



משרד האנרגיה והמים

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל

שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים



מוגש למשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, מנהלת
תחליפי נפט

מכרז 53/12

פברואר 2014

כתבו וערכו:

פרופ' אופירה אילון
עידן ליבס

גדי רוזנטל
דנה גבאי



יועץ לענייני תחבורה - ד"ר ליאוניד טרטקובסקי - טכניון

תוכן עניינים

5	מבוא	1.1
6	תחליפי דלקים לתחבורה שמקורם מפסולות - תקציר מנהלים	1.2
6	רקע	2.1
8	ניהול מצאי חומר גלם	2.2
10	היצע הפסולות בישראל	2.3
11	טכנולוגיות להפקת דלקים מפסולות	2.4
13	מטרת ומסגרת העבודה	2.5
14	הפקת CNG מפסולות ע"י פירוק אנאירובי - ניתוח כלכלי	3.0
14	רקע	3.1
15	המודל הקיים עבור CNG מגז טבעי	3.2
16	הנחות התחשיב - עיכול אנאירובי להפקת CNG	3.3
17	עלויות הקמה	3.3.1
18	עלות תפעול מתקן עיכול אנאירובי	3.3.2
18	שיעור תשואה במתקן עיכול אנאירובי	3.3.3
19	עלות שדרוג תוצרי הביו-גז לביו-מתאן	3.3.4
20	מקדמי התפוקה והיצע כמויות הפסולת לעיכול אנאירובי	3.3.5
21	בדיקת רגישות	3.3.6
21	עלויות והנחות נוספות בחלופת העיכול האנאירובי	3.3.7
23	תוצאות הניתוח הכלכלי	3.4
24	בדיקות רגישות	3.4.1
28	מסקנות	3.4.2
29	הפקת מתנול, דלקים פחמימניים ואתנול מגזיפיקציה - ניתוח כלכלי ...	4.0
29	רקע ומטרת הניתוח	4.1
29	גזיפיקציה לדלקים	4.1.1
31	ישימות טכנולוגית הגזיפיקציה וזמינות נתונים	4.2
32	מתודולוגיה	4.3
33	מקדמי תפוקה של גזיפיקציה - הנחות התחשיב	4.4
34	מתנול	4.4.1
35	BTL	4.4.2
36	אתנול	4.4.3
37	מקדמי תפוקה - סיכום	4.4.4
38	היצע הפסולת לתהליך הגזיפיקציה והתפוקה הפוטנציאלית	4.5
39	טכנולוגית הגזיפיקציה - הנחות כלכליות	4.6
39	התפלגות מבנה עלויות של מתקן גזיפיקציה המטפל בפסולות	4.6.1
39	עלויות הקמה ותפעול של מתקן גזיפיקציה	4.6.2
40	תהליך השבת הסינגז לדלקים	4.6.3
41	סיכום הנחות כלכליות - עלות הקמה ותפעול במתקן גזיפיקציה לייצור דלק	4.6.4
41	מחירי כניסה למתקן	4.6.5
42	הנחות כלכליות נוספות לתרחיש הפקת דלק לתחבורה בתהליך הגזיפיקציה	4.6.6
43	תוצאות הניתוח הכלכלי	4.7
43	תוצאות תחשיב כלכלי מתנול	4.7.1
44	יתרונות לגודל במתקני מתנול	4.7.2
45	תוצאות הניתוח	4.7.3
47	תוצאות תחשיב כלכלי - BTL	4.7.4
48	תוצאות תחשיב כלכלי- אתנול	4.7.5
49	סיכום	4.8
50	ניתוח מחזור חיים לייצור דלקים מפסולות	5.0
50	רקע	5.1

50.....	אפיון היקף ושלבנים בניתוח	5.2
51.....	הבסיס ההשוואתי לדלקים ממקורות שונים - צפיפות אנרגטית	5.3
51.....	מתודולוגיית הניתוח	5.4
53....	ניתוח מחזור חיים "מהבאר למיכל" להפקת תחליפי דלקים לתחבורה מפסולת	5.5
53.....	JEC	5.5.1
57.....	GREET	5.5.2
65	סיכום	6

רשימת תרשימים

6.....	תרשים I - חומרי הגלם, הדלקים, התשתיות ומערכות ההנעה האפשריות בעתיד
7.....	תרשים II - היצע ביו-דלקים בתחבורה על פי חלוקה לדלקים
8.....	תרשים III - התכנית הרב שנתית של משרד הטכנולוגיות לביו-אנרגיה, משרד האנרגיה האמריקאי
9.....	תרשים IV - מקורות הביומסה להפקת אנרגיה
11.....	תרשים V - הפקת דלקים מפסולות: מפת דרכים
15.....	תרשים 1 - המודל הקיים עבור CNG המופק מגז טבעי
23.....	תרשים 2 - התפלגות עלויות המרת טון פסולת עירונית רקבובית לביומתאן
24.....	תרשים 3 - עלות ייצור ביומתאן, \$/MMBTU
25.....	תרשים 4 - עלות ייצור ביומתאן \$/MMBTU – במחיר כניסה של 170 \$/טון פסולת
26.....	תרשים 5 - עלות ייצור ביומתאן, \$/MMBTU, במחיר הובלה לקומפוסט של 30 \$/טון
27.....	תרשים 6 - עלות ייצור ביומתאן \$/MMBTU - במחיר שדרוג ביוגז של 1.9 \$/מ"ק ביוגז (65% מתאן)
29.....	תרשים 7 - שלבי תהליך הפקת תחליפי דלקים מפסולות בשיטת הגזיפיקציה
40.....	תרשים 8 - התפלגות עלויות ההון במפעל גזיפיקציה המשיב פסולות לדלקים אלכוהוליים
43.....	תרשים 9 - מודל קיים עבור מתנול המופק מגז טבעי
44.....	תרשים 10 - עלויות וקיבולת ייצור מתנול ממקורות זינה שונים
46.....	תרשים 11 - התפלגות עלות ייצור מתנול מגזם
48.....	תרשים 12 - התפלגות עלות הפקת אתנול מטון גזם
51.....	תרשים 13 - השוואת צפיפות אנרגיה בדלקים שונים לתחבורה
54.....	תרשים 14 - נתיבי ביוגז מפסולת ושימושים אפשריים
55.....	תרשים 15 - מאזן אנרגיה בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל
55.....	תרשים 16 - מאזן אנרגיה פוסילית בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל
56.....	תרשים 17 - מאזן פליטות גז"ח בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל
57.....	תרשים 18 - סכמה מתודולוגית של מודל GREET
59.....	תרשים 19 - פליטות גזי חממה לשעט"נ תוצר בייצור דלקים, "מהבאר למיכל"
60.....	תרשים 20 - פליטות מזהמים לשעט"נ תוצר בייצור דלקים, "מהבאר למיכל"
61.....	תרשים 21 - עלות אנרגטית לשעט"נ תוצר בייצור דלקים, "מהבאר למיכל"
63.....	תרשים 22 - תמהיל חשמל מוצע לישראל
63.....	תרשים 23 - תמהיל מקורות חשמל מאנרגיה מתחדשת
64.....	תרשים 24 - השוואת פליטות גזי-חממה בתמהיל החשמל האמריקאי לעומת תמהיל מוצע לישראל

רשימת טבלאות

- טבלה 1- הנחות כלכליות - עלויות הקמה מתקן עיכול אנאירובי (כולל רכיב ייצור החשמל), אלש"ח 17
- טבלה 2- עלות תפעול למתקן עיכול (כולל רכיב ייצור החשמל) - אלש"ח בשנה..... 18
- טבלה 3 - שיעור תשואה במתקן עיכול אנאירובי 18
- טבלה 4-שיטות שדרוג הביו-גז לרמת גז טבעי 19
- טבלה 5 - כמות הביומתאן (98%) תרחיש הבסיס 20
- טבלה 6 - כמות הביומתאן (98%), בדיקת רגישות 21
- טבלה 7- הנחות נוספות לתחשיב העיכול האנאירובי 21
- טבלה 8- ניתוח כלכלי - הפקת ביו-מתאן מפסולות 23
- טבלה 9 - מקדמי תפוקה בטכנולוגיות הממירות ביומסה לסינגז ומשיבות אותו לדלקים 33
- טבלה 10 - מקדמי תפוקה עבור מתקני ביומסה למתנול בשיטת הגזיפיקציה 34
- טבלה 11 - מקדמי התפוקה לתחשיב, גלון דלק/טון פסולת 37
- טבלה 12 - מקדמי התפוקה לתחשיב, ליטר דלק/טון פסולת 37
- טבלה 13 - היצע הפסולות לדלקים בשני תרחישי כמויות של פסולת מוצקה 38
- טבלה 14 - פוטנציאל ייצור תחליפי דלק (אלפי ליטרים בשנה) - מקסימאלי 38
- טבלה 15 - פוטנציאל ייצור תחליפי דלק (אלפי ליטרים בשנה) - מקסימאלי 38
- טבלה 16 - ריכוז מידע טכנו כלכלי למתקני גזיפיקציה המשיבים פסולות לחשמל 39
- טבלה 17 - סיכום ההנחות הכלכליות, אלש"ח לטון פסולת שנתי 41
- טבלה 18 - עלות ייצור מתנול – תוצאות התחשיב 45
- טבלה 19 - עלות ייצור מתנול בגזיפיקציה, לליטר דלק 45
- טבלה 20 - עלות ייצור BTL – תוצאות התחשיב 47
- טבלה 21 - עלות ייצור אתנול – תוצאות התחשיב 48
- טבלה 22 - עלות ייצור תחליפי דלקים מפסולות - סיכום ממצאים, ש"ח לליטר 49
- טבלה 23 - מפתח נתיבי דלקים פסולת נבחרים בדו"ח JEC 53
- טבלה 24 - סיכום פליטות וצריכת אנרגיה בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל 56
- טבלה 25 - עלויות חיצוניות של פליטות בייצור דלקים, "מהבאר למיכל" 62

1. מבוא

מערכת התחבורה העולמית מושתתת כיום רובה ככולה, על דלקים מבוססי נפט המוזנים למערכות הנעה המונעות בלעדית ע"י מנוע בעירה פנימית. על רקע הדאגה העולמית מההשפעות הסביבתיות המחרפות של השימוש בדלקים פוסיליים (על בריאות הציבור והסביבה) והצורך להיגמל מהתלות האנרגטית בהם (בעיקר בסקטור התחבורה), מושקעים מאמצעי מחקר על מנת לתת מענה, בין היתר, לשני הכיוונים המשלימים הבאים:

- העמקת המחקר והפיתוח בניהול מערכות תחליפי דלקים ביולוגים או סינטטיים לשימוש בתחבורה
- פיתוח ופריסה מערכות הנעה אלטרנטיביות, יעילות ונקיות יותר (במונחי צריכת דלק ופליטת מזהמים)

במסגרת החלטת ממשלה משנת 2011¹ בדבר הפעלת תכנית לאומית להפחתת התלות העולמית בנפט, ובהמשך להחלטת ממשלה נוספת משנת 2013² בנושא הפחתת התלות הישראלית בנפט לתחבורה, מקדמת יחידת המדען הראשי, מחקר מעמיק בשני הכיוונים לעיל.

מסמך זה הינו חלק ממערך דוחות שנועדו לתת מענה לצרכי המחקר הללו והוא מוגש למנהלת תחליפי נפט במשרד האנרגיה, במסגרת מכרז 53/12. על פיו, תעסוק העבודה בשני הנושאים הבאים:

1. טכנולוגיות להפקת דלקים מפסולות
2. מערכות הנעה חשמליות והיברידיות לרכבים

כל נושא נחקר בשני שלבים (להלן שלב א'/ב'). הראשון נועד לספק סקירה ספרותית מקיפה על ישימותם של הטכנולוגיות לייצור הדלק ומערכות ההנעה שנבחנו. השלב השני מספק ניתוח כלכלי ראשוני וניתוח מחזור חיים של שימוש בטכנולוגיות ובמערכות ההנעה השונות. נדגיש כי על אף נקודות ההשקה בין שני כיווני המחקר, הנושאים נותחו והוצגו בנפרד.

מסמך זה הינו שלב ב' עבור הפרק הראשון הן בטכנולוגיות להפקת דלקים מפסולות.

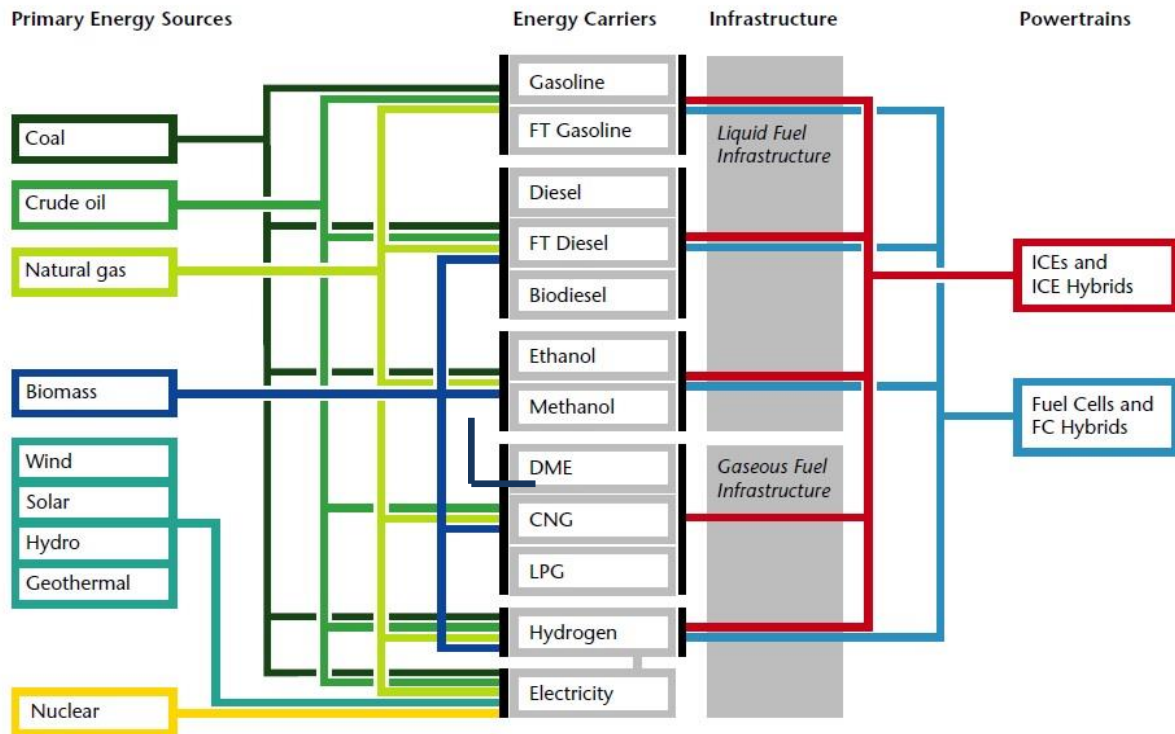
¹ מספר 2790 מיום 30.1.2011
² מספר 5327 מיום 13.1.2013

2. תחליפי דלקים לתחבורה שמקורם מפסולות - תקציר מנהלים

2.1. רקע

סקטור התחבורה שונה במאפייניו מסקטורי החשמל והתעשייה ולכך השפעה ניכרת על מידת תלותו בדלקים פוסיליים. באיור הבא ניתן להיווכח בנחיתותו של הסקטור מבחינת היצע תחליפי האנרגיה עבורו.

תרשים I - חומרי הגלם, הדלקים, התשתיות ומערכות ההנעה האפשריות בעתיד



מקור: (2004) SMP³

תחליפי הדלקים לתחבורה, בשונה מסקטורי אנרגיה אחרים, מוגבלים בטווח הקצר (וכנראה הבינוני), בדלקים נוזליים או גזיים. בעוד שלמוצרי אנרגיה אחרים (כגון חום או חשמל) יש מקורות מתחדשים חלופיים ומתחדשים כגון אנרגיה סולארית, רוח, הידרו וכו', לסקטור התחבורה לא צפויות חלופות מתחדשות ליישום בטווח זה, מלבד טכנולוגיות להמרת ביומסה לדלקים (DOE)⁴.

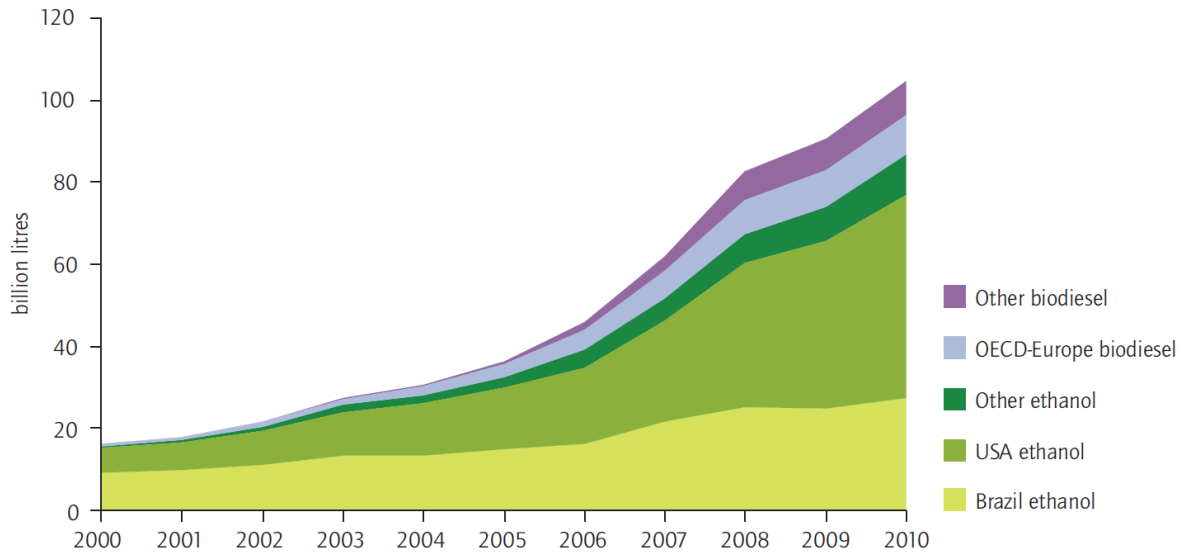
מחירי הדלקים הקונבנציונאליים לצד תמריצי מדיניות ומחירים זולים של חומרי גלם (כגון תירס וקנולה) העלו את קרנם של תחליפי הדלקים הביולוגיים "מהדור הראשון" (אלו המופקים מגידולי מאכל חקלאיים שיועדו להפקת דלקים⁵). הם נמצאים בשימוש כבר מספר עשורים ומהווים כיום כ-3% מסך ביקוש הדלקים העולמי (IRENA 2013) כאשר העיקרים שבהם הם: הביו-אתנול והביודיזל המהווים 80% ו-20% משוק הדלקים הביולוגיים העולמי, בהתאמה. גידול חומר הגלם להפקתם עושה שימוש בלא פחות מ-2-3% מהקרקע החקלאית העולמית ודורש משאבים רבים ויקרים כגון מים דשן וכו'.

³ <http://www.michelinman.com/mediabin/Approved/Michelin/Visuals/Digital/Mobility2030-Overview.pdf>

⁴ מתוך: http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/mypp_may_2013.pdf

⁵ נציין כי ישנם המגדירים את דורות תחליפי הדלקים על פי הטכנולוגיה ששימשה ליצורם.

תרשים II - היצע ביו-דלקים בתחבורה על פי חלוקה לדלקים



Source: IEA, 2010a.

מקור: IEA Technology Roadmap Biofuels for Transport (2011)

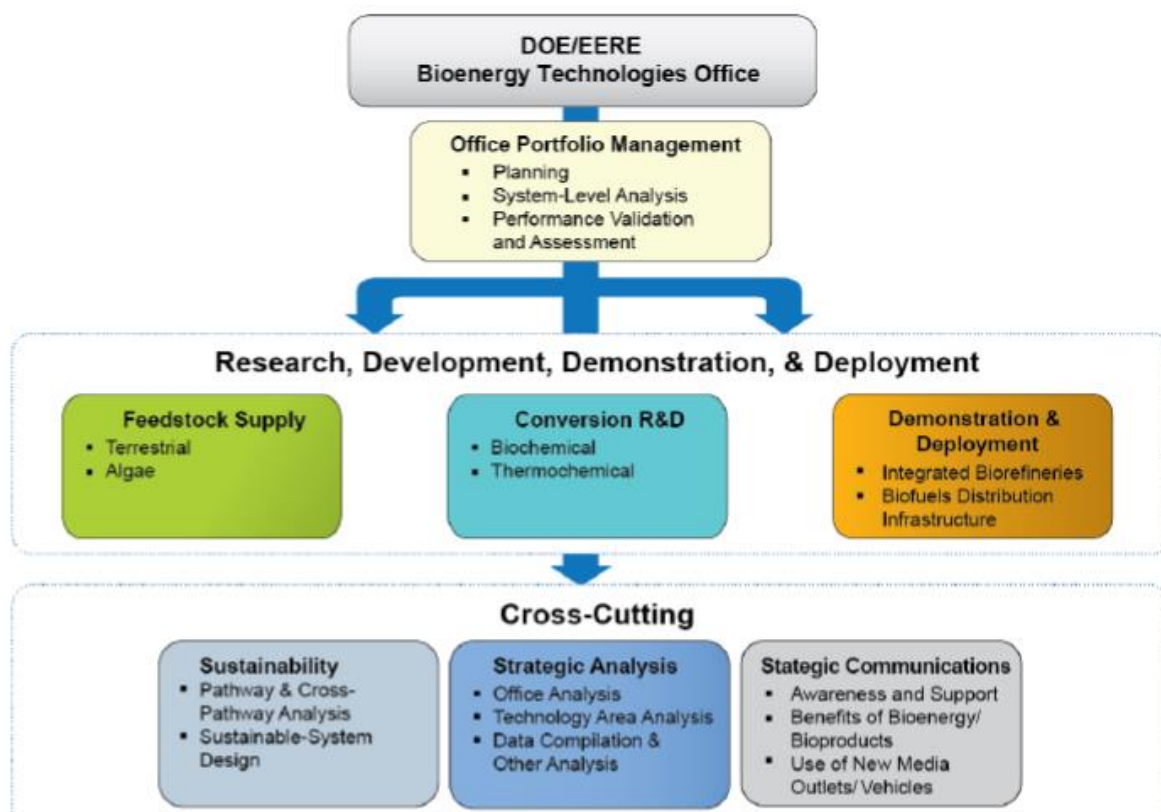
בשנים האחרונות מתפתחת ביקורת הולכת וגוברת כנגד שימוש בגידולים ייעודיים אלו להפקת תחליפי דלקים לתחבורה ומושקעים מאמצי מחקר ופיתוח טכנולוגיות להמרת הביומסה (או חומרים סינטטיים) הנמצאים בחומר הקיים (בפסולות ביולוגיות או סינטטיות) להפקת תחליפי דלקים לשימוש בתחבורה ("תחליפי דלקים דור שני"). הביקורת נובעת מהמשאבים הרבים שיש להשקיע על מנת לגדל את הדלק (דשן, מים וקרקע) והתחרות הנובעת מכך מול שוק המזון. חשוב לציין, כי יעדי השימוש בדלקים חלופיים, הן באירופה והן בארה"ב, נסמכים על כך כי תקציבי מו"פ גבוהים כבר הושקעו לקידום התחום והוקמו מפעלים המעבדים דלקים מגדולים חקלאיים (תירס, קנה סוכר ועוד). במילים אחרות, התשתית לעיבוד פסולת ביומסה כבר קיימת ולכן, ההצדקה, לכאורה, לקדום טכנולוגיות דור שני של דלקים מפסולות שלא בהכרח מוצדקות כלכלית.

התכנית הרב שנתית (עד 2020) של משרד הטכנולוגיות לביו-אנרגיה במשרד האנרגיה האמריקאי, שפורסמה ב-2013⁷, מגדירה וממפה מערך פעולה נרחב הכולל שלוש זרועות: גיבוש מערך **ניהול ביומסה** ביולוגי, קידום המחקר והפיתוח של **טכנולוגיות** המרה ומערכי הדגמה, **ישום ופריסה** של מתקנים.

⁶ http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap.pdf

⁷ <http://www1.eere.energy.gov/library/default.aspx?page=1>

תרשים III - התכנית הרב שנתית של משרד הטכנולוגיות לביו-אנרגיה, משרד האנרגיה האמריקאי



מקור: DOE, 2013

נדגיש כי התכנית שמה דגש ניכר (לא פחות מזה הניתן לפיתוח טכנולוגיות המרה) על מדיניות וניהול החומר הביולוגי בשווקים ורואה פוטנציאל עצום בניהול מלאי הביומסה באופן שיאפשר השבה יעילה לאנרגיה בכלל ולתחליפי דלקים בפרט.

2.2. ניהול מצאי חומר גלם

המושג ביומסה מתייחס לקשת רחבה מאוד של חומרים ואיכויות שכן כל חומר אורגני, פריק ביולוגית, שמקורו מהחי או מהצומח נכלל בהגדרה זו. מידת הלכלוך והחומרים הזרים בה מגדיר את איכות המשאב כמקור אנרגיה בעל ערך כלכלי (זרמי ביומסה נקיייה כמו: גזם, שאריות יער ופסולת החקלאית או פסולות סינטטיות) או לחילופין כבעל עלות כלכלית (זרם פסולת מעורבב ומלוכלך). לרגולציה השפעה ניכרת על שוק הפסולת והיא בפועל המניע העיקרי לשינויים בו. תמריצים יעילים ומדיניות ניהול ביומסה מושכלת הם בעלי תפקיד ראשי בהבטחת היצע חומר גלם באיכות גבוהה. נדגיש כי שיקוליו ועלויותיו (הישירות והחיצוניות) של המשרד להגנת הסביבה בנוגע למערך הטיפול בפסולת אינם מוצגים ומופנמים בעבודה זו.

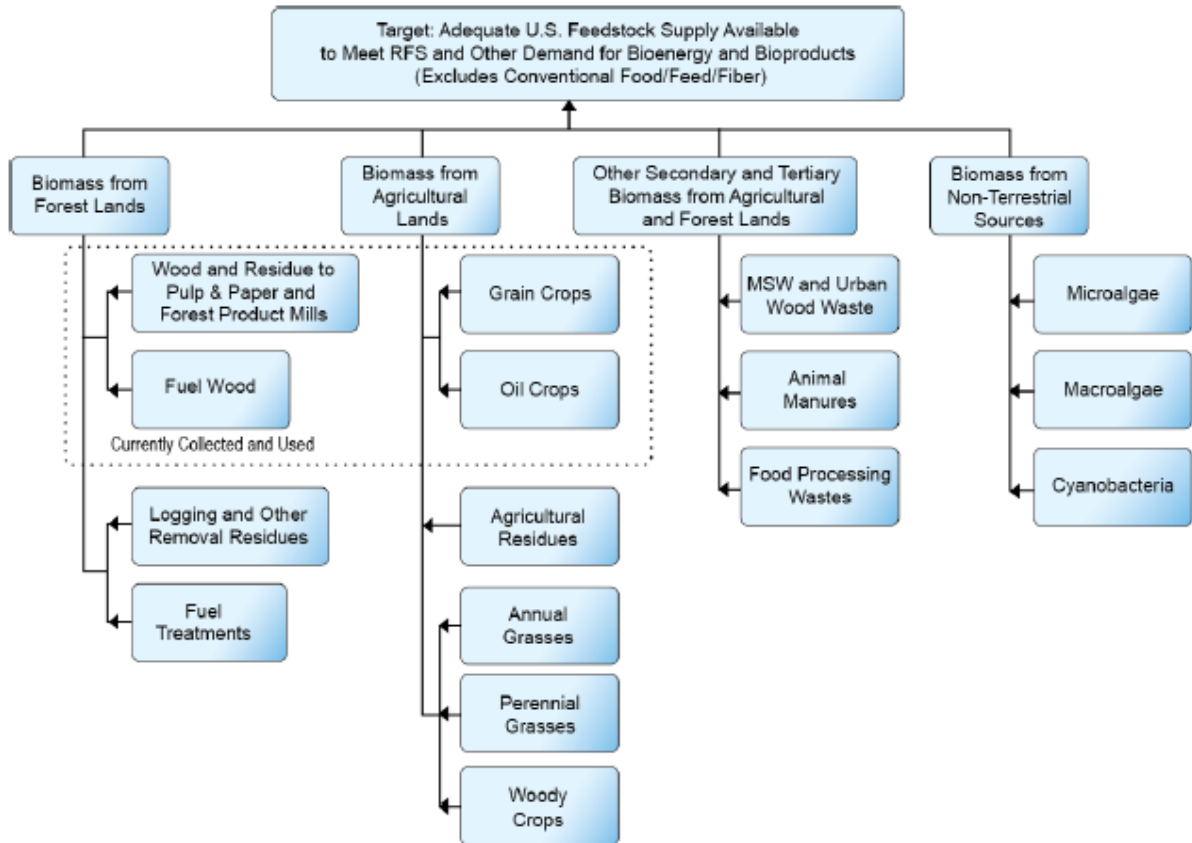
אופן ניהול הביומסה במשק הישראלי תלוי במדיניותו של המשרד להגנת הסביבה ובגורמים נוספים אחרים ומהווה גורם אקסוגני למערך קבלת ההחלטות, מנקודת מבטו של משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים. היצע הפסולת נותח "על פי המצוי ולא הרצוי"⁹ ומשקף את המציאות הקיימת בישראל בשנת 2013. נציין כי כיום הגזם בישראל (בעיקר העירוני) מהווה מטרד שנאסף יחד עם פסולת גרוטאות

⁸ http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/mypp_may_2013.pdf

⁹ בשלב א של דו"ח זה, מוצג ניתוח היצע הפסולת בישראל.

