטיק מתכלה, אך גם פלסטיק על בסיס הפולימרים הקלאסיים הנפוצים שאינם מתכלים ביולוגית, כמו פוליאטילן ופוליפרופילן (שביחד מהווים 78% מאריזות הפלסטיק [13]), ולכן תכונותיו הייחודיות של הפלסטיק בשימושו הנפוצים יכולות להישמר. פולימרים נפוצים אחרים של פלסטיק כמו פוליאטילן-תרפתלאט מיוצרים באופן שחלק מהמרכיבים אותם הם ממקור מתחדש וחלק מקורם בפחמימנים מאובנים [52]. נתח הפלסטיק הביולוגי (bioplastic), שכולל פלסטיק מתכלה ביולוגית או שמקורו מתחדש או שניהם יחד, מוערך כיום רק בכ-1% מסך ייצור הפלסטיק העולמי, ומתוכו 40% הוא פלסטיק ממקור מתחדש אך שאינו מתכלה [23].

באופן כללי, חומר המוצא הראשי לסוגי הפלסטיק הנפוצים כיום הוא הכימיקל אתילן, שעובר תהליכי פלמור לקבלת הפולימרים המוכרים של הפלסטיק. בעוד שכיום אתילן מיוצר מכרייה, מעיבוד ומזיקוק של פחמימנים מאובנים, במקרה של פלסטיק ממקור מתחדש אתילן מיוצר (בריאקציית אלומם [26] [dehydration]) מאתנול שמופק מביומסה דרך תהליכי תסיסה ביולוגיים או דרך פירוליזה כימית [44]. ייצור אתנול מביומסה (המכונה ביו-אתנול) הוא תהליך בשל ומוכר בעולם, והוא מיושם בקנה מידה תעשייתי נרחב בעיקר לשימוש כדלק ביולוגי (biofuel). כיום כ-100 מיליארד ליטר ביו-אתנול מיוצרים בשנה בעולם, וארה"ב וברזיל הן היצרניות הדומיננטיות שלו (כ-84% מכלל הייצור העולמי). כשליש מגידול התירס בארה"ב מופנה לייצור ביו-אתנול כדלק [56]. הביומסה שמפיקים ממנה כיום את הביו-אתנול היא ברובה מיבולים ייעודיים עתירי סוכרים (בעיקר תירס וסוכר), אולם לגידולם בקנה מידה רחב יש השלכות סביבתיות בשל ניצול משאבי הסביבה וכן עקב השפעה על זמינות המזון בעולם ועל מחירו. בעוד שהערכות אופטימיות טוענות שהמרת כל הגידולים בעולם לדלק ביולוגי לצורך ייצור פלסטיק שמקורו מתחדש תוביל לאספקת 25% מצריכת הפלסטיק העולמית, ובטווח של 15 שנים ניתן להגיע לכך שכל מרכיבי הפלסטיק יהיו מתחדשים [33], ההגדלה של מכסת היבולים תכביד על משאבי הסביבה ותיצור תחרות משמעותית אל מול ייצור המזון והדלק הביולוגי.

מקור ביומסה פוטנציאלי אחר לביו-אתנול, סביבתי יותר ושאינו מתחרה עם ייצור המזון והדלק הביולוגי, הוא ביומסה שיוצרת (פסולת) העשירה בליגנולוז, כמו פסולת של גזם או פסולת שיוצרת ביולוגית ספציפית, כמו של מאפיות, יקבים ותעשיות מזון [18]. למרות היתרון הסביבתי הברור, ייצור של ביו-אתנול מביומסה שיוצרת מורכב יותר, וזאת בשל הצורך בטיפולים מקדימים ובטיפול בביומסה שאינה הומוגנית ואינה ייעודית ומיטבית מבחינת הרכבה הכימית. כמו כן, כרגע עדיין הניסיון התעשייתי ברחבי העולם אינו רב. רתימת מהפכת העריכה הגנומית ובייחוד טכנולוגיית העריכה הגנומית המתקדמת קריספר (CRISPR) [27, 6], תוך שילוב ההתקדמות האדירה בתחומי מדע אחרים (כגון ביו-אינפורמטיקה, ביוטכנולוגיה ופיתוח חומרים), צפויים להביא לשיפור התהליכים הביו-טכנולוגיים בייצור הביו-אתנול מפסולת. נוסף על כך, המשך פיתוח התהליכים הכימיים הנלווים, כמו פיתוח זרזים בריאקציות השונות בתהליך (אלומם של אתנול, פירוליזה) וכן פיתוח שיטות ניקוי ומיצוי מתקדמות לפסולת, עשויים להוביל להתקדמות גם בהיבטים האלה. מכל אלה נובע הצורך בהשקעות של מו"פ בעיקר בשלבים השונים של הפקת אתילן מביו-אתנול לייצור פלסטיק שמקורו מתחדש בעלות תחרותית, שיחליף לפחות חלק מ-99% של הפלסטיק הבעייתי כיום שמקורו בפחמימנים מאובנים.



