



ביו-פלאסטיק

תועלות ובעיות סביבתיות בראי ניתוח מחזור החיים

גלעד אוסטרובסקי

יואב גוטרמן

המחלקה המדעית, אדם טבע ודין

ספטמבר 2011

אלול תשע"א

תכן העניינים

3	פורום הפלסטיקה
4	1. מבוא
5	1.2 מונחים
6	2. פלסטיק מתכלה וביו-פלסטיק
6	2.1 מקורות וחומרי גלם
7	2.2 שימושים
9	3. השפעות סביבתיות - ניתוח מחזור חיים
9	3.1 ניתוח מחזור חיים (נמ"ח)
10	3.2 נמ"ח פלסטיק
11	3.3 מגבלות המידע והשוואה בין מחקרים
12	3.4 ממצאים
12	3.4.1 הפקה ויצור- מעריסה לשער היציאה מהמפעל
15	3.4.2 סוף חיים או חיים חדשים
17	3.4.3 שימושי קרקע
18	4. השפעות אפשריות על ענף מיחזור הפלסטיק הקיים
19	5. סיכום והמלצות

פורום הפלסטיקה

מסמך זה נולד מתוך דיוני פורום הפלסטיקה שהתכנס בשנתיים האחרונות בעמותת אדם טבע ודין. הפורום כולל אנשים העוסקים בענף הפלסטיקה מצד היצור, תעשיית הביו-פולימרים, מחקר אקדמי, עיצוב תעשייתי ותעשיית מיחזור הפלסטיק.

כתיבת המסמך נערכה ע"י אדם טבע ודין, אך ברצוננו להדגיש שהדיונים הפוריים שהתקיימו בפורום הפלסטיקה והערות המשתתפים תרמו רבות לכתיבת המסמך והעשירוהו במידע ותובנות חשובות. תודה לכל המשתתפים.

המשתתפים בפורום הפלסטיקה:

חיים אלקלעי / ריפאל

אילן דיבון / מנהל תחום פלסטיק גומי ואריזה, משרד התמי"ת

פרופ' שמואל קניג / דיקן הפקולטה להנדסה, מכללת שנקר

רענן עוז / אמניר מחזור

יריב ספקטור / מודיפלסט

יאיר אנגיל / קיימא

יהונתן ענתבי / כפרית תעשיות

ירון מזרחי / אביב פלסטיק

סטיב ארנטוף / פלסטופיל

סמדר נוביק / ג'וליבר

עוזי קלברמן / ריפאל

עופר בן ישי / ג'וליבר

רונית שחר / שטראוס

רמון בן דוד / כתר פלסטיק

רמי ענבר / ג'וליבר

שירה רוזן / שטראוס

טל קמיל / 4C עיצוב סביבתי

גלעד אוסטרובסקי / אדם טבע ודין

אסף רוזנבלום / אדם טבע ודין

יואב גוטרמן / אדם טבע ודין

רועי קוצר / אדם טבע ודין

1. מבוא

הפלסטיק הוא חומר חזק, עמיד, קל ונוח לעיצוב וצביעה. יתרונות אלה הביאו לשימוש הולך וגובר בפלסטיק בענפים רבים ומגוונים. עם זאת, לפלסטיק שני חסרונות משמעותיים:

א. הפלסטיק הנפוץ עשוי תוצרי נפט - הפקתו דורשת ניצול משאבים אזילים והליך יצור מזהם.

ב. חוזקו ועמידותו הופכים למגרעת בגמר השימוש - מוצרי הפלסטיק אינם מתכלים ומגבירים את העומס הסביבתי.

חסרונות אלה העלו את הצורך בפיתוח חומר פלסטי בעל תכונות דומות אך כזה שיוכל להתפרק בדומה לחומרים אורגניים קלי פירוק. צורך נוסף הוא יצור פלסטיק העשוי ממסיב טבעי. הביו פלסטיק אם כן נועד לתת מענה לשני אלה: יצירת חומר מתכלה וצמצום השימוש בחומרים אזילים. שימוש בפלסטיק פריק ביולוגית העשוי מקורות מתחדשים (ביו פלסטיק) עדיין מוגבל. בעקבות הפיתוח המתמיד בענף זה, תכונותיהם ויתרונם היחסי של חומרים אלה נמצאים בתהליך שינוי והיתרונות הסביבתיים המתקבלים מהליך יצור זה עדיין לא ברורים באופן מספק.

במקביל לכך גובר העניין הציבורי והעסקי ביצור ביו-פלסטיק ושאלות רבות מתעוררות באשר לתועלת שתצמח מהשימוש בו:

- האם תהליך היצור אכן מקטין את פליטת המזהמים?
- האם ההתכלות אכן בעלת יתרון סביבתי?
- כיצד יבואו לידי ביטוי יתרונותינו של הביו-פלסטיק בעולם בו השימוש בפלסטיק רגיל הולך וגובר?

זה ננסה לתת תשובות לשאלות הללו בהתבסס על מחקרים, במיוחד כאלה שבחנו את כלל מחזור החיים של הביו-פלסטיק בהשוואה לפלסטיק הרגיל. אולם מטרתנו העיקרית היא לנסח מבעד לסבך הנתונים תובנות כלליות באשר לשימוש בביו-פלסטיק.

1.2 מונחים

פולימר: (פולי=הרבה, מר=יחידה) מולקולה העשויה שרשרת של יחידות (מונומר) הקשורות במתכונת חוזרת. ישנם פולימרים העשויים ממונומר מסוג אחד, וישנם כאלה העשויים מכמה מונומרים הקשורים במתכונת מחזורית. כל חומרי הפלסטיק עשויים פולימרים, אך לא כל פולימר הוא חומר פלסטי.

מונומר: (מונו=אחד, מר=יחידה) יחידות החוזרות על עצמן ויוצרות פולימר.

ביומסה: (ביו=ביולוגי, מסה=כמות החומר בגוף). למשל: צמחייה, יצורים חיים, עצה, פרש.

ביו-פולימרים: הם פולימרים הנגזרים מביומסה. הם יכולים להיות פולימרים טבעיים (למשל תאית), או פולימרים סינתטיים העשויים ממונומרים העשויים מביו-מסה (למשל חומצה פולי-לקטית), או פולימרים סינתטיים העשויים ממונומרים הנגזרים מביו-מסה (למשל פוליתן הנגזר מביו-אתנול). חומרים פלסטיים העוברים תהליכי פירוק אינם בהכרח עשויים מביופולימרים.

חומרים ממקור מתחדש: חומרים העשויים חומר גלם ממקורות מתחדשים.

חומרים מתכלים ביולוגית: פרוק ביולוגי הוא תהליך בו הפולימר מתפרק לחומרים פשוטים יותר. הביטוי "מתכלה ביולוגית" אינו מגדיר משך זמן או תהליך. חומרים המתכלים ביולוגית אינם בהכרח ממקור מתחדש. התקן הישראלי לפלסטיק מתכלה (ת"י 6081) המבוסס על התקן האירופאי (EN13432) דורש פירוק בתוך שישה חודשים בקומפוסטציה.