ויצרני הפסולת לרב משלמים עבור ההיפטרות ממנה. זאת לעומת גרמניה, שכבר למעלה מ-2 עשורים הפכה את הגזם למשאב בעל ערך כלכלי גבוה. הגזם נקנה ע"י בעלי מתקנים (בעשרות יורו לטון) על מנת שיוכלו להמירו לאנרגיה (בעיקר חום וחשמל). ערכו הכלכלי והסביבתי של חומר גלם לתהליך הפקת האנרגיה מחומר ביולוגי (בייחוד לדלקים) רגיש מאוד לאיכותו ומידת ההומוגניות שלו. פסולות חקלאיות וגזם (גם עירוני) יכולות להפוך למשאב עבור מי שמוטלת עליו אחריות הטיפול בהן. כמו כן היצע הטכנולוגיות להמרה מתרחב שכן זרמים הומוגניים ונקיים ממזהמים ופתוגנים מאפשרים שימוש בטכנולוגיות רגישות למזהמים (כמו הידרוליזה להפקת אתנול צלולוזי).

תרשים IV - מקורות הבימוסה להפקת אנרגיה



מקור: DOE, 2013

התמונה המוצגת למעלה מציגה תמונה אידאלית של הפרדת החומר הביולוגי בשוק באופן שמונע את הזדהמותו וערבוב עם חומרים אחרים (כמובן שהדבר אפשרי רק בהיתן שוק פסולת יעיל שמאפשר את קיומם של זרמים מופרדים מסוימים ובכך משמר את תכונותיהם של החומרים בהם). לכך השפעה על היצע הטכנולוגיות להמרתן לדלקים, בייחוד לדלקים לתחבורה, סקטור "תובעני" מבחינת דרישות ניקיון התוצר (ועלותו), בהשוואה לתעשייה ולייצור חשמל ולכן עלותו גבוהה, כפי שיורחב בהמשך.

בישראל של היום הפסולת טרם הפכה למשאב. עם זאת, בשנים האחרונות מושקעים מאמצים ניכרים, ע"י המשרד להגנת הסביבה, על מנת להסדיר את מערך הטיפול ולייצר תמריצים ומגבלות אפקטיביים לקידום שווקים לטכנולוגיות המוצעות (ייקור היטל הטמנה, סגירת מטמנות, מענקי ממשלה להפרדה במקור ומתקני השבה). שוק הפסולת הינו שוק מוכוון רגולציה ולכן לשינויים אלו צפויות להיות השפעה ניכרת על מערך היתרונות היחסיים של כל טכנולוגיית טיפול וזרם פסולת עצמו. כל מערך המחירים של

התוצרים והתשומות אינו וודאי כמו גם עתיד הרגולציה בשוק הפסולת (איסור הטמנה של חומר פריק ביולוגית המיושם בחלק ממדינות אירופה, לדוגמה). לאי וודאות זו ניתן להוסיף את חוסר הניסיון בישומם של התהליכים שיוצגו והעובדה שאפילו המתקנים הקונבנציונאליים לטיפול בפסולות (מתקני מיון והפרדה, RDF, קומפוסטציה ועיכול אנאירובי להשבה לחשמל) נמצאים כיום בעיקר בשלבי תכנון והשגת מימון מהמדינה או מיזמים.

בנוסף, יש לציין, כי עבודה זו אינה מעריכה את כדאיות הפקת הדלקים לעומת הפקת חשמל או חום מפסולות אלה. לשם כך, נדרשת עבודה מקיפה ומלאה אשר תתעדף את הקצאת חומרי הפסולת להפקת אנרגיה.

2.3. היצע הפסולות בישראל

היצע הפסולות נאמד ונותח נרחבות במסגרת שלב א' תוך חלוקה לפילוחים שונים (מקור הפסולת, מצב צבירתה ותתי הזרמים בה). כמויות תחליפי הדלקים שניתן יהיה להפיק נותחו במסגרת תרחיש הקצאה המשלב בין טכנולוגיית העיכול האנאירובי (ממשפחת הטכנולוגיות הביו-כימיות) לטכנולוגיית הגזיפיקציה (ממשפחת הטכנולוגיות התרמיות)¹⁰.

על פי המקורות שנבחנו, היצע הפסולת הזמינה להפקת דלקים בישראל, בשנת 2012, עמד על כ-12.1 מיליון טון. נדגיש כי בימים אלו ממש פועלים צוותי עבודה בין משרדיים בנושא טיפול וניהול תוצרי לוואי (פסולות) בחקלאות¹¹.

נזכיר כי **מצאי פסולות אינו תנאי מספיק להיווצרות שוק של הפקת דלקים מהן**. ללא מערך איסוף ושינוע הפסולת אינה מהווה חומר גלם אפקטיבי לניתוח (כמו במקרה של שאריות פרי שנותרות כיום בשדות או גזם שמושלך בשטח או מפונה למפחמות). אלמנט קריטי נוסף הינו מידת הרגולציה והאכיפה בתחום שבלעדיה ימשיכו ליישם פתרונות זולים ומזהמים (כמו גם לא חוקיים) לטיפול בפסולות.

היצע הפסולת נותח "על פי המצוי ולא הרצוי" ומשקף את המציאות הקיימת בישראל בשנת 2013.

¹⁰ על פי בקשת המשרד עודכן הפרק, ביחס לזה שהוצג בשלב א, ומוצגים בו אומדנים לתחליפי דלקים נוספים (כגון: מתנול BTL)

¹¹ במסגרת עבודתם נאמדה כמותם של זרמי פסולת שלא נלקחו בחשבון (שאריות פירות בשדה). עבור אלו שכן ממצאיהם זהים לאלו שהוצגו בשלב א', מלבד פרש בעלי החיים (שנבחנו במסגרת בדיקת רגישות).

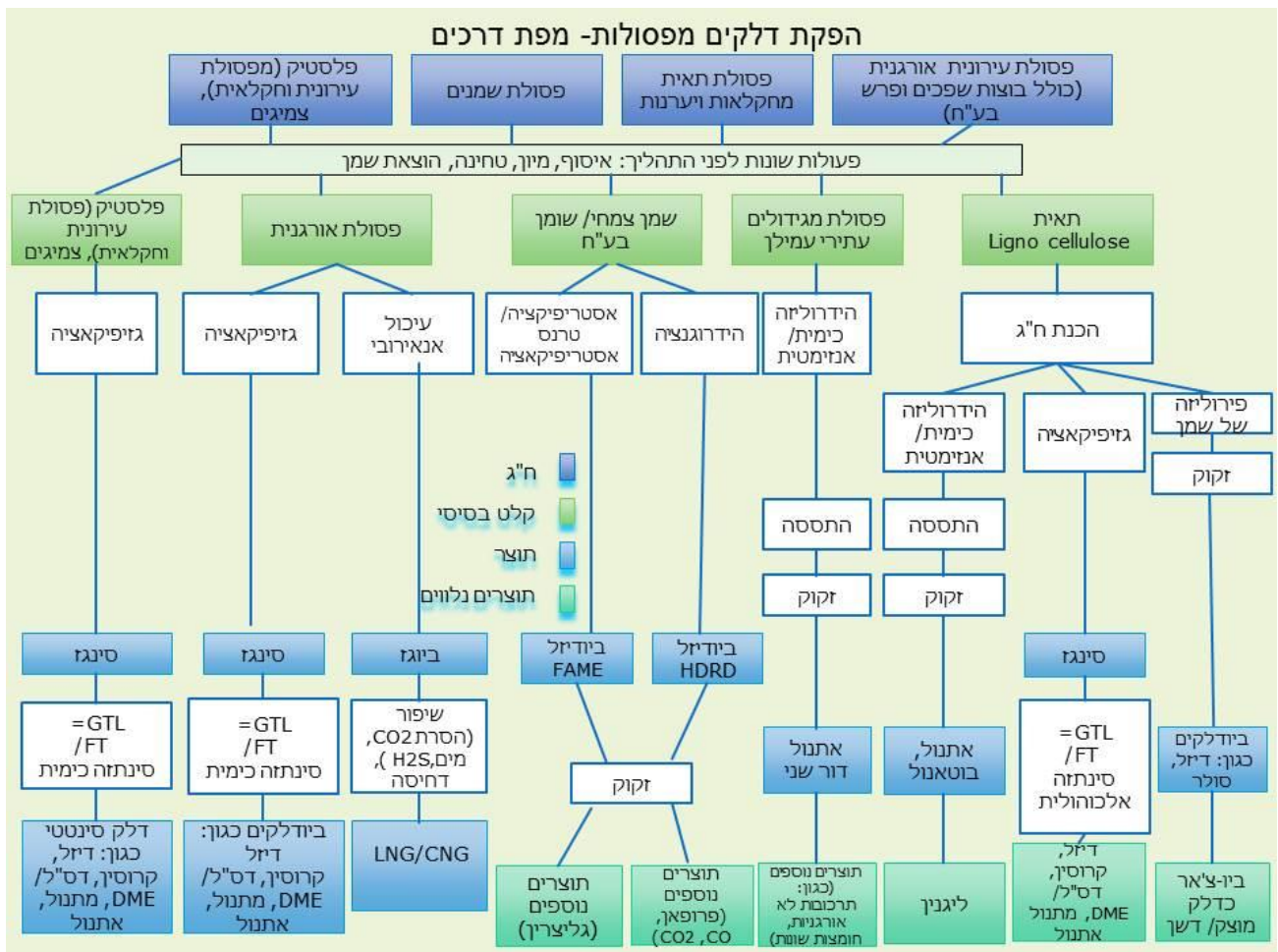
2.4. טכנולוגיות להפקת דלקים מפסולות

עיקר תצורות האנרגיה אליהן מומרות הפסולות כיום הינם חום ו/או חשמל כאשר עיקר השבת ביומסה לאנרגיה (או חומרים סינטטיים, כגון צמיגים ופלסטיק) נעשית בעיקר ע"י שתי משפחות עיקריות:

- משפחת הטכנולוגיות הביו-כימיות: עיכול אנאירובי והידרוליזה (ואלו המטפלות בשמנים: ההידרוגנציה והאסטרפיקציה)
- משפחת הטכנולוגיות התרמו-כימיות: גזיפיקציה, פירוליזה ופלסמה

ישנם מסלולים רבים המשקפים את תהליך ייצור הדלק החל מתת הזרם הקיים, הטכנולוגיה אליו הוא מוקצה, תהליך שדרוג תוצר הביניים וכלה בייצור וניקוי הדלק לשימוש בתחבורה. התרשים הבא מציג את מפת הדרכים להפקת דלקים מפסולות:

תרשים V - הפקת דלקים מפסולות: מפת דרכים



בשלב א' הוצגה סקירה מקיפה על הטכנולוגיות המוצגות בתרשים.

בשלב ב' (להלן), בשל היצע מוגבל של פסולות בישראל, מוקד הדיון לשתי הטכנולוגיות הבאות:

- **העיכול האנאירובי**, ממשפחת הטכנולוגיות הביוכימיות - להפקת CNG
- **הגזיפיקציה**, ממשפחת הטכנולוגיות התרמו-כימיות להפקת מתנול, אתנול או דלקים פחמימניים

השיקולים להתמקדות בהן נובעים מהגורמים הבאים:

- הן ה-CNG והן המתנול נבחרים במסגרת משרד האנרגיה כתחליף דלק לתחבורה (ממקור גז טבעי) וניתכן השתלבות יעילה של תוצרי הדלק המיוצר מפסולות בתשתיות שיוקמו.
- טכנולוגיית העיכול האנאירובי היא מהמיושמות ביותר מבין הטכנולוגיות שנסקרו (אם כי להשבה לחשמל ו/חום). כך גם טכנולוגיית הגזיפיקציה שהיא בעלת היישום הנרחב ביותר מבין משפחת הטכנולוגיות התרמו-כימיות לטיפול בפסולות (נדגיש כי טיפול בפסולות על ידן, נמצא בצעדיו הראשוניים ומתמקד גם הוא בייצור חשמל ו/או חום).
- לעומת הידרוליזה לאתנול צלולוזי, טכנולוגיית העיכול האנאירובי והגזיפיקציה מסוגלות לטפל בזרמי פסולת הטרוגניים המכילים שיעור גבוה של מזהמים וחומרים אחרים¹². זרמים אלו מהווים שיעור ניכר מהפסולת כיום בישראל. נדגיש כי זרמי הביומסה ה"נקיים יחסית" כגון: הגזם חקלאי ותוצרי לוואי נוספים, נאספים ו/או מטופלים כיום באופן לא יעיל ולעיתים לא חוקי (מפחמות, השארה בשדות, השלכה, הטמנה וכו').

תחום הפקת תחליפי הדלקים מפסולות נמצא בראשית דרכו. הדבר ניכר במספר היבטים, כשהעיקרי מביניהם הוא הרמה המועטת של הניסיון העולמי בתחום. מרבית הטכנולוגיות המוצגות במסמך אינן נמצאות כיום בשימוש מסחרי לצורך הפקת דלקים מפסולות (עיקר היישום הוא, כאמור, להשבה לחשמל ו/או חום). בשל זאת, נמצא קושי לאתר מידע מהימן בספרות המקצועית עבור חלק מהתהליכים שנסקרו (יפורט בהמשך).

תחזיות ה-IEA¹³ לא מנבאות לתחום קידום משמעותי בשנים הקרובות כאשר מחקריהם מבחינים בין שלוש קבוצות של טכנולוגיות אנרגיה המתחדשת:

1. טכנולוגיות בוגרות אשר מיושמות בעולם ביניהן: PV, רוח, הידרו, ביומסה (לחום ו/או חשמל) וצפויה התקדמות בישומן בשוקים בשנים הקרובות.
2. טכנולוגיות שנדרש עוד מאמץ לקידומן ביניהן: מכוניות חשמליות, FUEL ECONOMY
3. טכנולוגיות שאינן במסלול המועיד אותן ליישום משמעותי בשוקים ביניהן: **ביודלקים לתחבורה**, אנרגיה גרעינית, תרמו סולארי, ובנייה.

ניתוח כלכלי וסביבתי של טכנולוגיות שנמצאות בשלבי יישום כה מוקדם, בנוסף לתנאי שוק משלים משתנה (שוק הפסולת), טומן בחובו רמת אי וודאות גבוהה מאוד. לפיכך, יש להתייחס לממצאים כניתוח ראשוני גרידא.

¹² מצבו של שוק הפסולת כיום (לרבות פסולת צמחית) אינו מאפשר כיום מצאי סדיר של ביומסה מעובדת נקייה

¹³ <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,27685,en.html>

2.5. מטרת ומסגרת העבודה

מטרתו של מסמך זה היא לספק ניתוח כלכלי ראשוני להפקת תחליפי דלקים לתחבורה מעיכול אנאירובי של חומרים ביולוגיים רקבוביים וגזיפיקציה של פסולות בכלל (לרבות חומרים סינטטיים). הניתוח יכלול, על פי מצאי שלב א', את הכמות המקסימלית של תחליפי הדלק שניתן יהיה לייצר מהפסולת בישראל. נדגיש שוב, כי הניתוח מתבצע ברמת אי וודאות גבוהה מאוד ונדרש יהיה לבחון מחדש את הממצאים עם התקדמות המידע והיישום בשטח. כמו כן נדגיש כי הניתוח כמעט ואינו מפנים את שיקוליו של שוק הפסולת, בעיקר בכל הקשור להקצאת זרמי הפסולות לפתרונות עדיפים (על פי המדיניות המקודמת) כלכלית וסביבתית.

ישנו מידע מועט ביותר אודות תהליכי השבת הפסולת **לדלק** הן בהיבטים הפיסיקאליים (מקדמי התפוקה) והן בהיבטים הכלכליים (בעיקר עלויות תהליכי שדרוג הסינגז). המידע שכן נמצא בספרות העולמית, נלקח ממעבדות מחקר שבוחנות את התהליכים בתנאי מעבדה ולא בקנה מידה יישומי. כל מערך המחירים של התוצרים והתשומות אינו וודאי גם כן כמו גם עתיד הרגולציה בשוק הפסולת בישראל (זאת בייחוד לאור כל השינויים הצפויים בו).

תוצר הפרק הינו אומדן ראשוני לעלות הייצור החזויה (ש/ליטר או מ"ק) של דלק המיוצר משתי הטכנולוגיות שצוינו.

3. הפקת CNG מפסולות ע"י פירוק אנאירובי - ניתוח כלכלי

3.1. רקע

עיכול אנאירובי הוא פירוק ביולוגי של ביומסה ע"י מיקרואורגניזמים, בסביבה נעדרת חמצן שתוצרו ביוגז (50-75% מתאן). התהליך יכול לקרות באופן טבעי במטמנות, ביצות ובמתקנים ייעודיים, כפתרון לטיפול בפסולת אורגנית רקבובית המשיב אנרגיה. הביוגז שמיוצר יכול לשמש ישירות להפקת חשמל/ חום או לעבור תהליכי שדרוג לאיכות של גז טבעי (98% מתאן) באמצעות טכנולוגיות ניקוי, וניתן אח"כ להזינו לתשתית הגז הקיימת, לדחוס אותו ולהשמישו לתחבורה (כדלק CNG).

טכנולוגיה זו ידועה ומיושמת לטיפול בפסולות (כמה מאות מתקנים בעולם), אם כי ברובם ככולם של המקרים הביוגז מושב לחשמל ו/או לחום, ולכן ישנם נתונים רבים ומהימנים יחסית אודות היתכנות יישומה לצורך זה. אולם לצורך הפקת דלק לתחבורה (CNG) נדרשים תהליכים משלימים. השבת הביוגז (65% מתאן בממוצע) לביומתאן באיכות גז טבעי (98% מתאן), נמצא בפיגור מבחינת יישומו בשווקים והמידע שנמצא אודותיו בספרות חלקי וראשוני. הליכי הניקוי והשדרוג לביו-מתאן לא מיושמים בקנה מידה מסחרי ולכן נמצא קושי לאתר נתונים כלכליים מהימנים.

מטרתו של פרק זה היא להוסיף נדבך **נוסף** למידע הקיים והמקיף שנמצא בידי המשרד בנוגע לתחליף הדלק לתחבורה - CNG. המידע הקיים, שהוצג ונותר במסגרת עבודות ייעוץ קודמות¹⁴, מכיל ניתוח טכנו-כלכלי מקיף הלוך בחשבון את כלל המקטעים הרלוונטיים (ייצור, חלוקה וצריכה) של CNG המופק מגז טבעי. הפקת CNG מביו-גז שהופק מתהליך עיכול אנאירובי של פסולות אורגניות רקבוביות, מכיל נדבך נוסף לשרשרת האספקה של תחליף הדלק האמור ומטרת פרק זה היא לאמוד את ערכו.

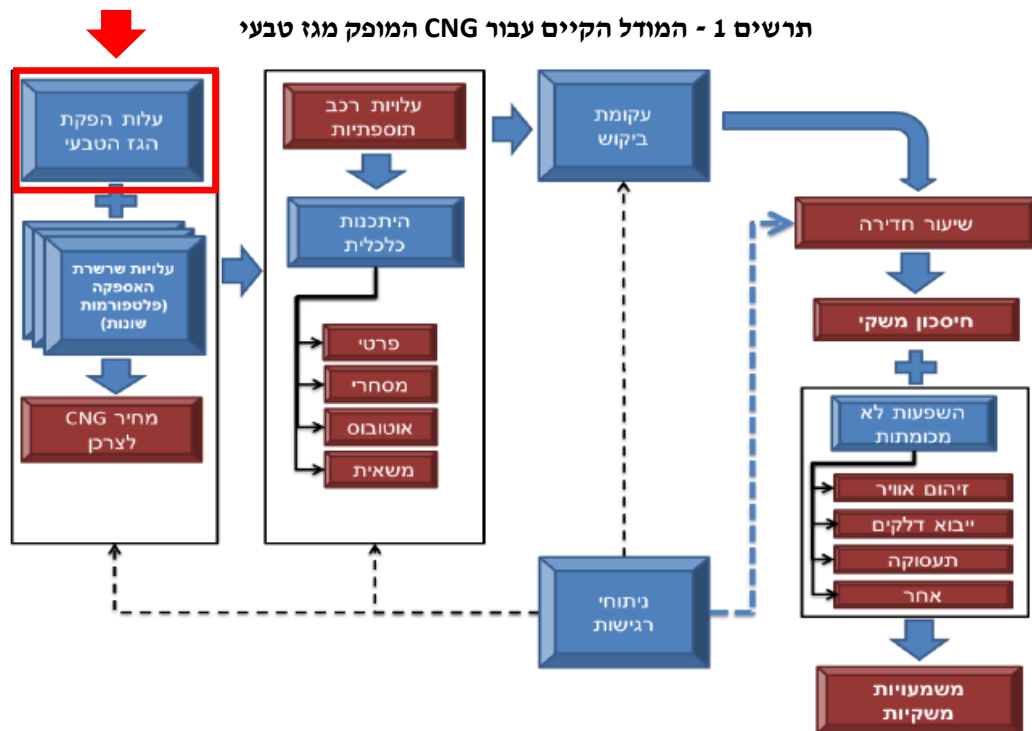
¹⁴ ראה - "שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל", קבוצת פארטו ו-DHV, 2012, <http://energy.gov.il/Subjects/EGOilReplacement/Documents/ORStageB.pdf>

3.2. המודל הקיים עבור CNG מגז טבעי

המודל הקיים שהוכן עבור המשרד, ומפורט בתרשים 1, הוכן במטרה לספק הערכה של מגוון המשמעויות המשקיות והצרכניות לשילוב גז טבעי דחוס בסקטור התחבורה. בשלב בראשון נאמד מחיר ה-CNG לצרכן הקצה כתלות בפלטפורמת התדלוק שתיבחר:

- תחנות תדלוק המחוברות לרשת ההולכה: תדלוק מהיר ממאגר, תדלוק איטי
- תחנות תדלוק המחוברות לרשת החלוקה: תדלוק מהיר ממאגר, תדלוק איטי
- תחנת אם בת

שיטות תדלוק אלו נבדלות בעלויות ההקמה, התפעול ומשך זמן התדלוק כאשר הבחירה הכדאית ביניהן תלויה ישירות במאפייני הביקוש לרכבי CNG וקצב חדירתם הצפוי לשוק. האחרונים אופיינו ונותחו אף הם במסגרת המודל הקיים, כמוצג להלן.



מקור: שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל, קבוצת פארטו ו-DHV, 2012

עלות הגז הטבעי שהונחה במודל הקיים עומדת על סך של \$6.5 ל-MMBTU והיא מהווה את עיקר העלויות התפעוליות של תחנות התדלוק שנבחנו.

התאמת המודל הקיים וניתוחו על בסיס CNG המופק מפסולות דורש התאמה של החוליה הראשונה במודל, קרי: עלות הפקת הגז הטבעי (המסומנת במסגרת אדומה). **יתר החוליות נותרות ללא שינוי ואינן תלויות במקור הגז הטבעי, ועל כן לא נותחו במסגרת עבודה זו.**

מטרת התחשיב שיוצג להלן היא להעריך את עלות הפקת הביומתאן מעיכול אנאירובי מבוקר של פסולות רקבוביות ושדרוג התוצרים לרמת גז טבעי ובחינת המשמעויות הנובעות ממנה.

3.3 הנחות התחשיב - עיכול אנאירובי להפקת CNG

מחיר הביומתאן שישמש כתחליף דלק CNG נגזר ממחיר ההקמה של מתקן עיכול, מחיר תפעולו, מחיר שדרוג תוצריו ומחיר סילוק התוצרים ממנו. בנוסף יכלול רכיב הכנסה הנובע מכך שהמתקן מייצר פיתרון לטיפול בפסולת שהינו בעל ערך כלכלי מנקודת מבט שוק הפסולת ולכן יש להכלילו בחישוב. נדגיש כי מערכי המחירים הצפויים לזרמי הפסולת הצפויים אינם קיימים ונסמכים על תחזיות בעלות שיעור טעות גבוה. העניין יטופל במסגרת בדיקות רגישות.

לצורך אמידה זו השתמשנו במקורות המידע הבאים:

- מסמך שימוע לקביעת התעריף עבור מתקנים לייצור חשמל מביו-גז¹⁵
- היכרות כותבי העבודה עם תכניות עסקיות של מתקני עיכול במסגרת בקשות לקבלת מענק מהמשרד להגנת הסביבה (קולות קוראים)
- סקר ספרות

אי הוודאות בניתוח גבוהה בשל כמה גורמים:

- עיקר פעילות העיכול האנאירובי של פסולת, בארץ ובעולם, מוכוונת לייצור חשמל. עלויות השדרוג לביומתאן נלקחו מהספרות ועל סמך יישום מחקרי / פיילוט בלבד.
- השינויים הצפויים בשוק הפסולת (הקמת מתקני קצה לטיפול בפסולת) צפויים לשנות את מערך הטיפול בפסולת ואת **עלויותיו**. העניין ייבחן במסגרת ניתוחי רגישות.

תחילה יוצגו אומדני עלות ההקמה של מתקן עיכול המייצר חשמל, על פי מקורות המידע שברשותינו. בשלב השני תונח התפלגות עלות זו לרכיבי העיכול ולרכיבי ייצור החשמל כאשר לראשון תתווסף עלות שדרוג הביוגז לאיכות גז טבעי.

¹⁵ http://www.pua.gov.il/Sip_storage/FILES/5/1765.pdf

3.3.1. עלויות הקמה

הנתונים הבאים מתבססים על פי מסמך השימוע לקביעת התעריף עבור מתקנים לייצור חשמל מביו-גז, שפרסמה רשות החשמל. הרשות הניחה מתקן המטפל ב-60,000 טון פסולת רקבובית בשנה.

טבלה 1- הנחות כלכליות - עלויות הקמה מתקן עיכול אנאירובי (כולל רכיב ייצור החשמל), אלש"ח

כמות פסולת מטופלת	60,000 טון	
עלות רכישת קרקע	4,440	לפי 370,000 ש"ח לדונם ממוצע באזור תעשייה
עלות פיתוח קרקע	2,544	לפי 212,000 ש"ח לדונם ממוצע באזור תעשייה
גנראטורים	5,600	
בלון אחסון ממברנאלי לגז	1,025	ללא ביסוס הבטון
מבנים	1,500	כולל מבני שירות, ביסוס בטון וכו
SCRUBBER	1,300	לטיפול במימן גופריתי
מערכת קירור + השבת חום	1,300	
חיבורים ומערכות לחשמל	950	
לפיד	600	
מיכלי עיכול אנאירובי*	20,240	
שונות	240	
תקורות	1,412	4% מסך העלויות ללא קרקע
בצ"מ	4,412	12.50% מעלויות ההקמה
סה"כ הקמת מתקן המייצר חשמל	45,563	
עלות הקמה לטון שנתי (שח/טון)	759.4	כולל רכיב ייצור חשמל

- מהנתונים עולה כי רשות החשמל מעריכה את עלות הקמת מתקן עיכול אנאירובי המשיב את האנרגיה לחשמל בכ-760 טון שנתי. התפלגות העלויות לאלו של שלב העיכול ולאלו של השבת הגז לחשמל מוערכת בכ-80% ו-20% בהתאמה.
- מנתוני קולות קוראים לבקשת מענקים להקמת מתקנים המשיבים פסולת לאנרגיה ע"י עיכול אנאירובי עולה כי טווח עלות ההקמה (לטון שנתי) נע בין 520 שח/טון ל-920 שח/טון (כולל רכיב ייצור החשמל). התפלגות רכיבי העלות לאלו הנובעים משלב העיכול ואלו של השבת הגז לחשמל מעלים התפלגות זהה לזו שהוצגה לעיל.
- הנחת התחשיב תהא שעלות הקמת מתקן עיכול אנאירובי המשיב לחשמל הינה 750 שח/טון שנתי. כאשר 80% מהעלות נובעת מרכיבי העיכול של הפסולת גרידא, סה"כ 600 שח עלות הקמה לטון שנתי.