כוס שיוצרה מפלסטיק ביולוגי. חומר הגלם של האתילן המשמש לייצור הפולימרים של הפלסטיק הוא ביומסה של גידולי תירס. הגדלת היקף גידול יבולים לטובת ייצור אתילן להפקת פלסטיק ביולוגי תכביד על משאבי הסביבה ותיצור תחרות משמעותית לייצור המזון והדלק הביולוגי | צילום: Majiscup Paper Cup, Flickr, CC BY-NC-ND 2.0

לכידת ה- CO_2 שנוצר בתהליך השבת האנרגיה מפלסטיק

דרך נוספת לטיפול בפליטת גזי חממה שמקורם בשרפת פסולת היא לכידת ה- CO_2 בארובת מתקן השבת האנרגיה ומניעת פליטתו לאטמוספירה. פתרון זה ישים בעיקר במשרפות להשבת אנרגיה, ורלוונטי פחות לשרפת הדלקים לתחבורה שנוצרו בתהליכי הפירוליזה והגזיפיקציה, ושאינם נשרפים במוקד אחד. יש שתי גישות עיקריות לטיפול בפחמן לאחר לכידתו: א. החדרה וקיבוע של ה- CO_2 בקרקע בתצורות גאולוגיות, אולם גישה זו מוגבלת בשל אתגרים טכנולוגיים וגאולוגיים [57]; ב. ה- CO_2 שנלכד משמש חומר מוצא למספר שימושים, כגון ייצור חומרי דלק וכימיקלים חדשים, בהם גם חומרי גלם לייצור פלסטיק [50]. קידום מסלול זה תלוי גם בפיתוח טכנולוגי של הפקת מימן, שדרוש גם הוא ליצירת הכימיקלים והפחמימנים. החיסרון של השימוש ב- CO_2 להפקת כימיקלים חדשים נובע מהעלות הגבוהה של התהליך, שיכולה להיות גבוהה בעשרות עד מאות אחוזים מעלות ייצור קונבנציונלי מפחמימנים מאובנים. לכן, יש חשיבות גדולה להשקעות במו"פ לצורך שיפור התהליכים הללו (כגון פיתוח זרזים או סופחי פחמן), כדי שיהיו יעילים כלכלית.

טכנולוגיה נוספת שנמצאת בשימוש היא קיבוע CO_2 על-ידי מיקרו-אצות, שממירות אותו לפחמימנים ולחומרי מזון ולתרכובות בעלות ערך כלכלי גבוה. החיסרון בשימוש במיקרו-אצות נובע מדרישות משאבים גדולות של התהליך, בעיקר של מים ונוטריינטים, לדוגמה: להפקת 1 ק"ג של דלק ביולוגי יש צורך ב-3-5 קוב מים מתוקים [31]. חידושים אחרונים בתחום הביולוגיה הסנתטית יכולים להוביל להגדלת השימוש באפיק זה לקיבוע CO_2 על-ידי ייעול התהליך והפיכתו לכלכלי.

נזיפיקציה ליצירת חומרי גלם לפלסטיק

תהליך נוסף שזוכה לתשומת לב גוברת בשנים האחרונות הוא מסלול תרמי ייחודי בתוך תהליך הגזיפיקציה, שמוביל בעיקרו להשבת חומר במקום להשבת אנרגיה, ושהתוצר הסופי שלו הוא אתילן [39, 45]. בתהליך זה בסדרת ריאקציות בלחצים ובטמפרטורות גבוהים מאוד ובבקרה של תנאי החמצן, כמעט כל סוגי הפסולת העירונית מומרים לגז סינתזה (מכונה syngas, בעיקר CO ו- H_2) שמומר בסדרת ריאקציות כימיות לאתילן כחומר המוצא לפולימרים הבסיסיים של הפלסטיק. בסוג