קומפוסטציה (הדשנה): תהליך ביולוגי אשר במהלכו עוברת הפסולת פירוק באמצעות מיקרואורגניזמים וחמצן, לפחמן דו חמצני, מים וחומר אורגני יציב (הקומפוסט). בחומר זה ניתן לעשות שימוש כמטייב קרקע וכמדשן.

קומפוסט: (דשונת) תוצר העשוי חומר צמחי (פסולת, בוצה, וזבל בעלי חיים) שהתפרק. הוא משמש כמטייב קרקע ודשן אורגני.

2. פלסטיק מתכלה וביו-פלסטיק

הפלסטיק המתכלה הופך להיות מושג שגור בפי רבים ונתפס פעמים רבות כפתרון הולם לבעיית אי ההתכלות, שכן ביכולתו להתפרק ולהתכלות בפרק זמן קצר יחסית. עם זאת, יש לזכור שפירוקו בפרק זמן קצר (בתנאים אופטימאליים) אינו מעיד בהכרח על מקורו, הליך הפקתו והשפעותיו הסביבתיות.

2.1. מקורות וחומרי גלם

כאמור, ה"פלסטיק המתכלה", הוא שם כולל למגוון מוצרי פלסטיק אשר יכולים להתכלות בפרק זמן קצר. עם זאת, חשוב להבין כי לא כל מוצרי הפלסטיק המתכלה דומים בתכונותיהם, באיכותם, בחומרי הגלם מהם הופקו, בהליך יצורם ובתנאים הדרושים לפירוקם.

ככלל, ניתן לחלק את מוצרי הפלסטיק המתכלה לשלוש קבוצות:

פלסטיק מתכלה ביולוגית ממקור מתחדש: פלסטיק המיוצר ממקורות מתחדשים (ביו-פולימרים) המתפרקים ביולוגית בתנאים הדומים לאלה הדרושים לפירוק שאריות מזון או פסולת צמחית (לדוגמה: TPS, PLA, PHP, PHB).

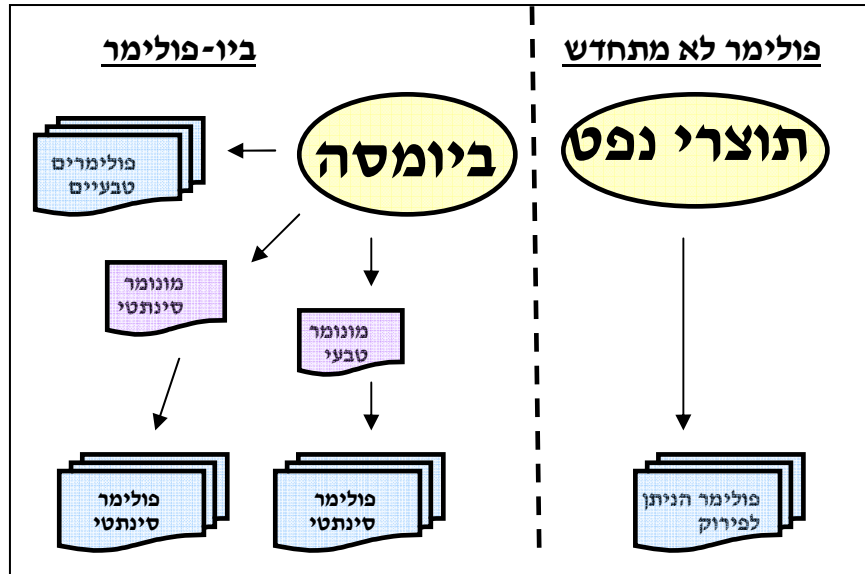
פלסטיק מתכלה ביולוגית ממקור אזיל: פלסטיק עשוי תוצרי נפט אזילים המסוגל להתפרק בהליך ביולוגי בתנאים הדומים לאלה הדרושים לפירוק שאריות מזון או פסולת צמחית (לדוגמה: PCL, EcoFlex, PBC).

פלסטיק מתכלה ממקור אזיל: פלסטיק עשוי תוצרי נפט אזילים (פוליאאתילן) המכילים תוספים לזירוז הליך פירוק. הפירוק דורש חשיפה לחום, קרני UV או מאמץ מכני (Oxy-degradable / UV-degradable). מוצרי פלסטיק אלה אינם עומדים בדרישות התקן האירופי לפלסטיק מתכלה.

יש לציין כי לעיתים מייצרים פלסטיק מתכלה מתערובות של חומרי גלם מתכלים ממקור אזיל וממקור מתחדש.

במסמך זה נתמקד במוצרי פלסטיק מתכלה ביולוגית ממקור מתחדש ונכנה אותם "ביו-פלסטיק".

נשווה בין מוצרי הביו-פלסטיק לבין מוצרי פלסטיק שאינם מתכלים ביולוגית ומיוצרים מחומרי גלם אזילים.



כפי שנראה בתרשים מס' 1, גם מתוצרי הנפט ניתן לייצר פולימרים הניתנים לפירוק ביולוגי. מהביו-מסה מאידך, ניתן להפיק ביו-פולימר בשלוש דרכים:

- ביו-מסה ממנה מיוצר פולימר טבעי.
- ביו-מסה, ממנה מיוצר מונומר טבעי וממנו פולימר סינתטי.
- ביו-מסה ממנה מיוצר מונומר סינתטי וממנו פולימר סינתטי.

2.2. שימושים

להלן מספר דוגמאות למוצרים הניתנים ליצור מביו-פלסטיק וליתרונות שבשימוש בחומר זה².

יריעות לחקלאות: במגוון ענפי חקלאות נעשה שימוש ביריעות המוצמדות לקרקע. יריעות אלה מונעות אידוי מים ונביטה של עשבים. בשימוש בביו-פלסטיק ניתן להפיק תועלת בכך שנחסך הצורך באיסוף היריעות והפנייתן למטמנות לאחר השימוש. בנוסף מסייעות היריעות בדישון וטיוב הקרקע החקלאית עם פירוקן.

¹ WRAP information sheet, (August 2008), Biopolymer Packing in the UK Grocery Market. http://www.wrap.org.uk/retail_supply_chain/research_tools/research/info_sheet.html

² Nolan-ITU, (October 2002), Biodegradable Plastics Development and Environmental Impacts. Environment Australia.

שקיות לאשפה: השימוש בשקיות עשויות ביו-פלסטיק לאצירת פסולת אורגנית ביתית יכול לסייע רבות בהליך הטיפול בזרם הפסולת האורגנית. שקיות הניילון הרגילות מהוות גורם מפריע המקשה על הליך הקומפוסטציה שכן יש צורך בפתיחת השקיות והוצאתן. שקיות ביו-פלסטיק מאפשרות לטפל בפסולת האורגנית ללא צורך בהפרדת השקית ולחסוך מיון ושאריו מזהמים.

