

השבת בוצת שפכים :

היבטים כלכליים, סביבתיים וארגוניים

(יישום למתקן השפד"ן)

Utilization of Sewage Sludge:

Economic, Environmental and Organizational Aspects

דו"ח מסכם

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ופיתוח הכפר

ע"י

אלי פיינרמן המחלקה לכלכלה חקלאית ומנהל, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית

גלעד אקסלרד המחלקה לכלכלה חקלאית ומנהל, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית

תומר גרשפלד המחלקה לכלכלה חקלאית ומנהל, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית

Feinerman Eli, Department of Agricultural Economics and Management, Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, P.O.B. 12 Rehovot 76100. E-mail: feiner@agri.huji.ac.il

Axelrad Gilad, Department of Agricultural Economics and Management, Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, P.O.B. 12 Rehovot 76100. E-mail: axelrad@agri.huji.ac.il

Gershfeld Tomer, Department of Agricultural Economics and Management, Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, P.O.B. 12 Rehovot 76100. E-mail: sunshiny@netvision.net.il

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים : לא

תקציר

מטרת המחקר הנוכחי היא ניתוח ההיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הכרוכים בשימוש בבוצת שפכים עירוניים ותעשייתיים מטופלים בחקלאות ברמה האזורית. תשומת לב מיוחדת תינתן ליחסים שבין המפעל לטיהור שפכים (מט"ש), יצרן הבוצה, לבין החקלאים השונים, צרכני הבוצה הפוטנציאליים, תוך הדגשת חלופות שונות להקצאת עלויות ורווחים בין היחידות הכלכליות הנבחנות. הניתוחים יתבצעו בהתייחס למספר חלופות ארגוניות: הקצאה על-ידי מתכנן מרכזי, והקצאה במסגרת משא ומתן (משחק שיתופי) בין המט"ש לבין צרכני הבוצה החקלאיים. הממצאים האנליטיים ייושמו למפעל השפד"ן.

חשיבותו העיקרית של המחקר תתבטא בפיתוח מנגנון הקצאה הוגן, קל ליישום אשר יעשה שימוש נכון בחומרי הגלם המצויים באזור (יחידות כלכליות, בוצה, תקנות וכד') לצורך מציאת פתרון להקצאת בוצה מיטבית למגזר החקלאי (דישון) ולמט"ש (שפד"ן).

המחקר יתבצע ב-2 שלבים עיקריים: א. פיתוח מודל תיאורטי, אשר יתאר תנאים לשווי-משקל אזורי בין השפד"ן לבין הצרכנים החקלאיים. הניתוח יערך בהתייחס לחלופת הקצאה על ידי מתכנן מרכזי, המשיא את סך הרווחה החברתית של האזור הנחקר. ב. יישום גישות, מתחום המשחקים השיתופיים, לאיתור הקצאות אופייניות ליחידות הכלכליות, תוך ניצול יתרונותיהן היחסיים, בהתבסס על תוצאות השלב הקודם.

בשנת המחקר הראשונה ביצענו את השלבים הבאים: סקירת ספרות, פיתוח מלא של המודלים האנליטיים של שלב א'. בשנה השנייה של המחקר, השלמנו את מלאכת איסוף הנתונים האמפיריים, ביצענו יישום אמפירי של הממצאים האנליטיים של שלב א', יישמנו גישות מתחום המשחקים השיתופיים, סיכום ומסקנות.

פרק 1: מבוא

1.1 משק המים ומאזן השפכים

משק המים בישראל מצוי בעיצומו של משבר, שמאפייניו הבולטים הם גירעון הולך וגובר במאזן המים, ירידה באיכויות מי האקוויפרים (עליה במליחות) וזיהום נחלים ומי ים עקב הזרמת שפכים לא מטופלים מצד המגזר העירוני והתעשייתי.

ביטוי כמותי מרכזי של המשבר, היא הירידה החדה ביכולת שאיבת מי התהום ומי הכנרת מבלי לחצות קווים אדומים מוגדרים (זסלבסקי, 2002), כשהמגזר החקלאי סופג את מירב הקיצוצים במכסות השימוש במים. כיום, משק המים מצוי בגרעון מאזני של כ- 2000 מלמ"ק. משמעות הדבר הינה סכנת פגיעה חמורה, בלתי הפיכה, במקור המים ו/או אובדן כושר שאיבה (רשות המים, 2008). גורמים רבים תורמים למשבר המים בישראל: הגידול באוכלוסיה, העלייה ברמת החיים, שאיבת יתר של מי כנרת, מי תהום, העברת מים שפירים לירדן ולרשות הפלשתינאית כנדרש בהסכמים (כ- 102 מלמ"ק) והתרחבות התשתיות האורבאניות הגורמת להקטנת היקף חלחול מי הגשמים למי התהום. צריכת המים במגזר העירוני גדלה ועמה גדלה כמות השפכים המוזרמים למתקני טיהור השפכים (מט"ש) (ראה נספח 1.1). כך למשל, בשנים 2000 ו- 2006 עמדה סך כמות השפכים שהוזרמה למכונן הטיפול בישראל על כ- 380 מלמ"ק וכ- 437 מלמ"ק, בהתאמה (למ"ס, 2007). מגמה זו צפויה להימשך והתחזית לשנת 2010 ואילך עומדת על כמות של למעלה מ- 500 מלמ"ק שפכים בשנה. לפיכך, המצב הנוכחי מחייב בחינה מחודשת של פוטנציאל המים והאצת פיתוח של מקורות מים חלופיים, קרי: התפלת מי-ים, מחזור מי שפכים עירוניים ותעשייתיים, תפיסת שיטפונות ועוד. יחד עם זאת, הגידול בכמות השפכים המוזרמים למט"ש מגדיל באופן ישיר את כמות תוצרי הלוואי של תהליך הטיפול בשפכים: קולחים¹ ובוצת שפכים². היצע השפכים המטוהרים צפוי לגדול ועמו התרחבות השימוש במים מושבים לצרכי השקיה ושיקום נחלים.

הגידול הצפוי בצריכת המים במגזר העירוני והתעשייתי יגדיל את כמות השפכים המועברים למטש"ים ואת כמות הבוצה הנוצרת. על כן במחקר הנוכחי, נתמקד בניתוח ההיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הכרוכים במציאת פתרון לסילוק הבוצה לשימוש המגזר החקלאי (כחומר מדשן). תשומת לב מיוחדת תינתן ליחסים שבין המט"ש, יצרן הבוצה, לבין מספר קבוצות של חקלאים, צרכני הבוצה, תוך הדגשת חלופות שונות להקצאת עלויות ורווחים בין היחידות הכלכליות הנבחות.

הניתוחים יתבצעו בהתייחס למספר חלופות ארגוניות: הקצאה על-ידי מתכנן מרכזי והקצאת מגשר אובייקטיבי מוסכם מראש, שיכול להציע מספר חלופות הקצאה, שתתבססנה על עקרונות הקצאה מקובלים מתחום המשחקים השיתופיים (רציונאלית אישית וקבוצתית, יעילות, סימטריות ועוד). הממצאים האנליטיים ייושמו לאזור דרום הארץ (פרק 5).

1 קולחים – מי שפכים שעברו תהליכי טיפול וטיהור.

2 בוצה – תוצר לוואי של תהליך טיפול בשפכים במפעל טיפול בשפכים, למעט תוצר כאמור המתקבל בתהליך המקדמי של הטיפול שבו מבוצעים סינון גס והפרדת חול ושמנים (תקנות המים, 2004).

1.2 המסגרות החוקיות והארגוניות: סוגיות עיקריות בנושא הטיפול בשפכים

על פי חוק המים (1959): "מקורות המים הם כל אגני התהום, הנהרות, האגמים ושאר זרמים ומקווים של מים... לרבות שפכים". הטיפול בשפכים נועד לסלק מטרדים, למנוע זיהום של הסביבה ושל מקורות המים ולהגדיל את היצע המים לשימושים שונים (השקיה חקלאית ושיקום נחלים).

מבחינה חוקית, במשך שנים נושא הטיפול בשפכים התאפיין במחסור במנגנון הסדרה אשר יספק מענה הולם לסוגיות המים והשפכים, בחוקים מיושנים ובריבוי ישויות הנושאות באחריות הטיפול. נוצר מצב של חוסר תיאום בין המוסדות, טיפול לקוי בבעיות והתנערות מאחריות. רשויות מקומיות רבות לא הסכימו לשאת בעול ההקמה והאחזקה של מערכות ההולכה והסילוק של שפכייהן, מתוך הנחה שגופים ממשלתיים ואחרים מטפלים בכך (גולדמן, 1996; זסלבסקי, 2002). בעקבות בעיות אלו החליטה ממשלת ישראל כי יש צורך להסדיר את מערך הביוב על ידי גורם ממשלתי יחיד והקימה ב-1992 את **המנהל לפיתוח תשתיות ביוב**³ (המילת"ב). בשנת 2004 תוקנו תקנות המים, שמטרתן מניעת זיהום מקורות מים וגרימת מפגעים סביבתיים עקב סילוק לא מבוקר של בוצה שמקורה בשפכים עירוניים⁴. התקנות מחלקות את הבוצה לשתי רמות איכות, סוג א'⁵ וסוג ב'⁶ ומפרטות הנחיות ברורות לגבי אופן השימוש והסילוק של כל סוג בוצה, בדגש על שימושים חקלאיים ואחרים בהתאם לרמות סף מחמירות של ריכוזי מתכות כבדות בבוצה וכן הגדרת מרווחי ביטחון להקמת מט"שים ולסילוק בוצה ממקורות מים ומתחומי יישוב (תקנות המים, 2004). בתחילת שנת 2007 התאחד המילת"ב עם נציבות המים והוקמה הרשות הממשלתית למים ולביוב (להלן: "רשות המים"). רשות המים הוקמה כדי ליצור גוף בעל ראייה כוללת של צרכי משק המים, ובמטרה לרכז את הסמכויות בידי גורם מקצועי-ממשלתי שבידיו הכלים והיכולת לנהל ולפקח בצורה הנכונה והיעילה ביותר את משק המים בישראל (רשות המים, 2008).

מבחינה ארגונית, האחריות על השפכים מתחלקת בין מספר רב של ישויות. מצד השלטון המרכזי, הפיקוח על אופן הטיפול בשפכים מופקד בידי משרד הפנים, משרד הבריאות, משרד החקלאות, המשרד לאיכות הסביבה ורשות המים, ואילו חובת איסוף השפכים, הטיפול בהם וסילוקם מתחומי היישובים חלה על הרשויות המוניציפאליות⁷.

באופן כללי, **משרד הבריאות** אחראי להגדרת תקני טיהור השפכים; **המשרד לאיכות הסביבה** אחראי על מניעת זיהום הסביבה והגנה בפני זיהום מקורות מים; **משרד הפנים** מפקח על פעילויות המים והביוב של הרשויות המקומיות; **משרד האוצר** אחראי על תקצוב והקצאת מקורות פיננסיים (כולל מתן סובסידיות) לנושאי המים והביוב; **רשות המים** הינה גוף הביצוע העיקרי בתחום ניהול משק המים, ואחראית בין היתר על הסדרת משק המים, פיקוח וניטור עליו, הנפקת אישורי הפקה לספקי המים, הקצאת כמויות מים (מכסות) לצרכנים השונים, קביעת תעריפים והיטלים לשימושי המים

3 המינהל לפיתוח תשתיות ביוב (המילת"ב), פועל כיחידה אורגנית במשרד התשתיות הלאומיות, ומשמש כזרוע ליישום מדיניות הממשלה בתחום פיתוח תשתיות הביוב במשק. באמצעות המילת"ב משקיעה מדינת ישראל סכום של כ-500 מיליון ₪ בשנה בתחום הביוב, הן בהקמת תשתיות חדשות והן בשיקום ושדרוג תשתיות קיימות. התקציבים ניתנים לרשויות המקומיות לצורך פיתוח תשתיות הביוב והטיפול בשפכים (משרד התשתיות הלאומיות, 2006).