גזיפיקציה ייחודי זה שייעודו ייצור כימיקלים, הפחמן המקורי בפסולת מקובע ככימיקל בסוף התהליך, ולא מומר לאנרגיה ול- CO_2 , ועל כן אינו נפלט לאטמוספירה. עם זאת, נדרשת השקעת אנרגיה גבוהה בשלבים השונים של התהליך התרמי. מידת היישום של התהליך תהיה תלויה בכדאיות הכלכלית הכוללת ביחס לייצור פלסטיק שמקורו בפחמימנים מאובנים, בכדאיות ביחס לחלופה של ייצור ביו-אתנול לפלסטיק ממקור ביולוגי, וכן במציאת פתרונות לתוצרי הלוואי. כיום קיימים בעולם מתקני גזיפיקציה תעשייתיים מועטים שמיועדים ליצירת כימיקלים [48], ולכן יש צורך במו"פ מתקדם לשיפור היעילות בשלבים השונים (המרה יעילה של הפסולת לגז סינתטי, והמרת גז הסינתטי לאתילן כחומר מוצא לפולימרים של פלסטיק).

סיכום

שתי בעיות עיקריות נובעות מפסולת הפלסטיק, וכל אחת מהן חמורה וחשובה בפני עצמה. הבעיה הראשונה מתבטאת בפסולת פלסטיק שמתפזרת לסביבה, מצטברת בה, ומאיימת על המערכות האקולוגיות השונות. דרכי ההתמודדות למניעת החמרת הבעיה כוללות חינוך, אסדרה ואכיפה למניעת הפיזור בסביבה, וכן מו"פ להפיכת סוגי הפלסטיק הבעייתיים למתכלים בתנאי הסביבה. עם זאת, גם אם הפיזור לסביבה יחדל, עדיין כמויות הפלסטיק העצומות שהצטברו במערכות האקולוגיות השונות מהוות בעיה המחייבת חשיבה יצירתית.

במקביל, יש לגבש פתרון קצה לרובה המוחלט של פסולת הפלסטיק שנאצרת ונאספת לטיפול, ומבוססת על פחמימנים מאובנים. מעבר לכך שהטמנה נחשבת נחותה מבחינת ההשלכות הסביבתיות, השטח שהוקצה להטמנה בישראל הולך ואוזל, ועל כן יש צורך קריטי בקידום פתרונות קצה אחרים לפסולת בישראל. בעוד שהשבת אנרגיה מהפסולת היא החלופה המועדפת והמוכחת בעולם להטמנה, שרפת הפלסטיק שמקורו בפחמימנים מאובנים עומדת בסתירה למדיניות הפחתת פליטות גזי החממה העולמית. היות שכך, יש לקדם מאמץ מחקרי ופיתוח טכנולוגי להתמודדות עם האתגר, למשל דרך יצירת פלסטיק מביומסה מתחדשת, לכידת ה- CO_2 בארובות מתקן השרפה והמרתו לחומרים מועילים, וקידום תהליך גזיפיקציה ייעודי להשבת חומר ולא אנרגיה, כך שפסולת הפלסטיק תומר לחומרי גלם שישמשו ליצירת פלסטיק.

אנו סבורים שיש צורך להאיר את מכלול הבעיות של השימוש בפלסטיק כדי לנוע במקביל להתמודדות עם האתגרים המגוונים של הפלסטיק. הפניית תקציבי מו"פ ממשלתיים משמעותיים וממוקדים לעבר כלל אתגרי הפלסטיק עשויה למצב את ישראל כמובילה במאמץ העולמי לפתרון הבעיות הסביבתיות הללו, ואף למנף את הפוטנציאל הכלכלי המשמעותי לשוק העתידי האדיר הצפוי לטכנולוגיות שיענו על האתגרים העולמיים הקשורים אליו.

הלכה למעשה

אלעד עמיחי, סמנכ"ל בכיר לשלטון מקומי, המשרד להגנת הסביבה:

כפי שכתוב במאמר, הרוב המכריע של פליטות גזי חממה מפלסטיק נוצר בעקבות הפקת תזקיני הנפט והשימוש בהם בתהליכי ייצור הפלסטיק. המחברים מציגים מספר פתרונות אפשריים להקטנת מדריך הפחמן של הפלסטיק עד יציאתו מהמפעל (cradle to gate).

המשרד להגנת הסביבה מציע לעסוק בהפחתת הצורך בפלסטיק, וכמו המחברים מציע להתמקד בשינוי המבנה הכימי של הפלסטיק כך שיהיה בעל מדריך פחמן נמוך יותר. כמו כן, כדי שניתן יהיה לעשות בפסולת הפלסטיק שימוש חוזר, מציע המשרד להקים מתקנים למחזור פלסטיק, כך שפחות פסולת פלסטיק תועבר להטמנה. המשרד מציע להקים מספר מצומצם של מתקנים להשבת אנרגיה מפלסטיק, ורק בסוף השרשרת.