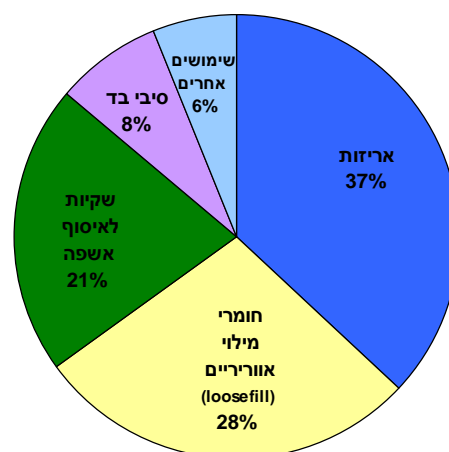
מוצרי אריזה: ניתן לארוז מוצרי מזון טריים באריזות עשויות ביו-פלסטיק. למוצרים אלה חיי מדף קצרים. במידה ופג תוקפם, ניתן להשליכם לזרם הפסולת האורגנית ללא כל מיון או הפרדה. כך נמנע את זיהום הזרם האורגני בשיירי אריזה ואת זיהום הזרם היבש בשיירי מזון.

חומר מילוי לאריזות: שימוש בחומרי מילוי אווריריים (loose-fill packing) המגנים על מוצרים עדינים בתוך אריזתם. ייצורם מביו-פולימרים יכול להביא לחיסכון ניכר בשימוש בחומרי גלם אזילים.

חומר כיסוי למטמנות: כיסוי פני הפסולת במטמנה נועדה למנוע הפצת מחלות, נבירה של בע"ח, מפגעי ריח ופיזור פסולת ברוח. חומר הכיסוי הנפוץ הוא עפר, אולם פעולה זו בזבזנית ביותר הן בשימוש בחומר והן בנפח הטמנה. הביו-פלסטיק מתאים גם למטרה זו, שכן יריעת ניילון תופסת נפח קטן ביותר, ומתפרקת לאחר שזו מכוסה.

נייר מצופה: מוצרי נייר רבים מצופים בשכבת פלסטיק דקיקה המקנה להם הגנה וגמישות. כך למשל, עטיפות הנייר למוצרי המזון במעדנייה, עטיפות מזון מהיר ומשלוחים, כוסות חד פעמיות ועוד. כולן מכילות שכבת פוליאטילן בצפיפות נמוכה. החומר הרב שכבתי הוא קשה מיחזור והשימוש בביו-פלסטיק יכול להוות יתרון.

תרשים מס' 2: התפלגות השימושים בביו-פלסטיק באירופה³



³ European Commission, (June 2011), Plastic waste: redesign and biodegradability. Since for Environment Policy, issue number 1.

3. השפעות סביבתיות - ניתוח מחזור חיים

בבואנו להעריך מהן ההשלכות הסביבתיות הכרוכות בשימוש בסוגי הפלסטיק המתכלה השונים, לא די בבחינת קצב פירוקם. יש לתת את הדעת למספר שלבים נוספים, אשר להם השפעה מכרעת על היקף ההשלכות ואופיין:

- א. **הפקת חומרי הגלם:** מהם חומרי הגלם מהם מייצרים את הביו-פלסטיק, מהן ההשלכות הסביבתיות הנגזרות מהליך הפקת החומרים?
- ב. **הליך הייצור:** כמה אנרגיה יש להשקיע בתהליך, מהו היקף הפליטות לסביבה (אוויר, שפכים) והרכבן?
- ג. **סוף-חיים:** כיצד מתפרק החומר, מהו קצב הפירוק, מהם תנאי הפירוק הדרושים, מהי איכות החומר המתקבל, אילו חומרים נפלטים לסביבה כתוצאה מהפירוק?

3.1. ניתוח מחזור חיים (נמ"ח)

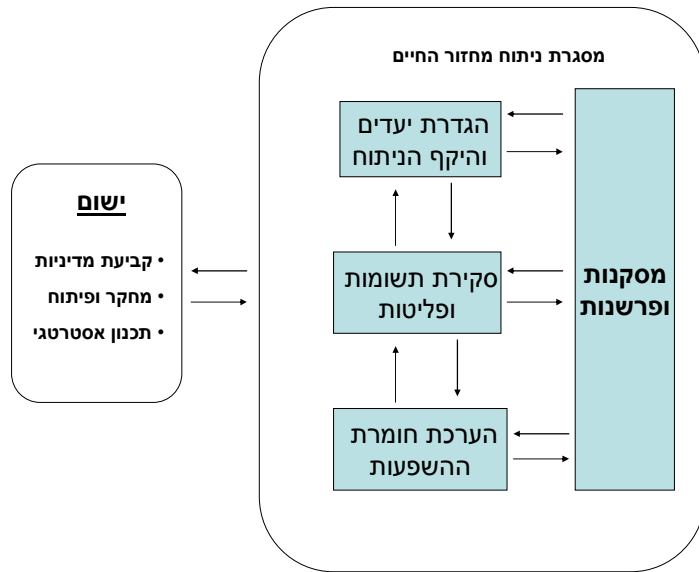
בכדי ללמוד על ההשפעות הסביבתיות המיוחסות למוצרי הפלסטיק השונים, עלינו לבחון את כל השלבים, הפעולות הנדרשות והשלכותיהן - מכריית חומרי הגלם ועד "סוף חיינו" של החומר, כלומר, **יש לנתח את מחזור החיים המלא של מוצרי הפלסטיק.**

ניתוח מחזור חיים (נמ"ח) הוא הליך בחינה בו נבדקות ומשוקללות כלל ההשפעות הסביבתיות האפשריות אותן ניתן לייחס למוצר לאורך כל מחזור חייו.

ניתוח מחזור החיים מורכב מארבעה שלבי עבודה מרכזיים⁴:

1. **הגדרת היעדים והיקף הניתוח:** יחידת הניתוח המהווה בסיס להשוואה, גבולות הניתוח, הליכים, הנחות ומגבלות.
2. **מצאי תשומות ופליטות-** שקלול היקף ואופי התשומות המוזנות למערכת והפליטות ממנה אשר להן עלולות להיות השלכה סביבתית.
3. **הערכת ההשפעות -** הערכת ההשפעות הסביבתיות.
4. **מסקנות ופרשנות-** שעל בסיסן ניתן לבסס המלצות.

⁴ Patel Martin, (2003), Life-cycle Assessment of Bio-based Polymers and Natural Fiber Composites. Utrecht University.



התשומות והפליטות אותן נהוג לכמת במחקר נמ"ח הן:

כריית מינרלים המשמשים כחומרי גלם בתהליך הייצור, השטח הדרוש לגידולים חקלאיים המשמשים כחומרי גלם, צריכת מים בהליך הייצור והשקיית גידולים חקלאיים, היקף השימוש בחומרי הדברה ודשנים, דלקים ומחצבים אזילים הנצרכים להפקת אנרגיה, חומרי הגלם, פליטת גזי חממה לאורך כל חיי המוצר - לרבות התפרקותו הסופית, פליטת שפכים הנוצרים בהליך ייצור המוצר, פסולת מוצקה הנוצרת בהליך ייצור המוצר (באריזותיו ובמוצר עצמו).