3.3.2. עלות תפעול מתקן עיכול אנאירובי

עלות התפעול המוערכת על פי מסמך השימוע של רשות החשמל מפורטת להלן (כולל רכיב ייצור החשמל):

טבלה 2- עלות תפעול למתקן עיכול (כולל רכיב ייצור החשמל) - אלש"ח בשנה

כ"א	854.4	
תחזוקה וחלפים	1100	בעיקר של רכיב ייצור החשמל
תחזוקת מיכלים	506.00	2.50%
ביטוחים	198.70	0.50%
ארנונה	709	59 ש"ח/מ"ר
עלות תפעול ש"ח/טון שנתי	56.13	כולל רכיב ייצור חשמל, ללא המשך טיפול בפסולת

- עלות התפעול המוערכת ע"י רשות החשמל עומדת על כ- 56 ש"ח/טון (כולל רכיב ייצור החשמל וללא המשך טיפול וסילוק התוצרים). ההערכה היא כי עיקר העלות נובעת משלב העיכול מלבד סעיף התחזוקה והחלפים המשוך לרכיב ייצור החשמל (תחזוקת מיכלי העיכול מהווים סעיף נפרד). לפיכך, עלות התפעול לשלב העיכול בלבד מוערך בכ-37.8 ש"ח/טון שהם כ-67% מסך העלות השוטפת.
- מנתוני קולות קוראים עולה כי העלות השוטפת במתקני עיכול אנאירובי נעים בין 60 ל-80 ש"ח לטון כשרכיב ייצור החשמל מוערך בכ-25% עד 37% ממנו.
- הנחת התחשיב היא שעלות התפעול הינה כ-70 ש"ח לטון שנתי כאשר 30% ממנה משוך לרכיב הפקת החשמל. לפיכך, עלות התפעול לטון פסולת, לרכיב העיכול בלבד מוערך בכ-49 ש"ח/טון.

3.3.3. שיעור תשואה במתקן עיכול אנאירובי

מחיר ההון המשוקלל (WACC) על פיו יחושב החזר ההון על ההשקעה, יתבסס על הנחות המימון והמחירים הבאים ויעמוד על כ-16%:

טבלה 3 - שיעור תשואה במתקן עיכול אנאירובי

WACC*	שיעורו בהון	מחיר ההון	הון זר
9%	70%	6%	הון עצמי
	30%	20%	

* בהנחת שיעור מס חברות של 25% ו-15 שנות החזר

¹⁶ בדומה לניתוחים כלכליים קודמים שהוגשו למשרד

3.3.4. עלות שדרוג תוצרי הביו-גז לביו-מתאן

מכיוון שעיקר פעילות השבת הפסולת לאנרגיה באמצעות עיכול אנאירובי נעשית לצורך הפקת חשמל ו/או חום, נמצא קושי לאתר עלויות להליך שדרוג הביו-גז לביומתאן לצורך הפקת CNG. לפיכך, נעשה שימוש במקדמי עלויות שנמצאו בספרות ומפורטים בטבלה הבאה:

טבלה 4- שיטות שדרוג הביו-גז לרמת גז טבעי

חסרונות	יתרונות	ריכוז המתאן בגז	שיעור הגז המופק	עלות שדרוג (€/מ"ק ביוגז)*	טכנולוגיה
▪ זרז יקר	▪ הסרה כמעט מוחלטת של H ₂ S	98%	90%	0.28	ספיגה כימית
▪ אין ספיגה מוחלטת של המימן הגופריתי בגלל רמת החומציות המשתנה ▪ המימן הגופריתי פוגע במתקנים ▪ תהליך הדורש הרבה מים	▪ מסיר גזים וחלקיקים ▪ שיעורי הפקה ומתאן גבוהים ▪ טכניקה יחסית פשוטה ▪ נטרול של גזים קורוזיביים	98%	94%	0.15	קרצוף ע"י מים בלחץ גבוה
▪ יש צורך בשלב נוסף להסרת המימן הגופריתי	▪ מתאן מועשר ▪ צריכת אנרגיה נמוכה ▪ מעט פליטות ▪ ספיגה של חנקן וחמצן	98%	91%	0.26	ספיגה באמצעות לחץ
▪ דורש הרבה ציוד	▪ ניתן להפיק כמויות גדולות עם טהורות גבוהה ▪ אין שימוש בכימיקליים בתהליך	91%	98%	0.40	הפרדה קריוגנית
▪ תפוקה נמוכה של מתאן ▪ יש צורך בשלב נוסף להסרת המימן הגופריתי ▪ הממברנה יקרה	▪ הממברנה קומפקטית ובעלת משקל קל ▪ דורש מעט תחזוקה ▪ תהליך פשוט	90%	78%	0.22	הפרדה באמצעות ממברנה

מקור: ¹⁷de Hulu, et al. (2008)

מהטבלה עולה כי לשיטת הקרצוף ע"י מים בלחץ גבוה יתרון כלכלי ותפעולי בהשוואה ליתר השיטות. השיטה נמצאה זולה יותר וכזו שמשיבה כמות גדולה יותר של גז ובשיעור מתאן גבוה (98%).

לפיכך, הנחת העבודה היא כי שיטת השדרוג תהיה קרצוף ע"י מים בלחץ גבוה ובעלות של 0.15 אירו (כולל עלויות הון) למ"ק ביוגז המכיל 60% מתאן.

¹⁷ de Hulu, J., Maassen, J. I. W., van Meel, P. A., Shazad, S. & Vaessen, J.M.P. (2008). Comparing different biogas upgrading techniques - Final report. Eindhoven University of Technology & DMT. <http://students.chem.tue.nl/ifp24/BiogasPublic.pdf>

3.3.5. מקדמי התפוקה והיצע כמויות הפסולת לעיכול אנאירובי

בסעיף זה יוצגו היצע כמויות הפסולת האורגנית לעיכול האנאירובי, תחת כמה תרחישים. הראשון, תרחיש הבסיס, מתאר את היצע הביומתאן שניתן יהיה להפיק מהטכנולוגיה תחת אומדני הכמויות שהוצגו בשלב א' של העבודה. לאחר מכן יוצגו נתונים זהים עבור תרחיש בו כמות פרש בע"ח כפולה. הבחירה בתרחיש זה נובעת מנתונים מקדימים¹⁸ של הוועדה הבין משרדית לטיפול בפסולת חקלאים שעל פיהם מוערך כי כמות פרש בע"ח הינה גבוהה משמעותית.

טבלה 5 - כמות הביומתאן (98% תרחיש הבסיס)

תתי זרמים	סך היצע (אלפי טון בשנה)	היצע לאחר מדיניות משרד להגנ"ס (אלפי טון בשנה)	מקדם תפוקה - כמות ביומתאן (98% מתאן) (מ"ק / טון פסולת)	סה"כ כמות ביומתאן (אלפי מ"ק בשנה) - לאחר מדיניות משרד להגנ"ס	סה"כ כמות ביומתאן (אלפי מ"ק בשנה) - לאחר מדיניות משרד להגנ"ס
פסולת עירונית אורגנית רקבובית	960	960	135	129,600	129,600
פרש בקר יבש / פרש לולים*	1,900	1,100	112.48	123,728	213,712
פרש בקר רטוב*	2,800	560	17.5	9,800	49,000
בוצות שפכים	330	330	12.59	4,155	4,155
סה"כ פסולת רטובה אורגנית	5,990	2,950			
סה"כ כמות ביומתאן (אלפי מ"ק בשנה)					
				267,283	396,467

* פרש הצאן לא הוזכר מכיוון שהינו יבש ומיוצב באופן טבעי ואינו נדרש לטיפול נוסף לפני סילוקו לשימוש חקלאי (דישון/טיוב קרקע, פיתרון מועדף כיום על המשרד להגנת הסביבה (על פני השבה לאנרגיה בלב ולדלקים בפרט)



הפסולת האורגנית הרקבובית מסוגלת לספק כ-323 אלף שעט"ן תחת תרחיש ההקצאה המקסימלי וכ-218 אלף שעט"ן לאחר מדיניות המשרד להגנת הסביבה¹⁹. כמות זו מהווה כ-5.5% וכ-3.7% בהתאמה, מסך צריכת הדלקים לתחבורה בשנת 2013, העומדת על כ-5,789 אלפי שעט"ן.

¹⁸ עפ"י שיחה עם משתתף בוועדה צפויים נתונים אלה להשתנות כבר בשבועות הקרובים (פברואר 2014)
¹⁹ על-פי מקדם המרה של 0.000815587 שעט"ן למ"ק ביוגז.

3.3.6. בדיקת רגישות

במסגרת תרחיש זה ייבחנו הכמויות תחת שני תרחישים. המקסימאלי יהיה כמו תרחיש הבסיס מלבד **זרמי פרש שכמותם תהיה כפולה**. השני, תרחיש המשרד, יהיה על פי תחזית מוקדמת של הוועדה הבין משרדית של כמויות הפסולת "שיש לגביהם מחלוקת לגבי הטיפול", להגדרתם. הכוונה לפסולות פרש הנדרשות טיפול נוסף/חלופי. נזכיר את זרם הצאן אשר מטבעו מיוצר מיוצב ויכול לדשן קרקעות קרובות למקום יצורו.

טבלה 6 - כמות הביומתאן (98%), בדיקת רגישות

תתי זרמים	סך היצע (אלפי טון בשנה)	היצע לאחר מדיניות משרד להגנ"ס (אלפי טון בשנה)	מקדם תפוקה - כמות ביומתאן (98% מתאן) (מ"ק / טון פסולת)	סה"כ כמות ביומתאן (אלפי מ"ק בשנה)	סה"כ כמות ביומתאן (אלפי מ"ק בשנה) - לאחר מדיניות משרד להגנ"ס
פסולת עירונית אורגנית רקבובית	960	960	135	129,600	129,600
פרש בקר יבש / פרש לולים	3,800	2,470	112.48	427,424	277,825.6
פרש בקר רטוב	5,600	2,352	17.5	98,000	41,160
בוצות שפכים	330	330	12.59	4,155	4,155
סה"כ פסולת רטובה אורגנית	5,990	2,950			
סה"כ כמות ביומתאן (אלפי מ"ק בשנה)					
				659,179	452,740



תחת כמויות אלו עולה כי כמות השעט"ן שניתן לייצר מהפסולות הרקבוביות עומדת על כ-11% מסך צריכת הדלקים לתחבורה בתרחיש המקסימלי וכ-7% ממנה לאחר הפנמת מדיניות המשרד.

3.3.7. עלויות והנחות נוספות בחלופת העיכול האנאירובי

להלן הנחות נוספות שנדרשו לצורך תחשיב העלויות הכולל:

טבלה 7 - הנחות נוספות לתחשיב העיכול האנאירובי

מחיר כניסה - טיפול בפסולת	120	ש/טון פסולת
תשואה נדרשת	9.00%	WACC
שיטת שדרוג	קיצוץ ע"י מים בלחץ גבוה	
עלות השדרוג (ש' למ"ק ביוגז - 60% מתאן)	0.7215	
עלות הקמה לטון שנתי	600	ש/טון פסולת
שנות החזר	15	
החזר הון (רכיב העיכול)	83.44	ש/טון פסולת
עלות תפעול לטון (לא כולל שדרוג הגז וטיפול בתוצרים)	49	ש/טון פסולת
עלות הובלה לקומפוסטציה	70	ש/טון פסולת
מחיר כניסה לקומפוסטציה (ראה הסבר מטה)	80	ש/טון פסולת
שיעור איבוד מסה (אידיוי + ביוגז)	20%	
שע"ח ש/אירו	4.81	
שע"ח ש/דולר	3.53	
MMBTU/מ"ק ביומתאן	0.036	

- מחיר הכניסה למתקן העיכול צריך לשקף את המחיר האלטרנטיבי הצפוי לטיפול בפסולת עירונית רקבובית. מאחר ותהליך הקומפוסטציה מהווה הן טיפול משלים והן טיפול תחליפי לעיכול האנאירובי לא סביר כי מחיר הכניסה למתקן העיכול יהיה גבוה מזה של הקומפוסט, זאת ביחוד לאור העובדה כי במתקן עיכול מערך ההכנסה כולל את מחירי התוצרים (חשמל/חום).
- מחיר הכניסה למתקן קומפוסטציה צפוי להיות מושפע ממיקומו הגיאוגרפי של המתקן, ללא קשר לעלויות ההובלה (ממתקן העיכול אליו). מתקני קומפוסטציה פתוחים זולים משמעותית מאלו הסגורים וקיומם מותנה באישור המשרד להגנת הסביבה, שמאפשר זאת רק דרום הארץ (בשל החשש ממטרדי ריח). לפיכך, צפויה תחליפיות בין מחיר הכניסה למתקן למחיר ההובלה אליו (ככל שהמתקן מרוחק יותר, מחיר הכניסה יהיה זול יותר אך ההובלה תתייקר).
- הנחת התחשיב היא כי מחיר סילוק השאריות מהמתקן הינם 150 ש"ט/טון (מחיר כניסה לקומפוסטציה+הובלה). מחיר כניסה של 80 ש"ט לטון הינו מחיר המאפיין מתקני קומפוסט פתוחים. (הפניית הוצאה למתקן קומפוסט קרוב יותר יצמצם את עלויות ההובלה אך מחיר הכניסה צפוי להתייקר לכ-120 ש"ט לטון). נציין כי שוק הקומפוסט עצמו ניצב מול תנאי אי וודאות (איכות התוצר מכל זרם, היצע מתקני הטיפול וכו'). לכל אלו השפעות ניכרות על מחירים וייתכנו התייקרויות (מעבר למחיר הנורמאלי). במסגרת ניתוחי הרגישות ייבחנו שינויים במחירי הכניסה למתקן העיכול ובמחירי סילוק התוצרים.
- עיקר שיעור איבוד המסה (הירידה במשקל) של הפסולת האורגנית מתבצע בשלב הייצוב האירובי (תהליך הקומפוסטציה). קיימים מתקני עיכול המשלבים רכיב של ייצוב ביולוגי (חלקי) בשטח המתקן (אחת הסיבות לכך היא הרצון להפחית את מטרד הריח הנובע מהבוצה הנותרת). במתקנים אלו צפויה ירידת מסה משמעותית יותר (מתהליך הקומפוסטציה צפויים להתאדות בכעוד 30% מהנוזלים בפסולת (סה"כ 40-50% איבוד מסה). עם זאת, במודל שלהלן לא הונח כי המתקן יכיל רכיב ייצוב ביולוגי ולכן שיעור ירידת המסה נמוך יותר ומוערך בכ-20%.
- ההערכה היא כי הפסולת מגיעה למתקני ההפקה נקייה וממוינת.
- לא נמצאה רגישות למחיר ההון שנלקח בתחשיב

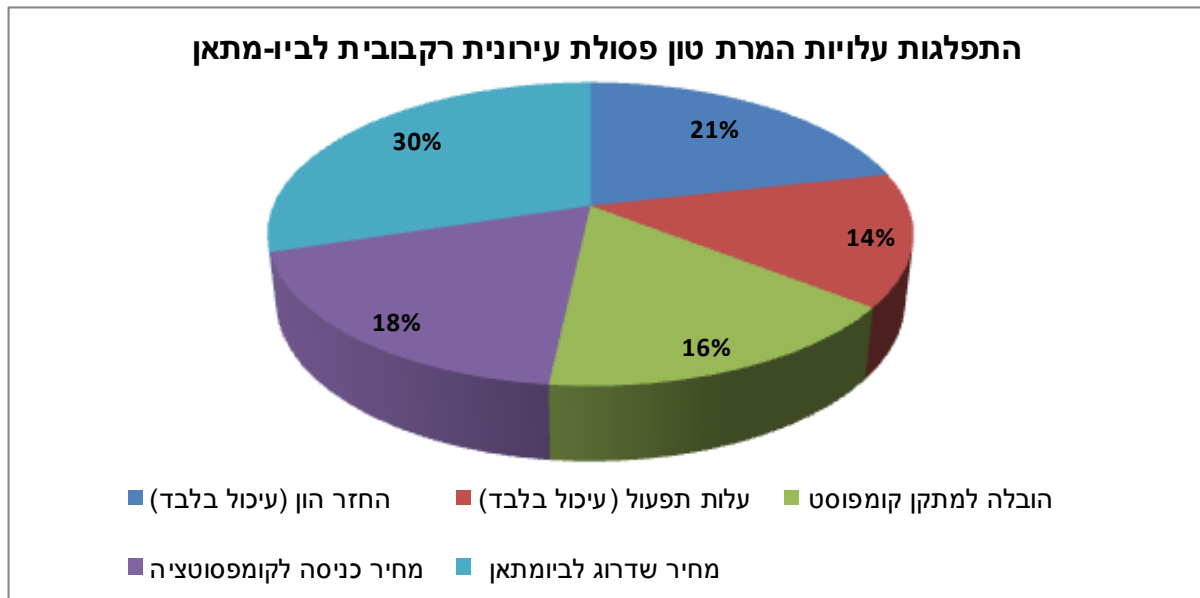
3.4. תוצאות הניתוח הכלכלי

טבלה 8- ניתוח כלכלי - הפקת ביו-מתאן מפסולות

זרם:	פסולת עירונית רטובה	פרש בקר יבש / פרש לולים	פרש בקר רטוב	בוצות שפכים
טון נכנס	1	1	1	1
מחיר טיפול בפסולת – ש/טון	120	120	120	120
החזר הון (עיכול בלבד) - ש/טון	74	74	74	74
עלות תפעול (עיכול בלבד) - ש/טון	49	49	49	49
כמות חומר גלם להמשך טיפול ביולוגי (טון)	0.8	0.8	0.8	0.8
הובלה למתקן קומפוסט - ש	56	56	56	56
מחיר כניסה לקומפוסטציה - ש	64	64	64	64
מחיר שדרוג לביומתאן (הון+תפעול) ש	103.6	86.3	13.4	9.7
כמות ביומתאן – מ"ק (98% מתאן)	135	112.48	17.5	12.59
כמות MMBTU	4.90	4.08	0.64	0.46
סה"כ עלות ייצור מטון פסולת (ש/טון פסולת)	227.06	209.77	136.87	133.10
עלות ייצור ש/ממבטו MMBTU	46.32	51.36	215.40	291.16
עלות ייצור \$/ממבטו MMBTU	13.12	14.55	61.02	82.48

כך לדוגמא: עבור טון פסולת עירונית רטובה, הכנסות המתקן יהיו 120 ש"ח וההוצאות בגינו יעמדו על כ-227 ש"ח²⁰ המתפלגים באופן הבא:

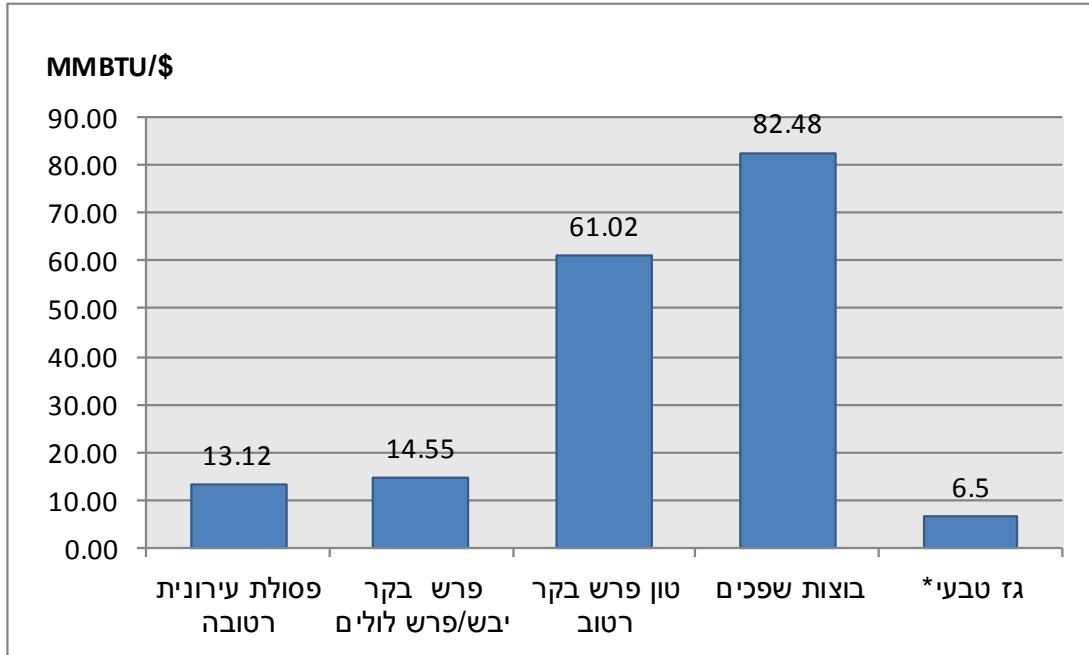
תרשים 2 - התפלגות עלויות המרת טון פסולת עירונית רקבובית לביומתאן



²⁰ ייתכנו הבדלים מזעריים הנובעים מעיגול תוצאות התחשיב.

תרשים 3 מציג את עלויות הפקת MMBTU מגז טבעי לעומת עלויות ההפקה מפסולות אורגניות:

תרשים 3 - עלות ייצור ביומתאן, MMBTU/\$



* עבור גז טבעי העלות מתייחסת לאומדן עלות הרכישה (על פי המודל הקיים)

עלות ייצור הביומתאן מוערכת בכ-46.3 MMBTU/ש (עבור פסולת עירונית רטובה). זוהי העלות הנמוכה ביותר מבין הזרמים שנבחנו (זאת בשל מקדם התפוקה הגבוה של הזרם). לצורך השוואה, עלותו של הגז הטבעי על פי הנחת המודל הקיים במשרד לתחנות תדלוק של גז טבעי דחוס, עומדת על 23 MMBTU/ש (\$6.5). הזרם ממנו הכי יקר להפיק את הביומתאן הינו בוצות שפכים, עבורו עלות הייצור מאמירה לכ-291 MMBTU/ש (\$82.5).

3.4.1. בדיקות רגישות

במסגרת בדיקות הרגישות ייבחנו התרחישים הבאים:

- מחירי כניסה למתקן העיכול וסילוק תוצרים לקומפוסט-ייבחנו שני מצבים: האחד שמחיר הכניסה למתקן העיכול יעלה בכ-50 ש"ח לכ-170 טון (תרחיש זה עלול להיווצר בתנאי שוק אוליגופולי בשוק הקומפוסט שיעלה את המחיר האלטרנטיבי לטיפול בפסולות). השני, שמתקן הקומפוסט יוקם בצמוד למתקן העיכול ועלויות ההובלה יפחתו לכ-30 ש"ח לטון.
- מחיר שדרוג הביומתאן יאמיר לכ-0.4 אירו לטון- עלותה של טכנולוגיית השדרוג היקרה ביותר (על פי טבלה 4) שהיא הפרדה קריוגנית.
- ייבחן מחיר הכניסה התיאורטי של הפסולת למתקן העיכול (ש"ח/טון) שתשווה את עלות ייצור הביו-מתאן (במונחי \$/MMBTU) לעלותו המקבילה מגז טבעי (כזכור \$6.5)²¹.

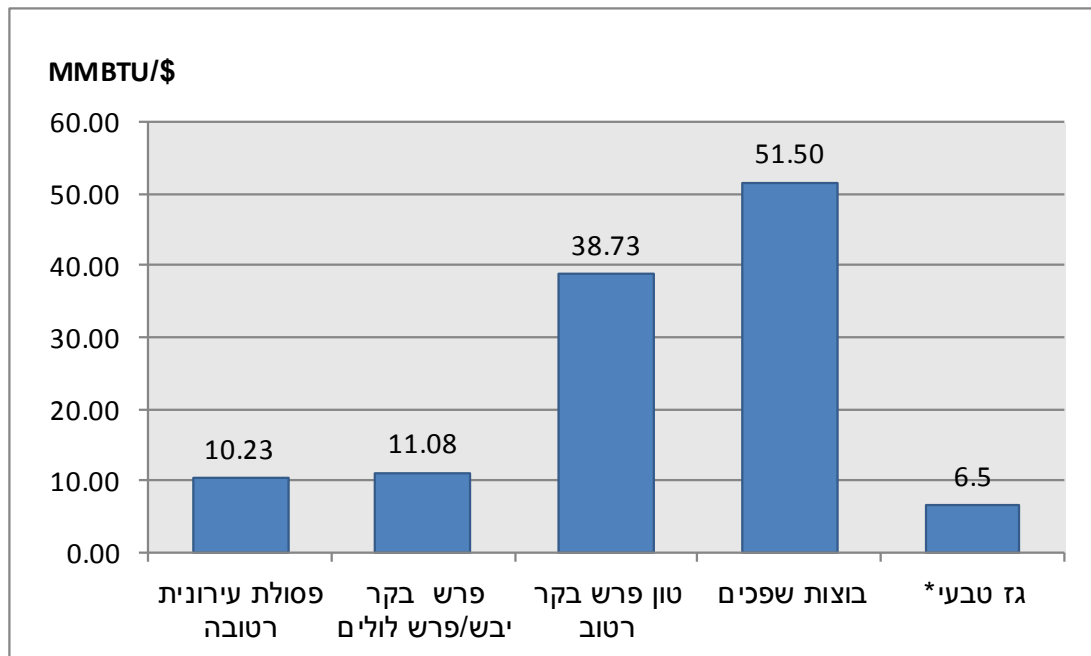
עבור כל אחד מהתרחישים יתר ההנחות יותרו בעינן.

²¹ כמו כן ייבחן מקדם התפוקה (התיאורטי גם כן) שנייב את אותה עלות.

מחיר הכניסה למתקן העיכול יעלה 170 מ"טון

מחירי כניסה גבוהים יותר אותו משלמות הרשויות ליזם מפעיל מתקן העיכול מוזילים את עלות הייצור במתקן. רגישות עלות הייצור למחיר הכניסה למתקן משתנה בין הזרמים הנבחרים. ככל שכמות הביומתאן המיוצרת מכל טון פסולת גבוהה יותר, כך קטנה הרגישות במונחי מ"טון/מ"ק ביומתאן. לכן הזרם שהושפע הכי פחות הוא זרם הפסולת העירונית הרקבובית שעלות ייצור הביומתאן ממנה פחת לכ-10.2 MMBTU/\$, הוזלה של כ-22% מהעלות המקורית (לעומת ייקור של 29% במחיר הכניסה). עבור זרם בוצות השפכים ההשפעה הייתה ניכרת יותר ועלות ייצור הביומתאן ממנו פחתה לכ-57 MMBTU/\$, הוזלה של כ-35%.

תרשים 4 - עלות ייצור ביומתאן MMBTU/\$ – במחיר כניסה 170 מ"טון פסולת



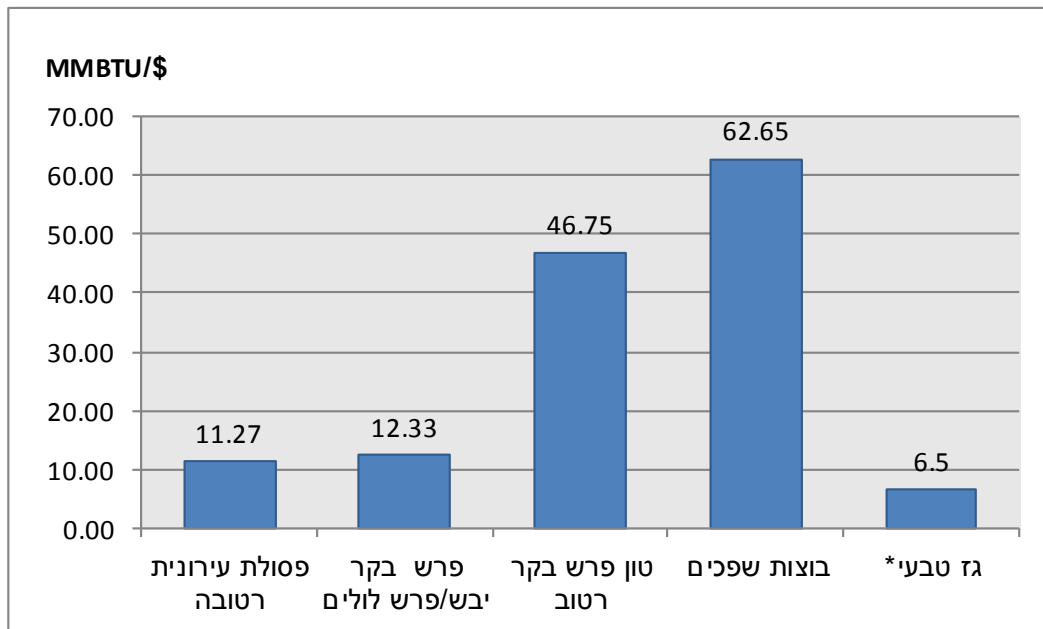
* עבור גז טבעי העלות מתייחסת לאומדן עלות הרכישה (על פי המודל הקיים)

מניתוח זה מתקבל שאין בהוזלה זו די על מנת להפוך את ייצור הביומתאן משתלם לעומת האלטרנטיבה של רכישת גז טבעי (שכאמור מוערכת בכ-6.5 MMBTU/\$).

מחיר ההובלה יקטן לכ-30% לטון

רגישות מחיר הייצור של הביומתאן לעלות סילוק התוצרים (ובכללם עלות הובלה למתקן הקומפוסט) משתנה בין הזרמים הנבחנים. ככל שכמות הביומתאן המיוצרת מכל טון פסולת גבוהה יותר, כך קטנה הרגישות למחירי הסילוק (במונחי \$/MMBTU). לכן, הזרם שהושפע הכי פחות הוא זרם הפסולת העירונית הרקבובית, בו עלות ייצור הביומתאן פחת לכ-11.27 MMBTU/\$ – הוזלה של כ-14% מהעלות המקורית. עבור זרם בוצות השפכים ההשפעה הייתה ניכרת יותר ועלות ייצור הביומתאן ממנו פחתה לכ-24% MMBTU/\$, הוזלה של כ-63.