4 שפכים עירוניים – פסולת המורחקת בהזרמה, שמקורה בבתי מגורים בעירייה, מועצה מקומית או איגוד ערים שמתפקידו התקנת ביוב או החזקתו, ולרבות שפכים וקולחים שמקורם בתהליכים תעשייתיים או גידול בעלי חיים המחוברים למערכת הביוב העירונית (תקנות המים, 2004).

5 בוצה סוג א' – בוצה מיוצבת שעומדת בקריטריונים מחמירים מבחינת רמת הפתוגנים, חומרים כימיים ומתכות כבדות שמצויים בה. מוגבלת לשימוש רק מבחינת עומס חנקן כולל ליחידת שטח (תקנות המים, 2004).

6 בוצה סוג ב' – בוצה מיוצבת שהמוצע הגיאומטרי של ריכוזי החיידקים הצואתיים שבה קטן מרמה נקובה לגרם אחד של חומר יבש. ריכוז נמוך מאשר הנדרש מבוצה סוג א' (תקנות המים, 2004).

7 הסדרת הביוב בתחומה של רשות מוניציפאלית מעוגנת בחוק הרשויות המקומיות (ביוב), תשכ"ב-1962 (חוק הביוב), ובחקיקת עזר של הרשות.

השונים, קביעת תקנים לטיפול במי שפכים, הוצאת צווים נגד מזהמי מים וכו' (תיקון מס' 22 לחוק המים, תשס"ו-2006). מועצת הרשות מורכבת מנציגי כל משרדי הממשלה האחראים לקביעת המדיניות במשק המים.

1.3 שפכים בישראל - איסוף טיפול וסילוק

1.3.1 רקע כללי

השפכים הם מים המכילים חומרי פסולת שונים שנוספו במהלך השימוש בבתי מגורים, באזורי פעילות עירונית ובשטחי תעשייה ומלאכה. קיימים גם שפכים שמקורם במשקי בעלי חיים, כגון: רפתות ולולים. שפכים מכילים מזהמים שונים, והשפעתם על בריאות האדם והסביבה הטבעית משתנה בהתאם להרכבם. שפכי המגזר עירוני עלולים להכיל, בין היתר, ריכוזי חיידקים מחוללי מחלות, רעלנים ומלחים. השפכים התעשייתיים הם בעלי שונות גבוהה במרכיביהם ופוטנציאל ההרס הסביבתי שלהם גדול הרבה יותר בהשוואה לשפכים העירוניים. שפכים אלו עלולים להכיל, מלבד החומר האורגני, גם מזהמים שונים ומגוונים, דוגמת: ריכוזים גבוהים של מתכות כבדות, דטרגנטים וחומרים רעילים, התלויים בסוג התעשייה ומידת הטיפול ביציאה מהמפעל והרכבם אינו תמיד ידוע. המגזר התעשייתי צורך רק כ- 5% מסך צריכת המים בישראל, אך הוא גורם לייצורם של כ- 19% מכלל השפכים.

שני סוגי השפכים, עירוניים ותעשייתיים, מתנקזים למערכת ביוב אחת וקיימת סכנה כי מהילתם יחד תפגע במערכות ההולכה והטיפול ותוביל לפגיעה באיכותם של העירוניים, עד כדי פסילתם להשקיה חקלאית ו/או להזרמה בטוחה לנחלים וליים (המשרד לאיכות הסביבה, 1992). עובדה זו מחייבת טיפול מוקדם בשפכים התעשייתיים טרם הגעתם למט"ש, כגון הפחתת ריכוזי המזהמים ונטרול רעלנים, בכדי לאפשר טיפול משותף.

1.3.2 תהליכי הטיפול העיקריים בשפכים

הטיפול בשפכים כולל שלושה מרכיבים עיקריים: מערכת איסוף מרכזית (בדרך כלל ביוב), מט"שים וסילוק סניטרי של תוצרי הטיפול, הקולחים והבוצה. 96% מכמויות השפכים בישראל מחוברות למערכות איסוף (451.1 מלמ"ק), 91% מתוך סך כל השפכים, מטופלים במתקני טיפול שונים והנותרים מוזרמים למתקני טיפול ראשוניים, לנחלים וליים. מתוך סך כל השפכים שזורמים למתקני טיפול בשפכים, מושבים לשימושים חקלאיים כ- 312 מלמ"ק המהווים 66.5% מכלל הקולחים המטופלים (שיעור השבת הקולחים הגבוה בעולם). היקף השטחים המושקים במי קולחים עומד על 705,262 דונם מתוכם כ- 290,000 דונם מושקים בקולחי שפד"ן⁸ (נציבות המים, 2004).

תהליך טיהור השפכים במתקני הטיפול כולל שילוב בין אמצעים פיזיים, כימיים, ביולוגיים ופיסיקליים.

⁸ השפד"ן - מכון טיהור מכני-ביולוגי הגדול בישראל, המשרת כיום אוכלוסייה של כ-1.5 מיליון תושבים ותעשייה ומופעל באחריות "איגוד ערים וביוב דן". ספיקת השפכים היומית המוזרמת לשפד"ן עומדת על כ-340,000 מ"ק ליום שהם כ-120 מיליון מ"ק בשנה והוא אחראי לייצור כ-44% מכלל הבוצה בישראל. השפד"ן מפיק מי קולחים באיכות שלישונית, המיועדים להשקיה חקלאית.

באופן כללי, נהוג למיין את תהליכי הטיפול העיקריים בשפכים לארבעה שלבים עיקריים (Tchobanoglous et al., 2003):

- א. טיפול קדם:** בסוג טיפול זה מורחקים גופים גדולים מהשפכים, הרחקה פיזית באמצעות מגובי ענק. בנוסף מתבצעת הרחקת חול, גרוסת, שמנים וכיו"ב באגן שיקוע מיוחד.
- ב. טיפול ראשוני:** הרחקה גרביטציונית; תהליך פסיקלי להרחקת חומר מרחף (אורגני ואנאורגני) ע"י שיקוע ו/או פלוטציה. התהליך יעיל גם להרחקת חלק מהחנקן האורגני, זרחן אורגני ומתכות כבדות מסוימות.
- ג. טיפול שניוני:** בעיקר הרחקת חומר אורגני מהשפכים ולעיתים גם חנקן וזרחן. במרבית המקרים מבוסס טיפול זה על תהליכים ביולוגיים, אותם ניתן לסווג בכלליות לשני סוגי תהליכים: תהליכים הכוללים נוכחות חמצן ותהליכים שאינם כוללים נוכחות חמצן.
- ד. טיפול מתקדם:** בחלק מהמקורות מוזכר גם כטיפול שלישוני ורבעוני, כולל מגוון רחב של תהליכים, כגון: סינון גרנולרי, ניטריפיקציה ודה ניטריפיקציה, הרחקת זרחן, קואגולציה ושיקוע כימי, ספיחה על פחם פעיל, מחליף יונים, חיטוי ועוד.

1.3.3 בוצת שפכים ("Biosolids")

הבוצה היא חומר אורגני מוצק הנוצר כחלק בלתי נפרד מתהליך טיהור השפכים. מקורה במוצקים השוקעים באגני הטיפול בשפכים ובמיקרואורגניזמים האחראים על פירוק החומר האורגני שבשפכים (צדיקוב, 2005). הרכב הבוצה ותכונותיה תלויים במקור מי השפכים ובשיטת הטיפול שבשימוש, המשפיעים גם על אפשרויות הסילוק של הבוצה לסביבה. כמות הרכיבים החיוניים (הלא מסוכנים) בבוצה מהווים, ברוב המקרים, כ- 98% מסך כמות המוצקים וכוללים בעיקר חומרים אורגנים, חנקן, זרחן ואשלגן (ושיעורים נמוכים יותר של סידן, גפרית ומגנזיום). התכולה האורגנית בבוצה, הניתנת למחזור, מהווה 40-70% מהמוצקים (תלוי במקור השפכים ובשיטת הטיפול). החומרים המזהמים בבוצה כוללים, בדרך כלל, מתכות כבדות, חומרים אורגנים מזהמים ופתוגנים, שמקורם משימושים ביתיים ותעשייתיים (UNEP, 2005). כמות הבוצה ניתנת למדידה במונחי חומר יבש (ח"י)⁹.

תהליך הטיפול בבוצה כולל, בין היתר, את השלבים הבאים (פיין, 2000):

- א. הסמכה -** הסמכת בוצה, בדרך כלל על ידי שיקוע גרביטציוני.
- ב. עיכול -** פירוק מיקרוביולוגי של חלק ניכר מהחומר האורגני (כ-38%).
- ג. הוצאת מים -** בשיטות סינון שונות, כגון סינון לחץ או פילטר.
- ד. ייבוש -** בשדות ייבוש פתוחים או בחימום.
- ה. ייצוב ופסטור -** תהליך מיקרוביאלי או כימי, שמטרתו הפחתת הרטיבות, הקטנת ריכוזי החומר האורגני, החנקן והזרחן והגדלת ריכוז האפר בבוצה.

ייצור בוצת השפכים בעולם מתגבר עם השיפור באיסוף וטיפול בשפכים, בעיקר במדינות מתפתחות, תוך החמרה בתקנות הטיפול והשימוש בה מטעמי בריאות ואיכות הסביבה. ארה"ב והאיחוד האירופי הן כיום היצרניות הגדולות בעולם של בוצת שפכים, מעל 20 ק"ג ח"י לתושב לשנה,

9 חומר המתקבל לאחר ייבוש בוצה בטמפרטורה של 105 מעלות צלסיוס לפי סטנדרטים מקובלים (תקנות המים, 2004).

בהשוואה לישראל בה נוצרים כ- 100 אלף טון ח"י שהם כ-15 ק"ג ח"י לתושב לשנה (טרצייצקי, 2006).

1.3.4 חלופות עיקריות לסילוק בוצת שפכים

קיימות מספר חלופות עיקריות הנהוגות כיום בעולם לסילוק הבוצה (UNEP, 2005):

1. הטמנה סניטארית (Landfilling) - הטמנה באתרי סילוק פסולת. שיטה ותיקה המקובלת במדינות רבות בעולם, למרות שאינה נחשבת ידידותית לסביבה. כ-20% מסך הבוצה המסולקת במדינות האיחוד האירופאי וארה"ב מסולקת להטמנה, אך חלופה זו נמצאת במגמת צמצום מתמדת עקב החמרת התקנות והדרישה לרמת ייצוב גבוהה של הבוצה במטרה למנוע מפגעים סביבתיים הנגרמים משינוע הבוצה ומהטמנתה. כמו-כן, הגברת המודעות הסביבתית בעולם גרמה לחיפוש אחר חלופות סילוק ברות-קיימא, המבוססות על מחזור וחיסכון באנרגיה. בישראל כיום מרבית הפסולת האורגנית מופנית לאתרי פסולת מוסדרים, כאשר קיימת הפרדה בין אתרים לסילוק פסולת יבשה, מעורבת ופסולת מסוכנת. בישראל רק כ-7% מהבוצה מסולקת בשיטה זו (המשרד לאיכות הסביבה, 2007).

יתרונות עיקריים בהטמנת בוצה - מתאימה למרבית סוגי הפסולת, ואינה מחייבת טיפול משלים או הפרדה במקור, הכרוכים בעלויות נוספות.

חסרונות עיקריים בהטמנת בוצה - מחסור בשטחי הטמנה, בייחוד במדינה קטנה כמו ישראל בה הקרקע הינה משאב במחסור; מפגע סביבתי ונופי במקרים של מיקום מטמנה בקרבת יישוב; פליטת גזים לאוויר במהלך הטיפול בשפכים (בעיקר גז מתאן ופחמן דו-חמצני); פליטת גזים ממכונות הפועלות באתר; סכנת זיהום קרקע ומי תהום כתוצאה מפליטה וזרימה של חומרים מסוכנים, כגון מתכות כבדות וחומרים אורגניים רעילים. לכן, נדרש תהליך מוקדם של ייצוב והסמכת הבוצה לרמת מוצקים של כ-25% בטרם הטמנתה¹⁰.