על המשרד ועל הממשלה כולה לפעול לפי סדר עדיפות זה. יישום המדיניות באופן המתואר לעיל יביא להפחתה של פליטות גזי חממה באופן משמעותי יותר מאשר התמקדות בהקמת מתקנים להשבת אנרגיה במטרה לטפל בכמות גדולה של פסולת פלסטיק, כמתואר במאמר.

מקורות

1. אשכנזי ש. 2021. "בדרך למשבר לאומי": המקום לפסולת שלנו הולך ואוזל. *גלובס*.
2. המשרד להגנת הסביבה. 2020. [אסטרטגיה למשק פסולת בר-קיימא 2030-2021](#).
3. המשרד להגנת הסביבה. 2020. [הפחתה, שימוש חוזר, מחזור, השבת אנרגיה, הטמנה: מדרג \(היררכיית\) הטיפול בפסולת](#).
4. המשרד להגנת הסביבה. 2018. [האסטרטגיה החדשה לטיפול בפסולת עירונית \(מצגת\)](#).
5. המשרד להגנת הסביבה. 2021. [הפחתת פליטות גזי חממה בישראל: דוח שנתי](#).
6. חיימוביץ' ג. 2018. [מלחמות הקריספר](#). מכון דוידסון.
7. חירייה פארק המחזור. [מפעל RDF – פסולת לאנרגיה \(פל"א\)](#). איגוד ערים דן לתברואה.
8. מבקר המדינה. 2016. [פרויקט הפרדה במקור של פסולת ביתית ברשויות המקומיות](#). דו"ח מבקר המדינה.
9. מוסד שמואל נאמן. 2014. ביומסה לאנרגיה בישראל, סיכום והמלצות דיון פורום האנרגיה מס' 31.
10. ממשלת ישראל. 2021. [החלטת ממשלה מס' 171. מעבר לכלכלה דלת פחמן](#).
11. סגל י. 2020. תכנית הניטור הלאומית לשנת 2019 – ניטור פסולת ימית. דו"ח חיא"ל H22/2020.
12. ענבר י. 2021. [לשרוף או לא לשרוף? רב-שיח בנושא פתרון הקצה הראוי לפסולת – המשך הטמנה או הקמת מתקני שרפת פסולת להפקת אנרגיה. אקולוגיה וסביבה 11\(4\): 78–85](#).
13. קלברמן ע, ארנטוף ס ואלבוחר נ. 2020. המדריך לאריזה מקיימת. מכון האריזה, התאחדות התעשיינים בישראל.
14. Beyene HD, Werkneh AA, and Ambaye TG. 2018. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: A review. *Renewable Energy Focus* **24**: 1–11.
15. Blasenbauer D, Huber F, Lederer J, et al. 2020. Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe. *Waste Management* **102**: 868–883.
16. Borrelle SB, Ringma, Law KL, et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science* **369**(6510): 1515–1518.
17. Brahney J, Brahney M, Heim E, et al. 2020. Plastic rain in protected areas of The United States. *Science* **368**(6496): 1257–1260.
18. Brodin M, Vallejos M, Tanase M, et al. 2017. Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics – A review. *Journal of Cleaner Production* **162**: 646–664.
19. Chen G, Jamro IA, Samo SR, et al. 2020. Hydrogen-rich syngas production from municipal solid waste gasification through the application of central composite design: An optimization study. *International Journal of Hydrogen Energy* **45**(58): 33260–33273.
20. Cox KD, Covernton GA, Davies HK, et al. 2019. Human consumptions of microplastics. *Environmental Science and Technology* **53**(12): 7068–7074.