תרשים 5 - עלות ייצור ביומתאן, MMBTU/\$, במחיר הובלה לקומפוסט של 30 \$/טון



* עבור גז טבעי העלות מתייחסת לאומדן עלות הרכישה (על פי המודל הקיים)

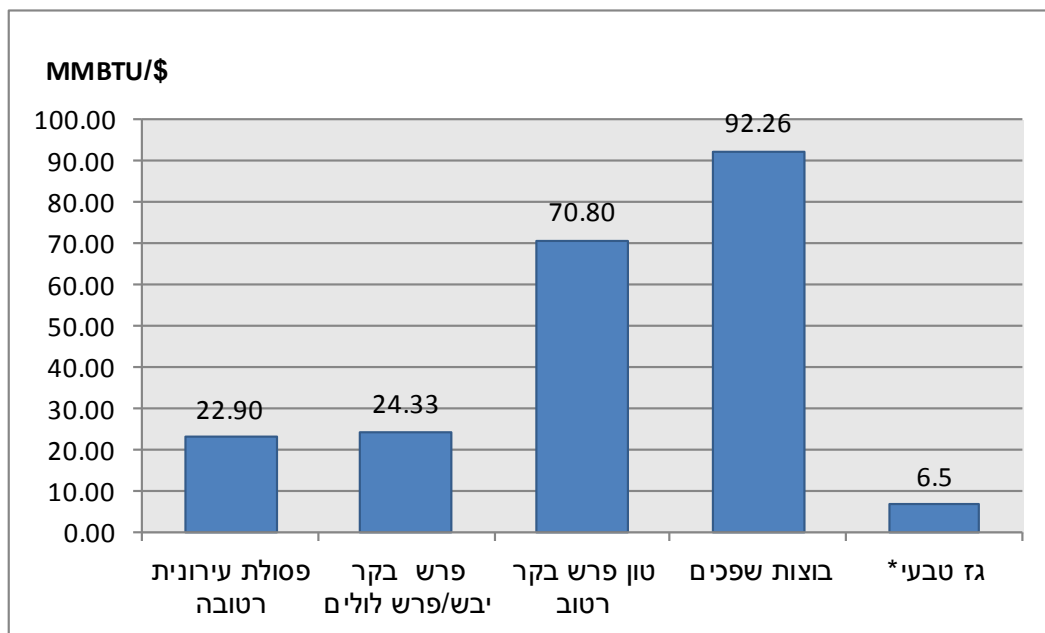
גם במקרה זה, אין בהוזלה זו די על מנת להפוך את ייצור הביומתאן משתלם לעומת האלטרנטיבה של רכישת גז טבעי (שכאמור מוערכת בכ-6.5 MMBTU/\$).

ייקור תהליך שדרוג הביוגז

שיטת שדרוג הביוגז שנלקחה בחשבון בתרחיש הבסיס היא שיטת הקרצוף ע"י מים בלחץ שנמצאה הזולה ביותר והיעילה ביותר במונחי תפוקת הביומתאן. עם זאת, ישנם מזהמים אשר לא מסולקים על ידה במלואם וכן נמצא מקום לבחון את השתנות עלות ייצור הביומתאן כאשר שיטת השדרוג תתייקר לרמתה של עלות שיטת ההפרדה הקריוגנית - כ-0.4 אירו לטון שהם 1.9 \$/מ"ק ביוגז (לעומת 0.7 \$/מ"ק בתרחיש הבסיס).

לייקור זו השפעה ניכרת על עלויות הייצור עבור כל הזרמים הנבחנו אם כי ברגישויות משתנות. בשונה, מבדיקת הרגישות הקודמת, הזרמים שניתן להפיק מהם כמות גדולה של ביוגז יהיו רגישים יותר לשינוי. הנתונים מוצגים בתרשים להלן.

תרשים 6 - עלות ייצור ביומתאן \$/MMBTU - במחיר שדרוג ביוגז של 1.9 \$/מ"ק ביוגז (65% מתאן)



* עבור גז טבעי העלות מתייחסת לאומדן עלות הרכישה (על פי המודל הקיים)

כפי שעולה מהניתוח, עלות ייצור הביומתאן מפסולת עירונית האמירה לכ-23 \$/MMBTU (לעומת 13.6 בתרחיש הבסיס), ייקור של 70% בעלות הייצור.

השוואה לעלות הייצור מגז טבעי

מחיר הכניסה למתקן הטיפול מהווה הכנסה לבעל המתקן ולכן ככל שהוא יהיה גבוה יותר כך העלות לייצור הביו-מתאן מהפסולת תקטן. מחיר הכניסה של פסולת עירונית רטובה שיניב עלות ייצור MMBTU של כ-6.5\$, הינו 235 ₪ לטון, פי 2 ממחיר הכניסה המקורי (כאשר כל יתר ההנחות קבועות ושוות לאלו של תרחיש הבסיס). מקדם התפוקה שיניב (תחת מחיר כניסה של 120 ₪/טון) את עלותו של MMBTU גז טבעי הינו 275 מ"ק ביו-מתאן (98%) מטון פסולת עירונית. מקדם זה גבוה פי 2 מהמקדם שנלקח בתרחיש הבסיס.

3.4.2. מסקנות

- הזרמים הפיסיבליים ביותר כלכלית, להפקת ביומתאן מפסולת ע"י עיכול אנאירובי הם הזרם האורגני הרקבובי המצוי בזרם הפסולת הביתית (המופרד והמעורב) והפרש היבש.
- עבור המצב המיטבי שנבחן, מחיר כניסה של 170 ₪ לטון פסולת, הפער בין עלות ייצור הגז מגז טבעי לעומת יצורו מביומסה הינו 57%, לרעת חלופה זו. עבור יתר המצבים שנבחנו, הפער הולך וגדל.
- ניתוחי הרגישות מאירים את ההבדל בין הזרמים מבחינת רגישותם לשינויים במחירים. מחירי כניסה וסילוק פסולות (שהם במונחי ₪/טון פסולת) ישפיעו פחות על זרמים בעלי מקדמי תפוקה גבוהים, במונחי ₪/מ"ק MMBTU. לעומת זאת, מחירים שמתייחסים לעלויות השדרוג (שהן במונחי ₪/מ"ק ביוגז או ביומתאן) משפיעים על עלות ההפקה, בכל זרם, באופן הפוך. ככל שהזרם "מייצר" יותר ביוגז אזי עלויות שדרוג הגז ודחיסתו משפיעות על מחירו באופן משמעותי יותר. במילים אחרות ככל שהזרם מפיק יותר גז, עלות הפקת הדלק ממנו רגישה למחירי השדרוג באופן משמעותי יותר מזרמים אחרים.
- רגישות עלות הייצור למחיר הכניסה למתקן משתנה בין הזרמים הנבחנו. ככל שכמות הביומתאן המיוצרת מכל טון פסולת גבוהה יותר, כך קטנה הרגישות למחירים שהינם במונחי ₪/מ"ק ביומתאן (להבדיל מש"ח/טון פסולת). לכן הזרם שהושפע הכי פחות הוא זרם הפסולת העירונית הרקבובית.

4. הפקת מתנול, דלקים פחמימניים ואתנול מגזיפיקציה - ניתוח כלכלי

4.1. רקע ומטרת הניתוח

במסגרת עבודה זו, יופנה הדגש על יישומה של טכנולוגיית הגזיפיקציה להשבת פסולות לתחליפי דלקים לתחבורה. מטרתו הפרק היא לספק ניתוח כלכלי ראשוני להפקת תחליפי דלקים לתחבורה מגזיפיקציה של פסולות. כפי שיפורט בסעיף הבא ישנו מידע מועט ביותר אודות תהליכי השבת הפסולת לדלק הן בהיבטים הפיסיקאליים (מקדמי התפוקה) והן בהיבטים הכלכליים (בעיקר עלויות תהליכי שדרוג הסינגז). כמו כן, כל מערך המחירים של התוצרים והתשומות אינו וודאי גם כן כמו גם עתיד הרגולציה בשוק הפסולת בישראל (זאת בייחוד לאור כל השינויים הצפויים בו).

הטכנולוגיה מסוגלת לטפל כמעט בכל הפסולות הקיימות בזרם העירוני/תעשייתי ולכן השימוש הפוטנציאלי בה רחב. היא מסוגלת לטפל גם בפסולות מעורבות ובעלות שיעור מזהמים גבוה יחסית. במסגרת תרחיש הקצאת הפסולת שפורט נרחבות בשלב א' לדו"ח זה, הופנו לטכנולוגיה פסולות עירוניות לסוגיהן (לרבות פסולת תעשייתית) ופסולות הגזם. נציין כי עבור זרם הגזם קיימות אלטרנטיבות לטיפול להשבה לדלקים כגון הידרוליזה (כמפורט במבוא).

תוצרו של הפרק הינו אומדן ראשוני לעלות הייצור החזויה (ש/ליטר או מ"ק) של הדלק המיוצר, על פי מקור הפסולת (פסולת עירונית או גזם) לצד הערכת כמויות תחליפי הדלק המקסימליות שניתן יהיה להפיק. הדלקים שייבחנו הינם: מתנול, BTL ואתנול.

4.1.1. גזיפיקציה לדלקים²²

טכנולוגיית הגזיפיקציה נמנית בין הטכנולוגיות התרמו-כימיות להשבת פסולות לאנרגיה. התהליך הוא בעיקרו פירוק תרמי של חומרים אורגניים, בתנאי חמצן חסר וחשיפה לטמפרטורות גבוהות (בין 600-1400 מ"צ), שתוצרו סינגז. להלן שלבי התהליך להפקת תחליפי דלקים מפסולות בשיטת הגזיפיקציה:

תרשים 7 - שלבי תהליך הפקת תחליפי דלקים מפסולות בשיטת הגזיפיקציה



²² הרקע מציג בתמציתיות את עיקרי הסקירה הספרותית (ראה: "שילוב טכנולוגיות הפירוק הגזי במערך הטיפול בפסולות בישראל", חברת כיוון, 2011)

כפי שפורט נרחבות בשלב א', ישנם 4 שימושים מרכזיים של סינגז שנבחנו להפקת דלקים נוזליים (כאשר חומר הגלם הוא ביומסה ו/ או פסולות):

- **סינתזה של פישר-טרופס** - תהליך קטליטי כימי שמשמשים בו מאז 1920 להפקת דלקים נוזליים מסינגז המיוצר מפחם וגז טבעי. המימן והפחמן החד חמצני בגז מומרים בתהליך הסינתזה לשרשראות פחממניות שניתן לייצר מהם מגוון דלקים פחמימניים. על פי מחקרי משרד האנרגיה האנגלי גודל המתקן המינימלי המאפשר יתרונות לגודל עומד על כ- 1,520 טון ביומסה מיובשת ביום (אם כי ישנם גופים המעריכים כי הכמות קטנה יותר).
- **סינתזה למתנול** - תהליך בו מומר הסינגז למתנול באמצעות קטליזטור (זרז) שמכיל נחושת / תחמוצת אבץ / תחמוצת אלומיניום. תהליך המתנול דורש דרישות דומות לאלו של תהליך הפישר טרופס בכל הנוגע להרכב הסינגז הנכנס לתהליך וגודלו המינימאלי של מתקן כדאי.
- **סינתזה של כוהלים מעורבבים** - תהליך קטליטי כימי שמייצר תערובות של מתנול, אתנול, פרופאנול, בוטאנול, וכמויות יותר קטנות של כוהלים יותר גבוהים.
- **התססה של סינגז** - תהליך ביולוגי שמשמש במיקרואורגניזמים אנארוביים להתסיס את הסינגז ליצירת אתנול או כימיקלים. גודלו המינימאלי של מתקן נמוך משמעותית מזה של תהליך הפישר טרופס והסינתזה למתנול ועומד על כ- 290 טון ביומסה מיובשת ביום.

נציין כי לכל אחד מהתהליכים המוזכרים לעיל יש דרישות שונות מבחינת התרכובת של הסינגז שנכנס לתהליך וכן תפוקה ועלויות שונות.

נדגיש כי על פי הידע שנצבר בסקירה הספרותית (של שלב א'), הפקת הסינגז (לרמת ניקיון גבוהה שמאפשרת הפקת דלקים לתחבורה) שונה משמעותית כאשר חומר הגלם הינו פסולת מוצקה, לעומת מצב בו חומר הגלם הוא גז. זאת בשל:

- **הטיפול המוקדם והגזיפיקציה עצמה** (לרבות תכנון המפעל וגודלו) יהיה שונה בין שני חומרי הגלם מהסיבה הברורה שגז הוא חומר גלם גזי ונקי והפסולת מוצקה ומלוכלכת. מערכות טיהור האוויר (Air Pollution Control) של המתקנים יהיו שונות (וצפויה להיות יקרה הרבה יותר עבור מתקן המטפל בפסולות).
- **איכות הסינגז שמתקבל** - איכות הסינגז ומידת הזיהום בו משתנה, באופן טבעי, בין שני המקורות (בדומה לביו-גז המומר לביומתאן). כאשר חומר הגלם הוא פסולות, לרוב מושב הסינגז לחשמל ו/או חום. על מנת להשיבו לדלקים נדרש ניקיון נוסף ויקר- זהו רכיב עלות שקשה לקבוע את ערכו, שכן רובם ככולם של מתקני הגזיפיקציה לפסולות לא מפיקים ממנה דלקים.
- **הסינתזה לדלק** - מרגע שהסינגז עומד בדרישות הניקיון, התהליך ועלויותיו צפויים להיות דומה לזה שיתקיים במתקן סינתזה של גז טבעי.

נדגיש כי מקורות המידע כיום אינם מאפשרים פילוח לכל אחד מהשלבים המוצגים לעיל ונדרשו הערכות על מנת לשייך את העלויות לרכיבי התהליך השונים.

4.2. ישימות טכנולוגית הגזיפיקציה וזמינות נתונים

טכנולוגיית הגזיפיקציה (ראה פרוט בשלב א') קיימת וידועה מזה שנים רבות כאשר חומרי הגלם לתהליך הינם דלקים פוסיליים כגון פחם וגז טבעי. במקרים אלו מושבים הדלקים לחשמל, חום או תחליפי דלקים סינטטיים. יישומה של הטכנולוגיה לטיפול בחומר גלם של פסולות נמצא בחיתוליו ומתמצה בעיקר ביפן ובגרמניה, כשרובם ככולם של המתקנים הקיימים משיבים את הפסולת לחום ו/או חשמל (ולא לדלקים). מכאן, כי ישנו מידע מועט ביותר (אם בכלל) אודות תהליך השבת הפסולת לדלק הן בהיבטים הפיסיקאליים (מקדמי התפוקה) והן בהיבטים הכלכליים (בעיקר עלויות תהליכי שדרוג הסינגז). המידע שכן נמצא בספרות העולמית, נלקח בעיקרו מניסויי מעבדה ומחקרים שונים כשמרבית היישומים הינם בשלבי הדגמה בלבד. לכן באופן טבעי נתגלו הבדלים של מאות אחוזים בהערכותיהם של גופי מחקר שונים אודות מקדמי התפוקה וההערכות הכלכליות של תהליך השבת הפסולת לדלקים בטכנולוגיה זו. ההבדלים נובעים מגדלים שונים של מתקנים, מחירי חומרי גלם, הנחות כלכליות, שווקי ביומסה מתקדמים (בהם לזרם הפסולת ערך כלכלי ולא עלות) והמתקנים רוכשים את הפסולות ע"י בעלי המתקנים) ומתודולוגיות חישוב שונות.

לפיכך, מדובר בניתוח ראשוני בלבד (ולא מעבר לכך) שכן לפני קבלת החלטת מדיניות חייבים הממצאים לעבור אימות בלתי אמצעי ולימוד מהמקומות בהם מיושמים הפיתוחים של הטכנולוגיות המוצגות. כמו כן מומלץ לעדכן את הממצאים בהתאם ליישומי מהפיכת הפסולת שמקדם המשרד להגנת הסביבה בכל הקשור למחירי הכניסה למתקני טיפול ומיקומם.

על מנת להתמודד עם אתגר זמינות הנתונים ומהימנותם, נעשה ניסיון לשלב מספר מקורות מידע מהארץ ומהעולם על גזיפיקציה של פסולות בכלל וזו לצורך הפקת דלקים בפרט. הממצאים נבחנו הן בשיטת ה-TOP-DOWN והן בשיטת ה-BOTTOM-UP, והשוו לאלו המופיעים במקורות שונים. בכך התאפשר הן להניח הנחות סבירות בעת התחשיב הכלכלי והן להאיר על אי הוודאות בתחום זה.

המקורות שנעשה בהם שימוש הינם:

- "שילוב טכנולוגיות הפירוק הגזי במערך הטיפול בפסולות בישראל", חברת כיוון, 2011
- נתוני יזמים / יועצים המייצגים חברות המייצאות טכנולוגיות של גזיפיקציה לטיפול בפסולת עירונית והשבתה לחשמל. החברות²³, רובן ככולן, בעלות ניסיון של הקמת עשרות מפעלים ברחבי העולם המשיבים, כאמור, את הפסולות לחשמל ו/או חום. כמו כן, נערכה שיחה עם מומחה מחברה²⁴ גרמנית שהינה בעלת ניסיון בהקמת מתקני גזיפיקציה.
- סקר ספרות שהוגש בשלב א'.

²³החברות:

- **VER** - חברה גרמנית הפעילה בהקמת מתקני גזי פיקציה משנת 1995. בסה"כ הקימה 10 מתקנים לטיפול בפסולת עירונית בעלי הספק מותקן שבין 2-5 MW. בנוסף הקימה החברה מתקנים קטנים לשימוש מקומי בקנה מידה קטן.
- **Waste 2 Energy** - חברה אמריקאית המיוצגת בארץ ע"י חברת EVILON בע"מ. לחברה מפעלים בארה"ב וסקוטלנד. החברה מתמחה בהקמת מפעלי גזיפיקציה מודולריים שניתנים להתאמה לכמות הפסולת המטופלת הרצויה במפעל שיכולה להגיע למעל 600 טון ביום.
- **Kentec Energy** - חברה קוריאנית המתמחה בהקמה ובתפעול של מפעלי גזיפיקציה ומתקני טיפול באוויר. לחברה ניסיון רחב בהקמת מעל ל-7 מפעלים בקוריאה בכמות של עד 40 טון ליום. יש להדגיש כי הקמת מתקנים קטנים מאפיינת את המדיניות בקוריאה ולא את מגבלות הטכנולוגיה.

²⁴נערכה שיחה עם מר Norbert Torp מחברת VER.

4.3. מתודולוגיה

ישנן שתי שיטות לאמוד את עלות הייצור של הדלק:

- **שיטת TOP-DOWN** - המאפשרת לקבל סדרי גודל של עלות ייצור הדלק ע"י סקירה ספרותית מתקנים דומים בעולם והסקה מהם לגבי עלויות חזויות בישראל.
- **שיטת BOTTOM-UP** - הערכת אומדן ההשקעה הנדרשת בהקמת מתקנים, עליהן יש להוסיף את עלות התפעול השוטף של מערכים אלה, עלויות כניסה וסילוק תוצרים וכו'.

על מנת לתקף עד כמה שניתן את מהימנות הנתונים נעשה בפרק שימוש בשתי הגישות²⁵.

כאמור, תוצרו של הפרק הינו אומדן ראשוני לעלות הייצור החזויה (ש/ליטר או מ"ק) של הדלק המיוצר כשתחליפי הדלקים שייבחנו הינם: מתנול, BTL ואתנול.

הניתוח יבחין בין שני זרמים עיקריים:

- שאריות מיון ופסולת מעורבת פסולת עירונית- פסולת הטרוגנית מאוד הן מבחינת חומרים והן מבחינת מצאי המזהמים בה.
- פסולת גזם- פסולת הומוגנית יחסית שניתן, בהינתן מערך איסוף ושינוע מתאים, להימנע מערבוב עם זרמים נוספים.

עלות תחליף הדלק שיופק מהסינגז נגזר מערכם של הפרמטרים הבאים: מקדמי התפוקה, מחיר ההקמה של מתקן הגזיפיקציה, מחיר תפעולו, מחיר שדרוג הסינגז והנזלתו לדלק, שיעור התשואה לזים ומחירי הכניסה למתקן. הפרקים הבאים יציגו את ממצאי הסקירה הספרותית ואת ההנחות הפיסיקליות (מקדמי תפוקה) ואלו הכלכליות שנשעה בהם שימוש בניתוח הכלכלי. הפרקים לאחר מיכן, יציגו עבור כל תחליף דלק בנפרד את תוצאות הניתוח.

²⁵עבור ביודיזל משמנים יוצגו העלויות בשיטה הראשונה בלבד ועל פי שיחות עם יזמים המיישמים את הטכנולוגיה בארץ. כמויות פסולת השמנים בישראל מספיקה לייצור של כמות זניחה של ביודיזל ביחס לביקושים מתחבורה (כ-0.3%).

4.4. מקדמי תפוקה של גזיפיקציה - הנחות התחשיב

טרם הצגת ממצאי הניתוח יוצגו ממצאי הסקירה הספרותית אודות מקדמי התפוקה הסופיים במונחי ליטר / גלון (או מ"ק) לטון חומר גלם (פסולת עירונית מוצקה או גזם), הטבלה הבאה ממחישה את הפערים בין המקדמים המדווחים. נזכיר כי הטכנולוגיה לא נמצאת בשימוש מסחרי לצורך הפקת דלקים.

תחילה יוצגו ממצאים הנוגעים לשלושת הדלקים הנידונים שמקורם במחקר של המעבדה הלאומית לחקר אנרגיות מתחדשות בארה"ב²⁶. לאחר מכן, ייבחנו הממצאים על פי מקורות מידע נוספים ויוצגו המקדמים שנלקחו בחשבון בתחשיב הסופי. חשוב להבדיל בין מקדמים הנוגעים לביומסה נקייה ומיובשת (גזם ופסולת חקלאית נקייה) לבין אלו של פסולות (הצפויים להיות נמוכים מהם).

טבלה 9 - מקדמי תפוקה בטכנולוגיות הממירות ביומסה לסינגז ומשיבות אותו לדלקים

System (BD = bone dry)	kg of product/Mg of BD feed	GJ of product/Mg of BD feed	GJ of product/GJ of feed (LHV)	Reference
Natural gas to H ₂	337	40	0.83	Leiby, 1994
Coal to H ₂	96	12	0.44	Spath and Amos (2000)
Biomass to H ₂	52-105	6-13	0.36-0.73	Spath, et al. (2000); Hamelinck, et al. (2001)
Natural gas to MeOH	1,445	29	0.61	SRI (2002)
Coal to MeOH	518-666	11-14	0.40-0.52	Bailey (1979); Michaels (1979); SRI (2002)
Biomass to MeOH	246-554	5-11	0.29-0.65	Hamelinck, et al. (2001)
Natural gas to FT	570-666	26-31	0.54-0.63	Navqvi (2000)
Biomass to FT	60-159	3-7	0.16-0.43	Tijmensen, et al. (2000); Hamelinck, et al, 2003; NREL gasification material balance info (Spath, et al, 2000) with Apanel (Dec. 2002)
Natural gas to mixed alcohols	1,210	31	0.63	Nirula (1994)
Biomass to mixed alcohols	135-223	3-6	0.18-0.30	NREL gasification material balance info (Spath, et al, 2000) with Nirula (1994)
Natural gas to olefins	453	21	0.43	Apanel (2002)
Biomass to MeOH then olefins	77-174	4-8	0.21-0.46	MeOH material balances with Apanel (2002)
Biomass to syngas then ethanol	228	7	0.35	Putsche (1999)

מקור: NREL, 2003 ²⁴

מהטבלה עולה כי:

- מקדם התפוקה עבור מתנול נע בין 81 ל-184 גלון לטון ביומסה נקייה ומיובשת
- מקדם התפוקה עבור BTL נע בין 22 ל-60 גלון לטון ביומסה נקייה ומיובשת
- מקדמי התפוקה הסופיים של אתנול הוא 75 גלון לטון ביומסה נקייה ומיובשת

²⁶ NREL, 2003 <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34929.pdf>

עוד עולים מהטבלה, הפערים העצומים שיש בין מקורות המידע המגיעים עד לכ-30%. הפערים נובעים מסיבות דומות לאלו שנתגלו בהערכות הכלכליות- חוסר הניסיון וקנה מידה יישומי קטן ומקומי מידי. עם זאת ניתן להיווכח כי הממצאים שיובאו בהמשך תומכים בקשר היחסי בין המקדמים.

על מנת להתגבש לכדי מערכת מקדמים על פיה ייערך הניתוח, יוצגו ממצאי הסקירה הספרותית עבור כל תחליף דלק בנפרד ולבסוף ייבחרו, על בסיס שוק הפסולת המקומי המקדמים שיעשה בהם שימוש בניתוח הכלכלי.

4.4.1 מתנול

להלן ממצאי הסקירה:

- כאמור, מחקר מהמכון לחקר אנרגיות מתחדשות בארה"ב מעלה כי מקדמי התפוקה נעים בין 81 ל-184 גלון מתנול לטון ביומסה נקייה ומעובדת. הפער העצום בין המקדמים נובע מהטכנולוגיה המיושמת ביישומים שנבחנו, כמות החשמל הנמכר על ידם (לעיתים מתקנים אלו משלבים המרת סינגו לדלקים לצד שריפתו לחשמל), ומגודל המתקנים (למתקני הפקת מתנול מסינגו, בדומה למתקני BTL, כפי שיוצג בהמשך, יתרונות משמעותיים לגודל).

טבלה 10 - מקדמי תפוקה עבור מתקני ביומסה למתנול בשיטת הגזיפיקציה²⁷

Table 16: Comparison of Biomass Based Methanol Studies

Study	(Hamelinck and Faaij 2001) (a), (b)	(Novem 2000) (a), (c)	(Larson 1992) (a)	(Wyman et al. 1993) (a)	(1990)	(Mudge et al. 1981)
Cost year	2001	1999	1991	1989	1987	1980
Biomass feed rate (BD tonne/day)	1,920	1,358	1,650	1,814	1,814 - 9,841	1,800
Biomass cost	\$2/GJ \$38/dry tonne	\$3/GJ \$55/dry tonne	\$2/GJ \$38/dry tonne	\$2.45/GJ \$46/dry tonne	\$2.45/GJ \$46/dry tonne (\$0-2.4/GJ sensitivity)	\$1.2/GJ \$22/dry tonne (\$0-154/dry tonne sensitivity)
Electricity selling price	\$0.03/kWh	\$0.067/kWh	\$0.05/kWh (purchased)	not given	\$0.041/kWh	\$0.03/kWh (purchased)
Net power (MW)	no excess to about 100 MW (@ 91% production cap)	about 150	no excess	no excess	no excess	no excess
Other fuels	none	co-fires nat gas in gas turbine	none	none	none	none
MeOH produced (tonne/day)	613-970 (@ 91% production cap)	57-196	705-1,004	790-1,110	717 - 4,577	900
Price of MeOH (HHV basis)	\$9-\$12/GJ \$0.58-\$0.83/gallon	\$10.6-\$13.6/GJ \$0.72-\$0.93/gallon	\$9.62-\$15.4/GJ \$0.66-\$1.05/gallon	\$10.01-\$19.60/GJ \$0.68-\$1.34/gallon (@ 12% discount rate)	\$10-\$18.9/GJ \$0.68-\$1.29/gal (for 20% capital recovery factor)	\$8.2-\$10.3/GJ \$0.56-\$0.70/gallon (sensitivity: \$5.9-\$22.7/GJ \$0.40-\$1.55/gal)
Level of detail	Very detailed - Gives costs of individual equipment, operating costs, and other economic parameters and assumptions	Some details - Gives costs of major plant sections, and assumptions used to determine installed costs	Somewhat detailed - Gives capital and operating costs	Somewhat detailed - Gives capital and operating costs and cash flow sheet	Somewhat detailed - Gives capital cost by section and operating costs	Somewhat detailed - Gives capital cost by section, operating costs, and other economic parameters

Notes: (a) Examined direct & indirect gasifiers and atmospheric and pressurized gasifiers.

(b) Several configurations examined (varied type of gas cleaning, reforming, and gas or LPMeOH with and without recycle)

(c) Examined once through LPMeOH with combined heat and power.

מקור: NREL, 2003

²⁷ לא נמצאו נתונים מעודכנים יותר ברמת פירוט זו

- נתונים עדכניים יותר של חברת ENERKEM²⁸, מעלים כי צפוי לקום בקנדה מתקן שיקלוט כ- 100,000 טון פסולת עירונית מיובשת בשנה וייצר 10 מיליון גלון מתנול (100 גלון מתנול לטון פסולת עירונית).
- מנתוני מחקר שמימן משרד האנרגיה האנגלי נמצא כי מקדם זה עומד על כ- 60 גלון בלבד לטון ביומסה מיובשת.