2. שריפה (Incineration) - חלופה מקובלת במדינות ובערים צפופות אוכלוסין. עיקר השימוש בשיטה זו קיים ביפן (כ-44% מבוצה) וארה"ב (כ-27%). באירופה השיטה מיושמת בעיקר בגרמניה, צרפת ובלגיה. כ-22% מסך הבוצה במדינות האיחוד האירופי, מסולקת בדרך זו. בישראל שיטת סילוק זו אינה בשימוש כיום.

יתרונות עיקריים בשריפת בוצה - צמצום ניכר בכמות הבוצה עד לרמה של אפר מיוצב בשיעור של 10% מהכמות הבוצה המיובשת לפני שריפתה; השמדת חומר אורגני רעיל; פוטנציאל אנרגטי לשימוש חוזר בבוצה השרופה ובגזים הנפלטים בתהליך (Werther and Ogada, 1999).

חסרונות עיקריים בשריפת בוצה - עלות הקמה גבוהה של המפעל (בהשוואה לעלות יישום של חלופות אחרות), הנדרש לעמוד בסטנדרטים מחמירים ופועל בטכנולוגיות חדשניות; פליטת גזים רעילים לסביבה; שריפת משאב בעל פוטנציאל כלכלי בניגוד לתפיסת הפיתוח בר-קיימא.

3. ייבוש בחום (Heat drying) - תהליך טכנולוגי משולב במתקנים אלקטרו-מכניים להסמכה, שחיטה והתססה. תהליך זה משמש להפחתת תכולת המים בבוצה וקבלת רטיבות ברמה של פחות מ-10%. המוצר המתקבל מופחת בנפחו, בכמות הפתוגנים, נוח לאחסון ולטיפול, וניתן להשתמש בו כמקור אנרגיה בתחנות כוח ובמפעלי מלט או לטיוב קרקעות (סלומון, 2006).

10 על-פי תקנות המשרד לאיכות הסביבה משנת 2004 לא ניתן לשנע בוצה מחוץ למט"ש, אלא אם הבוצה סוג ב' לפחות. על מנת לסלק את הבוצה לאתר קומפוסט או אתר הטמנה, יש צורך לייצב את הבוצה קודם לכן (תקנות המים, 2004).

יתרונות עיקריים של שיטת הייבוש בחום - הורדת עלות העברה; שיפור קיבולת האחסון והרס פתוגנים; בוצה מיובשת בחום יכולה להיות משווקת כדשן או כחומר טיוב קרקע; התוצר הסופי הינו מפוסטר וניתן לטיפול בצורה בטוחה ולכן, מהווה אלטרנטיבה אטרקטיבית יותר מטיפול בבוצה נוזלית.

חסרונות עיקריים של שיטת הייבוש בחום - זיהום האוויר והשליטה במטרדי ריח מהווים את הבעיה העיקרית בתהליך טיפול זה; התהליך מצריך דרישה גבוהה של אנרגיה; הייבוש דורש מערכות מסובכות וצוות הפעלה מיומן.

4. יישום חקלאי (Agricultural Application) - פיזור הבוצה כתחליף לדשן חקלאי, לטיוב ולשיקום קרקעות. היישום כולל פיזור ישיר של בוצה מיובשת בשטחים חקלאיים, או פיזור עקיף של חומרים המסולקים לחקלאות לאחר תהליכי ייצוב וטיפול, כגון: קומפוסטציה (ראה סעיף הבא), טיפול בסיד בשיטת ¹¹N-Viro, או תהליכי טיפול מקובלים אחרים. החלופה מועדפת במרבית מדינות האיחוד האירופי ובארה"ב ומקובלת גם בישראל (40-50% מהבוצה מיושמים בחקלאות, ברמות שונות של טיפול). שיטה זו מנצלת את פוטנציאל הבוצה כדשן חקלאי, המשתנה בהתאם לסוג הקרקע המיועדת לדישון ולתמהיל הגידולים המיועד.

יתרונות עיקריים ביישום חקלאי של בוצה – שימוש חקלאי בבוצה עשוי לחסוך תשומות דשנים (חנקן, זרחן, אשלגן ויסודות קורט) ויקטין הוצאות; בוצה עשויה לשפר תכונות פיזיקאליות חשובות של הקרקע, כגון: תאחיזת קרקע, יציבות תלכידים, חדירות ומוליכות לגזים ולמים וכדומה (פיין, 2000); הידע להפעלת השיטה קיים והיא כבר מיושמת בישראל.

חסרונות עיקריים ביישום חקלאי של בוצה – יישום בוצה בקרקעות חקלאיות עלול לגרום נזק לאדם, לגידולים, לקרקע ולמי התהום. בוצה מכילה פתוגנים לאדם, ועודפי חומר אורגאני מומס, חנקן וזרחן. בטווח הארוך, עלולים להצטבר בקרקע עודפים גדולים של זרחן ומתכות כבדות. בנוסף, בוצה לא מעוכלת דייה עלולה לגרום למפגע סביבתי, שיתבטא במטרדי ריח וזבובים. ככל שהבוצה תהיה מעוכלת ומיובשת טוב יותר, כך תוכל לשמש טוב יותר לשימושים חקלאיים (פיין, 2000).

קיימות שיטות נוספות לטיפול וסילוק של בוצה, כגון טיפולי קרינה בטכנולוגיות שונות, אגנים ירוקים (Wetlands) ועוד, אך היקף השימוש בהן הוא קטן וחלקן נמצאות בתהליכי פיתוח ניסיוניים (UNEP, 2005).

במחקר הנוכחי נתמקד בחלופת יישום הבוצה במגזר החקלאי בשיטת קומפוסטציה. מבחינה כלכלית סביבתית, מחקרים שונים הראו כי יישום חקלאי של בוצה זול וידידותי יותר לסביבה בהשוואה לחלופות השריפה וההטמנה (ראה למשל: EC Economic Report, 2002; Crohn; Lundin et al., 2003; and Thomas, 1998). בנוסף לכך, חלופת הקומפוסטציה הינה אחת משתי החלופות הזולות עבור הטיפול בבוצת השפד"ן, כך עולה מנתוני סקר חלופות שנערך עבור השפד"ן (DHV Water and Balasha-Jalon, 2002). בנוסף, בעבודתם של טרצ'יצקי וחובריו (2006) נמצא כי

11 תהליך טכנולוגי המשלב מתקנים אלקטר-מכאניים להסמכה, סחיטה ועירוב הבוצה בחומרי לוואי, כדוגמת אפר כבשנים וסיד. קיימות כמה צורות של יישום טיפול בסיד, כתוסף לתהליך ייצוב כימי, האחד הוא CaO והשני Ca(OH)₂. השימוש בתוצר המתקבל טוב עבור ייצוב הקרקע וניתן להשתמש בו כדשן ללא הגבלה בכל הקשור לפתוגנים. חסרונות השיטה הן יצור גז האמוניה המחייב סילוק בעזרת אוורור והוספת תכולת מוצקים משמעותית לבוצה, המתבטא בעליית התכולה שיש לשנע (UNEP, 2005).

במגזר החקלאי קיים ביקוש עודף לקומפוסט, הן ברמה הארצית והן ברמה האזורית, כאשר המחיר שהחקלאים מוכנים לשלם מחושב לפי שווי החנקן בקומפוסט (ראה נספח 1.2).

קומפוסטציה

קומפוסטציה הינו תהליך חמצון ביולוגי מבוקר, אשר במהלכו מתפרק חומר אורגני מוצק בתהליך תרמופילי ממושך שבסופו מתקבל חומר אורגני מיוצב חסר ריח (קומפוסט). היתרונות הבולטים של תהליך הקומפוסטציה כוללים: הפחתת כמות הפסולת והבוצה המיועדת להטמנה וכתוצאה מכך חסכון ישיר בשטחי הטמנה והפחתת פליטות גז מתאן וגזים אחרים הנפלטות בשטח הטמנה; השבת חומר אורגני היכול לשמש לטיוב קרקעות חקלאיות וכתחליף לתשומות דשנים; ייצוב הבוצה על-ידי השמדת פתוגנים והפחתת ריכוזי חומרים רעילים אחרים.

ניתן לחלק את תהליך הקומפוסטציה לארבעה שלבים עיקריים: (1) השלב המזופילי – ניצול החומר האורגני על-ידי מיקרואורגניזמים שמקורם בשפכים, באוויר ובמים. תהליך המתבטא בשחרור חום ולוקח מספר ימים. (2) השלב התרמופילי – במהלכו מתרחש עיקר פרוק החומר האורגני על-ידי חיידקים, משתחרר חום המעלה את הטמפרטורה מעל 45 מעלות צלזיוס. שלב זה אורך 2-3 שבועות ובמהלכו מושמדים מרבית הפתוגנים המסוכנים לאדם ולצמח. (3) שלב ההתקררות – מתבטא בירידה ברמת המטבוליזם וכן מתרחשת התקררות. האוכלוסייה המיקרוביאלית מתחלפת במיקרואורגניזמים היודעים לנצל פולימרים אורגניים. (4) שלב הייצור וההבשלה – השלב האחרון בתהליך, אשר אורכו תלוי במידה רבה באופי החומר ובשיטת הקומפוסטציה. שלב זה נמשך שבועות עד חודשים, ובמהלכו מתרחש פירוק חומר אורגני בקצב איטי מאוד (Haug, 1993; חלמיש וחובריו, 2000).

בשל אופיו הביוכימי של התהליך, יש לאפשר למיקרואורגניזמים תנאים אידיאליים לקיום וזאת על מנת למנוע עיכובים או הפסקת התהליך. תנאי אופטימום לקומפוסטציה הם: אוורור יומיומי, תכולת רטיבות של 35-45%, המושגת לרוב על-ידי שימוש בחומרים סופחים כדוגמת שבבי עץ לבוצת שפכים, טמפרטורה של 55-65 מעלות צלזיוס בשלב התרמופילי, יחס פחמן לחנקן (C/N) התחלתי 30:1-35:1. יחס זה מסתמן, על-פי רוב המחקרים, כמדד מהימן לרמת זמינות החומר האורגני ולאיכות הקומפוסט המתקבלת בסופו של התהליך (ראה למשל: חלמיש וחובריו, 2000; Brinton, 2000; Cooperband, 2002; Griffin et al, 2007). בהקשר זה, ניתן לחלק את מדדי איכות הקומפוסט ל-3 קבוצות עיקריות: מדדים כימיים ופיזיקליים, תכולת פתוגנים ותכולת מתכות כבדות. המדדים בקבוצה הראשונה משמשים להערכת איכות הקומפוסט כתוסף קרקע וכדשן אורגני בחקלאות, ושתי הקבוצות האחרות משמשות לסיווג הקומפוסט כבוצה סוג א', סוג ב' או פסולה לשימוש. קומפוסט בוצה שהגיע לרמת איכות של בוצה סוג א' אינו בהכרח באיכות אופטימלית עבור הצמח. קיים קשר ישיר בין איכות הקומפוסט לעלות הטיהור: ככל שאיכות הקומפוסט המיוצר תהיה גבוהה יותר, כך העלויות לטיהורו לרמת איכות זו יהיו גבוהות יותר. ניתן לנהל ייצור קומפוסט אופטימלי בהינתן רמת הבשלות הרצויה של החומר האורגני (Keener et al, 2005; Epstein, 1997).

מהפך הסביבתי, קומפוסט בוצה מוגדר כבוצה סוג א', הוא נטול פתוגנים וריחות, וניתן להשתמש בו ללא הגבלת גידול, כולל גידולים שהם צרכני זבל גדולים כדוגמת ירקות ותפוח"א. קומפוסט ניתן לאחסון ולצבירה, ניתן לפיזור במינן אחיד, הוא משפר את מבנה הקרקע ועשוי לשפר תכונות קרקע, מספק יסודות הזנה בצורה מאוזנת (ראה נספח 1.3) ואף עשוי לשמש להדברת פתוגנים שוכני-קרקע

(פיון, 2000). בוצה סוג אי ניתן ליישום בכל מועד בכפיפות למגבלת כמות של כ- 1.5 טון/דונם בוצה (ח"י) לשנה¹².