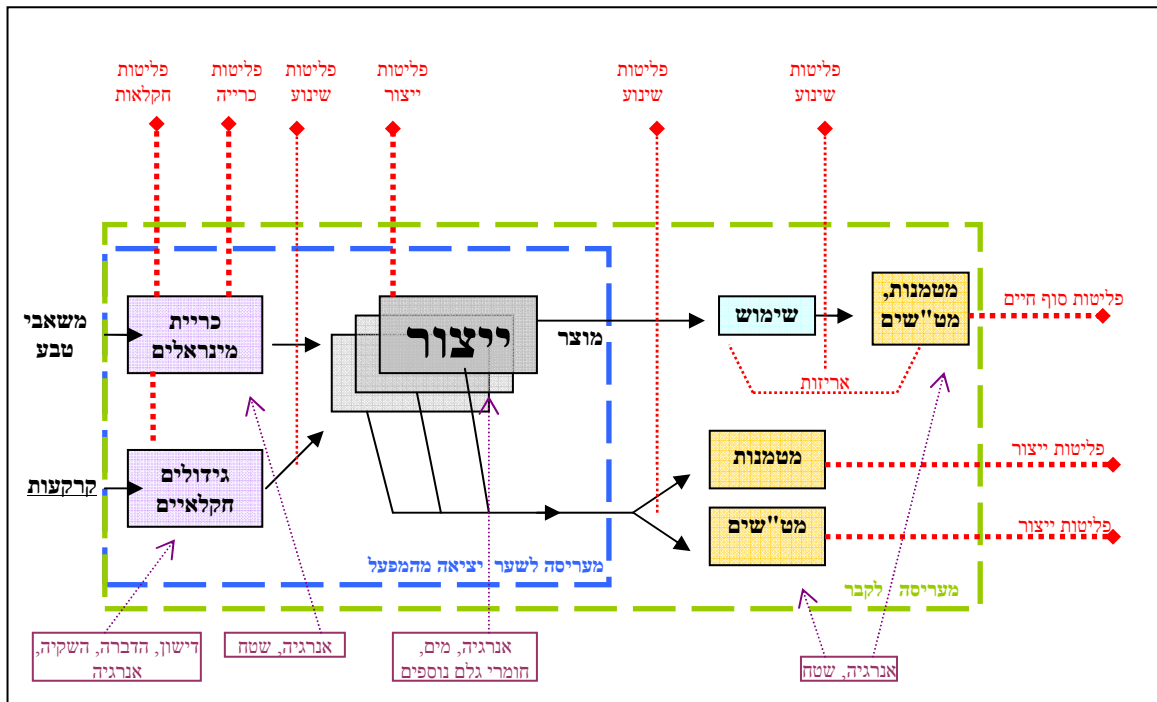
ההשפעות הסביבתיות הן:

זיהום אוויר והתגברות אפקט החממה, זיהום קרקעות ומקורות מים על ידי שפכים ופסולת, איאטרופיקציה של גופי מים, חמצון פוטוכימי ופליטת תרכובות אורגניות נדיפות לאוויר, שימוש בקרקע ופגיעה בנוף.

3.2. נמ"ח פלסטיק

התרשים הבא מתאר את השלבים השונים הנבחנו לאורך כל חיי המוצר. ניתן לראות כי כל אחד מהשלבים גורם לפליטות העלולות לפגוע בסביבה.

⁵ E.T.H. Vink et al. (2003), Applications of life cycle assessment to Nature Works™ polylactide (PLA) production. Polymer Degradation and Stability 80(2003)403–419.



בסופו של התהליך מתקבלות תוצאות כמותיות בכל קטגוריה של השפעה סביבתית, אולם, שלב הנרמול, דהיינו כינוס כל ההשפעות הסביבתיות ליחידות זהות ליצירת מכנה משותף, איננו בגדר ההכרח ופעמים רבות איננו נכלל בניתוח.

3.3. מגבלות המידע והשוואה בין מחקרים

שתי בעיות מרכזיות עומדות לפנינו כשאנו מבקשים להסיק מסקנות ממחקרי נמ"ח.

ניתוחים נקודתיים: מחקרים אלה מתמקדים לרוב במוצר מסויים ובוחנים את השפעותיו ביחס למוצר החליפי העשוי פלסטיק תוצר-נפט. לאופיו היחודי של המוצר יש השפעה של ממש על תוצאות ההשוואה. יתכן שמוצר ביו-פלסטיק אחד ימצא עדיף בעוד שהמוצר השני ימצא נחות.

היקף הניתוח: גם היקף ניתוח מחזור החיים משתנה ממחקר למחקר. יתכן ומחקרים הבוחנים את אותם המוצרים יעשו זאת בדרכים שונות תוך בחינת מקטע אחר במחזור החיים של המוצר.

ובנוסף, ענף הביו-פלסטיקה נמצא בתהליך של פיתוחים טכנולוגיים המשפרים את הפרופיל הסביבתי שלו, כך שניתוחים שעשו בעבר יצטרכו לעבור עדכונים עם ההתקדמות הטכנולוגית.

⁶ Patel Martin, (February 2002), Review of Life Cycle Assessments for Bio-plastics. utrecht university, Netherlands.

חשוב לציין: חלק ניכר מהמחקרים מוזמנים על ידי בעלי עניין המבקשים לבחון את כדאיות השימוש במוצר זה או אחר. כאן נציג בעיקר עבודות הסוקרות מספר מחקרי נמ"ח ומשוות ביניהם.

3.4. ממצאים

כאמור, משתנים רבים יכולים להשפיע על המאזן הכולל, על תוצאות הניתוחים ועל המסקנות הנגזרות מהן. אחד הדברים המשפיעים הוא סוג הטיפול בגמר השימוש, הטמנה, שריפה או טיפול ביולוגי. מסיבה זו חשוב להבין את תוצאות הנמ"ח בשלבים השונים (הפקה, יצור, טיפול) ולא רק את התוצאה הכוללת.

3.4.1. הפקה ויצור - מעריסה לשער היציאה מהמפעל

רבים ממחקרי ניתוח מחזור החיים מתמקדים בשלבי הייצור של הביו-פלסטיק. ניתוחים אלה מביאים בחשבון את התהליכים והשלכותיהם מרגע הפקת חומרי הגלם מהקרקע (מעריסה) ועד לשער היציאה מהמפעל כחומר גלם מוכן ליצור. ההתמקדות בשלב זה בלבד מאפשרת ללמוד מהן ההשלכות הסביבתיות של יצור הביו-פלסטיק ולהשוותן לאלה הכרוכות ביצור פלסטיק ממקור אזיל.

גורמים רבים ישפיעו על טביעת הרגל האקולוגית של הליכי הייצור. יש לתת את הדעת לסוג הגידולים, צרכי השקיה/דישון/הדברה, צריכת שטח, אנרגיה הנדרשת בהליך ההפקה והיצור, מקור האנרגיה הנצרכת, חומרי גלם נלווים הדרושים בהליך הייצור, היקף הפליטות ואופיין.

אנרגיה וגזי חממה

מחקר מקיף סקר עשרים ניתוחי מחזור חיים של ביו-פולימרים מסוגים שונים והשווה ביניהם ובין פולימרים המופקים ממקורות אזילים. טבלה מס' 1 מציגה שלוש תוצאות נמ"ח (מעריסה לשער המפעל) אשר ביניהם נערכה ההשוואה. הערכים שבטבלה מייצגים את החיסכון באנרגיה ובפליטות גזי חממה ביחס לייצור מוצרים מקבילים מפולימרים תוצרי נפט (LDPE, ו-LLDPE). מהשוואה זו ניתן ללמוד כי הביו-פולימר על בסיס העמילן (TPS) מביא לחיסכון הגדול ביותר בפליטות הנמדדות.