מהמוצג לעיל ניכרים ההבדלים בהערכות הגופים השונים ובכיוונים:

על פי ENERKEM ניתן ייצר מטון פסולת עירונית כ-100 גלון מתנול. זאת בעוד שמחקר אחר (NREL) מציג, עבור גזם איכותי, שמקדם התפוקה שלו אמור להיות גבוה יותר, מקדם של רק 60 גלון לטון. בהתחשב באיכות הזרמים בישראל וכמותם (כפי שיוצג בהמשך למתקני מתנול יתרונו עצומים לגודל), נלקחו בחשבון בתחשיב הכלכלי המקדמים הבאים:

- **עבור פסולת עירונית מוצקה** - ההנחה היא כי הפסולות יהיו מעורבות בעיקר ויכילו שאריות להטמנה (יתרונה של הגזיפיקציה בכך שהיא מסוגלת לטפל בכל סוגי הפסולות ויכולה לסלק שאריות מיון). לכן המקדם יהיה נמוך בכ-30% (בשל איכות הפסולת) מזה המוצג באתר המתקן המתוכנן לפעול בקנדה – כלומר, **70 גלון מתנול מטון פסולת עירונית**.
- **עבור גזם** - ההנחה כי המקדם יהיה בתחום הנמוך מאלו שנמצאו בספרות עבור זרמי ביומסה נקייה (בשל איכותו). נזכיר כי הגזם בגרמניה הינו משאב ויצרניו נהנים ממכירתו (בעשרות אירו לטון). בישראל אין זה כך ולעיתים רבות נאסף הגזם יחד עם עוד זרמים ונדרש לשלם עבור סילוקו. גם עבור פסולות חקלאיות טרם יושם מערך איסוף ושינוע באופן שיבטיח את ניקיונם וטיפול בכללם (כיום מרבית הפסולת מושלכת בשטח). לכן, גם במקרה זה ייערך הניתוח הבסיסי על פי המצוי ולא על פי הרצוי. **הנחת התחשיב עבור הגזם תהיה כ- 90 גלון מתנול מטון גזם**.

BTL .4.4.2

בפרק הכלכלי מוצג איור שממנו עולה תמונה ברורה של יתרונות לגודל למתקני GTL, הן מפסולות עץ וגזם והן מפסולות, במונחי עלות לגלון BTL מיוצר מכל זרם. מלבד יתרונות טכנולוגיים המשפיעים על כך, סביר להניח על השפעת המקדמים והיעילות של זרמי התשומה. מבט על העלות לאותה כמות ביומסה מטופלת (לרבות חומרים סינטטיים כמו צמיגים ופלסטיק בפסולת עירונית), מאפשר הסקה על יחסי המקדמים.

להלן ממצאי סקירה נוספת:

- נתוני המכון לחקר אנרגיות מתחדשות בארה"ב מעלה כי מקדם התפוקה להפקת דלקים פחמימניים מסינגז שמקורו בביומסה נעים בין 15 ל-44 גלון לטון ביומסה.
- נתוני משרד האנרגיה האנגלי מצביעים על מקדם העומד על כ-27 גלון לטון ביומסה.
- מחקרים נוספים ושיחה עם מומחה גרמני מעידים על מקדם שנע בין 35-40 גלון לטון ביומסה.

²⁸ <http://www.enerkem.com/en/facilities/plants/edmonton-alberta-canada.html>

בהתחשב באיכות הזרמים בישראל וכמותם (כפי שיוצג בהמשך למתקני מתנול יתרונות עצומים לגודל), נלקחו בחשבון בתחשיב הכלכלי המקדמים הבאים:

- **עבור פסולת עירונית** - ההנחה היא כי הפסולות יהיו מעורבות בעיקר ויכילו שאריות להטמנה (יתרונה של הגזיפיקציה בכך שהיא מסוגלת לטפל בכל סוגי הפסולות ויכולה לסלק שאריות מיון). המקדם שייעשה בו שימוש יהיה **30 גלון דלק לטון פסולת**.
- **עבור גזם** - המקדם שייעשה בו שימוש יהיה **40 גלון דלק לטון פסולת**.

4.4.3. אתנול

להלן ממצאי הסקירה:

- מסקר הספרות שהוצג בשלב א' לעבודה זו עלה כי מטון פסולת עירונית ניתן לייצר כ-28 גלון אתנול ומטון גזם ניתן לייצר כ-50 גלון אתנול²⁹.
- מנתוני מחקר נוסף עולה כי תפוקת האתנול לפסולת שבבי עץ עומדת על כ-71 גלון לטון. חשוב להדגיש כי חומר גלם זה הינו באיכות גבוהה מאוד (מיובש ונקי) והוא **נקנה** ע"י המפעל בעלות של \$25 לטון.
- מנתוני המכון לחקר אנרגיות מתחדשות בארה"ב עולה כי ניתן להפיק בין 70 ל-105 גלון אתנול מביומסה נקייה ומיובשת³⁰.

מכל המוצג לעיל ובהתחשב באיכות הפסולת העירונית התעשייתית והחקלאית בישראל הצפויה להתקבל בשנים **הקרובות** (שתהיה, בעיקר, מעורבת או מופרדת באיכות ירודה), ייעשה במסגרת הניתוח כלכלי השימוש במקדמים הבאים:

- **עבור פסולת עירונית** - ההנחה היא כי הפסולות יהיו מעורבות בעיקר ויכילו שאריות להטמנה (יתרונה של הגזיפיקציה בכך שהיא מסוגלת לטפל בכל סוגי הפסולות ויכולה לסלק שאריות מיון). לכן המקדם יהיה זה שנמצא בספרות עבור זרם ייחודי זה - **כ-28 גלון אתנול מטון פסולת עירונית**.
- **עבור גזם** - ההנחה כי המקדם יהיה בתחום הנמוך מאלו שנמצאו בספרות (בשל איכותו). הגזם בגרמניה הינו משאב ויצרניו נהנים ממכירתו. בישראל אין זה כך ולעיתים רבות נאסף הגזם יחד עם עוד זרמים. כמו כן עבור פסולות חקלאיות טרם גובש מערך איסוף ושינוע של הזרמים באופן שיבטיח את ניקיונם. לכן, גם במקרה זה ייערך הניתוח הבסיסי על פי המצוי ולא על פי הרצוי. הנחת התחשיב עבור הגזם תהיה **כ-60 גלון אתנול מטון גזם**.

²⁹ http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18482.pdf

³⁰ <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34929.pdf>

4.4.4. מקדמי תפוקה - סיכום

על פי האמור לעיל, מקדמי התפוקה (בגלונים ובליטרים) שיעשה בהם שימוש בתחשיב הכלכלי מופיעים בטבלאות הבאות:

טבלה 11 - מקדמי התפוקה לתחשיב, גלון דלק/טון פסולת

אתנול	BTL	מתנול	
28	30	70	פסולת עירונית מוצקה
60	40	90	גזם

טבלה 12 - מקדמי התפוקה לתחשיב, ליטר דלק/טון פסולת

אתנול	BTL	מתנול	
106	113	265	פסולת עירונית מוצקה (ליטר דלק/טון פסולת)
0.054	0.090	0.101	מקדמי התפוקה לתחשיב בשעט"ן
227	151	340	גזם (ליטר דלק/טון פסולת)
0.115	0.120	0.130	מקדמי התפוקה לתחשיב בשעט"ן

4.5. היצע הפסולת לתהליך הגזיפיקציה והתפוקה הפוטנציאלית

הזרמים הרלוונטיים לתהליך הינם פסולת עירונית ופסולת הגזים. במסגרת ניתוח היצע הפסולות בישראל שתואר ונתח במסגרת שלב א' עולה כי היצע שני הזרמים הינו 3.7 מיליון טון (תחת תרחיש מקסימאלי) ו-1.7 מיליון טון תחת מדיניותו של המשרד להגנת הסביבה.

טבלה 13 - היצע הפסולות לדלקים בשני תרחישי כמויות של פסולת מוצקה

תרחיש כמויות: תתי זרמים	תרחיש כמות מקסימלית סך היצע (אלפי טון בשנה)	תרחיש מדיניות מחזור היצע לאחר מדיניות משרד להגנ"ס (אלפי טון בשנה)
צמיגים	50	10
נייר	958	192
קרטון	518	104
פלסטיק	1,007	403
חיתולים	240	240
גזם עירוני	240	240
גזם מטעים	600	400
גזם אחר	120	120
סה"כ פסולת יבשה מוצקה	3,733	1,709

תחת המקדמים שהוצגו בסעיף הקודם עולה כי היצע הפסולות המקסימלי מאפשר ייצור של כחצי מיליארד ליטרים של אתנול ו-BTL. בשל מקדמו הגבוה של המתנול כמותו המקסימלית היא כפולה ועומדת על כמיליארד ליטרים, כמפורט הטבלה הבאה.

טבלה 14 - פוטנציאל ייצור תחליפי דלק (אלפי ליטרים בשנה) - מקסימאלי

אתנול	BTL	מתנול	
293,494	314,458	733,736	פסולת עירונית מוצקה
217,728	145,152	326,592	גזם
511,222	459,610	1,060,328	סה"כ אלפי ליטרים
0.0005081310	0.0007958470	0.0003811150	מקדם המרה - שעט"ן/ליטר
259.77	365.78	404.11	סה"כ אלפי שעט"ן



- היצע הפסולות לגזיפיקציה יכול לספק בין 260 ל-404 אלף שעט"ן (תחת תרחיש ההקצאה המקסימלי) ובין 138 ל-194 אלפי שעט"ן לאחר מדיניות המשרד להגנת הסביבה.
- הפניית הפסולות לצורך הפקת מתנול מייצר את כמות האנרגיה המקסימלית, המהווה כ-7% מהביקוש לדלקים לתחבורה (שעמד בשנת 2013 על כ-5.789 מיליון שעט"ן)³¹.

תחת מגבלות מדיניות המשרד להגנ"ס, פוחתת כמות זו משמעותית לכדי מחצית, כמוצג להלן:

טבלה 15 - פוטנציאל ייצור תחליפי דלק (אלפי ליטרים בשנה) - מקסימאלי

אתנול	BTL	מתנול	
100,442	107,617	251,105	פסולת עירונית מוצקה
172,368	114,912	258,552	גזם
272,810	222,529	509,657	סה"כ אלפי ליטרים
0.0005081310	0.0007958470	0.0003811150	מקדם המרה - שעט"ן/ליטר
138.62	177.10	194.24	סה"כ אלפי שעט"ן

³¹ על פי נתוני מנהל הדלק

4.6. טכנולוגית הגזיפיקציה - הנחות כלכליות

4.6.1. התפלגות מבנה עלויות של מתקן גזיפיקציה המטפל בפסולות

על מנת בכל זאת לאפשר השוואה בין מקורות המידע ולייצר מסגרת ניתוח אחידה, חולק תהליך הפקת הדלקים לשני שלבים:

- **שלב א -** תהליך הגזיפיקציה, הפקת הסינגו וניקוי **עד** לרמה הנדרשת להפקת חשמל (רמה נחותה מזו הדרושה להשבת הסינגו לדלקים). שלב זה משותף למפעלי גזיפיקציה המשיבים פסולת לחשמל, ועבורו ישנו מידע מהימן יחסית על המאפיינים הטכנו-כלכליים של הטכנולוגיה (כמוצג להלן).
- **שלב ב -** ניקוי נוסף של הסינגו והפיכתו לתחליף דלק. שלב זה כמעט ואינו מיושם, ולפיכך עלויותיו נאמדו מתוך מאמרים ושיחות עם מומחים ומתוך התפלגות ההשקעה של מתקני גזיפיקציה של פסולות לחשמל. עבור שלב ניקוי הסינגו (שמקורו בפסולת ולכן מכיל כמות רבה יותר של מזהמים) והנזלתו כמעט ואין נתונים מהימנים ועקביים (העלויות נעות בטווחים של מאות אחוזים ממחקר למחקר³²).

4.6.2. עלויות הקמה ותפעול של מתקן גזיפיקציה

לצורך הערכת העלויות של שלב א', רוכז המידע הכלכלי והתפעולי אודות מתקני גזיפיקציה המשיבים פסולת עירונית לחשמל (ומתופעלים ע"י החברות הבינלאומיות שצוינו בתחילת הפרק)³³, מוצג בטבלה הבאה:

טבלה 16 - ריכוז מידע טכנו כלכלי למתקני גזיפיקציה המשיבים פסולות לחשמל

מפעל ג	מפעל ב	מפעל א	
600	100	62	טון ליום
194,400	32,400	20,088	טון לשנה
הכל מלבד פסולת בניין	צמיגים, מעורבת מופרדת	הכל מלבד פסולת בניין	סוג פסולת
10%	8%	8%	שאריות - אפר
90%	90%	90%	יחס נצילות המפעל (על פי VER)
324	324	324	ימי עבודה בשנה
24	24	24	שעות עבודה ביממה
25	2.6	2.0	הספק מותקן MW (נטו) - לאחר שימוש עצמי באנרגיה ליממה MWH
600	62	48	ייצור חשמל שנתי (MWH)
194,400	20,218	15,448	ייצור חשמל שנתי (MWH) - לטון פסולת
579,855	74,580	53,790	השקעה
2.98	2.30	2.68	השקעה לטון (טונות בשנה)
0.00298	0.00369	0.00348	השקעה לקוט"ש (קוט"ש בשנה)
45,830	7,119	4,438	סה"כ הוצאות תפעול
0.24	0.22	0.22	סה"כ הוצאות טיפול לטון בשנה

מקור: "שילוב טכנולוגיות הפירוק הגזי במערך הטיפול בפסולות בישראל", חברת כיוון, 2011

- עלויות ההקמה למתקני גזיפיקציה המשיבים לחשמל (שלב א' + ייצור חשמל) נעים בין 2.3 ל-3 אלש"ח לטון פסולת ביומסה שנתי
- עלות התפעול השנתית מוערכת בכ-9%-8% מעלות ההשקעה

³² <http://wiki.gekgasifier.com/f/Review+of+Biomass+Gasification+Technologies.NNFCC.Jun09.pdf>

³³ "שילוב טכנולוגיות הפירוק הגזי במערך הטיפול בפסולות בישראל", חברת כיוון, 2011

נתונים אלו עולים בקנה אחד עם נתוני מחקר שמימן משרד האנרגיה³⁴ האנגלי שעל פיו סך עלויות ההון עבור מפעל גזיפיקציה המייצר דלקים מהסינגז (הערכה זו כוללת טיפול מקדים של חומר הגלם, אך לא כוללת את המרת הסינגז לדלק נוזלי) וקולט 1,520 טון יבש/יום של קלט של ביומסה, מוערכות החל בין 138-207 מיליון ליש"ט שהם 760-1140 מלש"ח. הנתונים הממוצעים מעלים כי עד שלב ההשבה לאנרגיה העלות מוערכת בכ-2.09 מלש"ח לטון שנתי. עוד עולה מהמחקר כי עלויות התפעול עד שלב ניקוי הסינגז מוערך ב- 3.5-5.7% מעלויות ההקמה.

לצורך התחשיב הונח כי עלות ההקמה של שלב הפקת הסינגז וניקויו (שלב א) היא בגובה של 2.09 אלש"ח לטון שנתי ועלויות התפעול הינן 6% מעלויות ההקמה.

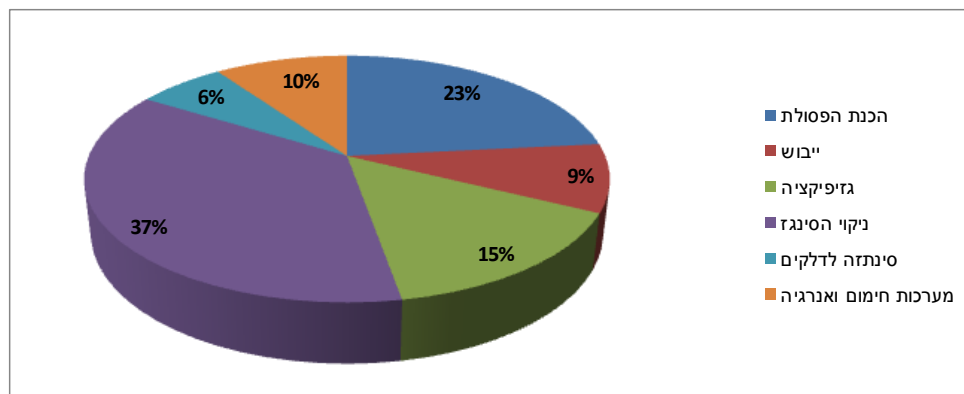
4.6.3. תהליך השבת הסינגז לדלקים

המחסור בנתונים זמינים עבור שלב ב' בתהליך הייצור הוא עקב האכילס של הניתוח הכלכלי שלהלן. כאמור, על מנת כן לאפשר ניתוח ראשוני מושכל, נדרשו הנחות שסבירותם נבדקה בניתוח TOP-DOWN המציג את מחירי הדלקים שהופקו בתהליכים אלו (להבדיל ממבנה העלויות של המתקנים המייצרים אותם). בשלב זה תיאמד ההשקעה התוספתית הנדרשת למתקן על מנת להנזיל את הסינגז לתחליפי הדלקים הנידונים על סמך מקורות ספרותיים ואחרים.

משיחה עם מומחה מחברת VER הגרמנית עולה כי עלות השבת הסינגז לדלק במפעל המשיב את הפסולת לדלקים פחמימניים היא 45% מעלות המתקן כולו. מהספרות עולה כי מתקנים להשבת סינגז למתנול חולקים מבנה עלויות דומה ולכן גם למתקני מתנול הונחה הנחה זו.

ממחקר³⁵ המתאר מתקן המשיב את הסינגז לאתנול נגזרה התפלגות ההשקעות בין השלבים עד ולאחר ההשבה לאנרגיה, על פי ההתפלגות הבאה:

תרשים 8 - התפלגות עלויות ההון במפעל גזיפיקציה המשיב פסולת לדלקים אלכוהוליים



- לצורך התחשיב הונח כי עלויות ניקוי הסינגז במתקני אתנול, מתחלקות בין השלב הראשון לשני לכרבע ושלושה רבעים, בהתאמה.
- הונח כי עלויות מערכות החימום והאנרגיה מתפלגות 65% לשלב הראשון ו-35% לשלב השבה לאתנול

³⁴ http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18482.pdf
³⁵ http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18482.pdf

4.6.4. סיכום הנחות כלכליות - עלות הקמה ותפעול במתקן גזיפיקציה

לייצור דלק

נזכיר כי על פי מתודולוגיית הניתוח העלויות פולג על פי שני שלבים:

- **שלב א'** - טיפול מוקדם, גזיפיקציה וניקוי תוצרים
- **שלב ב'** - ניקוי נוסף והנזלה

סיכום ההנחות הכלכליות הנוגעות לעלות ההון והתפעול (ללא עלויות סילוק שאריות טיפול) מוצג להלן:

טבלה 17 - סיכום ההנחות הכלכליות, אלש"ח לטון פסולת שנתי

55%	2.090	עלות הקמה - שלב א'	מתנול + BTL
45%	1.710	עלות הקמה - שלב ב'	
100%	3.800	סה"כ עלות הקמה	
6% מעלות ההשקעה	0.23	עלות תפעול לטון	
70%	2.090	עלות הקמה - שלב א'	אתנול
30%	0.896	עלות הקמה - שלב ב'	
100%	2.986	סה"כ עלות הקמה	
6% מעלות ההשקעה	0.18	עלות תפעול לטון	

4.6.5. מחירי כניסה למתקן

בדומה לפרק הפקת CNG בתהליך העיכול האנאירובי, מחיר הטיפול בפסולת ישקף את העלות האלטרנטיבית שיש למקבל ההחלטות בנוגע ליעוד הזרם. במידה וישנו פתרון זול יותר לפסולת ואין מחויבויות חוקיות (רגולציה, הסכמים) ייבחר, על פי רוב, פתרון הטיפול הזול ביותר. כמו כן חשוב להדגיש כי מחירי הכניסה תלויים באיכות חומר הגלם (סוגיה זו פורטה במסגרת המבוא). הדבר משמעותי בעיקר בזרמי הביניים (שאינם ביומסה גולמית אך גם לא פסולת) והם זרמי הגזם והפסולת החקלאית. כפי שתואר בסעיפים הקודמים, ישנן מדינות כמו גרמניה עבורן מהווה הגזם נכס כלכלי בשווי 25 אירו לטון (בעלי המתקנים רוכשים מספקי הפסולת). מובן כי ישראל לא נמנית בין שווקים אלו. עם זאת, יש להניח שהביקוש לגזם בשוק הקומפוסט (שוק אשר מוקדם נמרצות ע"י המשרד להגנת הסביבה) יוביל להעלאת ערכו.

להלן הנחות מחירי הכניסה לשני זרמי הפסולת:

- **עבור פסולת עירונית** - הזרם הצפוי יכיל בעיקרו פסולת מעורבת ושאריות מיון. לזרם זה אלטרנטיבת הטמנה בלבד. לפיכך עלויות הטיפול האלטרנטיביות יהיו מחירי ההטמנה הצפויים. מאחר ומחיר ההטמנה (כולל קיומה בכלל, הרי יש מדינות בהן ההטמנה אסורה) מותנה ברגולציה ולכן העלות נתונה לשינויים בטווח הבינוני ארוך. בשנת 2015, צפוי מחיר ההטמנה לנוע בסביבות ה-140 ₪ לטון (היטל+TF, לא כולל הובלה). לפיכך יונח מחיר זה כמחיר הכניסה למתקן הגזיפיקציה. בנוסף ייבחנו במסגרת בדיקות הרגישות ייקור של מחיר הכניסה ל-200 שקלים לטון פסולת עירונית. חשוב להדגיש כי בחלק ממקורות המידע שיוצגו, בנוגע לעלות התהליך, מתקן הגזיפיקציה לדלקים "מתפקד" גם כמתקן מיון שנהנה מחומרים למיחזור (מתכות וכו'). במדיניות המשרד להגנת הסביבה כיום, המקדמת הקמה של מתקני מיון, יש להעריך כי חומר הגלם שיגיע למתקן לא יכיל חומרים למיחזור ולפיכך לבעלי המתקנים לא תהא הכנסה ממיחזור. לכך כמובן השפעה על עלות הדלק שתתקבל (בניתוח ה-BOTTOM-UP).

- **עבור גזם ופסולות חקלאיות -** לגזם המעובד שימוש תחליפי במתקני הקומפוסטציה. הם מסייעים באורור חומר הגלם בתהליך הייצוב הביולוגי. הסקטור הפרטי מעריך³⁶ כי הגזם ייקלט בשער מתקן הקומפוסט במחיר 0 (ולא ישלם מחיר כניסה). הנחת התחשיב תהיה זהה. נחזור ונדגיש כי על פי תכנית ה-DOE שפורסמה ב 2013 (ראה הערה 9) מערך איסוף וניהול מלאי פסולות אלו מהווה תחום פיתוח חשוב לא פחות מההיצע הטכנולוגי שישנו. תחום זה הינו בידיו של המשרד להגנת הסביבה ועד שלא ייעשו בו שינויים מהותיים לא יוכלו יצרני הגזם ליהנות מערכו הכלכלי.

4.6.6. הנחות כלכליות נוספות לתרחיש הפקת זלק לתחבורה בתהליך הגזיפיקציה

- **מחיר ההון המשוקלל (WACC),** על פיו יחושב החזר ההון על ההשקעה, יתבסס על הנחות המימון והמחירים הבאים ויעמוד על כ-37%:

WACC*	שיעורו בהון	מחיר ההון	
9%	70%	6%	הון זר
	30%	20%	הון עצמי

*בהנחת שיעור מס חברות של 25% ו-15 שנות החזר

- יונח כי מכל טון חומר גלם יוותר 10% (משקלית) אפשר שיצריך סילוק לאתר הטמנה במחיר של 200₪ לטון (הובלה, מחיר כניסה והיטל).

³⁶ משיחות עם מומחים ויזמים בתחום הקומפוסט
³⁷ בדומה לניתוחים כלכליים קודמים שהוגשו למשרד

4.7. תוצאות הניתוח הכלכלי

בסעיף זה יוצגו עבור כל תחליף דלק עלויות הייצור הנובעות מההנחות שתוארו בסעיפים הקודמים. חשוב לציין כי לאיכות חומר הגלם השפעה כפולה על עלות ייצור הדלק: מצד אחד ככל שחומר הגלם איכותי יותר, מחיר הכניסה שלו קטן (או הופך לשלילי- בעלי המתקן קונים אותו), ולכך השפעה המייקרת את עלות ייצור הדלק. מצד שני, מקדם התפוקה (במונחי ליטר דלק לטון פסולת) של זרם איכותי גדול יותר מזה של פסולות נחותות (זרם מעורב) ולכך השפעה הפוכה.

תחליפי הדלקים שידונו הינם: מתנול, BTL ואתנול, המופקים מגזיפיקציה של פסולות.

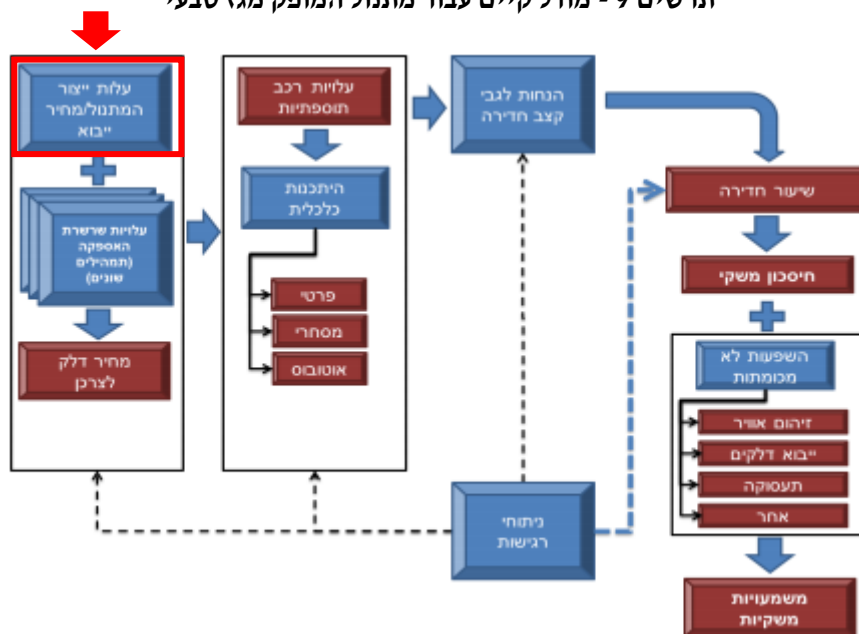
4.7.1. תוצאות תחשיב כלכלי מתנול

המודל הקיים שהוכן עבור המשרד, המופיע באיור 2, הוכן במטרה לספק הערכה של מגוון המשמעויות המשקיות והצרכניות לשילוב מתנול, המופק מגז טבעי, בסקטור התחבורה. בשלב בראשון נאמד מחיר הדלק לצרכן הקצה כתלות בשיעור המתנול בדלק הסופי.

הוגדרו שלוש פלטפורמות אותן בוחן המודל:

- M15 - תמהיל של 15% מתנול ו-85% בנזין
- M30 - תמהיל של 30% מתנול ו-70% בנזין
- M85 - תמהיל של 85% מתנול ו-15% בנזין

תרשים 9 - מודל קיים עבור מתנול המופק מגז טבעי



מקור: שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל, קבוצת פארטו ו-DHV, 2012

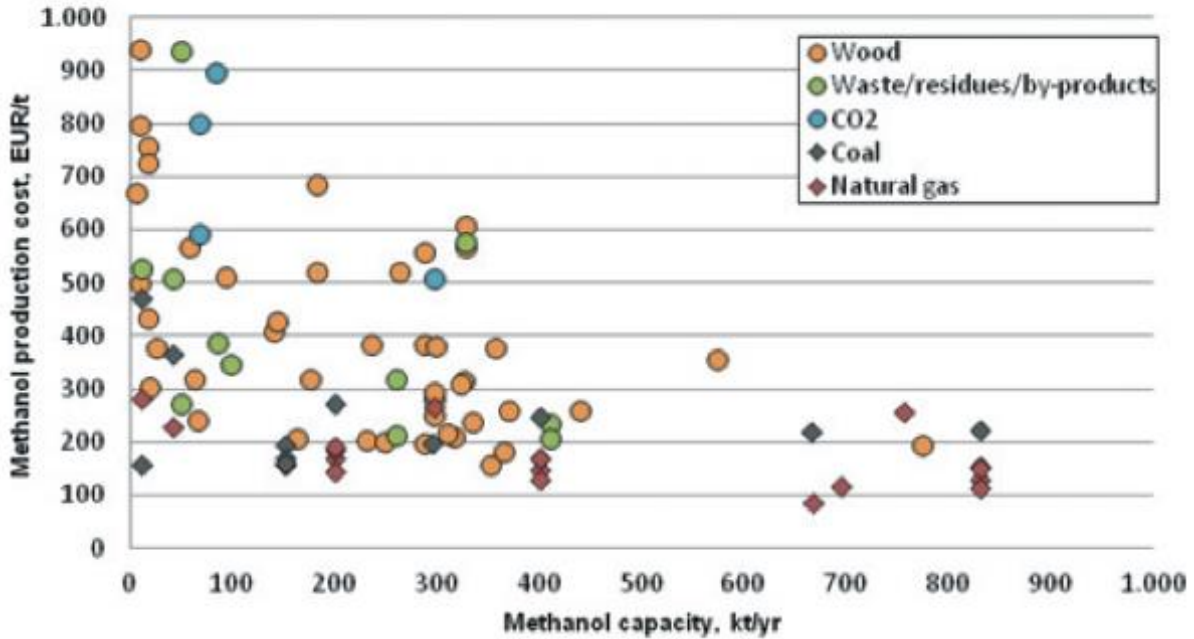
התאמת המודל הקיים וניתוחו על בסיס מתנול המופק מגזיפיקציה של פסולות דורש התאמה של החוליה הראשונה במודל: עלות ייצור המתנול (המופיע במסגרת אדומה). יתר החוליות נותרות ללא שינוי ואינן תלויות במקור ובעלות הגז הטבעי ועל כן לא נותחו במסגרת עבודה זו.