בהיבט הכלכלי, הקומפוסט הינו גורם ייצור בעל פוטנציאל ליצירת ערך כלכלי חיובי עבור המגזר החקלאי המתבטא בשני אופנים: (א) תרומה לגידולים בדישון הקרקע כתוצאה מהוספת חנקן וזרחן לקרקע, העשויה להוות תחליף¹³ לשימוש בדשן הכימי הקיים (ראה: חלמיש, וחובריו, 2000; טרצ'יצקי וחובריו, 2006). (ב) תרומה בטיוב הקרקע – ממחקרים רבים שנערכו בעשור האחרון עולה, כי שימוש בקומפוסט וקומפוסט בוצה תורם להגדלת היבול בחלק מהגידולים החקלאיים (ראה למשל: חלמיש וחובריו, 2000; חן וחובריו, 2003; איזנקוט וחובריו, 2004; Avnimelech, et al, 2004; Griffin et al, 2007; Golabi et al, 2007; 1990 Agassi et al, 2004).

שיטת הקומפוסטציה המקובלת ביותר בישראל היא שיטת ה-Windrows¹⁴ (קומפוסטציה בערימות פתוחות). בשיטה זו מפזרים את חומר הגלם על משטח סלול בערמות. תהליך האוורור מתבצע על-ידי הפיכת הערמות, והלחות הנדרשת מסופקת על ידי הרטבת הערמות לרמה הרצויה (פלודה, 2002). קיימות שיטות קומפוסטציה נוספות, המקובלות בעולם, כגון: קומפוסטציה בריאקטורים¹⁵, קומפוסטציה בתעלות וקומפוסטציה בשיטת Gore¹⁶.

1.3.5 תמונת המצב בישראל

בישראל, כ-48% מכלל הבוצה הנוצרת (בוצת השפד"ן) מסולקת לים, למרות התנגדות רבה בקרב הציבור והגופים הירוקים ובניגוד לחוק למניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים (1988), האוסר הזרמת פסולת או שפכים ממקור יבשתי ללא היתר של הוועדה למען היתרים להזרמה לים. חלופה זו עומדת בניגוד לאמנת ברצלונה¹⁷ (1976) עליה חתומה גם ישראל והיא אינה מהווה פתרון מקובל לטווח הארוך על ידי המשרד לאיכות הסביבה (המשרד לאיכות הסביבה, 2006). במהלך שנת 2007 נכנסו לתוקף שני שינויים מהותיים, אשר השפיעו על תהליך הטיפול בבוצה. הראשון, מתייחס לסעיפים הרלוונטיים ב"תקנות הבוצה" (תקנות המים - מניעת זיהום מים, שימוש בבוצה וסילוקה, התשס"ד 2004) האוסר על שימוש בבוצה מסוג ב' בחקלאות. ואילו השני הוא כניסתו לתוקף של היטל ההטמנה ביולי 2007, שמתווסף לתשלום דמי הקליטה במטמנה ויעמוד על

12 כמות החנקן המיושם עם הבוצה בשטח של דונם במשך 12 חודשים רצופים, לא תעלה על 50 ק"ג, והיישום ייעשה רק בקרקע שאינה מושקית בקולחים או בקרקע המושקית בקולחים, שריכוז החנקן הכללי בה אינו עולה על 15 מיליגרם לליטר (תקנות המים, 2004).

13 ניתן לבחון את כמות החנקן והזרחן במ"ק קומפוסט (לחומרים הללו יש מחירי שוק ידועים) ולחשב את הפוטנציאל הכלכלי של הקומפוסט כתחליף לשימוש בדשן כימי בעל תרומה דומה (חלמיש, נ. וחובריו, 2000).

14 היתרון בשיטה הינו בפשטות התשתית והתפעול. חסרונותיה העיקריים הם: דרישת שטח גדולה לטיפול בכמויות גדולות, קושי בבקרת הריח וחוסר אחידות מסוים. שיטה זו מיושמת בישראל במפעל הקומפוסט "שחם נבעת-עדה" (חלמיש, נ. וחובריו, 2000).

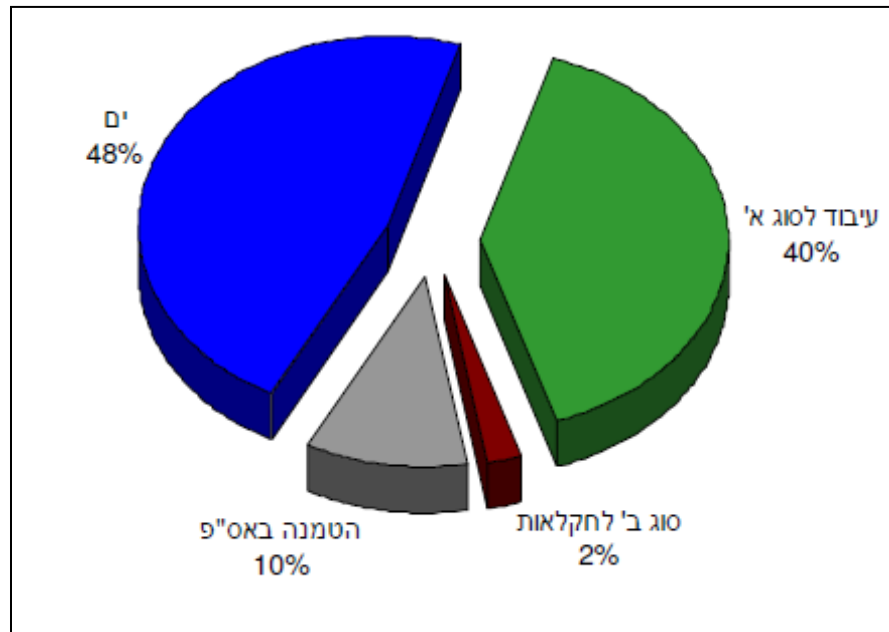
15 בשיטה זו ניתן להשיג בקרה טובה של התנאים ולהביא לכלל אופטימיזציה שלהם, ובכך מושגת האצה של התהליך המיקוביאלי. חסרונה העיקרי הוא בכך שנדרשת השלמה של הקומפוסטציה בערימות (חלמיש, נ. וחובריו, 2000).

16 ייחודה של השיטה הוא בכך שהערימות מכוסות ביריעות מיוחדות Gore-Tex, שמאפשרות מעבר גזים אך מונעות מעבר של מים. שיטה זו יעילה מאוד במניעת הפצת ריחות רעים לסביבה, תנאי הטמפה והלחות בערימות אחידים, זמן הקומפוסטציה מתקצר ל-3-4 חודשים ואיכות הקומפוסט משופרת. חסרונה העיקרי הוא עלותה הגבוהה (חלמיש, נ. וחובריו, 2006).

17 אמנת ברצלונה 1976 - עוסקת בהגנת הסביבה הימית ואזור החוף של הים התיכון ונוסדה ביוזמת תוכנית הסביבה של האו"ם. 22 מדינות חתומות על האמנה, ביניהן ישראל והאיחוד האירופי. האמנה שונתה בשנת 1995 וכנסה לתוקף בשנת 2004 בכדי לקבע את עקרון הזהירות כעקרון מוביל בקביעת המדיניות הסביבתית של המדינות השונות. תיקונים אלו גם הרחיבו את תחום הפעילות של התוכנית אל אזורי החוף. אמנה זו מחייבת את המדינות החתומות לנקוט בכל האמצעים המתאימים על מנת למנוע, להפחית ולהילחם בזיהום הים התיכון וכמו כן להגן ולשפר את הסביבה הימית באזור, והיא מכילה מספר פרוטוקולים, ביניהם פרוטוקול בדבר מקורות יבשתיים – Based Sources (LBS) Protocol Land: המכוון למניעת זיהום ממקורות או מפעולות יבשתיים. הפרוטוקול מתמקד בהפסקת זיהום של חומרים רעילים (Toxic), חומרים יציבים (Persistent) וחומרים המצטברים בשרשרת המזון במישרין משפכים המרוקנים ישירות לים או באמצעות סילוק עם מוצא ימי (UNEP/MAP, 2008).

24 שנה לטון בוצה ב-2007. גובה ההיטל יעלה ב- 24 שנה לטון מידי שנה עד שיגיע ל- 120 שנה לטון בשנת 2011 [חוק שמירת הניקיון (תיקון מס' 9), תשס"ז 2007]. עלויות אלו, מצריכות בדיקה כלכלית מחודשת של חלופות הסילוק הקיימות והצפי הוא להגדלת כמות הבוצה המופנית לשימוש חקלאי, לאחר עיבודה לסוג א'. באיור מספר 1 ניתן לראות את יעדי סילוק הבוצה בישראל לשנת 2007.

איור 1.1 : כמויות בוצה ויעדי סילוק בישראל 2007



(מקור : צדיקוב, 2008)

מאיור 1.1 עולה כי כ- 81% מסך הבוצה המיוצרת בישראל (ללא שפד"ן) הועברה בשנת 2007 לשימוש חקלאי: כ- 4% (12,000 טון) כבוצה שלא עברה תהליך עיבוד נוסף ("סוג ב'") ויושמה בשטחים חקלאיים מעובדים עד מרץ 2007 (מועד החלת האיסור ליישום בוצה סוג ב' בחקלאות) והותרות, כ- 77% (239,000 טון), עברה עיבוד סניטרי נוסף (קומפוסטציה או שיטת N-Viro) והפכה לבוצה סוג א'. סה"כ, בשנת 2007 עובדו 42,587 טון חומר יבש (ח"י) בוצה סוג א', המהווים כ- 40% מכלל הבוצה המיוצרת בישראל. כושר העיבוד לבוצה סוג א', של כלל המתקנים הקיימים בארץ, עומד כיום על למעלה מ- 60,000 טון ח"י בשנה, כמות השקולה לסך הבוצה המיוצרת ומסולקת בדרך יבשתית, למעט השפד"ן. בשנת 2007 כמות הבוצה לסילוק יבשתי מ-34 מט"שים בארץ, עמדה על 293,101 טון (56,116 טון ח"י) ללא השפד"ן. יחד עם השפד"ן מיוצרים בישראל כ- 105,966 טון ח"י בוצה בשנה (צדיקוב, 2008). עד כה, לא נמצא פתרון לבעיית סילוק בוצת השפד"ן. שתי החלופות העיקריות הנבחנות כיום הן: (1) טיפול תרמי באמצעות שריפת הבוצה; (2) יישום חקלאי של בוצה באמצעות קומפוסטציה (צדיקוב, 2007; DHV Water and Balasha-Jalon, 2002). כאשר באיגוד ערים וביוב דן¹⁸ מצדדים בשיטת הטיפול התרמי, קרי שריפה, כפתרון היבשתי המועדף לטיפול בבוצת השפד"ן (סלומון, 2006; מסינג, 2006), וזאת בניגוד למצדדי חלופת היישום החקלאי בראשות משרד החקלאות ועמותת אדם, טבע ודין (אט"ד). כל אחד מהפתרונות שייבחר יחייב הקמת תשתיות ומתקנים ויהיו לכך השלכות כלכליות, ארגוניות וסביבתיות המחייבות התייחסות.

18 באיגוד ערים דן (ביוב) מאגדות שבע רשויות מקומיות גדולות שנמצאות במרכז הארץ, והוא נותן שירותים לרשויות מקומיות נוספות, מטפל בכ- 120 מלמ"ק שפכים בשנה (כ-2 מיליון תושבים) ואחראי להפעלת השפד"ן.

כללי

איסור סילוק בוצה לים התיכון בישראל, בהתאם לאמנת ברצלונה, והגידול המתמיד בכמות השפכים העירוניים והתעשייתיים המגיעים למתקני הטיפול בשפכים, מחייבים מציאת פתרון יבשתי לבעיית סילוק הבוצה.

במחקר הנוכחי, בכוונתנו לבחון מספר חלופות התארגנות בין מספר יחידות כלכליות (מט"ש ומספר קבוצות חקלאים) ליישום בוצה בחקלאות, תוך התייחסות להיבטים הכלכליים והסביבתיים. תשומת לב מיוחדת תינתן ליחסי הגומלין בין המט"ש, "יצרן הבוצה", לבין קבוצות החקלאים השונות, צרכני תוצרי הבוצה הפוטנציאליים.