טבלה מס' 1: חיסכון בצריכת אנרגיה ופליטות גזי חממה ביחס להליך יצור LDPE ו-LLDPE⁷

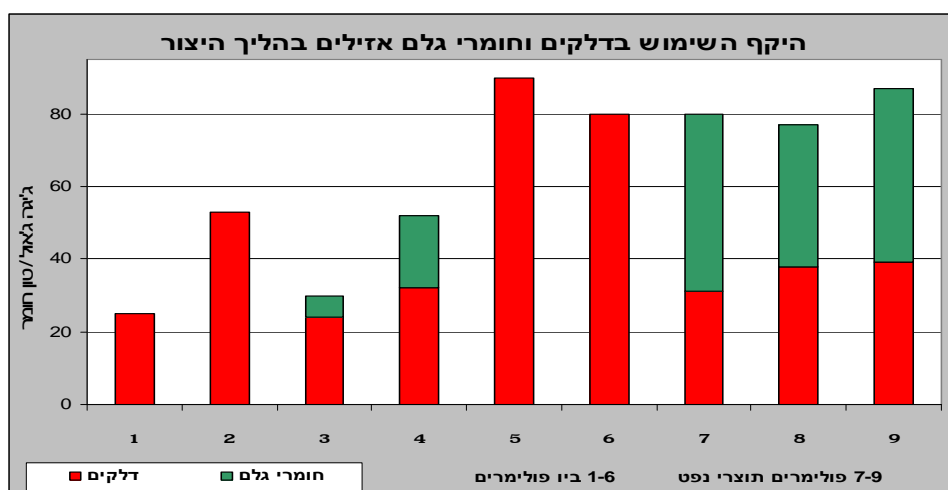
חיסכון בפליטת גזי חממה (ק"ג Co2 / ק"ג ביופולימר)	חיסכון באנרגיה (מגה-ג'אול/ק"ג ביופולימר)	ביו-פולימר
3.7	51	Thermoplastic starch (TPS)
1.2	24	40% TPS+60% polycaprolactone
1.0	19	Polylactic acid (PLA)

⁷ Patel Martin, (2003), *Life-cycle Assessment of Bio-based Polymers and Natural Fiber Composites*. Utrecht University, Netherlands, pg 33.

מחקר נוסף, אשר הציג תוצאות ניתוחי מחזור חיים של מספר מחקרים שונים, השווה בין צריכת המחצבים האזילים הנדרשים לייצור פולימרים על בסיס נפט- לעומת אלה הדרושים לייצור פולימרים ממקור מתחדש.

בתרשים מס' 4, העמודות הצבועות באדום מייצגות את היקף השימוש בדלקים ממקור אזיל איתם מייצרים אנרגיה בהליך היצור. העמודות הצבועות בירוק מייצגות חומרים אזילים המשמשים כחומרי גלם לייצור השרשרת הפולימרית. ניתן לראות, כי גם מחקר זה מצביע על עדיפות ברורה לביו-הפולימרים העשויים עמילן (עמודות 1-4). מחקר זה מצא גם את הביו-פולימרים הלא "טהורים" (המכילים מעט חומרי גלם ממקור אזיל), כחסכוניים ביחס לאלה העשויים מחומרי גלם אזילים בלבד (עמודות 3-4).

תרשים מס' 4: היקף השימוש בדלקים וחומרי גלם אזילים בהליכי ייצור פלסטיק מסוגים שונים⁸



1: Thermoplastic starch, 2: polylactic acid (starch based), 3: Plastic starch+15% Polyvinyl alcohol, 4: Plastic starch+50% polyester, 5: polyhydroxyalkanoate (corn), 6: polyhydroxyalkanoate (bacterial fermentation), 7: high density polyethylene, 8: low density polyethylene (bottle grade), 9: Polystyrene

להיקף צריכת החומרים האזילים לייצור פלסטיק חשיבות של ממש. חוקרים מעריכים כי 8% מכלל הנפט והגז הנצרכים בעולם מוקצים לייצור מוצרי הפלסטיק השונים. בין 3-4% נדרשים להפקת אנרגיה בהליך היצור, ו- 4% נוספים משמשים כחומרי גלם.⁹

צריכת מים

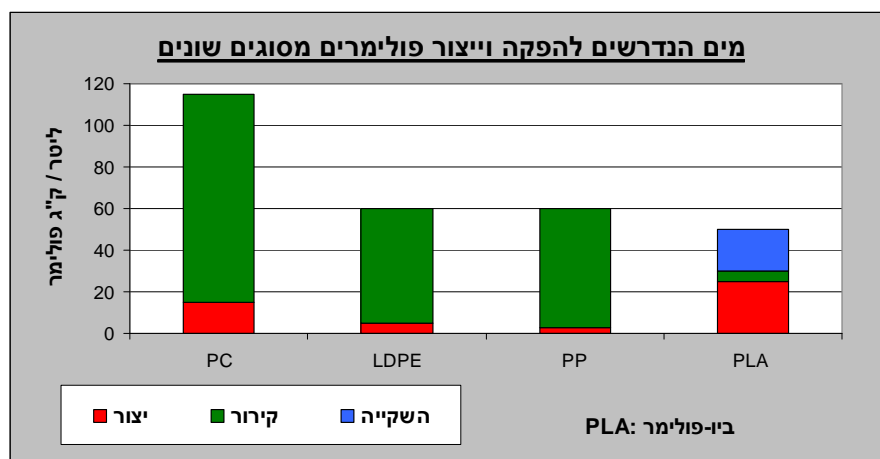
מחקר השוואתי אחר בדק את היקף צריכת המים הנדרשת לשם הפקת פולימרים מסוגים שונים. יש לציין כי המחקר נערך עבור חברה מסחרית (Cargill Dow's LLC) המייצרת ביו-פולימרים

⁸ Ramani Naryan, (2003). Environmental Footprint/Profile of Biobased, Biodegradable Products. Department of Chemical Engineering & Materials Science Michigan State University.

⁹ Hopewell, J., Dvorak, R. & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B 364: 2115-2126.

מסוג PLA. מחקר זה הציג תוצאות נמ"ח ל-PLA אותו מייצרת החברה והשווה את תוצאותיו לתוצאות נמ"חים שבחנו פלסטיקים תוצרי נפט. תרשים מס' 5 מציג את היקף צריכת המים למטרות שונות בהליך ההפקה והיצור. ניתן לראות כי במקרה זה, הליך ייצור ה-PLA (כולל השקיית הגידולים) אינו צורך יותר מים מהליך ייצור הפולימרים המתחרים.