4.7.2. יתרונות לגודל במתקני מתנול

מהמכון הבינלאומי לאנרגיות מתחדשות³⁸ עולה כי ישנה שונות עצומה במחירי הפקת המתנול מגזיפיקציה של פסולות ועץ, כמופיע בתרשים הבא:

תרשים 10 - עלויות וקיבולת ייצור מתנול ממקורות זינה שונים

Methanol production costs per feedstock type in literature



מקור: IRENA, 2013³⁸

עלות הפקת המתנול מגזיפיקציה של שבבי עץ נעה בין \$160 ל-\$940 לטון מתנול (שהם 1.7 ו-10.2 ש"ח לגלון מתנול בהתאמה). עלות הפקת המתנול מפסולות, מוערכת כנמוכה יותר וככזו שנעה בין \$200 ל-\$500 לטון (שהם 2.13 ש"ח ו-5.33 ש"ח לגלון בהתאמה). הפערים הגדולים הללו נובעים מהנחות כלכליות שונות ובתנאים המקומיים (חשוב לזכור כי במרבית מתקנים אלו הביומסה "נקנית" ע"י המפעל כי מדובר בחומר גלם איכותי ונקי (ולא בשאריות מיון)).

עוד עולה מהתרשים כי למתקנים אלו יתרונות בולטים לגודל ועלות הפקתה יורדת משמעותית עם גודל המפעל. בנוסף ניתן להבחין בפערים הגדולים בעלויות הפקת המתנול מגז טבעי ומפחם לעומת אלו שמביומסה ופסולות (הבדלים של מאות אחוזים במפעלים קטנים).

³⁸ http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20I08%20Production_of_Bio-methanol.pdf

4.7.3. תוצאות הניתוח

טבלה 18 - עלות ייצור מתנול – תוצאות התחשיב

פסולת עירונית (בדיקת רגישות)	גזם	פסולת עירונית	זרם:
1	1	1	טון נכנס
200	0	140	מחיר טיפול בפסולת - ש/טון פסולת
471	471	471	החזר הון - ש/טון פסולת
228	228	228	עלות תפעול - ש/טון פסולת
20	20	20	עלות סילוק אפר להטמנה - ש/טון פסולת
519	719	579	סה"כ עלות התהליך - ש/טון פסולת
70	90	70	מקדם תפוקה גלון/טון
265	340	265	מקדם תפוקה ליטר/טון
7.42	7.99	8.28	עלות ייצור ש/גלון מתנול
1.96	2.11	2.19	עלות ייצור ש/ליטר מתנול

מהתחשיב עולה כי:

- מחיר הפקת מתנול בתהליך גזיפיקציה של פסולות הינו 2.19 ש/ליטר עבור פסולת עירונית ו-2.11 ש/ליטר עבור פסולת הגזם. עבור הגזם (הזרם הזול יותר), עלות ייצור המתנול גבוהה בכ-115% מעלות הפקת המתנול מגז טבעי (שעומד על כ-0.98 ש/ליטר³⁹).
- עוד עולה כי על אף שעבור הגזם אין עלויות כניסה למתקן, עדיין עלות הפקת הדלק ממנו זולה יותר ביחס לפסולת עירונית עם מחיר כניסה של 140 ש/טון. ייקור מחיר הכניסה מוזיל את עלות ההפקה לכ-1.96 ש/ליטר מתנול.
- החזר ההון מתחלק בין השלבים כפי שעלויות ההקמה מתפלגות (55% מהעלות לשלב א' ו-45% לשלב ב').
- מחיר הכניסה לפסולת עירונית שישווה את עלות ייצור המתנול לזה המופק מגז טבעי הינו 460 ש/טון פסולת עירונית מוצקה⁴⁰.

הניתוח לליטר דלק, מעלה את התמונה הבאה:

טבלה 19 - עלות ייצור מתנול בגזיפיקציה, לליטר דלק

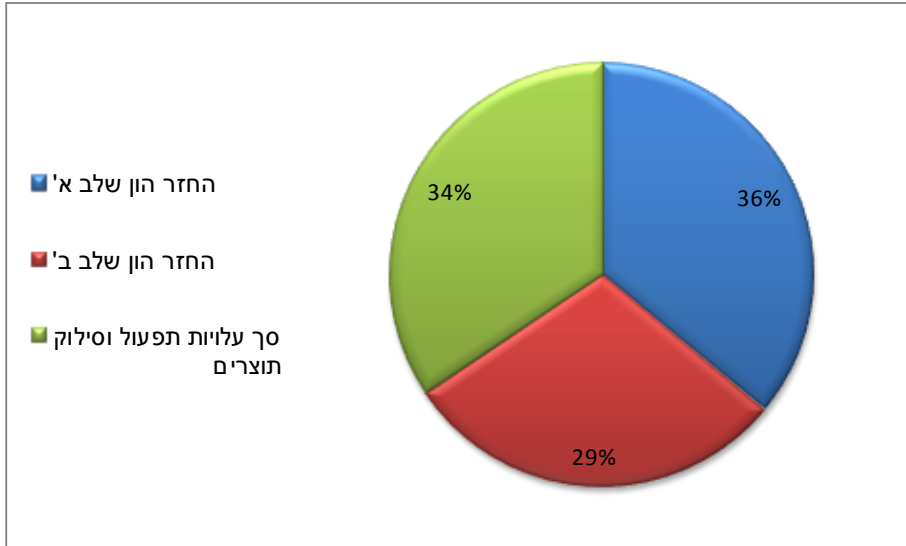
פסולת עירונית (בדיקת רגישות)	גזם	פסולת עירונית	זרם:
-0.76	0.00	-0.53	מחיר טיפול בפסולת - ש/ליטר דלק
0.98	0.76	0.98	החזר הון שלב א' - ש/ליטר דלק
0.80	0.62	0.80	החזר הון שלב ב' - ש/ליטר דלק
1.78	1.39	1.78	סך החזר הון ש/ליטר דלק
0.86	0.67	0.86	עלות תפעול - ש/ליטר דלק
0.08	0.06	0.08	עלות סילוק אפר להטמנה ש/ליטר דלק
0.94	0.73	0.94	סך עלויות תפעול וסילוק תוצרים
1.96	2.11	2.19	סה"כ עלות התהליך - ש/ליטר דלק

- מחיר הטיפול בפסולת הינו שלילי עבור זרמי פסולת עירונית, מכיוון שזהו רכיב של המתקן המהווה הכנסה (בעוד שהיתר הינם רכיבי עלות).

³⁹ ראה - "שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל, שלב ב'", קבוצת פארטו ו-DHV, 2012.
⁴⁰ המחיר המקביל לזרם הגזם הוא 380 ש/טון (נדגיש כי גזם נקי לא משלם כיום מחיר כניסה למתקן אלא ההיפך, הוא נקנה ע"י בעל המתקן).

עבור גזם (שאינו משלם מחיר כניסה), התפלגות העלויות הינה כדלקמן:

תרשים 11 - התפלגות עלות ייצור מתנול מגזם



השוואה למקורות מידע אחרים

- סקירת מפעלים המשלבים השבה של ביומסה למתנול מעלה עלות הפקה דומה העומדת על כ- 1.77\$ לליטר מתנול (בדומה לעלות ההפקה כאשר מחיר הכניסה למתקן הינה 200\$ לטון)
- מחקר נוסף⁴¹ מעלה כי הפקת מתנול מביומסה מייקרת את התהליך בכ- 0.3-0.55\$ לגלון ביחס להפקתו מגז טבעי (בין 0.3 ל-0.5\$ לליטר). מספר זה נמצא נמוך מזה העולה מהתחשיב.

⁴¹ Technical and economic assesment of synythesis gas to fuels and chemicals with emphasis on the potential on biomass derived syngas, 2003.

4.7.4. תוצאות תחשיב כלכלי - BTL

טבלה 20 - עלות ייצור BTL – תוצאות התחשיב

פסולת עירונית (בדיקת רגישות)	גזם	פסולת עירונית	זרם:
1	1	1	טון נכנס
200	0	140	מחיר טיפול בפסולת - ש/טון פסולת
471	471	471	החזר הון - ש/טון פסולת
228	228	228	עלות תפעול - ש/טון פסולת
20	20	20	עלות סילוק אפר להטמנה - ש/טון פסולת
519	719	579	סה"כ עלות התהליך - ש/טון פסולת
30	40	30	מקדם תפוקה גלון/טון
113	151	113	מקדם תפוקה ליטר/טון
17.31	17.99	19.31	עלות ייצור ש/גלון BTL
4.58	4.76	5.11	עלות ייצור ש/ליטר BTL

מהטבלה עולה כי:

- עלות תפוקת ה-BTL ממתקן גזיפיקציה של פסולת עירונית במחיר כניסה של 140 ש/טון, מוערכת בכ-5.11 ש לליטר, מחיר יקר משמעותית ממחירי דלקים קונבנציונליים (במחיר חבית נפט של \$ 112.5 נמכרים בנזין וסולר בתחנות התדלוק בכ-3.63 ו-3.79 ש"ל לליטר בהתאמה, ללא מיסים).
- שימוש בגזם כחומר גלם יוזיל את העלות לכ-4.76 ש לליטר אל אף שהזרם אינו "משלם" מחיר כניסה למתקן. כמו כן ייקור מחיר הכניסה לפסולת עירונית יוזיל את העלות לכ-4.58 ש לליטר BTL.
- התפלגות עלות הייצור זהה לזו שהוצגה עבור מתנול
- מחיר הכניסה לפסולת עירונית שישווה את עלות ייצור ה-BTL לזה המופק מגז טבעי הינו 460 ש לטון MSW⁴².

⁴² המחיר המקביל לזרם הגזם הוא 380 ש לטון (נדגיש כי גזם נקי לא משלם כיום מחיר כניסה למתקן אלא ההיפך, הוא נקנה ע"י בעל המתקן).

4.7.5. תוצאות תחשיב כלכלי- אתנול

טבלה 21 - עלות ייצור אתנול – תוצאות התחשיב

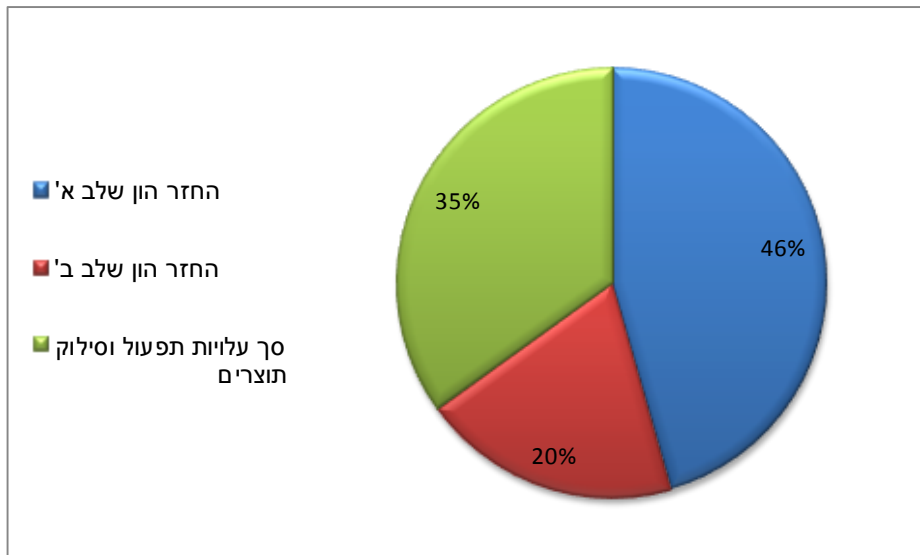
פסולת עירונית (בדיקת רגישות)	גזם	פסולת עירונית	זרם:
1	1	1	טון נכנס
200	0	140	מחיר טיפול בפסולת - נה/טון פסולת
370	370	370	החזר הון - נה/טון פסולת
179	179	179	עלות תפעול - נה/טון פסולת
20	20	20	עלות סילוק אפר להטמנה- נה/טון פסולת
370	570	430	סה"כ עלות התהליך - נה/טון פסולת
28	60	28	מקדם תפוקה גלון/טון
106	227	106	מקדם תפוקה ליטר/טון
13.20	9.49	15.34	עלות ייצור נה/גלון אתנול
3.49	2.51	4.06	עלות ייצור נה/ליטר אתנול

מהטבלה עולה כי:

- עלות הפקת האתנול נעה בין 2.51 נה/ליטר אתנול לכ-4.06 נה לליטר אתנול. סקירת מפעלים המשלבים השבה של ביומסה לאתנול מעלה עלות הפקה העומדת על כ-3.43 נה לליטר אתנול⁴³ (עלות הנמצאת בין שני הניתוחים שהוצגו עבור פסולת עירונית).
- עלות הפקת האתנול הזולה ביותר היא מזרם הגזם (אל אף שאין שמחיר הכניסה שלו הוא 0).

התפלגות העלות עבור זרם הגזם, מעלה את התמונה הבאה:

תרשים 12 - התפלגות עלות הפקת אתנול מטון גזם



⁴³ http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18482.pdf חשוב לציין כי התחשיב מבוסס על פסולת עירונית שחלק מהכנסות המפעל מבוסס על מכירת חומרי גלם כמו אלומיניום, ברזל וחשמל, דבר שמוריד, באופן מלאכותי, את העלות הסופית של ליטר אתנול.

4.8. סיכום

- היצע הפסולות לגזיפיקציה יכול לספק בין 260 ל-404 אלף שעט"ן (תחת תרחיש ההקצאה המקסימלי) ובין 138 ל-194 אלפי שעט"ן לאחר הטמעת מדיניות המשרד להגנת הסביבה.
- הפניית הפסולות לצורך הפקת מתנול מייצר את כמות האנרגיה המקסימלית, המהווה כ- 7% מהביקוש לדלקים לתחבורה (שעמד בשנת 2013 על כ-5.789 מיליון שעט"ן)⁴⁴.
- בדיקות הרגישות העלו רגישות גבוהה לעלות שדרוג הסינגז.
- מחיר הכניסה שישווה את עלות ייצור המתנול לזה המופק מגז טבעי (0.98 ₪ לליטר) הינו 460 ₪ לטון פסולת עירונית מוצקה.

להלן סיכום הנתונים הכלכליים שהוצגו :

טבלה 22 - עלות ייצור תחליפי דלקים מפסולות - סיכום ממצאים, ₪ לליטר

אתנול	BTL	מתנול	
4.06	5.11	2.19	עלות ייצור - מפסולת עירונית
2.51	4.76	2.11	עלות ייצור - מגזם
3.82	4.62	4.29	₪ לליטר שווה ערך בנזין

נזכיר כי יש מקום לבחינה מחודשת של הממצאים עם התקדמות הטכנולוגיה. כמו כן נציין כי סביר שבדומה למודל ה-CNG, מחיר הדלק יהיה רגיש מאוד למחיר שדרוג הסינגז (מחירים שכאמור לא נמצאו להם מקורות מספיקים), לפיכך יש להתייחס לנתונים כאומדן ראשוני ותו לא.

⁴⁴ על פי נתוני מנהל הדלק

5. ניתוח מחזור חיים לייצור דלקים מפסולת

5.1. רקע

ניתוח מחזור חיים (נמ"ח) היא גישה כוללת לאומדן של צריכת המשאבים, הפליטות הנגזרות וההשפעות הסביבתיות המיוחסים לטובין או שירותים, תוך לקיחה בחשבון של כל מחזור חייהם מ'עריסה' ל'קבר'. תוצר הניתוח הינו חיזוי כמותי של סך ההשפעה – או "המחיר הסביבתי" – עקב יישום תהליך ייצור המוצר פר יחידת מידה (משקל, נפח, אנרגיה וכיו"ב), לרוב במונחי כמות פליטות (גזי-חממה, מזהמים) וניצול משאבים (צריכת אנרגיה, מים וניצול קרקע לדוג'). לפיכך, גישה זו מאפשרת בחינה השוואתית של חלופות שונות של תהליכים ומערכות וההשלכות הצפויות בעת יישומן. במסגרת עבודה זו, היקף ניתוח מחזור החיים יכלול ויגבל לפליטות וצריכה אנרגטית, ויבחן את החלופות השונות הן בתחום הדלקים מפסולת והן במערכות הנעה חשמליות אל מול החלופה הקונבנציונאלית.

5.2. אפיון היקף ושלבנים בניתוח

ניתוח מחזור-חיים של תחבורה מקיף מספר תהליכים, חלקם עוקבים וחלקם מתרחשים במקביל. מתודולוגיות שונות מגדירות את היקף הניתוח בהתאם לאופיין ומטרותיהן כאשר לדוגמא, תהליכי ייצור הרכב עצמו לא נמדדים במסגרת נמ"ח – כפי שאכן מוצג בדו"ח זה.

ככלל, מקובל לחלק נמ"ח בתחבורה לשתי שרשראות תהליכים, המשיקות זו לזו:

- **מהבאר למיכל, Well-to-Tank (WTT)** או לחליפין Well-to-Pump (WTP). ב-WTT מתייחסים לנתיב הדלק עצמו – הפקה, הובלה, ייצור, אכסון וחלוקה – לרוב במונחי אנרגיה, נפח או משקל של הדלק הנוצר בתהליך.
- **מהמיכל לגלגל, Tank-to-Wheel (TTW)** או לחליפין Pump-to-Wheel (PTW). ב-TTW מתייחסים למערכת ההנעה שברכב ולשימוש בדלק לפעולתה – לרוב במונחי צריכה ליחידת נסועה.

חלוקה זו למקטעים מאפשרת ניתוח השוואתי בין דלקים ומערכות הנעה שונות, ושילובים אפשריים שונים בין השניים. חיבור בין WTT ו-TTW מאפשר לקבל ניתוח המקיף את מחזור החיים **מהבאר לגלגל**,

Well-to-Wheel (WTW)

בשל המגוון הקיים הן בנתיבי הדלקים (מהבאר למיכל) והן במערכות ההנעה (מהמיכל לגלגל), ישנו מספר גדול של קומבינציות דלק-מנוע. הצגת ניתוח מהבאר לגלגל לכלל השילובים האפשריים איננה פרקטית. לפיכך ובהתאם למבנה הפרקים בדו"ח, נבחרה גישה המחלקת את התהליכים לשני ניתוחים נפרדים, כאשר כל אחד מהם מהווה בסיס השוואתי בפני עצמו.

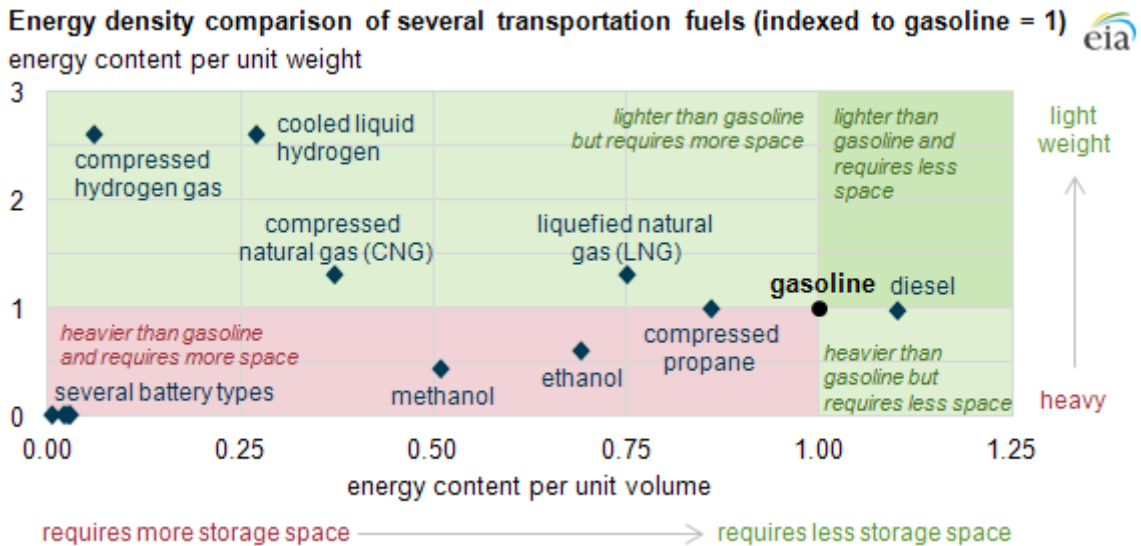
בדו"ח זה יוצגו ניתוחי מחזור חיים נפרדים בהתאם לשני הפרקים בדו"ח:

- נמ"ח מהבאר למיכל לפרק טכנולוגיות להפקת תחליפי דלקים לתחבורה מפסולת
- נמ"ח מהמיכל לגלגל לפרק שימוש ברכב חשמלי והיברידי לסוגיו

5.3. הבסיס ההשוואתי לדלקים ממקורות שונים - צפיפות אנרגטית

כאשר בוחנים בצורה השוואתית דלקים מסוגים שונים, ישנה חשיבות להשוואה בין מאפייני המשקל והנפח ליחידת אנרגיה של כל סוג דלק – ובמשולב ה"צפיפות האנרגטית". מאפיינים אלו עשויים להשפיע על יעילות הרכב, עלות תפעולו וקיבולת האכסון שבו. בתרשים 13 מוצגים מאפייני המשקל והנפח ליחידת אנרגיה של דלקים שונים, בהשוואה לבנזין.

תרשים 13 - השוואת צפיפות אנרגיה בדלקים שונים לתחבורה



מקור: ⁴⁵EIA, based on the National Defense University

ניתן לראות כי בנזין ודיזל מתאפיינים בצפיפות האנרגיה הגדולה ביותר ליחידת נפח, בעוד שביתר הדלקים דרוש נפח גדול יותר על מנת להשיג את אותה כמות האנרגיה. אתנול, מתנול, פרופן דחוס וסוללות כבדים יותר מבנזין, בעוד שגז טבעי ומימן דחוסים או נוזליים קלים ממנו. עם זאת, חשוב לציין כי שיעור הנצילות - או לחלפין, צריכת אנרגיה ליחידת עבודה - של מערכות ההנעה המשתמשות בדלקים הוא גורם משמעותי שיש לקחת בחשבון, במיוחד בשל הפערים בין המערכות השונות (לדוגמא, לתא-דלק מימני מחצית צריכת האנרגיה של מנוע בעירה פנימית ליחידת עבודה ולמנוע חשמלי כרבע מהצריכה - בשל היותם בעלי נצילות גבוהה יותר).

5.4. מתודולוגיית הניתוח

על מנת לקבל תוצאות בעלות מהימנות גבוהה ואשר ניתן יהיה להשליך מהן לגבי רלוונטיות למשק הישראלי, ננקטה גישה של איסוף מידע משני מקורות בני-סמכה בתחום נמ"ח בתחבורה. מקורות אלו נבדלים זה מזה באופיים - הן מבחינה מתודולוגית והן במאפיינים המשקיים של מקורות המידע עליו הם מסתמכים. כך, ניתן להשוות את הנתונים המתקבלים מכל מקור ולקבל מושג טוב הן לגבי טווח הערכים המקובלים בנתיבי הדלקים ומערכות ההנעה השונות, והן באשר להבדלים היחסיים בתוך קבוצת הייחוס.

U.S. Energy Information Administration, based on the National Defense University. (14 February 2013). ⁴⁵

U.S. Energy Information Administration: *Today in Energy*
<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=9991>

העבודה הסתמכה על שני מקורות מייצגים ומשלימים :

- דו"ח JEC⁴⁶ – "Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context" Version 4 (Report EUR 26028 EN – 2013). הינו תוצר של שת"פ מחקרי בחסות הנציבות האירופית, ומרכז עבודת מחקר מקיפה ומתמשכת בנושא תחליפי דלקים בתחבורה. הדו"ח מרכז מידע אמפירי והערכות באשר לפליטות הנוצרות ותשומות האנרגיה הנדרשות בהפקת דלקים ממקורות ובטכנולוגיות שונים ובשימוש בהם. המידע בדו"ח זה רלוונטי למקרה האירופי וככזה מתבסס על תמהיל האנרגיה, מקורות הדלקים, מאפייני הסקטור החקלאי וכיו"ב כפי שהם באיחוד האירופי.
- מודל GREET⁴⁷ (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation). מודל זה, אשר פותח ומתוחזק ע"י Argonne National Laboratory עבור משרד האנרגיה האמריקאי (DOE), מנתח את תשומות האנרגיה והפליטות הנובעים ממקורות, תוצרים ותהליכים בייצור ובשימוש בדלקים לתחבורה ברמה הפרטנית של כל תהליך וחומר גלם. במודל מובנה מאגר נתונים עדכניים הרלוונטיים למשק האמריקאי, הכולל תמהילי דלקים ומקורות אנרגיה, מקדמי פליטות ומאפיינים של מגוון מערכות הנעה. כלי זה הוא למעשה הסטנדרט בבחינת נמ"ח בתחום הרכב, וכאמור בבסיסו רלוונטי לשוק האמריקאי על מאפייניו.

מקורות אלו עוסקים במגוון רחב של חלופות דלקים ומערכות הנעה – מתוך כל אחד מהמקורות נבחרו נתונים ונתיבים הרלוונטיים לעבודה זו, והם אלו שהוצגו.

כמו כן, מקורות אלו מוטים מטבעם בשל היותם מושתתים על נתונים הרלוונטיים לאזור מוצאם כגון תמהיל דלקים בחשמל, תמהיל מקורות הדלקים, מרחקי ואמצעי שינוע והולכה, אקלים, חקלאות וכיו"ב. מעבר להשפעה הישירה, למשתנים אלו ישנה גם השפעה עקיפה על דלקים ומערכות הנעה השונים מהם בשל חלקם בתהליכי הייצור, ההולכה והחלוקה. כך, לדוגמא, תמהיל החשמל אינו רלוונטי רק לרכב חשמלי, אלא גם לגז טבעי דחוס מעיכול אנאירובי – בשל החשמל הדרוש לדחיסת הגז לאורך מערך ההולכה והחלוקה. לפיכך, יש לנקוט בזהירות הנדרשת כאשר מבקשים להשליך את התוצאות המובאות להלן על המקרה הישראלי.

עוד נציין כי ההנחה בעבודה היא כי לאחר ייצור הדלק שמקורו בפסולת, הוא נמהל עם הדלק הקונבנציונאלי בשיעורים נמוכים יחסית ואינו משפיע מהותית על הרכב הפליטות מהרכב.

⁴⁶ JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration. (2013). Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, WELL-TO-TANK (WTT) Report, Version 4

JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration. (2013). Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, TANK-TO-WHEELS (TTW) Report, Version 4

⁴⁷ GREET 2013, Version 1.1.0.9210. (2013). Argonne National Laboratory.

5.5. ניתוח מחזור חיים "מהבאר למיכל" להפקת תחליפי דלקים לתחבורה מפסולת

מקטע זה בשרשרת מחזור החיים מתייחס לשלבי הפקת חומר הגלם, שינועו למתקן הייצור, תהליכי הזיקוק, ניקוי ודחיסה הרלוונטיים וחלוקה לנקודות התדלוק. יש לשים לב כי במקרים מסוימים, עצם השימוש בפסולת כמקור גלם יוצר מצב של "זיכוי" (credit) בשל הפליטות שנחסכות מפסולת שלא נוצלה.

5.5.1 JEC

5.5.1.1 מתודולוגיית המודל

מטרת המחקר שבבסיס דו"ח זה היא בניית מאזן אנרגיה ופליטות לנתיבי הדלקים השונים, אשר נמצאו כרלוונטיים באופן זמן של העשור הקרוב. הגישה שננקטה היא אפיון של תהליכים פרטניים ושילובם כשלבים בנתיבים שנבחרו. בחלק ה-(WTT) Well to Tank נבחנו שלבי ההפקה, הובלה, ייצור והפצה של הדלקים. משיקולים שונים לא נלקחו בחשבון צריכת אנרגיה ופליטות שמקורן בבנייה ופירוק של מתקני ייצור ורכבים.