מטרות המחקר

מטרת המחקר הנוכחי היא לפתח וליישם מודלים, אשר יתארו וינתחו את ההיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הכרוכים ביישום וסילוק בוצת שפכי השפד"ן ברמה האזורית, תוך התמקדות בחלופות ההטמנה והקומפוסטציה. תשומת לב מיוחדת תינתן ליחסים שבין השפד"ן, יצרן הבוצה, לבין קבוצות החקלאים השונים, צרכני תוצרי הבוצה הפוטנציאליים, תוך התייחסות להקצאת עלויות ורווחים בין היחידות הכלכליות הנבחנות (מט"ש וחקלאים). הניתוחים יתבצעו בהתייחס למספר חלופות ארגוניות: הקצאה על-ידי מתכנן מרכזי והקצאה במסגרת משא ומתן (משחק שיתופי) בין היחידות הכלכליות. הממצאים האנליטיים ייושמו לאזור הרי יהודה וצפון הנגב ויתמקדו במט"ש השפד"ן.

שאלות המחקר - המחקר הנוכחי ינסה לספק מענה למספר שאלות מהותיות:

- א. מהו הפתרון האופטימאלי שיושג בהנחת מתכנן מרכזי?
- ב. האם קיים יתרון לשיתוף פעולה אזורי בין היחידות הכלכליות? וממה הוא נובע?
- ג. מהו אוסף הפתרונות ההוגנים/היעילים עבור היחידות הכלכליות באזור? מהן גבולות מרחב המיקוח? ומהם הפתרונות שיוצעו על ידי מגשר אובייקטיבי הוגן?

תוכנית המחקר - ניתן לחלק את המחקר לארבעה שלבים עיקריים:

שלב א' - פיתוח מודל תיאורטי, אשר יתאר תנאים לשווי-משקל אזורי בין יצרן הבוצה (שפד"ן) לבין צרכנים חקלאיים (דישון). הניתוח יערך בהתייחס לחלופת הקצאה על ידי מתכנן מרכזי, אשר משיא את סך הרווחה החברתית של האזור הנחקר. כמו-כן, תבחנה השפעתם של הגורמים הבאים על בחירת ההקצאה האופטימאלית: תרומת הבוצה לחקלאים המשתמשים בה (התלויה בכמותה ובאיכותה); עלות הטיפול בבוצה כתלות באיכותה; עלויות הובלה של הבוצה מהשפד"ן ליחידות הכלכליות השונות. בשלב זה נוכל להשיב על שאלת המחקר הראשונה.

שלב ב' – יישום גישות, מתחום תורת המשחקים השיתופיים (קואליציוניים), לאיתור הקצאות אופייניות ליחידות הכלכליות הנבחנות (מט"ש וקבוצות החקלאים השונות), תוך ניצול יתרונותיהן היחסיים. פתרונות מודל האופטימיזציה (מתכנן מרכזי), שהוצג בשלב א', ישמשו כנתונים למודלים

של תורת המשחקים. המודל יבחן האם קיים יתרון לשיתוף פעולה אזורי על-ידי אפיון מרחב המיקוח שנוצר מקיומה של הליבה. בנוסף, תבחנה מספר חלופות הקצאה של מתווך הוגן באמצעות מספר מאפייני פתרון, אשר יושוו ביניהם, תוך הצגת השיקולים העומדים מאחורי בחירה אפשרית בכל אחד מהפתרונות. בשלב זה נוכל להשיב על שתי שאלות המחקר הנוותרות.

שלב ג' - יישום השלבים דלעיל לאזור דרום הארץ. היישום יתבסס על נתונים אמפיריים קיימים לגבי היצע הבוצה (כמות ואיכות), עלויות תפעול והובלה, מרחקים בין היחידות הכלכליות השונות ובנתונים רלוונטיים נוספים.

שלב ד' - השוואה אמפירית ותיאורטית בין שיטות ההקצאה האופייניות שחושבו בשלבים הקודמים, במטרה לבחון את היתרונות והחסרונות היחסיים של כל שיטה הן מבחינת היחידות הנבחנות והן מבחינת הרווחה הכוללת ולגבש המלצות בדבר הקצאת בוצת השפד"ן, שתשרתנה את מקבלי ההחלטות.

פרק 2: סקירת ספרות

בפרק זה נציג את הספרות הרלוונטית למחקר הנוכחי. הפרק מורכב מארבעה נושאים עיקריים:

1. סקירת ספרות בנושא משק המים והטיפול בשפכים ובבוצה.
2. דיון בהיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הקשורים בסילוק והשבת בוצה.
3. הצגת שיטות להקצאת קולחים ובוצה.
4. דיון ביישום קומפוסט בוצה בישראל.

2.1 משק המים, הטיפול בשפכים ובבוצה

משק המים בישראל הוא מורכב ומגוון. חוקרים רבים, מדיסציפלינות מחקר שונות, מנסים להתמודד עם בעיות רבות ומורכבות דוגמת המחסור במים על ההיבטים השונים שלהן; פיתוח של מקורות מים חלופיים ומציאת חלופות סילוק ושימוש של בוצה. במחקר הנוכחי נשים דגש מיוחד על בחירת הכמויות והאיכויות הרצויות של בוצת השפד"ן לצרכי דישון בשדות החקלאים. הקריטריון לבחירת החלופה המתאימה יתבסס על שיקולי כדאיות כלכלית, תוך התייחסות למגבלות סביבתיות וארגוניות שונות.

גולדמן (1996) מתאר את מדיניות הטיפול הלקויה של משרדי הממשלה ואת חוסר היעילות של הרשויות בטיפול בבעיית השפכים. מבקרת המדינה כבר העירה בדוח משנת 1990 על היווצרות ניגודים בין מטרות של מגזרים שונים בניהול משק המים בישראל. לכן, נדרשת קביעת מדיניות לאומית כוללת, המתייחסת לצרכיה העתידיים של המדינה והחברה בראייה מקפת (מבקר המדינה, 1990). בדוח מבקר המדינה שפורסם בשנת 2003, נקבע (בין היתר) כי: "...הפתרונות לבעיית השפכים צריכים להיבחן בראייה אזורית רחבה ובהתבסס על שיקולים מקצועיים וכלכליים, ולא רק על שיקולים מקומיים. ראוי שמנהלת הביוב, האחראית לפיתוח תשתיות ביוב ולהקצאת משאבים למטרה זו, תפעל לקבל לידיה סמכויות כדי שתוכל ליזום הכנת תכניות אזוריות לטיפול בשפכים שינחו את הרשויות המקומיות במציאת הפתרונות המיטביים בעניין זה..." (מבקר המדינה, 2003). זסלבסקי (2002) מותח ביקורת חריפה על מקבלי ההחלטות הקשורים למשק המים. הוא טוען כי המשבר הנוכחי הוא תוצאה ישירה של מדיניות קלוקלת הנעדרת תכנון ורמה מקצועית מתאימה. לדעתו ישנם מספר צעדים שיש לבצע בכדי למזער את הנזקים העלולים להיגרם בעתיד, ביניהם: שיפור איכויות המים (בעיקר קולחים); תפישת מקורות מים טבעיים נוספים והתפלת מי ים ומים מליחים.

סוגיית סכנת הזיהום משפכים נידונה בספרות בהרחבה. בדוח מבקר המדינה לשנת 1999 מקדיש המבקר דיון נרחב לנושא זיהום מאגרי מי התהום של ישראל בחומרים מזהמים, לרבות שפכים עירוניים ותעשייתיים וקולחים (מבקר המדינה, 2000). (Isaac et al. (2000) מתריעים במחקרם מפני סכנת זיהום מקורות המים בישראל וברשות הפלסטינית כתוצאה מגידול בכמות השפכים והשינוי בהרכבם. (Pepper et al. (1996) סוקרים בספרם את סכנות הזיהום הטמונות מחלופות שונות של סילוק בוצה. לדעת החוקרים, עיקר הזיהום עלול לנבוע ממתכות כבדות ורעילות המצויות בבוצה, החודרות לקרקע כתוצאה מיישום חקלאי של בוצה, או נפלטות לאוויר בצורת גזים רעילים בתהליך שריפת הבוצה. (Harrison (1999) ו-Snyder (2005) חקרו את היישום החקלאי של בוצת שפכים

בארה"ב. החוקרים מתריעים בפני הצורך החיוני להגן על מקורות המזון וזאת על ידי העמקת המחקר והחמרה בתקנות במטרה למנוע זיהום של גידולים חקלאיים וסיכון חיי אדם. טרצ'יצקי (2006) טוען שתקנות השימוש בישראל ובאירופה מחמירות ביותר בתחום המתכות הכבדות לעומת התקנות בארה"ב. בכל התקנות קיימת התייחסות לערך הדישוני, מבחינת חנקן, של הבוצות. מאידך, מתריע החוקר שאין בתקנות התייחסות לזרחן ולעודף יסוד זה בקרקעות שבהן מיושמת בוצה.

התרומה משימוש חוזר בקולחים ובבוצה נידונה, בין היתר, בעבודתם של פרידלר וחואניקו (1997), אשר סקרו במאמרם את השימוש החוזר בשפכים לשימוש חקלאי. לטענתם, טיפול יעיל בשפכים בכפוף לתקנות ולמגבלות הדרושות, עשוי להגדיל את פוטנציאל המים להשקיה חקלאית. במאמר מאוחר יותר, סוקר פיין (2000) את היתרונות והחסרונות של חלופות השימוש בבוצת שפכים בחקלאות. לטענתו, בוצה היא משאב שניצולו הנכון יועיל למגזר החקלאי, למגזר העירוני ולאיכות הסביבה.

2.2 היבטים כלכליים, סביבתיים וארגוניים

הדיון הכלכלי, סביבתי וארגוני בנושא בעיית הטיפול בשפכים קיבל תאוצה במהלך שנות השבעים, בהם התפרסמו המחקרים הראשונים העוסקים בניתוח והשוואה של חלופות טיפול וסילוק בוצה, תוך יישום מודלים כלכליים וסביבתיים שפותחו ושוכללו במשך השנים.

Ott and Foster (1978) הציגו מודל תכנון ליניארי להקצאה אופטימאלית של בוצת שפכים באדמות חקלאיות ויישמו אותו במספר קהילות קטנות בארה"ב. מטרת החוקרים הייתה לנתח את התרומה מיישום בוצת שפכים בחקלאות לרווחת הקהילות. המודל הורכב משני תת מודלים: האחד, מודל המתאר מינימום הוצאות מוניציפאליות לטיפול בבוצה, שמטרתו לקבוע איזו טכנולוגיית פיזור בוצה בשטחים חקלאיים זולה יותר בקהילות הנבדקות. השני, מודל שמתאר את הרווח הכלכלי הנקי של הקהילה, הלוקח בחשבון את הערך הכלכלי של הבוצה כאמצעי דישון, בהשוואה לחלופות סילוק לא חקלאיות, כגון: הטמנה ושריפה. החוקרים הסיקו, כי מבחינת יעילות כלכלית, שימושים חקלאיים בבוצה זולים יותר מאשר הטמנה או שריפה. לגבי טכנולוגיית הפיזור של הבוצה, ניתן להתאים טכנולוגיה מתאימה לכל עיר או קהילה עם שטחי גידול פוטנציאליים בהתאם למרחק ולתמהיל הגידולים. בנוסף, טענו החוקרים, כי למבנה הארגוני יש חשיבות רבה בהקצאה נכונה של בוצה והקצאה האופטימאלית של בוצה לחקלאות צריכה לנבוע מהערך התזונתי הטמון בה. הקצאת בוצה בשוק תחרותי תניב את הרווחים הגבוהים ביותר עבור הקהילה (החקלאים) יתחרו על הבוצה כאלטרנטיבה לדשן ויהיו מוכנים לשלם על הבוצה עד שעלותה תשתווה לעלות השולית משימוש בדשן בניכוי פרמיית סיכון מסוימת, שמתחשבת בסיכונים הטמונים בשימוש בבוצה, קרי: זיהום ממתכות כבדות ו/או אורגניזמים למיניהם וכן בעיות תפעול (חדשות) והיא עדיפה על הקצאה אדמיניסטרטיבית, שמטרתה להיפטר מכמות גדולה ככל האפשר של בוצה ללא תלות בערכה הכלכלי.