תרשים מס' 5: היקף השימוש במים בהליכי ייצור פלסטיק מסוגים שונים¹⁰



PC: polycarbonate, LDPE: low density polyethylene, PP: polypropylene, PLA: polylactic acid

רעילות ואטרופיקציה

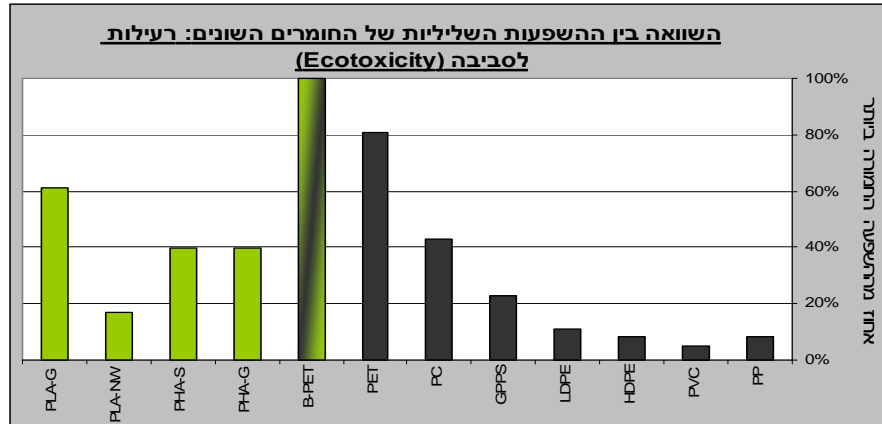
תרשימים מס' 6 ו-7 מציגים חלק מתוצאות מחקר אשר הציג 12 תוצאות מחקרי נמ"ח שנעשו בפולימרים מסוגים שונים. המחקר סקר מספר השפעות סביבתיות, ביניהן אטרופיקציה ורמות רעילות הפליטות לסביבה¹¹. למוצר אשר לו מיוחסת ההשפעה החמורה ביותר ניתן הערך המקסימאלי (100%). לכל שאר המוצרים ניתנו ערכים יחסיים המבטאים את חומרת השפעתם ביחס למוצר המשפיע ביותר. העמודות בירוק מבטאות את ההשפעות היחסיות של הביו-פלסטיק, בעוד שהשחורות את ההשפעות היחסיות של פלסטיק תוצר-הנפט. העמודה הצבועה בירוק-שחור מייצגת פלסטיק המיוצר מתערובת של חומרי גלם מתחדשים ואזילים. בתרשים מס' 6 ניתן לראות כי הפליטות הנגרמות בשלב הייצור וההפקה של חלק ממוצרי הביו-פלסטיק עלולות להכיל ריכוזים גבוהים יותר של חומרים רעילים. רעילות זו מוסברת בצורך בדשנים, חומרי הדברה התססת

¹⁰ Erwin T.H. Vink, Karl R. Rabago, David A. Glassner and Patrick R. Gruber (203), Applications of life cycle assessment to NatureWorks polylactide (PLA) production. Polymer Degradation and Stability 80, 403–419

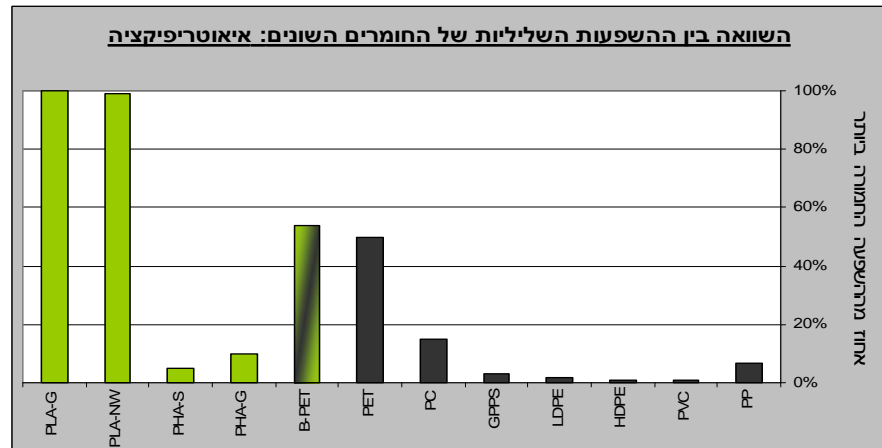
¹¹ Tabone, M.D., Cregg, J.J., Beckman, E.J. & Landis, A.E. (2010) Sustainability Metrics: Life Cycle Assessment and Green Design in Polymers. Environmental Science & Technology, 44 (21): 8264–8269.

חומרי הגלם והליכי יצור הדורשים שימוש בכימיקלים שונים¹². בתרשים מס' 7 ניכר פער גדול ביותר בין מוצרי הביו-פלסטיק השונים ובין שאר הפולימרים.

תרשים מס' 6: רעילות לסביבה בהליך ההפקה והיצור של מוצרי פלסטיק שונים



תרשים מס' 7: אוטוריפיקציה בהליך ההפקה והיצור של מוצרי פלסטיק שונים



PLA-G: polyactic acid general process, **PLA-NW:** polyactic acid NatureWorks, **PHA-S:** polyhydroxyalkanoate –corn stover, **PHA-G:** polyhydroxyalkanoate –corn grain, **B-pet:** hybrid bio/petroleum biopolyethylene terephthalate, **PET:** polyethylene terephthalate, **PC:** polycarbonate, **GPPS:** general purpose polystyrene, **LDPE:** low density polyethylene, **HDPE:** high density polyethylene, **PVC:** polyvinyl chloride, **PP:** polypropylene

3.4.2 סוף חיים או חיים חדשים

ניתן להצביע על מספר אפשרויות לטיפול מוסדר במוצרי פלסטיק: הטמנה, שריפה ומיחזור. במדינות ורשויות שונות מוצעים פתרונות שונים לטיפול בפסולת מסוגים מגוונים. קשה לחזות כיצד יתנהגו הצרכנים לאחר השימוש במוצרים, לאן יעשו מוצרים אלה את דרכם וכיצד יטופלו. חשוב להדגיש כי מחקרים רבים זיהו שלב זה, כשלב משמעותי ביותר, אשר בו יכולה לבוא עדיפותו הסביבתית של הביו-פלסטיק לידי ביטוי ולהקנות לו יתרון על מוצרים המקבילים לו. יתכן וחלק ממוצרי הביו-פלסטיק ימצאו כעדיפים רק במידה ויזכו לטיפול מיטבי בסוף מחזור חייהם. מגוון ניתוחי הנמ"ח יוצאים מנקודות הנחה שונות בדבר שיטות הטיפול בפלסטיק בסוף חייו.

¹² European Commission, (June 2011), Plastic waste: redesign and biodegradability. Since for Environment Policy, issue number 1.

הטבלה הבאה מציגה את היקף פליטות גזי החממה מחומרים שונים בהתאם לשיטת הטיפול. הערכים השונים מבטאים פליטות גזי חממה בטון ביחס לטון של חומר. לצערנו אין בנמצא נתונים המתארים פליטות מפלסטיק מתכלה, אך ניתן ליחס להן תכונות הדומות לאלה של הפסולת האורגנית.

- במיחזור מוצרי פלסטיק ממקור אזיל (PET), ניתן להביא לחיסכון מרבי בפליטת גזי חממה. חיסכון זה נזקף לזכותו של הפלסטיק לאור החיסכון ביחידת ייצור מזהמת נוספת.
- הליך העיכול האנאירובי של פסולת אורגנית חסכוני יותר בפליטת גזי חממה יחסית לקומפוסטציה. עיקר החיסכון מיוחס לחשמל הניתן להפקה בהליך העיכול.
- הטמנת פסולת אורגנית מביאה למרב הפליטות בגזי חממה בעוד שהטמנת פלסטיק ממקור אזיל אינה כרוכה בפליטות של ממש.