5.5.1.2 נתיבי פסולת וטכנולוגיות במודל

בדו"ח זה עוסקים בשלושה נתיבי דלקים מפסולת (שאיננה פסולת עץ):

1. **פסולת עירונית לביוגז דחוס (CBG)** – שימוש בפסולת עירונית שכבר נאספה לייצור של ביוגז. הביוגז עובר טיפול ושדרוג ומוזן לרשת גז טבעי קיימת לשימוש כדלק לתחבורה.
2. **פרש בע"ח רטוב (איחסון סגור) לביוגז דחוס (CBG)** – איסוף פרש בע"ח רטוב המאוכסן במיכל סגור ממשקים למתקן קהילתי מרכזי וייצור ביוגז. הביוגז עובר טיפול ושדרוג ומוזן לרשת גז טבעי קיימת לשימוש כדלק לתחבורה.
3. **פרש בע"ח רטוב (איחסון פתוח) לביוגז דחוס (CBG)** – איסוף פרש בע"ח רטוב המאוכסן באגן פתוח ממשקים למתקן קהילתי מרכזי וייצור ביוגז. הביוגז עובר טיפול ושדרוג ומוזן לרשת גז טבעי קיימת לשימוש כדלק לתחבורה.

טבלה 23 - מפתח נתיבי דלקים פסולת נבחרים בדו"ח JEC

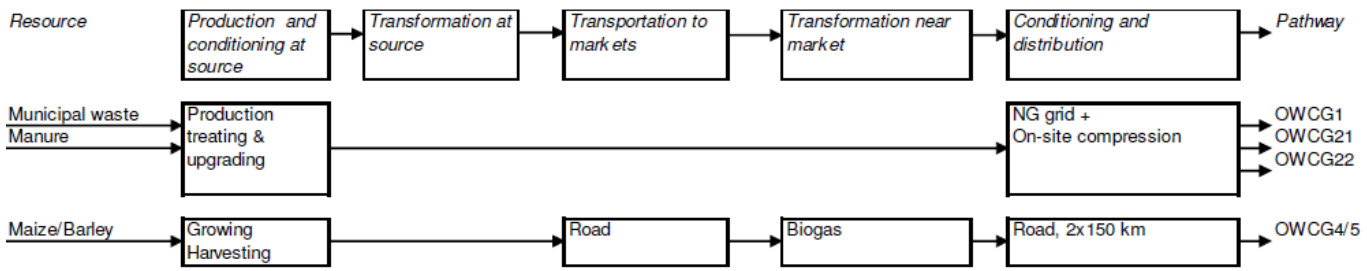
Key to pathway codes

OWCG1	Municipal waste (closed digestate storage)
OWCG21	Manure (closed digestate storage)
OWCG22	Manure (open digestate storage)
OWCG4	Maize (whole plant) (closed digestate storage)
OWCG5	Double cropping (closed digestate storage)

מקור: JEC (2013)

השימוש בביוגז מפסולת אורגנית לייצור חשמל וחום נפוץ הרבה יותר מאשר כדלק ביוגז דחוס לתחבורה. בדו"ח נטען כי בעוד שייצור של חשמל וחום הוא פשוט וניתן לביצוע במתקנים מבוזרים בסדר-גודל קטן, ייצור של ביוגז דחוס לתחבורה כרוך בתהליכי ניקוי ודחיסה ומצריך זרם באיכויות וכמויות יציבים – כך שנדרש ייצור מרכזי ובסדר גודל משמעותי.

תרשים 14 - נתיבי ביוגז מפסולת ושימושים אפשריים



מקור: JEC (2013)

פסולת אורגנית שמקורה בפסולת עירונית מופרדת נחשבת למתאימה מאוד לייצור ביוגז – הן בשל הערך האנרגטי הגבוה שבה (מייצרת כמות ביוגז גדולה יותר מפרש בע"ח פר טון פסולת – ראה טבלה 21 - מקדמי תפוקה בשלב א' של עבודה זו) והן בשל העלות החליפית של טיפול בה. עירוב של פסולת עירונית אורגנית עם פרש בע"ח אף מטיבה עם תהליך ייצור ביוגז ע"י סיוע בשמירת הטמפרטורה ויחס פחמן:חנקן ברמות אופטימליות.

פרש בעלי-חיים מהווה את המקור המשמעותי ביותר לייצור ביוגז לתחבורה, במיוחד פרש מבקר המתאפיין בכמויות הגדולות ביותר ובפער ניכר מסוגי בע"ח אחרים. לשם תפעול של מפעל ביוגז לתחבורה באופן ישים הוא נדרש להיות ממוקם באזור בו יש חקלאות בע"ח אינטנסיבית, המתקיימת במתקנים סגורים שבהם נאסף הפרש במצב רטוב (slurry).

פסולות אחרות לא נכללו בדו"ח כמקור דלקים לתחבורה, בעיקר בשל פוטנציאל מוגבל בהיקפו:

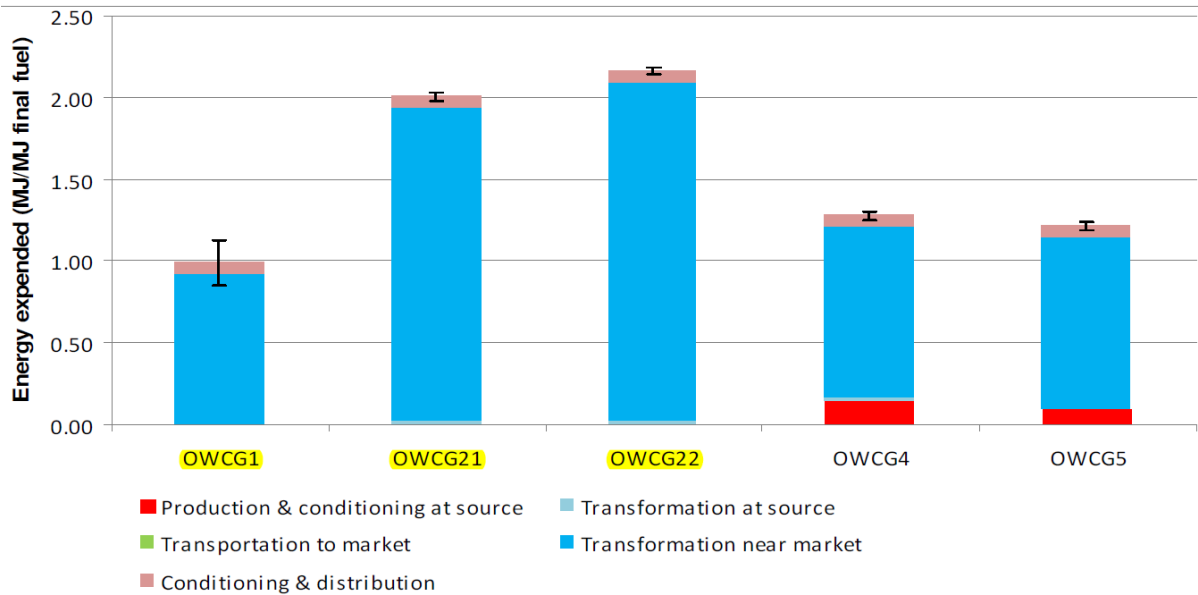
- **שומן מן החי** - לזרם זה ישנם שימושים מתחרים ורק הרמה הנמוכה ביותר של חומר גלם מופנית לייצור דלקים. מתוך כ-2.5 מיליון טונות שומן מן החי המיוצרים בשנה באיחוד האירופי, כ-28% משמשים לייצור אנרגיה (למעלה מ-80% בבעירה בתוך מפעלי עיבוד הבשר), אך רק 2.34% משמשים לייצור (מסובסד) של ביודיזל.
- **שמן משומש** - ההערכה היא כי באיחוד האירופי ישנו פוטנציאל בהיקף של 3.55 מיליון טון בשנה, כאשר בפועל רק כ-0.7 מיליון טון אכן נאספים, מתוכם 0.5 מיליון טון (פחות מ-15% מהפוטנציאל) משמשים לייצור ביו-דיזל.
- **פסולת חקלאית** - הפקת דלקים מזרם זה, בהשוואה לייצור אנרגיה מאותה הפסולת, דורשת חומר-גלם ומתקנים בהיקף נרחב על מנת להיות כלכלית. ממחקרים המובאים בדו"ח וניתוחם עולה כי גורמים של היקף הפסולת ופיזור, עלויות שינוע, שונות בין-שנתית בכמויות הזמינות, שימושים מתחרים והצורך בשמירה על העמידות ויכולת ההזנה של הקרקע מגבילים את פוטנציאל ייצור האנרגיה מפסולת חקלאית באופן משמעותי, ואף יותר מכך באשר לאפשרות המעשית לייצר ממנה דלקים לתחבורה.

לא מובאים מן הדוח נתיבי גזיפיקציה, היות והם אינם עוסקים בפסולת הרלוונטית לישראל (קיימים בדוח נתיבי גזיפיקציה של עץ בגידול חקלאי, ופסולת עץ בשילוב עם black liquor שהינו תוצר לוואי של תעשיית הנייר).

5.5.1.3. תוצאות ומסקנות

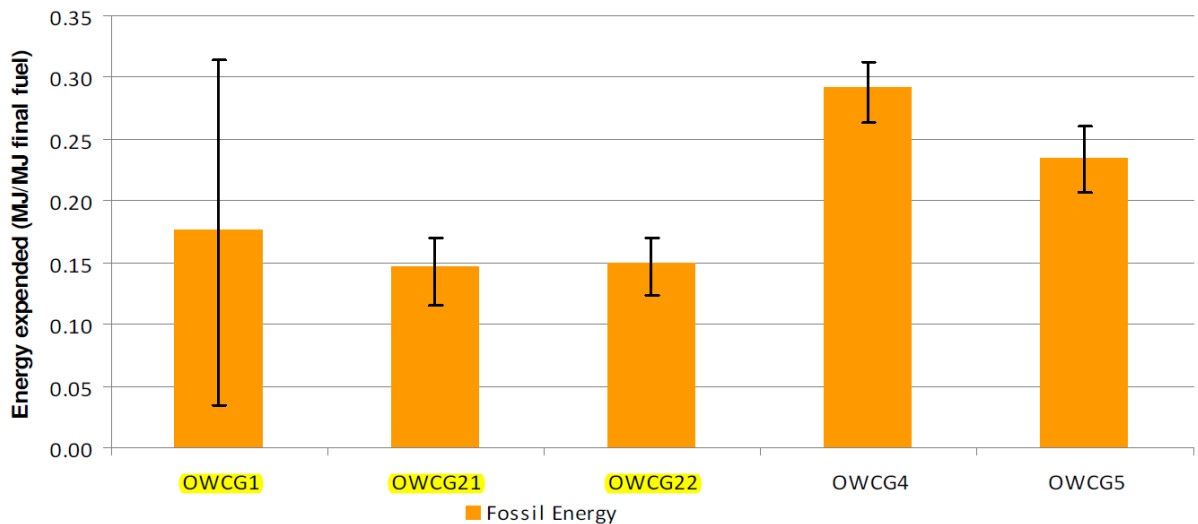
בתרשים 15 מוצג מאזן האנרגיה בנתיבי הביוגז דחוס מעיכול האנאירובי של חומר גלם אורגני (הנתיבים הרלוונטיים לעבודה זו מודגשים), במונחים של מגה ג'אול (MJ) אנרגיה מושקעת למגה ג'אול אנרגיה מתקבלת.

תרשים 15 - מאזן אנרגיה בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל



מקור: JEC (2013)

תרשים 16 - מאזן אנרגיה פוסילית בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל

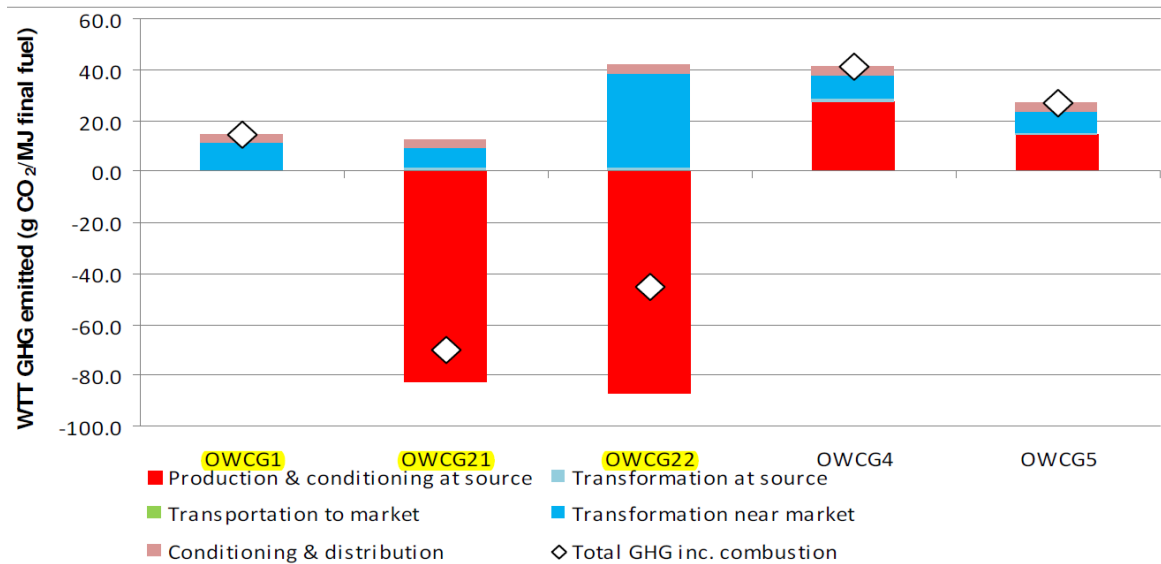


מקור: JEC (2013)

ניתן לראות כי העלות האנרגטית (היחס בין האנרגיה המושקעת לאנרגיה המתקבלת) היא גבוהה ועומדת על 1 במקרה של פסולת עירונית מוצקה ו-2 ומעלה במקרה של פרש בע"ח. זאת, בעיקר בשל מגבלת מקדם ההמרה שהוערכה כאן ב-70%. עם זאת, מאחר וחומר הגלם – שהינו התשומה העיקרית בתהליך – הינו פסולת, אין ליחס לכך חשיבות. התשומות האנרגטיות הפוסיליות בתהליך המוצגות בתרשים 16 הן נמוכות ובטווח של 0.15-0.17MJ למגה-ג'אול של דלק תוצר.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים

תרשים 17 - מאזן פליטות גז"ח בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל



מקור: JEC (2013)

בתרשים 17 מוצג מאזן פליטות גז"ח בנתיבי הביוגז דחוס מעיכול האנאירובי של חומר גלם אורגני, במונחים של גרם שווה-ערך פד"ח למגה-ג'אול של דלק תוצר (g CO₂eq./MJ). ניתן לראות כי סך הפליטות (סימון היהלום) בתהליך ייצור הביוגז מפסולת נמוך ואף שלילי במקרה של פרש בע"ח. זאת, עקב הפליטות המשמעותיות של מתאן הנמנעות עקב השימוש בחומר גלם זה לייצור, כמו גם הפליטה הנמנעת מעצם איסוף והטיפול בפרש המונעים פליטות הנובעות מאי-טיפול או טיפול לא יעיל בזרם פסולת זה. נוסף על כך, החומר הנותר לאחר תהליך העיכול ומשמש כדשן מפחית שימוש בדשנים מלאכותיים ולכן מזכה את תהליך העיכול האנאירובי בקרדיט פליטות שלילי נוסף.

טבלה 24 מסכמת את הפליטות וצריכת האנרגיה בנתיבי הביוגז דחוס השונים, כפי שהוצגו לעיל:

טבלה 24 - סיכום פליטות וצריכת אנרגיה בנתיבי ביוגז דחוס, מהבאר למיכל

Pathway Code	Description	Energy expended (MJ/MJ final fuel)										WTT GHG emitted (g CO ₂ eq/MJ final fuel)						Total GHG inc. combustion					
		Total	Fossil	Nuclear	Renewable	Fracture	Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market	Conditioning & distribution	Range	Total Production & conditioning at source	Transformation at source	Transportation to market	Transformation near market	Conditioning & distribution		Range				
CBG																							
OWCG1	Municipal waste	0.99	0.18	0.15	0.67	67.2%					0.92	0.07	0.84	1.13	14.8			11.5	3.3	11.3	18.1	14.8	
OWCG21	Liquid manure (closed storage)	2.01	0.15	0.09	1.77	88.3%	0.00	0.02			1.92	0.07	1.98	2.03	-69.9	-82.4	1.4		7.9	3.3	-71.3	-68.8	-69.9
OWCG22	Liquid manure (open storage)	2.17	0.15	0.09	1.93	88.9%	0.00	0.02			2.08	0.07	2.14	2.19	-45.2	-87.1	1.5		37.1	3.3	-46.6	-44.2	-45.2
OWCG4	Maize (whole plant)	1.28	0.29	0.10	0.89	69.4%	0.14	0.02			1.05	0.07	1.25	1.30	40.8	27.4	1.4		8.7	3.3	40.4	85.7	40.8
OWCG5	Barley/maize (double cropping) whole plant	1.22	0.23	0.10	0.89	72.9%	0.09	0.01			1.05	0.07	1.19	1.24	26.8	14.1	0.6		8.7	3.3	24.3	38.4	26.8
RECG1	Synthetic methane	1.06	0.04	0.03	1.00	94.0%	0.00						0.10	0.89	3.3	0.0		0.0	0.0	3.3	2.2	4.1	3.3

מקור: JEC (2013)

ניתן לראות כי שלושת הנתיבים הרלוונטיים (פסולת עירונית אורגנית, פרש רטוב ופרש יבש) מתאפיינים בסך פליטות שלילי, וצריכת אנרגיה פוסילית נמוכה. השימוש בחומר גלם שמקורו בפסולת מהווה "פליטה שלילית" המנוכה מסך הפליטות.

כפי שניתן לראות בטבלה 24, גם בהשוואה לייצור דלקים מבוססי נפט או גז טבעי – ייצור ביוגז מפסולת מתאפיין בפליטות הנמוכות ביותר ובצריכת האנרגיה הפוסילית הנמוכה ביותר.

5.5.2. GREET

5.5.2.1 מתודולוגיית המודל

מודל ה-GREET מאופיין ביכולת התאמה דינמית הן של חומרי הגלם והן של נתיבי הדלקים, בפריסה מלאה של כלל השלבים בשרשרת ה-WTW ברמת התשומות והתוצרים, וביכולת לנתח ולהציג נתונים ברמת כל שלב ושלב בתהליך. המודל מנתח בכל נתיב דלק (מהבאר למיכל) ומערכת הנעה (מהמיכל לגלגל) את פליטות גזי החממה, פליטות המזהמים ותשומות האנרגיה המיוחסים להם. עם זאת, הנתונים מבוססים על תמהיל הדלקים והמשתנים הסביבתיים בארה"ב והמודל עוסק במידה מוגבלת בלבד בייצור דלקים לתחבורה מפסולת.

יצוין כי מודל GREET משתמש במינוח Well-to-Pump (WTP) במקום Well-to-Tank (WTT), אך המשמעות, בפועל, זהה.



מקור: GREET 2013

5.5.2.2 נתיבי פסולת וטכנולוגיות במודל

הנתיבים שנבחרו מהמודל מייצגים שני סוגים עיקריים של זרמי פסולת – פסולת יערנות (Forest residue) ופרש פרות (Animal waste; manure). בשל העדר פסולת עירונית מוצקה כחומר גלם במודל, הבחירה בפסולת יערנות מייצגת זרם פסולת קיים שבאופן רגיל יש לטפל בסילוקו. זרם זה הינו חומר גלם אשר ניתן לנתבו לתהליכים טכנולוגיים ותוצרי דלקים שונים, וככזה מאפשר בסיס השוואתי אחיד לנתיבים השונים. במקרה של ייצור מתנול ע"י גזיפיקציה, חומר הגלם שנבחר הינו ביומסה, היות והוא נמצא כקרוב ביותר במאפייניו לפסולת ואשר יש לגביו מידע במודל.

נתיבים שנבחרו מהמודל לייצור דלקים מפסולת:

- **בנזין משאריות יערנות** - Renewable Gasoline from Forest Residue Pyrolysis (פיירוליזה)
- **דיזל פישר-טרופס משאריות יערנות** - Fischer-Tropsch Diesel from Forest Residue (גזיפיקציה)
- **DME משאריות יערנות** - Dimethyl Ether from Forest Residue
- **גז טבעי דחוס מפרש בע"ח** - Animal Waste Anaerobic Digestion to CNG Refueling (עיכול אנאירובי)
- **גז טבעי דחוס משפכים** - Wastewater Sludge to CNG (עיכול אנאירובי)
- **מתנול מביומסה** - Methanol from Biomass (גזיפיקציה)
- **אתנול משאריות יערנות** - Forest Residue Fermentation for Ethanol Production (התססה)

לשם ההשוואה, נבחרו נתיבי דלקים ממקורות מחצביים אשר נמצאו כרלוונטיים למשק הישראלי:

- **בנזין** - Conventional Gasoline from Crude Oil (זיקוק)
- **דיזל דל-גפרית** - Low-Sulfur Diesel from Crude Oil (זיקוק)
- **דיזל פישר-טרופס מגז טבעי** - Fischer-Tropsch Diesel North American Natural Gas (גזיפיקציה)
- **מתנול מגז טבעי** - Methanol from Natural Gas
- **גז טבעי דחוס** - Compressed Natural Gas from North American Natural Gas

יש לציין כי גרסת המודל העדכנית שעליה מסתמכת עבודה זו הציגה שינויים רבים אל מול גרסאות קודמות, ובכללם גם שינויים משמעותיים ביותר בתוצאות המתקבלות בחלק מן הנתיבים. בשל כך, נתיבי דיזל פישר-טרופס משאריות יערנות ודיזל פישר-טרופס מגז טבעי (נתיבי גזיפיקציה) נלקחו בחשבון בניתוח תוצאות נתיבים אלו בגרסת GREET Beta 1.0.

5.5.2.3. תוצאות ומסקנות

בתרשים 19 להלן מובאות תוצאות המודל לפליטות של גזי חממה "מהבאר למיכל" בנתיבים השונים, במונחים של ק"ג שווה-ערך פד"ח לשעט"נ תוצר. ניתן לראות כי בעוד שייצור דלקים שמקורם בפסולות יוצר פחות פליטות גז"ח ביחס לדלקים המחצביים (למעט בחלופת הפירוליזה), ישנם נתיבים בהם הפליטות הן אף שליליות – דהיינו, ייצורם גורע גז"ח. זאת, עקב פליטות נמנעות של CO₂ (בגזיפיקציה שתוצריה דיזל או DmE) ושל CH₄ (בעיכול אנאירובי שתוצרו CNG).

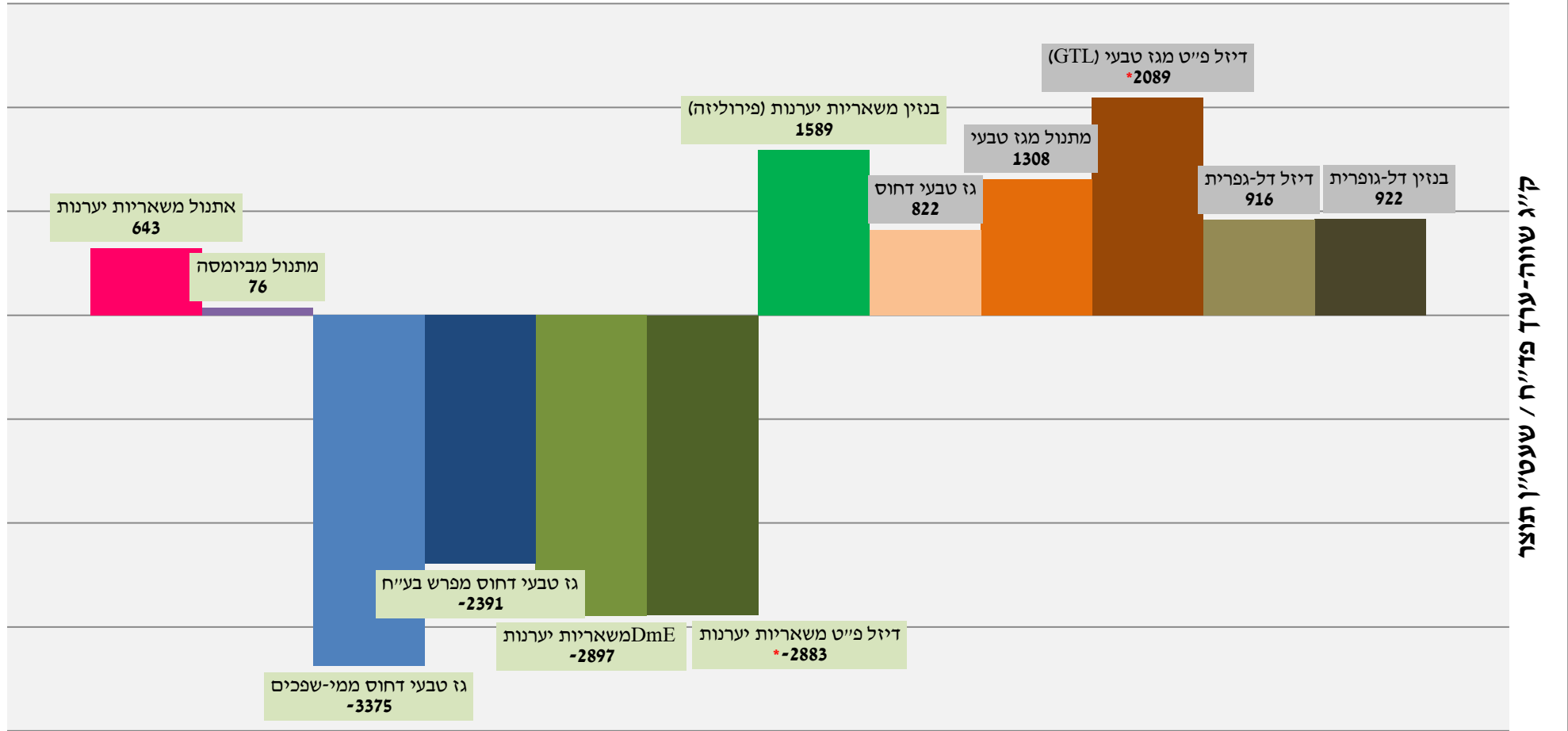
בתרשים 20 מוצגות פליטות מזהמים מסוג VOC, CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, ו-PM_{2.5}. מבין הדלקים שמקורם בפסולת, CNG משפכים הוא המזהם ביותר מבחינת תרכובות אורגניות נדיפות ופחמן חד-חמצני. אתנול הוא המזהם ביותר מבחינת חנקן, וחלקיקים. בנזין מפירוליזה הוא המזהם ביותר מבחינת תחמוצות גופרית. ניתן גם להבחין כי אעפ"י ש-CNG ממי-שפכים הוא המזהם ביותר מבחינת תרכובות אורגניות נדיפות ופחמן חד-חמצני, ייצורו מתאפיין בפליטות מזהמים שליליות של תחמוצות גופרית, תחמוצות חנקן וחלקיקים.

בתרשים 21 מוצגת העלות האנרגטית המושקעת על פני מחזור החיים של כל דלק מהבאר למיכל, במונחים של MMBtu לשעט"נ דלק תוצר (1 toe = 39.7 MMBtu). עלות זו כוללת בתוכה גם את הערך האנרגטי של חומר הגלם עצמו המשמש לייצור הדלק.

בטבלה 25 מוצגות העלויות החיצוניות מפליטות בייצור דלקים בנתיבים השונים, במושגי ש/שעט"נ דלק תוצר. העלויות מחושבות על סמך העלויות החיצוניות המוכרות על ידי המשרד להגנת הסביבה ל-1.1.2013. במגזר התעשייה (מקדמי שווה-ערך פד"ח של CH₄ ו-N₂O מחושבים על סמך פרוטוקול IPCC לשנת 2007 לפי 25GWP ו-298GWP, בהתאמה). בנתיבי הפסולת, עיכול אנאירובי וגזיפיקציה מתאפיינים בעלות חיצונית שלילית – כלומר תועלת (למעט בייצור מתנול, שם העלות היא חיובית אך נמוכה באופן יחסי). בנתיב הבנזין מפירוליזה העלות היא חיובית וגבוהה מאשר בבנזין קונבנציונאלי, ובנתיב האתנול בהתססה העלות היא הגבוהה ביותר.