Perlack and Willis (1985) הציגו מודל אופטימיזציה לבחירה בין חלופות הסילוק של בוצת השפכים בעיר בוסטון, ארה"ב. המודל משקלל את פוטנציאל הרווח הטמון בשימוש בבוצה כמקור אנרגיה מתהליכי השריפה לשימושים שונים וכאמצעי דישון לשטחים חקלאיים. החוקרים בחנו את המודל על 9 תת חלופות שנבחרו בכפיפות למגבלות כמות ואיכות הבוצה וכן בכפיפות למגבלות סביבתיות. מסקנותיהם העיקריות של החוקרים הם: ההשפעה הסביבתית של חלופת השריפה היא

הגבוהה ביותר, לעומת השפעות סביבתיות בחלופות היישום החקלאי, ההטמנה והסילוק לים; מבחינת עלות: חלופת הסילוק לים היא הזולה ביותר, אחריה חלופות ההטמנה והיישום החקלאי ולבסוף חלופת השריפה.

Crohn and Thomas (1998) הציגו מודל אופטימיזציה אזורי רב-תקופתי למציאת פתרון כלכלי יעיל לטווח ארוך (20 שנה), לבעיית סילוק הבוצה ממספר מט"שים במדינת קליפורניה. המודל מתמקד ביישום חקלאי של בוצה לפי קריטריון העלות המינימאלית ומתחשב במספר פרמטרים ומגבלות, כגון: מגבלות אחסון, הובלה, שיווק, מגבלות שימוש בחנקן, מגבלות התאמה לתקנות איכות הסביבה בארה"ב ושער ריבית תקופתי. החוקרים הגיעו למסקנה, כי שיטת טיפול המשלבת יישום קרקעי ישיר של בוצה וקומפוסטציה מהווה פתרון כלכלי ויעיל לאזור לטווח ארוך, למרות העלות הגבוהה הדרושה להקמת מתקן קומפוסטציה.

Tang et al. (1997) הציגו מודל אופטימיזציה מתקדם למציאת שיטות הטיפול האופטימאליות לשתי סוגיות: האחת, טיפול בנוזל השפכים והשנייה, טיפול בבוצה. החוקרים השתמשו בשיטת מחקר Analytical Hierarchy process (AHP), אשר פותחה על ידי החוקרים במחקרים קודמים (Tang et al., 1991, 1994). שיטת AHP מאפשרת להשוות בין מספר רב של חלופות טיפול בשפכים ובבוצה (מתן אינדיקציה עד כמה כל חלופה עדיפה או נחותה מהחלופות האחרות). לטענת החוקרים, בהשוואה בין חלופות טיפול וסילוק בוצה אין להתבסס רק על קריטריון העלות המינימאלית אלא חייבים להתחשב גם בהשפעות סביבתיות, חברתיות ותרבותיות, במרכיבי הון אנושי, כגון: יכולות, זמינות וידע מקצועי של כוח האדם שמפעיל את מתקני הטיפול, וכן בתנאי אקלים וזמינות הקרקע. החוקרים יישמו את המודל על אזור הונג-קונג והגיעו למסקנה, שהחלופה הטובה ביותר לטיפול בבוצה באזור הנבחן היא שריפה, אחריה סילוק לים ולבסוף נבחרה חלופת ההטמנה.

Zenz et al. (1998) סוקרים בספרם את התפתחות המחקר, שיטות הטיפול וההחמרה בתקנות השימוש בבוצת השפכים במדינות מפותחות בעולם, כגון: ארה"ב, האיחוד האירופי, יפן וכו'. החוקרים טוענים שבחירת החלופות המתאימות למדינה או אזור מסוים תלויה בנסיבות ובמאפיינים הייחודיים להם, כגון מאפיינים גיאוגרפיים, תרבותיים, היסטוריים, חוקיים, פוליטיים וכלכליים. לכל אחת מהחלופות הנבדקות יש קריטריונים שונים מבחינת הגנה על איכות הסביבה, אשר ניתנות למדידה באמצעות שיטות שונות, ובהתאם לחלופת הסילוק הנבחרת תשוקללנה שיטות הטיפול הנדרשות ליישומה, והפתרון האופטימלי יותאם לתנאים ולנסיבות הספציפיות של האזור הנבדק.

גישות הערכה סביבתיות להשוואה בין חלופות טיפול בבוצה ניתן למצוא בעבודתם של Suh and Rousseaux (2001), אשר השתמשו במודל Life Cycle Analysis (LCA) להשוואה בין חלופות הטיפול בבוצה במערב אירופה. שיטה זו מבוססת על זיהוי ומדידה כמותית של ההשפעות הסביבתיות החיוביות והשליליות ושקלול אנרגטי של תהליכי ייצור תעשייתיים, לצורך הערכת השפעות סביבתיות הקשורות בייצור מוצרים ספציפיים. החוקרים הגיעו למסקנה שיישום חקלאי של בוצה ידידותי לסביבה יותר מחלופות השריפה וההטמנה הודות לניצול נמוך של אנרגיה ולפליטת מזהמים נמוכה. Poulsen and Hansen (2002) טענו, שטיפול בבוצת שפכים אינו מוצר אלא מהווה שירות ליצרני הבוצה. לכן, כדי להעריך את ההשפעה הסביבתית של שירות זה, יש להעריך את ההשפעה הסביבתית של מערך הטיפול בבוצה כולו. לשם כך השתמשו החוקרים במודל¹⁹ Strategic

19 שיטה דומה לשיטת ה-LCA, אך מטפלת בהערכות סביבתיות של שירותים ופעילויות שנגרמות על-ידי הציבור (Poulsen and Hansen, 2002).

Environmental Assessment (SEA), ויישמו אותו למחוז אלבורג בשבדיה. מסקנת החוקרים היא כי חלופת השריפה עדיפה על חלופות היישום החקלאי וההטמנה הודות לניצול אנרגטי יעיל יותר. במחקר מאוחר יותר של Lundin et al., (2003) השתמשו החוקרים בשיטת LCA להשוואה בין חלופות הטיפול בבוצה בשבדיה. החוקרים הסיקו כי מנקודת מבט כלכלית-אזורית חלופת היישום החקלאי זולה באופן משמעותי מיישום תהליכים תרמיים (עלות יישום טון בוצה בחקלאות היא כרבע מהעלות שתידרש לשריפתה) ותהליכי מחזור של אנרגיה וזרחן מהבוצה. מאידך, בראיה סביבתית, חסרונו הגדול של היישום החקלאי מתבטא בבזבוז אנרגיה כתוצאה מהובלת הבוצה ופיזור. לטענתם, עדיפותה של החלופה התרמית באה לידי ביטוי בערים גדולות ואזורים צפופי אוכלוסייה, בייחוד כאשר איכות הבוצה לשימושים חקלאיים מוטלת בספק.

2.3 שיטות להקצאת קולחים ובוצה

הספרות המקצועית העוסקת ספציפית בנושא הקצאה של בוצת שפכים בין מספר יחידות כלכליות (קבוצות חקלאים למשל) אינה רחבה. לעומת זאת, הספרות המקצועית דנה יותר בשיטות הקצאה של קולחים. כך למשל ממחקרם של Axelrad, G. and Feinerman, E. (2009), המיושם לאזור השרון שבמרכז הארץ. ניתן לראות, כי על ידי שימוש מושכל בקולחי העיר ניתן לשפר את הניצול הנוכחי הלא יעיל של קולחי העיר הן מהבחינה הכלכלית והן מהבחינה הסביבתית ברמה האזורית. שיתוף הפעולה באזור הנבחן, בין כל היחידות הכלכליות מגדיל את סך ההכנסות שלהן. בנוסף, על ידי יישום גישות הקצאה שונות מתחום תורת המשחקים השיתופיים ניתן להציע מספר אפשרויות הקצאה של תוספת הרווח בין היחידות הכלכליות אשר יהיו הוגנות, הגיוניות ויעילות ולכן גם מקובלות על משתתפי המשחק האזורי הן בתנאי וודאות והן בתנאי חוסר וודאות.

במחקרם של Feinerman et-al. (2001), מוצגת השאלה: האם על יצרן השפכים (העיר) לשאת בעלויות הכרוכות בטיהור או שמא על החקלאים, צרכני הקולחים, ליטול חלק בעלויות אלו? המאמר בוחן שלושה מנגנוני הקצאת מים: הקצאה על-ידי מתכנן מרכזי, רגולציה על ידי מחירים, ומודל מיקוח המיושם לעיר אשקלון. מסקנות המודל הוא שעיקרון "המזהם משלם" אינו בהכרח יעיל, וכי ניתן להעלות את תועלות העיר והחקלאים באמצעות מסחר בקולחים.

Dinar and Yaron (1986) מפתחים מודל תכנון סימולטני בשני שלבים. המודל האמפירי מיושם לנתוני העיר רמלה וסביבותיה. אחת ממסקנות המודל היא, ששיתוף פעולה בין כל היחידות הכלכליות עשוי להתרחש רק כאשר ישנו סבסוד ממשלתי של כ-50% מעלות הפרויקט האזורי (הכולל הקמת מט"ש). במקרה זה יצרכו כל השפכים המטופלים של העיר, יגדלו הכנסות החקלאים (בהשוואה למצב בו אין שיתוף פעולה) ונבחנת האפשרות שהחקלאים, שמצבם שופר, יפצו את העיר עבור עלויות הטיפול בשפכים. בשלב השני אומדים החוקרים את הקצאת תוספת ההכנסות באזור המכיל 4 משתתפים (עיר ושלוש קבוצות חקלאים) המשתתפים פעולה בהקמת מתקן לטיהור שפכים שישימש את הקבוצות החקלאיות לצרכי השקיה. באמצעות שימוש בפתרונות מודל האופטימיזציה, מוצגות מספר שיטות הקצאה הכוללות את גישת העלות שולית (MCP), פתרון ליבה (core), הערך של שפלי, הערך של שפלי המתוקן ופתרון הגרעינון. מסקנתם העיקרית של החוקרים היא ששיטת הקצאה באמצעות גישת העלויות השוליות עשויה להדחות על-ידי המשתתפים היות ואינה מצויה בליבה ומכאן שאינה מקיימת תנאי הקצאה רציונאליים.

Loehman et-al. (1979), אומדים באמצעות הערך המתוקן של שפלי (Generalized Shapley's Value) את הקצאת העלות המתקבלת מהקמת מתקן טיהור שפכים עבור 8 רשויות השוכנות לאורך נהר בארה"ב (The Meramec River Basin). יתרונות לגודל של המתקן יוצרות את התמריץ לשיתוף פעולה כללי בין כל הרשויות בהקמת מתקן יחיד, בהשוואה לאלטרנטיבה של הקמת מספר מתקנים. שיטת הקצאה נוספת ופשוטה יחסית של עלויות ניתן למצוא במחקריהם של Okada (1985) ו-Young (1994), אשר אומדים את הקצאת העלויות הכרוכות בהקמת סכר המשרת שלוש מטרות עיקריות באמצעות שיטת SCR (Separable Costs Remaining Benefits Methods). התמריץ להקמת סכר המשרת סימולטאנית שלוש מטרות (השקיה חקלאית, בקרת הצפות, הפקת אנרגיה) על פני הקמת סכר המשרת מספר מטרות מועט יותר נובעת מיתרונות לגודל. החוקרים מיישמים שיטת פתרון זו לסכר המוקם ביפן (Sameura Dam Project) ולאזור TVA (Tennessee Valley Authority) בהתאמה.

2.4 יישום חקלאי של קומפוסט ובוצה בישראל

יישום קומפוסט וקומפוסט בוצה בחקלאות נידון בספרות המקצועית במגוון מאמרים, ניסויים ומחקרי שדה.