טבלה מס' 2: פליטות וחיסכון בפליטות גזי חממה בהתאם לשיטת הטיפול והחומר המטופל¹³

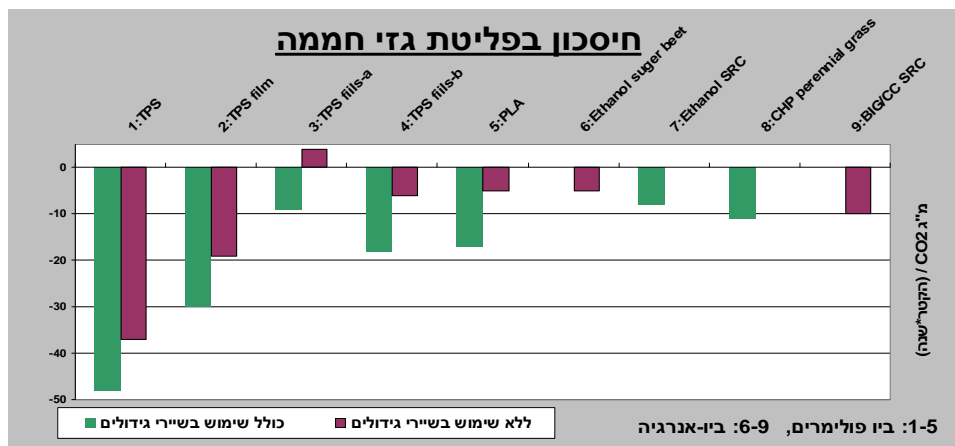
מיחזור: (ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת ממוחזרת)							
תהליך	חומר	פליטות Co2 אנרגיה	פליטות Co2 לשינוע	חיסכון מהחלפת מוצרים בתוליים	סה"כ		
מיחזור	נייר וקרטון	24	10	-634	-600		
מיחזור	פלסטיק PET	24	15	-1800	-1761		
קומפוסטציה ועיכול אנאירובי: (ק"ג ש"ע פד"ח / טון פסולת מטופלת)							
תהליך	חומר	פליטות שינוע ומיכון	פליטות חנקן תת חמצני	חיסכון מהחלפת דשנים כימיים	חיסכון מקיבוע פחמן	חיסכון מיצור חשמל	סה"כ
קומפוסטציה	אורגני רקבובי	21	7	-25	-22		-19
עיכול אנאירובי	אורגני רקבובי	8		-36	-22	-108	-158
הטמנה: (ק"ג ש"ע פ / טון פסולת מוטמנת)							
תהליך	חומר	פליטות שינוע ומיכון	פליטות מתאן	חיסכון מקיבוע פחמן	חיסכון מהשבת אנרגיה	סה"כ	
הטמנה	נייר וקרטון	8	1032	-787	-53	200	
הטמנה	אורגני רקבובי	8	1025	-272	-53	708	
הטמנה	פלסטיק PET	8	0	0	0	8	

¹³ אדם טבע ודין (יוני 2010), פליטות גזי חממה מטיפול בפסולת

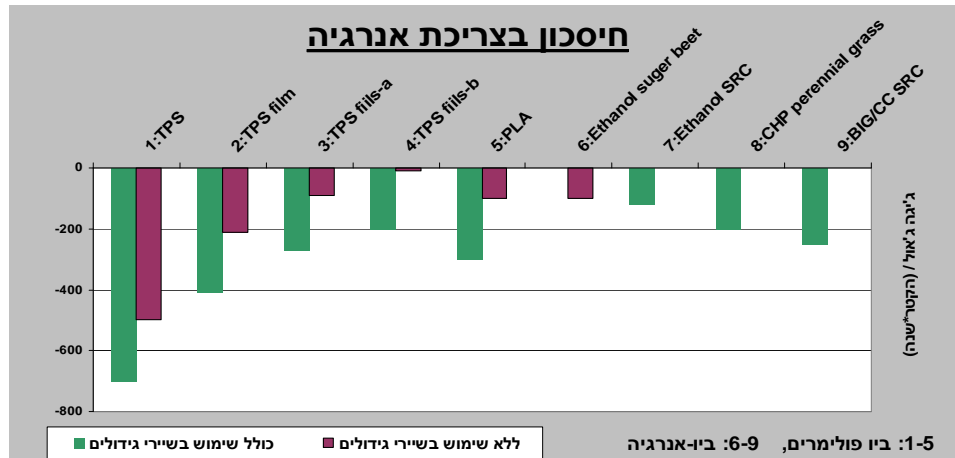
3.4.3. שימושי קרקע

משאב הקרקע מהווה גורם משמעותי בשל הקרקעות שעליהן מגדלים את הביו-מסה הדרושה ליצור ביו-פולימרים. במקרה זה נדרשת ההשוואה לגידולים המיועדים לביו-אנרגיה. מחקר השוואתי סקר ניתוחי מחזור חיים שונים של מוצרי ביו-פלסטיק ושל גידולים לביו-אנרגיה במטרה לקבוע מהי הקצאת הקרקעות אשר הבחירה בה תביא להפחתה המשמעותית ביותר בפליטות גזי חממה ולצריכה פחותה יותר של אנרגיה ממקורות אזילים. לשם ההשוואה, נבחרה יחידת שטח קרקע (הקטר אחד¹⁴) כמכנה משותף. החוקרים השוו בין החיסכון האפשרי אשר יכול להתקבל מהקצאת הקטר לגידולי ביו-פולימרים לבין החיסכון האפשרי אשר יכול להתקבל מהקצאת אותו הקטר לגידולים לביו-אנרגיה.

¹⁵ תרשים מס' 8: החיסכון בפליטות גזי חממה המתקבל מהקטר אחד לגידולי ביו-מסה לאנרגיה ולביו-פולימרים



¹⁵ תרשים מס' 9: החיסכון בצריכת אנרגיה המתקבל מהקטר אחד לגידולי ביו-מסה לאנרגיה ולביו-פולימרים



TPS: Thermoplastic starch, PLA: polylactic acid, SRC: short rotation coppice, CHP: combined heat and power, BIG/CC biomass integrated gasification with combined cycle

¹⁴ הקטר אחד שווה בשטחו לעשרה דונמים.

¹⁵ Veronika Dornburg, Iris Lewandowski, and Martin Patel, (2004), Comparing the Land Requirements, Energy Savings, and Greenhouse Gas Emissions Reduction of Bio based Polymer and Bio energy. Journal of Industrial Ecology, Volume7, Number3-4.

תרשימים מס' 8 ו-9 מציגים את תוצאות המחקר. כל עמודה (9-1) מציגה תוצאות מחקר נמ"ח אחר (עריסה לקבר) למוצרים, חומרים או גידולים שונים. ערכים שליליים מייצגים חיסכון בצריכת אנרגיה ובפליטות גזי חממה המתקבל מהקטר אחד של גידולים - ביחס לחלופה הנפוצה המקובלת (פולימר תוצר נפט ואנרגיה ממקור פוסילי). מסתמן כי הקצאת אותה יחידת שטח לטובת חלק מגידולי הביו-פולימר תביא לחיסכון משמעותי ביחס לגידולים לביו-אנרגיה. עוד ניתן לראות כי בעזרת הפניית שיירי הגידולים לטובת שריפה ליצור אנרגיה (עמודות המסומנות בירוק) ניתן לקבל חיסכון רב עוד יותר.