תרשים 19 - פליטות גזי חממה לשעט"נ תוצר בייצור דלקים, "מהבאר למיכל"

פליטות גזי חממה בייצור דלקים מהבאר למיכל, (ק"ג שווה-ערך פד"ח / שעט"נ דלק תוצר)

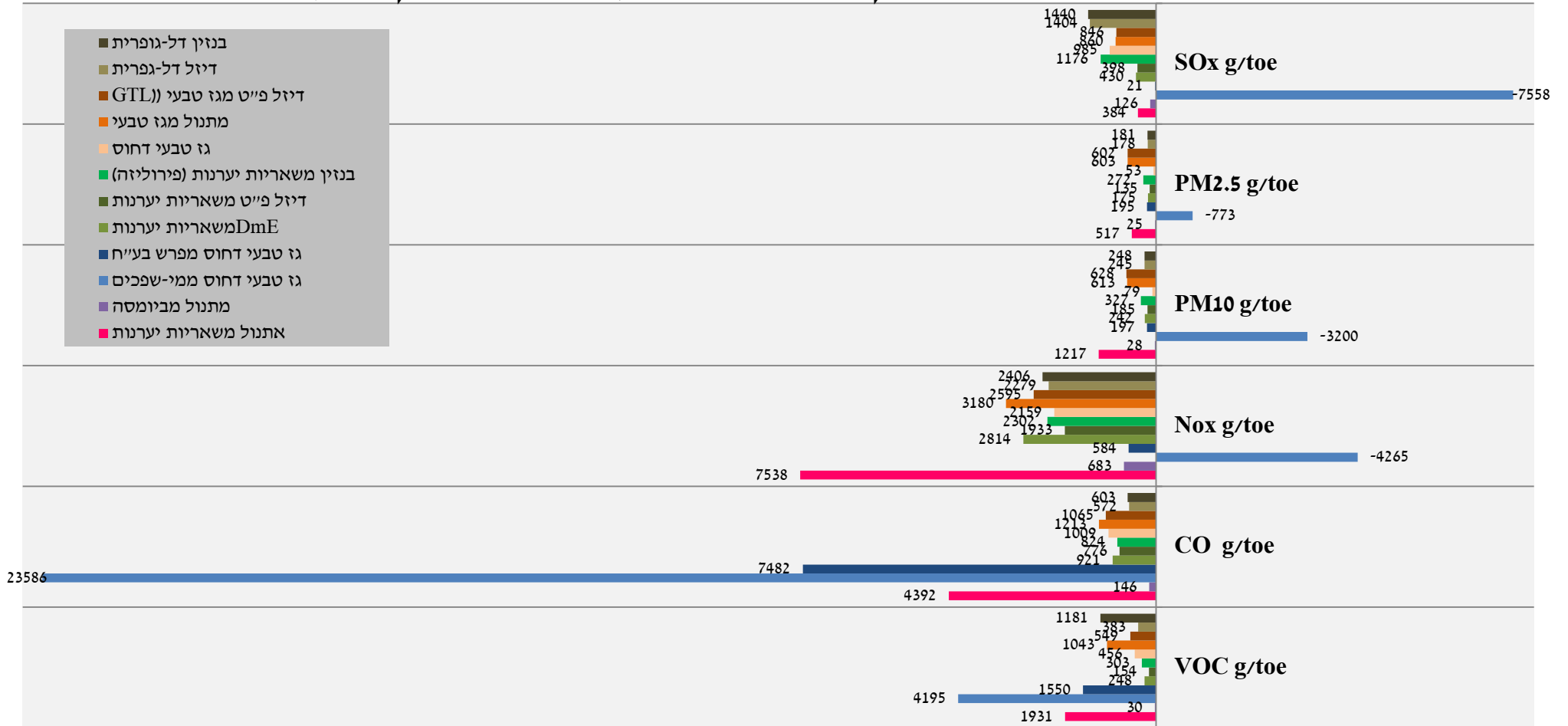


ק"ג שווה-ערך פד"ח / שעט"נ תוצר

* בנתיבים אלו, בשל סטייה חריגה בנתונים בגרסה העדכנית של המודל נלקחו הנתונים מגרסה קודמת (GREET Beta 1.0)

תרשים 20 - פליטות מזהמים לשעט"נ תוצר בייצור דלקים, "מהבאר למיכל"

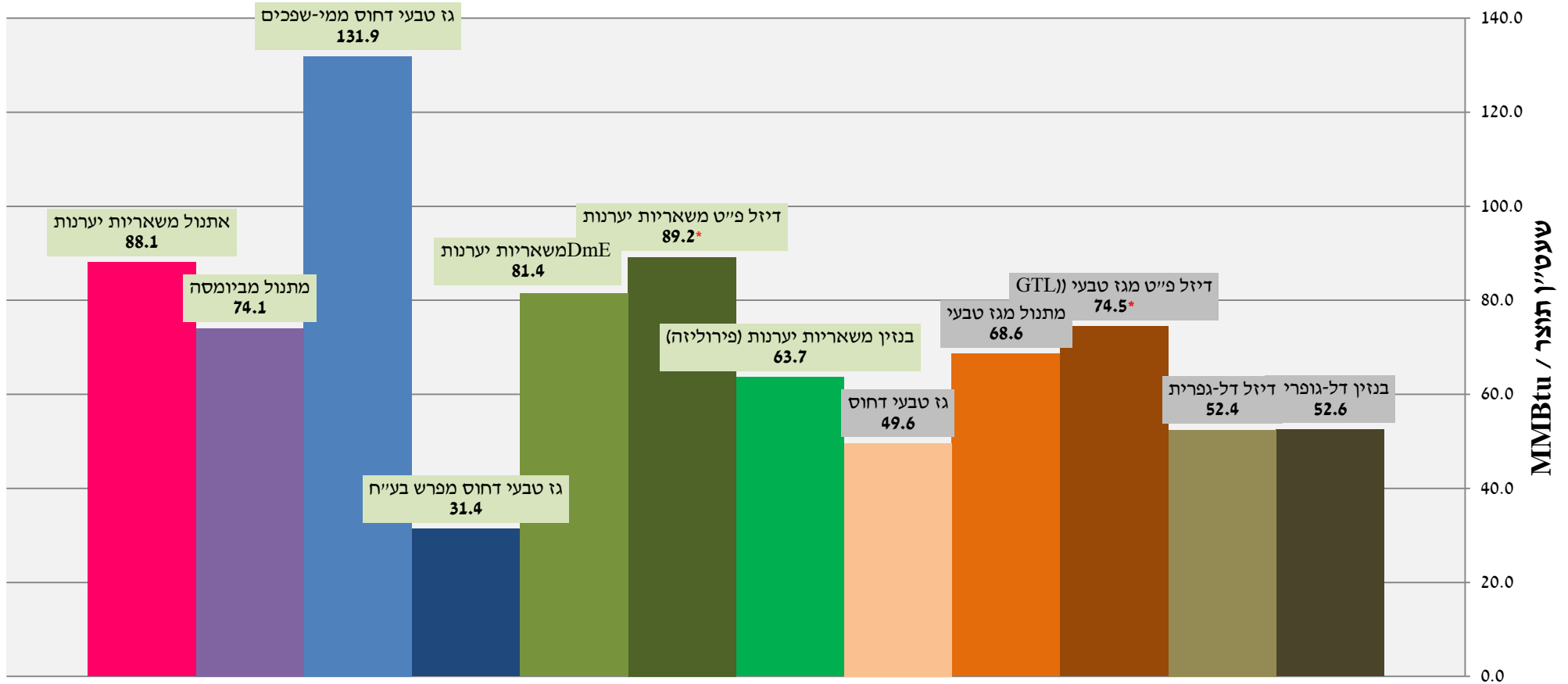
פליטות מזהמים בייצור דלקים מהבאר למיכל (גרם/שעט"נ דלק תוצר)



* בנתיבים אלו, בשל סטייה חריגה בנתונים בגרסה העדכנית של המודל נלקחו הנתונים מגרסה קודמת (GREET Beta 1.0)

תרשים 21 - עלות אנרגטית לשע"נ תוצר בייצור דלקים, "מהבאר למיכל"

עלות אנרגטית בייצור דלקים מהבאר למיכל, (MMBtu/שע"נ דלק תוצר)



* בנתיבים אלו, בשל סטייה חריגה בנתונים בגרסה העדכנית של המודל נלקחו הנתונים מגרסה קודמת (GREET Beta 1.0)

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים

טבלה 25 - עלויות חיצוניות של פליטות בייצור דלקים, "מהבאר למיכל"

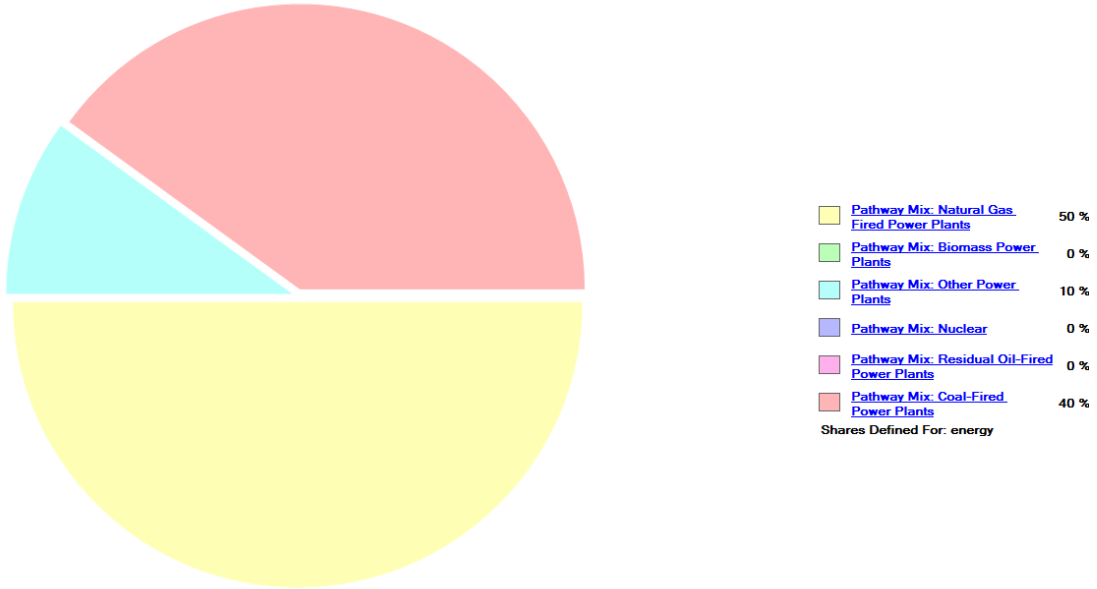
פליטות גרם לשעט"ן	עלויות חיצוניות נה/טון (תעשייה)	בנזין דל-גופרית	דיזל דל-גפרית	דיזל פ"ט מגז טבעי	מתנול מגז טבעי	גז טבעי דחוס	בנזין משאריות יערנות (פירוליזה)	דיזל פ"ט משאריות יערנות (גזיפיקציה)*	DME משאריות יערנות (גזיפיקציה)	גז טבעי דחוס מפרש בע"ח	גז טבעי דחוס משפכים	מתנול מביומסה (גזיפיקציה)	אתנול משאריות יערנות (תסיסה)
		נתיבי ייחוס (דלקים ממקורות מחצביים)						נתיבי דלקים מפסולות					
VOC	16,615 ₪	1181	383	549	1043	456	303	154	248	1550	4195	30	1931
CO	0 ₪	603	572	1065	1213	1009	824	776	921	7482	23586	146	4392
NOx	31,724 ₪	2406	2279	2595	3180	2159	2302	1933	2814	584	-4265	683	7538
PM10	77,142 ₪	248	245	628	613	79	327	185	242	197	-3200	28	1217
PM2.5	119,254 ₪	181	178	602	603	53	272	135	175	195	-773	25	517
SOx	44,633 ₪	1440	1404	846	860	985	1176	398	430	21	-7558	126	384
CH4	2,575 ₪	5020	4991	37228	8917	13914	3223	527	436	-170989	70559	88	1049
N2O	30,694 ₪	10	10	7	18	6	10	12	30	-495	-107	1	499
CO2	103 ₪	795042	789720	1156372	1079672	474136	1508404	-2899598	-2916498	2030997	-5107413	73107	6289637
סה"כ נה/שעט"ן		296.1 ₪	276 ₪	464.7 ₪	410.5 ₪	217.4 ₪	352.2 ₪	184.91 ₪	146.27 ₪	162.6 ₪	1,089.6 ₪	40.74 ₪	1,109.7 ₪

* בנתיבים אלו, בשל סטייה חריגה בנתונים בגרסה העדכנית של המודל נלקחו הנתונים מגרסה קודמת (GREET Beta 1.0)

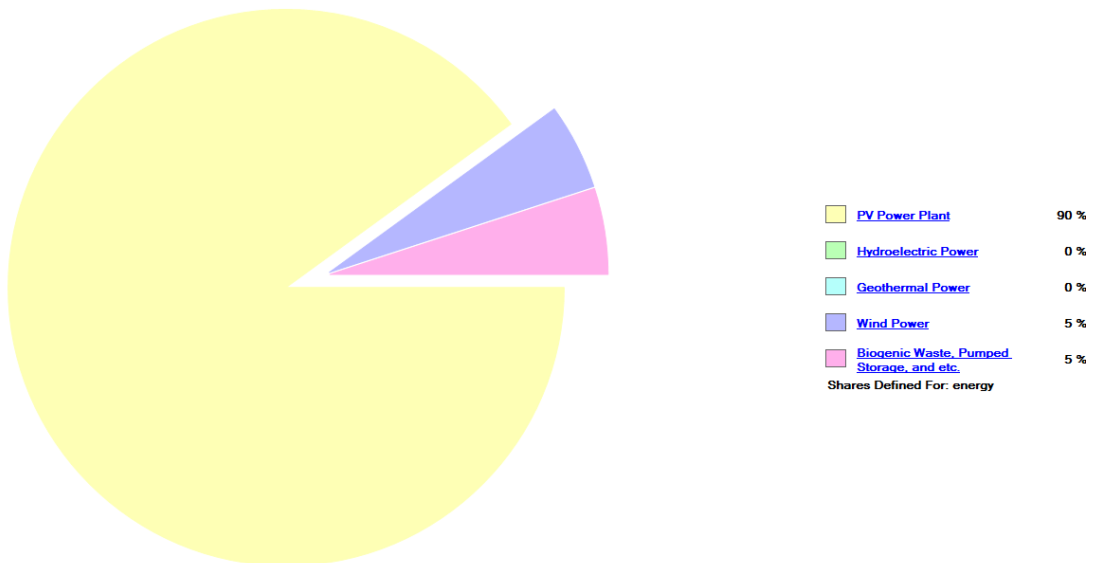
5.5.2.4. השפעת תמהיל החשמל על תוצאות ניתוח מחזור חיים

על-מנת לבחון את השפעת תמהיל החשמל על הפליטות המיוחסות לנתיבים השונים, הושו התוצאות שנתקבלו לתוצאות המתקבלות לאחר התאמת המודל לתמהיל חשמל מוצע למשק הישראלי. תמהיל זה כלל 50% גז טבעי, 40% פחם ו-10% מקורות מתחדשים לפי החלוקה של 90% סולארי, 5% רוח ו-5% אגירה שאובה וחשמל מפסולת.

תרשים 22 - תמהיל חשמל מוצע לישראל



תרשים 23 - תמהיל מקורות חשמל מאנרגיה מתחדשת

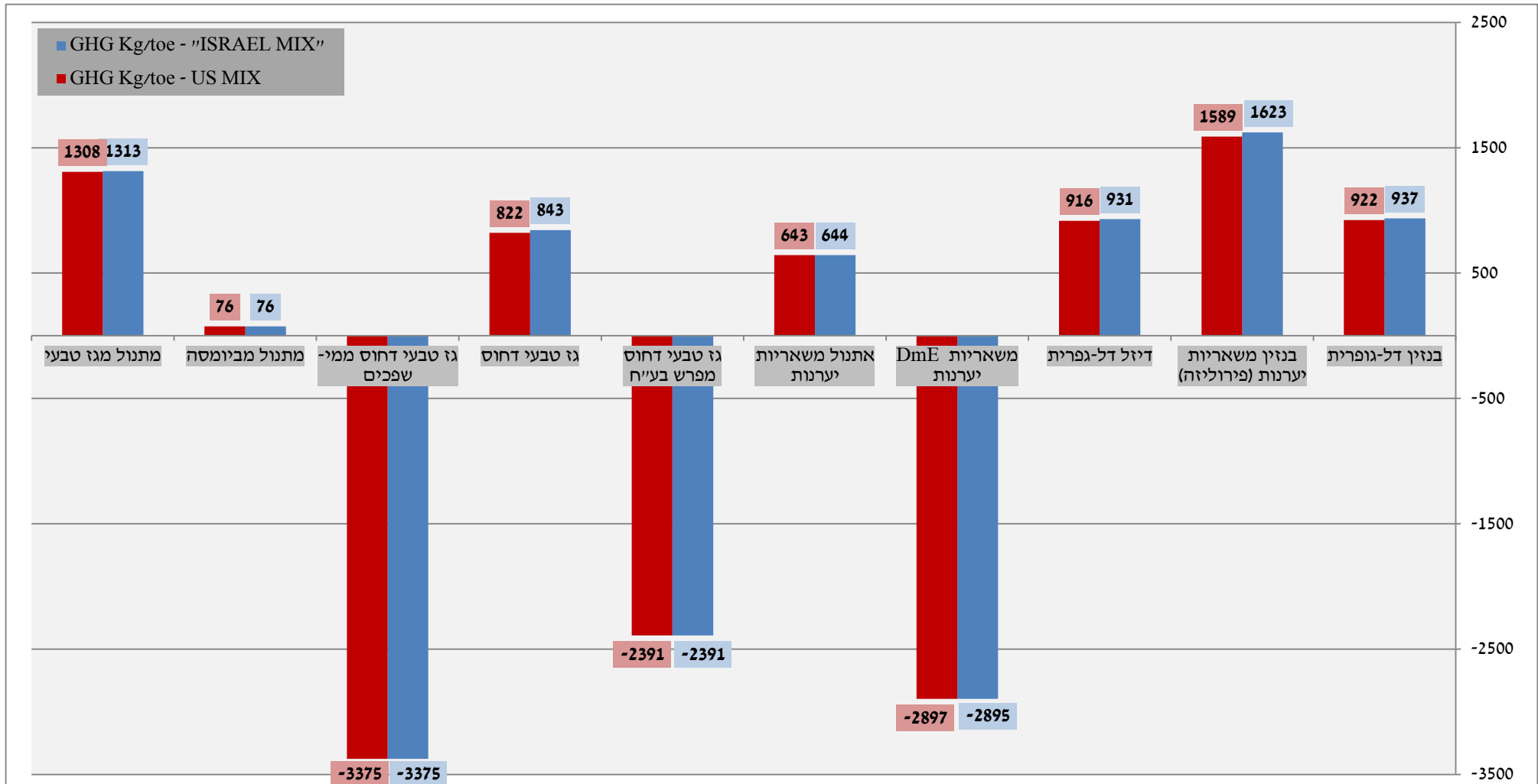


מקור: GREET (2014)

בחינת התוצאות, המוצגות בתרשים 1, מעלה כי אין הבדל משמעותי ברמת הפליטות בתמהילים השונים – משמע לתמהיל החשמל השפעה שולית על שיעור הפליטות בתהליכים שנבחנו.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים

תרשים 24 - השוואת פליטות גזי-חממה בתמהיל החשמל האמריקאי לעומת תמהיל מוצע לישראל



* נתיבי דיזל פ"ט מגז טבעי (GTL) ודיזל פ"ט משאריות יערנות הושמטו מניתוח זה בשל סטייה חריגה בנתונים בגרסה העדכנית של המודל

6. סיכום

תחליפי הדלקים לתחבורה, בשונה מסקטורי אנרגיה אחרים, מוגבלים בטווח הקצר (וכנראה הבינוני), בדלקים נוזליים או גזיים. בעוד שלמוצרי אנרגיה אחרים (כגון חום או חשמל) יש מקורות מתחדשים חלופיים ומתחדשים, לסקטור התחבורה לא צפויות חלופות מתחדשות ליישום בטווח זה, מלבד טכנולוגיות להמרת ביומסה לדלקים (DOE⁴⁸).

תחליפי דלקים מביומסה ייעודית נמצאים בשימוש כבר מספר עשורים ומהווים כיום כ-3% מסך ביקוש הדלקים העולמי, בשנים האחרונות מתפתחת ביקורת הולכת וגוברת כנגד שימוש בגידולים ייעודיים להפקת דלקים לתחבורה, ומושקעים מאמצי מחקר ופיתוח טכנולוגיות להמרת הביומסה (או חומרים סינטטיים) הנמצאת בחומר הקיים קרי, "תחליפי דלקים דור 2". התכנית הרב שנתית (עד 2020) של משרד הטכנולוגיות לביו-אנרגיה במשרד האנרגיה האמריקאי, שפורסמה ב-2013⁴⁹, מגדירה מערך פעולה נרחב הכולל שלוש זרועות המספקות מסגרת קבלת החלטות הכוללת את כלל החוליות בשרשרת ייצור הערך:



חשוב להדגיש כי חוליה אחת לא תוכל להתקיים ללא רעותה וכי ההתקדמות צריכה להיות בשלושת הכיוונים יחד. מצאי פסולות אינו כשלעצמו תנאי מספיק להיווצרות שוק של הפקת דלקים מהן שכן פוטנציאל הפקת הדלק מהן תלוי חזק באיכות החומר ומידת הזדהמותו בעת שרשרת האיסוף והטיפול בפסולת⁵⁰. איכות חומר הגלם מגדירה את הכדאיות הכלכלית בשימוש בכל טכנולוגיה ואת איכות התוצרים שיתקבלו (כמו גם עלויות השדרוג של תוצרי הביניים). כמו כן היצע הטכנולוגיות להמרה מתרחב שכן זרמים הומוגניים ונקיים ממזהמים ופתוגנים מאפשרים שימוש בטכנולוגיות רגישות למזהמים (כמו הידרוליזה להפקת אתנול צלולוזי, טכנולוגיה שלא נבחנה במסגרת המסמך).

⁴⁸ http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/mypp_may_2013.pdf

⁴⁹ <http://www1.eere.energy.gov/library/default.aspx?page=1>

⁵⁰ אופן ניהול הביומסה במשק הישראלי תלוי במדיניותו של המשרד להגנת הסביבה ובגורמים נוספים אחרים ומהווה גורם אקסוגני למערך קבלת ההחלטות, מנקודת מבטו של משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים.

עיקרי הממצאים ומסקנות

- ✓ הביקוש לדלקים בישראל צפוי לעלות, ודלקים מתחדשים מהווים אלטרנטיבה מועדפת, (מנקודת מבטו של שוק התחבורה) כתחליפים לדלקים פוסיליים. עם זאת, כפי שהוצג במסמך, התחום מדשדש, לא מיושם באופן מסחרי ולא צפוי לו על פי ה-IEA⁵¹ קידום משמעותי בתחום. קיומם של יתרונות מובהקים בהמרת פסולות לאנרגית חום או חשמל (כדאיות שלא הוצגה במסמך), מנציחים חוסר ניסיון תפעולי בתחום, הן בארץ והן בעולם.
- ✓ ניתוח כלכלי וסביבתי של טכנולוגיות שנמצאות בשלבי יישום כה מוקדם, בנוסף לתנאי שוק משלים משתנה (שוק הפסולת), טומן בחובו רמת אי וודאות גבוהה מאוד. לפיכך, יש להתייחס לממצאים כניתוח ראשוני גרידא.
- ✓ היצע תחליפי הדלק מהפסולות בישראל יכול לספק, תחת התרחיש המקסימלי, כ-12.5% מהביקושים (על פי נתוני מנהל הדלק לשנת 2013, סקטור התחבורה צרך כ-5.789 מיליון שעט"ן) תחת תרחיש הקצאת הפסולת בו יופנו הזרמים הרקבוביים לעיכול אנאירובי והזרמים היבשים לגזיפיקציה (כאשר בגזיפיקציה מיוצר מתנול⁵²).

כמות דלקים מקסימאלית לייצור מפסולות

גזיפיקציה			עיכול אנאירובי	טכנולוגיה
מתנול (אלפי ליטר)	דיזל BTL (אלפי ליטר)	אתנול (אלפי ליטר)	ביומתאן (98%) (אלפי מ"ק)	
1,060,328	459,610	511,222	396,467	כמות מקסימאלית לייצור מפסולות
0.000381	0.000795847	0.000508131	0.000815587	מקדם המרה (שעט"ן/ליטר או מ"ק)
403.98	365.78	259.77	323.35	אלפי שעט"ן

- ✓ הזרמים הפיסיבלים ביותר כלכלית, להפקת ביומתאן מפסולת ע"י עיכול אנאירובי הם הזרם האורגני הרקבובי המצוי בזרם הפסולת הביתית (המופרד והמעורב) והפרש היבש. עלות ייצור הביומתאן מוערכת בכ-46.3 \$/MMBTU (\$13.12), כאשר חומר הגלם הינו פסולת עירונית רטובה. זוהי העלות הנמוכה ביותר מבין זרמי הפסולת שנבחנו (זאת בשל מקדם התפוקה הגבוה של הזרם) אך עדיין היא יקרה פי שתיים מהעלות האלטרנטיבית של הגז הטבעי לשימוש זה (המוערכת בכ- \$6.5/MMBTU). ניתוחי הרגישות מאירים את ההבדל בין הזרמים מבחינת רגישותם לשינויים

⁵¹ <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,27685,en.html>

⁵² נזכיר כי שלושת תוצרי הגזיפיקציה הינם תחליפיים ו"מתחרים" על אותם זרמי פסולת יבשה.

במחירים. מחירי כניסה וסילוק פסולות (שהם במונחי ש/טון פסולת) ישפיעו פחות על זרמים בעלי מקדמי תפוקה גבוהים. לעומת זאת, מחירים שמתייחסים לעלויות השדרוג (שהן במונחי ש/מ"ק ביוגז או ביומתאן) משפיעים על עלות ההפקה, בכל זרם, באופן הפוך.

להלן סיכום הנתונים הכלכליים שהוצגו עבור תוצרי הגזיפיקציה:

עלות ייצור תחליפי דלקים מפסולות - סיכום ממצאים, ש/ל ליטר

אתנול	BTL	מתנול	
4.06	5.11	2.19	עלות ייצור - מפסולת עירונית
2.51	4.76	2.11	עלות ייצור - מגזם
3.82	4.62	4.29	ש/ל ליטר שווה ערך בנזין

- ✓ מחיר הפקת מתנול בתהליך גזיפיקציה של פסולות הינו 2.19 ש/ליטר עבור פסולת עירונית ו-2.11 ש/ליטר עבור פסולת הגזם. עבור הגזם (הזרם הזול יותר), עלות ייצור המתנול גבוהה בכ-115% מעלות הפקת המתנול מגז טבעי (שעומד על כ-0.98 ש/ליטר⁵³). עוד עולה כי על אף שעבור הגזם אין עלויות כניסה למתקן, עדיין עלות הפקת הדלק ממנו זולה יותר ביחס לפסולת עירונית עם מחיר כניסה של 140 ש/טון. ייקור מחיר הכניסה לכ-200 ש/טון פסולת מוזיל את עלות ההפקה לכ-1.96 ש/ליטר מתנול.
- ✓ עלות תפוקת ה-BTL ממתקן גזיפיקציה של פסולת עירונית במחיר כניסה של 140 ש/טון, מוערכת בכ-5.11 ש/ליטר, מחיר יקר משמעותית ממחירי דלקים קונבנציונליים (במחיר חבית נפט של 112.5 \$ נמכרים בנזין וסולר בתחנות התדלוק בכ-3.63 ו-3.79 ש"ל לליטר בהתאמה, ללא מיסים). שימוש בגזם כחומר גלם יוזיל את העלות לכ-4.76 ש/ליטר אל אף שהזרם אינו "משלם" מחיר כניסה למתקן. כמו כן ייקור מחיר הכניסה לפסולת עירונית יוזיל את העלות לכ-4.58 ש/ליטר BTL.
- ✓ עלות הפקת האתנול נעה בין 2.51 ש/ליטר אתנול לכ-4.06 ש/ליטר אתנול. עלות הפקת האתנול הזולה ביותר היא מזרם הגזם (אל אף שאין שמחיר הכניסה שלו הוא 0).

⁵³ ראה- "שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל, שלב ב'", קבוצת פארטו DHV, 2012

בטבלה להלן מוצגים הממצאים כולל ניתוח מחזור החיים עבור הפקת דלק מגזם. בהעדר תהליך דומה במודל ה-GREET, ניתוח כזה לא התאפשר עבור זרם הפסולת העירונית. לפיכך, עבור טכנולוגיית הגזיפיקציה נבחנו העלויות כשחומר הגלם הינו גזם ועבור ה-CNG נבחן הזרם הקרוב ביותר לזה של פסולת עירונית (מבחינת עלות הייצור) - פרש בעלי חיים.

עלויות ייצור דלקים מפסולות לרבות עלויות חיצוניות (מגזם בלבד)

מפרש CNG בע"ח יבש	אתנול E100 (LHV)	דיזל BTL (LHV)	מתנול M100 (LHV)	
	2.51	4.76	2.11	עלות ייצור ₪/ליטר - מגזם
51.36				עלות ייצור ₪/MMBTU
0.000815587	0.000508131	0.000795847	0.000381	מקדם המרה לשעט"ן (שעט"ן/ליטר או מ"ק)
-162.64	1109.69	-184.91	40.74	סה"כ ₪ לשעט"ן עלות חיצונית
-3.8	0.56	-0.15	0.016	סה"כ ₪/ליטר (או MMBTU) עלות חיצונית
47.54	3.08	4.61	2.13	סה"כ עלות לליטר (או MMBTU)