חלמיש וחובריו (2000) סוקרים את המקורות והשימושים של הקומפוסט בישראל ומבצעים ניתוח כלכלי של היצע וביקוש הקומפוסט לפי ענפים חקלאיים. אחת מהמלצותיהן העיקריות הייתה לפעול לעידוד יצירת שוק לקומפוסט בוצה ממפעלי טיהור שפכים ויישומה בחקלאות בשל הפוטנציאל הכלכלי הטמון בכך.

איזנקוט וחובריו (2004) סוקרים ניתוח רב שנתי של השפעת פיזור קומפוסט בוצה ובוצת שפכים בגידולי פלחה בשלושה אזורים על הגידולים והקרקע, בהתבססם על ניסויי שדה שבוצו בין השנים 2003 – 1999. מסקנותיהם האגרונומיות העיקריות העלו, כי התמורה הגבוהה ביותר מקומפוסט בוצה הייתה מיישום של הקומפוסט לקראת גידול דגניים חורפיים, והנמוכה ביותר הייתה לקראת גידול קטניות. פיזור חד פעמי של קומפוסט בוצה 2 - 6 מ"ק/ד' מחליף במלואו את הדישון החנקני בשנה הראשונה ו- 75-100% מהדישון החנקני בגידול העוקב, תלוי ביבול הצפוי או ברמת המשקעים. מסקנותיהם לגבי איכות הקומפוסט המיושם ואופן היישום העלו, שריכוז המתכות הכבדות בקומפוסט בוצה היה נמוך בצורה משמעותית מאשר בבוצה סוג ב', וריכוז החנקן והזרחן בקומפוסט בוצה היה נמוך ב- 50% מאשר בבוצה מסוג ב'. הטקסטורה של קומפוסט בוצה הייתה הרבה יותר נוחה ומתאימה ליישום בשדה מאשר בוצה סוג ב'. מסקנותיהם לגבי השינוי בתכונות הקרקע העלו, כי השינוי במליחות של תמיסת הקרקע היה קטן ולא משמעותי. השינוי בריכוז המתכות הכבדות בקרקע כתוצאה מיישום של בוצה בטווח זמן הקצר של הניסויים עד שלוש שנים היה קטן, ובכל מקרה רחוקים מרמות הסף המותרות בקרקע לפי התקנים האירופי והאמריקאי. מסקנותיהם העיקריות לגבי השינוי ביבול העלו, כי השינוי המשמעותי ביותר ביבול כתוצאה מפיזור של קומפוסט בוצה היה בחיטה, כאשר התרומה הייתה חיובית באזורים גשומים מעל 300 מ"מ/שנה, בעוד שבאזורים שחונים היבול נפגע.

בשנת 2002 פרסמו החברות DHV Water and Balasha-Jalon את סקר החלופות לטיפול בבוצת השפד"ן. מסקנותיהם העיקריות היו, כי שיטת הייבוש בחום ולאחריה שיטת הקומפוסטציה הן העדיפות ביותר מבחינה כלכלית. המלצתם הסופית הייתה יישום חלופת הטיפול התרמי, קרי שריפת

בוצת השפד"ן כפתרון המועדף. לטענתם, פתרון זה הוא היחיד המסוגל לטפל בבעיית בוצת השפד"ן לאורך זמן, תוך שמירה על עיקרון של חוסר תלות בצרכני קומפוסט לקליטת הבוצה. פתרון זה לא התקבל מצידם של הארגונים הירוקים ועיריית ראשון לציון, שהשפד"ן פועל מתחומה.

בעבודה מאוחרת יותר של טרצ'יצקי וחובריו (2006) נאמד הביקוש וההיצע של הקומפוסט בישראל, וחושב פוטנציאל השימוש בו בהתאם לערך הדישוני, עבור גידולים חקלאיים שונים (לפי שלוש קבוצות שימוש) באזורים שונים בארץ. המלצתם העיקרית הייתה, כי חישוב הביקוש לקומפוסט המבוסס על ריכוז החנקן שבו, מעיד על כך ששטחי החקלאות מסוגלים לקלוט את כל היצע הקומפוסט, כולל קומפוסט שמקורו מבוצת שפכים. לפיכך טענו החוקרים, כי לאור הביקוש הקיים לקומפוסט יש למנוע את שריפת בוצת השפד"ן.

קן וחובריו (2008), בחנו את כדאיות המיחזור של חומר אורגני ממקורות של אשפה ביתית וחקלאות בעלי חיים בישראל, ביחס לחלופה של הטמנת החומר האורגני לסוגיו במטמנות, הפועלות בכפוף לתנאים סניטאריים מקובלים. מערך המיחזור הנבחן התבסס על שימוש בחומר האורגני לייצור קומפוסט, אשר מופנה ליישום בחקלאות הצמחית. לצורך הניתוח נוסח מודל תכנון ריבועי, בו נלקחים בחשבון מגוון ההיבטים הכלכליים הקשורים בהפעלת המערך. על פי תוצאות המחקר, קיימת כדאיות למיחזור של 70% מהפסולת הביתית האורגנית וזבל בע"ח בכמות של 1,439,969 טון/שנה. אחת ההמלצות החשובות שעלתה ממחקרם הייתה, כי על המשרד לאיכות הסיבה לקדם תקנות, שמטרתן הפחתת שיעור החומר האורגני המופנה לאתרי הטמנה, מכיוון שקיימת הצדקה כלכלית להפניית החומר האורגני ליישום בקרקעות החקלאיות, העניות בחומר אורגני.

פרק 3: פיתוח מודל אופטימיזציה להקצאת בוצה ברמה האזורית

3.1 מסגרת מושגית

פיתוח מודל המתאר את פתרון מתכנן אזורי לבעיית סילוק הבוצה, המשיא את רווחת האזור הנבחן, בכפיפות למגבלות סביבתיות ותברואתיות. מטרת המודל היא לבחור את ההקצאה האופטימאלית של הבוצה בין חלופות הסילוק האפשריות. במילים אחרות, בחינת כדאיות חלופת הקומפוסטציה של בוצת המט"ש, ויישומה בשטחים חקלאיים, בהשוואה לחלופת הטמנת הבוצה במטמנה מאושרת. בחינת החלופות תיערך בשני שלבים. בשלב הראשון, נבחר את ההקצאה האופטימאלית של הבוצה עבור האזור הנבחר מנקודת ראות של מתכנן אזורי הפועל בתנאי וודאות מלאה ופועל במטרה להשיא את הרווחה החברתית באזור. הקצאה זו תושג על-ידי השאת תועלת האזור כולו, קרי: סכימת תועלות היחידות הכלכליות. בשלב השני, פתרונות מודל האופטימיזציה, של שלב א', ישמשו כנתונים למודלים מקובלים מתחום תורת המשחקים השיתופיים, אשר יבחנו האם קיים יתרון לשיתוף פעולה אזורי וזאת ע"י אפיון מרחב המיקוח שנוצר מקיומה של הליבה. בנוסף, נציג מספר פתרונות הקצאה מקובלים (ערכי שפלי, גרעין) לחלוקת העלויות והרווחים בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור.

3.2 חלופות ההתארגנות באזור

המתכנן המרכזי, פועל בתנאי וודאות מלאה ומבחין בין חלופות ההקצאה השונות המצויות באזור. נסמל ב- I את מספר היחידות הכלכליות שבאזור וב- i ($i=1, \dots, I$) את אינדקס היחידות הכלכליות, כאשר, $i=1$ מייצג את המט"ש, יצרן הבוצה. $i=2$ ו- $i=3$ מייצגים אזור חקלאי גדול ואזור חקלאי קטן, בהתאמה, השונים בגודל שטחם ובתמהיל גידוליהם. בנוסף נניח כי החקלאיים בכל אחד מתתי האזורים מיוצגים על-ידי נציגות חקלאית אחת. המתכנן המרכזי בוחן מספר אלטרנטיבות אפשריות של שיתופי פעולה בין היחידות הכלכליות, כאשר שיתוף פעולה אזורי בין כל היחידות הכלכליות יוגדר כשיתוף פעולה מלא ("קואליציית העל" במונחי תורת המשחקים). באיור 3.1 ניתן לראות את אפשרויות שיתוף הפעולה באזור הנבחן.

איור 3.1: סכמת חלופות ההתארגנות האפשריות באזור



מאיור 3.1 ניתן לראות כי ניצול הבוצה באזור יתכן רק בשיתוף העיר, כאשר בלעדית לא תיתכן התארגנות לניצול בוצה מצד הארגונים החקלאיים.
בהתאם לאמור לעיל ייבחנו החלופות האפשריות הבאות:

- א. חוסר שיתוף פעולה (סה"כ 3 חלופות): כל יחידה פועלת באופן עצמאי ומנצלת רק את התשומות הזמינות לה. לדוגמא: כל אחת מקבוצות החקלאים משיאה את הרווח שלה, כאשר לרשותן מכסת מים שפירים ו/או קולחים לצרכי השקיה וכמות דשנים נתונה וקבועה. העיר, כאשר היא פועלת בחוסר שיתוף, מחויבת לסלק את כל הבוצה למטמנה מאושרת, ובמקרה זה לא תהיה הקצאת בוצה לגידולים חקלאיים. בחלופה זו יש לקחת בחשבון את העלויות הכרוכות בהובלת כל כמות הבוצה למטמנה.
- ב. שיתוף פעולה בין העיר לבין אחת מהיחידות הכלכליות (סה"כ 2 חלופות): בהתארגנויות אלו קיימת אפשרות לניצול בוצה המט"ש לשימושים חקלאיים. במקרים אלו יש לקחת בחשבון את העלויות הכרוכות בהובלת הבוצה מהמט"ש למתקן הקומפוסטציה, עלויות ייצור הקומפוסט במתקן ועלויות הובלתו לאחד מהאזורים החקלאיים.
- ג. חלופת שיתוף פעולה בין כל היחידות הכלכליות באזור (קואליציית העל): שיתוף פעולה כללי בין כל היחידות הכלכליות הפעילות באזור תוך התייחסות למכלול מערך שינוע הבוצה, ייצור הקומפוסט והובלתו לשני האזורים הנבחרים.

- ניתן לחלק את בעיית התכנון העומדת בפני המתכנן המרכזי לשלושה מרכיבים עיקריים:
- א. תרומת כל אחת מהיחידות הכלכליות לסך הרווחה האזורית.
 - ב. מבנה העלויות הכרוכות בכל אחת מדרכי הפעולה (חלופות) האפשריות.
 - ג. מגבלות תכנון הכוללות, בין היתר, מגבלות קרקע, מגבלות איכות הסביבה ועוד.

ההיבטים הכלכליים של הבעיה האזורית, העומדים בפני היחידות הכלכליות שבאזור ובראשן המתכנן המרכזי יתמקדו בסוגיות הבאות:

- א. בחירת המבנה הארגוני או מידת שיתוף הפעולה בין היחידות הכלכליות שבאזור, ששיא את סך הרווחה האזורית;
- ב. קביעת הקצאת כמויות הבוצה ליחידות הכלכליות הפועלות באזור (לגידולים השונים);
- ג. קביעת רמות האיכות האופטימאליות של הבוצה לייעודים השונים (שימוש חקלאי, הטמנה).

ההחלטות בדבר הסוגיות הכלכליות דלעיל, יושפעו, בין היתר, מהגורמים הבאים:

- א. עלויות שינוע וסילוק הבוצה למטמנה (השפעת המרחק של היחידות החקלאיות מהמט"ש).
- ב. העלות (הנזק) החיצונית (הסביבתית) הנגרמת כתוצאה ממערך הטמנת הבוצה או מערך ייצור הקומפוסט ויישומו בשטחים חקלאיים.
- ג. עלות ייצור קומפוסט כתלות בכמות ואיכות הבוצה.
- ד. עלויות הקמה של מפעל קומפוסטציה אזורי כתלות בכמות הבוצה האזורית.
- ה. תפוקה חקלאית המתקבלת מיישום קומפוסט בגידולים חקלאיים שונים.
- ו. חיסכון בעלויות דשנים כימיים כתוצאה מיישום קומפוסט בגידולים חקלאיים שונים.
- ז. מגבלות יישום בוצה סוג א' בשטחים חקלאיים (תקנות המים, 2004).