הסוכנות להגנת הסביבה של האיחוד האירופי (EEA), ערכה השוואה דומה בין החלופות¹⁶. מחקר ביוזמתם ביקש לבחון את כדאיות השימוש בחומרי גלם מתחדשים (למגוון שימושים) והשווה את התועלות המתקבלות מהקצאת קרקעות למטרה זו לעומת אלה המתקבלות מהקצאת קרקעות לגידולי ביו-אנרגיה. נמצא כי להקצעת השטחים החקלאיים לטובת גידול חומרי גלם מתחדשים יתרונות כלכליים ברורים. כך למשל, הסיקו החוקרים כי הקצאת השטחים לגידול חומרי גלם תדרוש כח עבודה הגדול פי 15-10¹⁷, ותניב ערך מוסף הגדול פי 10 ביחס לגידולים לביו-אנרגיה¹⁸.

4. השפעות אפשריות על ענף מיחזור הפלסטיק הקיים

הופעתם של מוצרים על בסיס ביו-פלסטיק בשוק עלולה להשפיע גם על ענף מיחזור הפלסטיק הקיים. יש יסוד סביר להניח כי הציבור הרחב לא ידע להבדיל בין סוגי הפלסטיק השונים ושומוצרים העשויים ביו-פלסטיק יעשו דרכם גם לזרם הפלסטיק הרגיל המיועד למיחזור. נכון להיום, מוצרי הביו-פלסטיק אינם ניתנים למיחזור בהליך הזהה לזה של מוצרי הפלסטיק מהמקור האזיל. זליגתם לפס היצור של מפעלי המיחזור מצריכה הליך מיון דקדקני ויקר יותר ואף עלולה להביא לפסילת חומרי גלם ממוחזרים. חשוב להקפיד כי שילובם של המוצרים על בסיס הביו-פלסטיק בשוק לא יביא לפגיעה בענף מיחזור הפלסטיק הקיים. ניתן לעשות זאת על ידי סימון ברור ואחיד על גבי המוצרים או על ידי ייצור מוצרים אשר אינם ניתנים למיחזור.

¹⁶ European Environmental Agency, (march 2010), Use of renewable raw materials with special emphasis on chemical industry. ETC/SCP report 1/ 2010.

¹⁷ פערים אלה הוסברו בהליך הארוך והמסובך יותר הנדרש להפקת חומרי גלם מהתוצרת החקלאית (בהשוואה לביו-אנרגיה).

¹⁸ ערך מוסף: ההפרש בין ערך התפוקה הגולמית (המוצר הסופי) לבין הוצאות הכרוכות בייצורו (כגון חומרי גלם, חומרי עזר, דלק, אחזקה).

5. סיכום והמלצות

קשיים ניכרים עולים כשמבקשים לקבוע בפסקנות בדבר יתרונותיו הסביבתיים של הביו-פלסטיק במגוון מצבים, בשל:

- מחסור במחקרי נמ"ח מקיפים בנושא זה הבוחנים מגוון רחב של השלכות סביבתיות (מרבית המחקרים מתמקדים בפליטות גזי חממה וצריכת אנרגיה).
- חלק ממחקרי הנמ"ח אינם מפרטים את הנחות העבודה ולפיכך קשה להבין בוודאות את תוצאותיהם.
- פיתוח מתמיד המביא לשיפורים בהליך יצור הביו-פלסטיק ומשפיע לטובה על השפעותיו הסביבתיות.
- אי הודאויות באשר לשלב הסופי בחיי המוצר משפיעה על תוצאות מחקרי הנמ"ח ועל האפשרות לקבוע מסקנות חד משמעיות.

יחד עם זאת, ננסה לנסח את התובנות העיקריות המתקבלות בשלב זה:

- א. מרבית המחקרים מצביעים על כך שבראיה כוללת, למוצרי הביו-פלסטיק עדיפות סביבתית על הפלסטיק העשוי תוצרי נפט.
- ב. יתרוננו של הביו-פלסטיק ניכר בעיקר בתחומי ההשפעה הסביבתית של פליטות גזי חממה וצריכת אנרגיה בהליך ההפקה והיצור. עדיפות זו בולטת במיוחד בבחינת מוצרי הפלסטיק המיוצרים על בסיס עמילן¹⁹. הטמנת הביו-פלסטיק במטמנה בגמר השימוש במוצר תגרום לפליטת גזי חממה ותצמצם את התועלת הטמונה בו, אך לא תבטלה.
- ג. במקטע עריסה-לשער המפעל, למוצרי הביו-פלסטיק יתרון סביבתי בהיקף צריכת אנרגיה ופליטות גזי החממה.
- ד. במקטע סוף החיים, החיסכון בפליטות גזי חממה המתקבל ממיחזור פלסטיק ממקור אזיל גדול באופן ניכר מיצור קומפוסט מביו-פלסטיק (בגלל יחידות היצור הנחסכות).

¹⁹ Patel Martin, (November 2001), Lessons to be learnt from LCAs for biodegradable polymers. Utrecht University, Netherlands.

ה. במקטע עריסה-לשער המפעל, מסתמנת נחיתות למוצרי הביו-פלסטיק במספר השפעות סביבתיות (למשל: רעילות סביבתית ואוטרופיקציה). נחיתות זו מיוחסת בעיקר לשלב הגידול החקלאי בו נעשה שימוש בדשנים וחומרי הדברה²⁰.

ו. שימוש בקרקע למטרת גידולי ביו-פלסטיק עדיף על גידולי ביו-אנרגיה.

ז. ולבסוף, נראה שתובנת הבסיס עומדת בעינה: פחמן חדש עדיף על פחמן ישן. יש לקדם מערכת יצור וצריכה המבוססת על חומרים ממקור מתחדש, היכולים לחזור לקרקע ולתמוך בהתחדשות המערכת הביולוגית.

המלצות:

1. יש להימנע מפגיעה במערך איסוף הפלסטיק הקיים. בשלב זה עדיין לא פותחו שיטות למיחזור ביו-פלסטיק ולכן במקרים בהם שיעור גבוה של האריזות נאסף למיחזור (בעיקר מיכלי משקה) נראה שיש להעדיף פלסטיק ממקור אזיל, בשלב זה.
2. יש להעדיף את השימוש בביו-פלסטיק באריזות ומוצרים שאינם בני מיחזור (שקיות, עטיפות, כלים חד פעמיים ואריזות מזון טרי וכו').
3. השימוש בביו-פלסטיק מתאים במיוחד במערכות סגורות (מפעלים, מוסדות וארועים) בהן ניתן להבטיח איסוף נפרד וטיפול ביולוגי.
4. יש לרתום את היצרנים למהלך ולהבטיח אחידות ושקיפות בכל הנוגע להרכב מוצרי הפלסטיק וסימונם.

²⁰ Murphy R., Bartle I., (2004) Summery report- Biodegradable Polymers and Sustainability: insights from life cycle assessments. National Non Food Crops Center UK.