21. Dastjerdi B, Strezov V, Kumar R, and Behnia M. 2019. An evolution of the potential of waste to energy technologies for residual solid waste in New South Wales, Australia. *Renewable and Sustainable Energy Review* **115**: 109398.
22. EPA (United States Environmental Protection Agency). [Basic Information about Landfill Gas](#). Viewed 9 January 2022.
23. European bioplastics. [Bioplastics market data](#). Viewed 9 January 2022.
24. Fan D, Dai DJ, and Wu HS. 2013. Ethylene formation by catalytic dehydration of ethanol with industrial considerations. *Materials* **6**: 101–115.
25. Gallegos J. 2018. [10 ways CRISPR will revolutionize environmental science](#). Alliance of Science, Cornell University. Viewed 4 April 2022.
26. Galloway TS and Lewis CN. 2016. Marine microplastics affect future generations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **113**(9): 2331–2333.
27. Geyer R, Jambeck JR, and Law KL. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advanced* **3**(7): 1–5.
28. He P, Chen L, Shao L, et al. 2019. Municipal solid waste (MSW) landfill: A source of microplastics? Evidence of microplastics in landfill leachate. *Water Research* **159**: 38–45.
29. Hepburn C, Adlen E, Beddington J, et al. 2019. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature* **575**: 87–97.
30. Hodgkinson I, Maletz R, Franz-Georg S, and Dornack C. 2021. Mini-review of waste-to-energy related air pollution and their limit value regulations in an international comparison. *Waste Management and Research* **40**(7): 849–858.
31. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2013. Production of bio-ethylene technology brief. IEA-ETSAP and IRENA[®] Technology Brief I13.
32. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Chapter 10: Waste management.
33. Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, et al. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* **347**(6223): 768–771.
34. Jeswani HK and Azapagic A. 2016. Assessing the environmental sustainability of energy recovery from municipal solid waste in the UK. *Waste Management* **50**: 346–363.
35. Kalargaris I, Tian G, and Gu S. 2017. Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology* **157**: 108–115.
36. Koelmans AA, Nor NHM, Hermesen E, et al. 2019. Microplastics in fresh waters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research* **155**: 410–422.

37. Kuo YT, Almansa GA, and Vreugdenhil BJ. 2018. Catalytic aromatization of ethylene in syngas from biomass to enhance economic sustainability of gas production. *Applied Energy* **215**: 21–30.
38. Lam CH, Ip AW, Barford JP, and McKay G. 2010. Use of incineration MSW ash: A review. *Sustainability* **2**(7): 1943–1968.
39. Lebreton L and Andrady A. 2019. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications* **5**: 6.
40. Leckner B. 2015. Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units. *Waste Management* **37**: 13–25.
41. Macleod M, Arp HH, Tekman MB, and Jahnke A. 2021. The global threat from plastic pollution. *Science* **373**(6550): 61–65.
42. Mendieta CM, Cardozo RE, Felissia FE, et al. 2021. Bioconversion of wood waste to bio-ethylene: A review. *Bioresources* **16**(2): 4411–4437.
43. Nuss P, Gardner KH, and Bringezu S. 2013. Environmental implications and costs of municipal solid waste-derived ethylene. *Journal of Industrial Ecology* **17**(6): 912–925.
44. OECD. 2018. Improving plastics management: Trends, policy responses, and the role of international co-operation and trade. OECD environment policy paper No. 12.
45. OECD. 2021. [Waste: Municipal waste](#). *OECD Environment Statistics* (database).
46. Reisch MS. 2019. [The race is on to repurpose garbage](#). *Chemical Engineering News* **97**(42).
47. Saghir M, Rehan M, and Nizami AS. 2018. Recent trends in gasification based waste-to-energy. In: Yun Y (Ed). *Gasification for low-grade feedstock*. London: IntechOpen.
48. Saravanan P, Senthyl Kumar P, Vo Dai-Viet N, et al. 2021. A comprehensive review on different approaches for CO₂ utilization and conversion pathways. *Chemical Engineering Science* **236**(8): Article 116515.
49. Schmidt C, Krauth T, and Wagner S. 2017. Export of plastic debris by rivers into the sea. *Environmental Science and Technology* **51**(21): 12246–12253.
50. Siracusa V and Blanco I. 2020. Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers* **12**(8): 1641–1658.
51. The European Commission. 2020. Circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe.
52. UNEP (UN Environmental Program). 2020. CCET guideline series on intermediate municipal solid waste treatment technologies: Waste-to-Energy Incineration.
53. U.S. Department of Energy. 2019. [Waste-to-Energy from municipal solid wastes](#).
54. U.S. Department of Energy. [Alternative fuels data center](#). Viewed 4 April 2022.

55. Verbeek G. 2018. [The challenges of carbon capture and sequestration](#). *Journal of Petroleum Technology*.
56. World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation, and McKinsey & Company. 2016. [The new plastics economy – Rethinking the future of plastics](#).
57. World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation, and McKinsey & Company. 2017. [The new plastics economy – Rethinking the future of plastics & catalyzing action](#).
58. Zheng J and Suh S. 2019. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Changes* **9**: 374–378.