- א. הנחת היסוד עבור סילוק הבוצה היא, שחל איסור על סילוק הבוצה לים כפי שהתבצע עד עתה. במילים אחרות, יישום אמנת ברצלונה, עליה חתומה ישראל, האוסרת על סילוק פסולת לים ממקורות יבשתיים. כלומר, חלופת האפס של המט"ש (ללא שיתוף פעולה עם החקלאים) היא סילוק הבוצה למטמנה מאושרת.
- ב. כל כמות הבוצה חייבת להיות מסולקת מתחומי המט"ש לשימוש החקלאים (לאחר תהליכי ייצוב וקומפוסטציה) ו/או למטמנה מאושרת.
- ג. הבוצה היוצאת מהמט"ש היא בוצה סוג ב' בריכוז מוצקים של 20-25%, המתאימה לפי תקנות הבוצה החדשות (תקנות המים - מניעת זיהום מים, שימוש בבוצה וסילוקה, התשס"ד 2004), לשינוע למפעל קומפוסטציה או למטמנה, ואינה מתאימה ליישום חקלאי ללא שדרוג לבוצה סוג א' (תקף החל ממרץ 2007).
- ד. המט"ש יכול להגדיל את הכנסותיו על-ידי תמורה (תשלומי העברה) שיקבל עבור אספקת מוצר (קומפוסט) בעל ערך כלכלי חיובי עבור החקלאים. אולם, רווחיו יושפעו גם מעלויות הטיהור השינוע והפיזור של הבוצה לשטחי היישום, באזור שיוגדר על-ידי המתכנן המרכזי.
- ה. מפעל הקומפוסט והמטמנה מסוגלים לקלוט ולטפל בכל כמות הבוצה השנתית באזור.
- ו. מפעל הקומפוסט יכול לייצר קומפוסט באיכות אחת בלבד, מטעמי ניהול אופטימלי ומגבלות תפעול.
- ז. החקלאים ייבחרו את ניצול הקומפוסט האופטימלי בהסתמך על המלצות מומחים ולפי שטחי גידולים ותמהיל גידולים נתונים וקבועים. כל זאת כאשר מכסת מי ההשקיה (שפירים ו/או קולחים) שברשותם וכן כמות יסודות ההזנה, חנקן (N), זרחן (P) ואשלגן (K), השנתית הנדרשת לכל דונם גידול בכל אזור נבחן נתונה וקבועה וידועה לחקלאים, על-פי המלצות מומחים ומדריכי שדה.

3.4 ניסוח בעיית המתכנן המרכזי

בסעיף זה נציג בשלבים את בעיית המתכנן המרכזי, תוך התייחסות לרווח כל אחת מהיחידות הכלכליות שבאזור, למבנה העלויות הכרוכות ביישום כל אחת מהחלופות האפשריות ולאילווצים העומדים בפני המתכנן המרכזי (ראה טבלת ריכוז פרמטרים ומשתנים בנספח 3.1).

איכות הבוצה

נסמן ב- q_i את איכות הבוצה ונגדיר את טווח רמת האיכות לקטע $[0,1]$. נגדיר $q_i = 0$ כרמת האיכות המינימאלית של בוצה, כלומר בוצה גולמית לא מיוצבת, ו- $q_i = 1$ כרמת האיכות המקסימאלית של בוצה, כלומר בוצה סוג א' ברמת איכות הגבוהה ביותר. ניתן לטהר את הבוצה לרמות שונות של איכות בהתאם לאופן השימוש המיועד לה. נסמל q_1 - איכות בוצה המיועדת להטמנה, ו- q_2 - איכות הבוצה המועברת לשימוש חקלאי לקבוצות החקלאים השונות.

כמות הבוצה וההקצאות ליעודים השונים

כמות הבוצה שתיושם כקומפוסט בוצה בגידולים החקלאיים השונים באזורים השונים מוגדרת על-ידי הביטוי הבא :

$$\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \leq \bar{b} \quad (3.1)$$

כאשר משתנה ההחלטה x_{ij} מייצג את כמות קומפוסט בוצה (במונחי טון בוצה) שנתית שתיושם לדונם גידול j באזור i ($i=2,3$), הפרמטר l_{ij} מייצג את שטח הקרקע המוקצה לגידול j באזור i ו- \bar{b} היא סך כמות הבוצה השנתית, הנוצרת במט"ש. נסמל ב- b_1 את סך כמות הבוצה השנתית שתועבר להטמנה. לפיכך, כמות הבוצה שתועבר להטמנה מתקבלת כהפרש בין סך כמות הבוצה השנתית הנוצרת לבין סך כמות הבוצה שתיושם כקומפוסט, קרי :

$$b_1 = \bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \quad (3.2)$$

עלויות לסילוק הבוצה

סך עלות מערך הטמנת הבוצה נתונה על-ידי :

$$\left[c_1 + c(q_1) + p^m \right] \cdot \left(\bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \quad (3.3)$$

כאשר הביטוי בסוגריים המרובעים מבטא את סך העלות להטמנת טון בוצה, המתקבל כסכום של עלות הטיהור ($c(q_1)$), עלות ההובלה (c_1) ואגרת ההטמנה (p^m).

תהא $\varphi(q_1)$ - פונקציה המבטאת את העלות (הנזק) הסביבתית של סילוק 1 טון בוצה באיכות q_1 למטמנה בערכים כספיים (ש/טון). בהנחה שעלות זו מופנמת במלואה למט"ש, הרי ש- $\varphi(q_1)$ יהיה גובה התשלום/הקנס שישולם בגין הנזק הסביבתי-אקולוגי הנגרם כתוצאה מהטמנת בוצה באיכות q_1 , כאשר המט"ש, מבחינתו, יכול לבחור את רמת איכות הבוצה המועברת להטמנה. הפונקציה מוגדרת בתחום $[0,1]$ ומקבלת ערך מקסימאלי עבור $q_1 = 0$, כלומר עבור רמת איכות מינימאלית של בוצה. הפונקציה מקיימת: $\varphi'(q_1) < 0$, $\varphi''(q_1) > 0$.

מכאן, שסך העלות הסביבתית כתוצאה מהטמנת הבוצה הינה :

$$\varphi(q_1) \cdot \left(\bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \quad (3.4)$$

באופן דומה, תהא $\varphi(q_2)$ - פונקציה המבטאת את העלות (הנזק) החיצונית של יישום 1 טון בוצה באיכות q_2 בשטחים חקלאיים, לאחר הפיכתה לקומפוסט, בערכים כספיים (ש/טון). הפונקציה מוגדרת באופן דומה לפונקציה $\varphi(q_1)$, שהוגדרה לעיל.

מכאן, שסך העלות הסביבתית כתוצאה ממערך הקומפוסטציה הינה :

$$\varphi(q_2) \cdot \left(\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \quad (3.5)$$

סך העלות המשתנה לייצור ושינוע קומפוסט מבוצה מיוצגות על- ידי הנוסחה הבאה :

$$[c_2 + c(q_2)] \cdot \left(\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \quad (3.6)$$

כאשר c_2 מייצג את עלות הובלת הבוצה למפעל הקומפוסט (אם אינו ממוקם בסמיכות למט"ש), והביטוי $c(q_2)$ מייצג את עלות הטיהור המשתנה של הפיכת בוצה לקומפוסט ברמת איכות q_2 .

כאמור, **חלופת האפס** עבור המט"ש, בהעדר שת"פ, הינה סילוק כל כמות הבוצה למטמנה מאושרת ($\bar{b} = b_1$). בעיית המט"ש תחת חלופת האפס מוגדרת על- ידי :

$$\text{Max}_{q_1} \left\{ \Pi_1^0 = -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot \bar{b} \right\} \quad (3.7)$$

לפיכך, ביישום חלופת האפס המט"ש ייבחר את רמת איכות הבוצה המיועדת להטמנה q_1^1 כך ששיא את תועלתו, וזאת ללא קשר לתועלת החקלאים (תועלתם אינה מושפעת מאיכות הבוצה המופנית להטמנה). מתנאי סדר ראשון לבעיה (3.7) נקבל :

$$\frac{\partial \Pi_1^0}{\partial q_1} = 0 \Rightarrow c'(q_1) = -\varphi'(q_1) \quad (3.8)$$

משמעות תנאי זה היא שעבור הרמה האופטימלית של איכות הבוצה המיועדת להטמנה, העלות השולית לטיהור יחידת איכות, $c'(q_1)$, תהיה שווה לעלות הנזק הסביבתי השולי הנובע מההטמנה של טון בוצה באיכות זו.

ביישום חלופת האפס (3.7) המט"ש נושא לבדו בכל עלויות הסילוק של הבוצה מתחמומו. אולם, ע"י שת"פ עם יתר היחידות הכלכליות יתכן ויוכל למזער עלויות אלו ולשפר את מצבו.

בהנחה של שיתוף פעולה עם החקלאים, צרכני הבוצה הפוטנציאליים, כאשר המט"ש נושא בנטל כל עלויות שדרוג הבוצה ואספקתה לחקלאים, פונקצית הוצאות המט"ש תהא :

$$\Pi_1 = -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot \left(\bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2)] \cdot \left(\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - E \quad (3.9)$$

פונקציה זו מוגדרת כסכום העלויות של סילוק כמות הבוצה שתבחר להטמנה, עלות הנזק הסביבתי כתוצאה מההטמנה ועלות הפיכת כמות הבוצה שתבחר לקומפוסט באיכות שתבחר, כאשר הפרמטר E מייצג החזר הון שנתי בגין עלויות הקמה ותשתית של מפעל הקומפוסט בהנחה של מימון באמצעות לקיחת הלוואה לתקופה קצובה.

נגדיר את סך עלות שינוע ופיזור הקומפוסט בשדה לשטחי הגידול השונים נתונה על- ידי :

$$\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} t_{ij} \quad (3.10)$$

כאשר הפרמטר t_{ij} מייצג את עלות הובלה ופיזור בשדה למ"ק קומפוסט (במונחי טון בוצה) לשטחי גידול j באזור i ($i=2,3$).

התועלת האזורית מניצול הבוצה בחקלאות

בנוסף לחיסכון הנובע מהקטנת הוצאות מערך ההטמנה, התועלת הנובעת מיישום קומפוסט הבוצה בשטחים חקלאיים מוגדרת על ידי חישוב ושקלול של שני מרכיבים:

(א) החלפת דשנים כימיים (חסכון בדשן): נניח כי בוצה סוג i (קומפוסט בוצה) מהווה תחליף חלקי לדשנים כימיים (פיין, 2008), חנקן זרחן ואשלגן והוא משתנה בין קבוצות גידולים שונות בהתאם ליכולת ניצול הדשן של כל קבוצה (ראה למשל: טרצייצקי וחובריו, 2006). לפיכך, נניח כי 1 טון בוצה המיושם בכל גידול j באזור i מחליף α_{ij} טון דשנים כימיים, כאשר $0 < \alpha_{ij} < 1$. נגדיר את הפרמטר \bar{n}_{ij} ככמות הדשנים הכימיים, המיושמת בדונם גידול j באזור i , וזאת על-פי המלצות מומחים ומדריכי שדה, כאשר מכסת ההשקיה קבועה ברמה של \bar{w}_{ij} וללא שימוש בקומפוסט מכל סוג שהוא. עבור כמות זו נקבל לכל גידול j באזור i רמת יבול השווה ל- $y_{ij}(\bar{n}_{ij}, \bar{w}_{ij})$. כלומר, לפי יחס התחלופה דלעיל, יישום בוצה בגידול j באזור i בכמות x_{ij} טון, תחסוך שימוש בכמות מסוימת של דשנים הכימיים, כאשר סך כמות חומרי ההזנה לגידול נותרת קבועה לפי המשוואה: $\tilde{n}_{ij} = \bar{n}_{ij} - \alpha_{ij} x_{ij}$. כלומר, נקבל שסך כמות הדשנים הכימיים המיושמת תהיה ברמה נמוכה מזו הנדרשת ללא יישום קומפוסט עבור הגידול.

על מנת לבטא את החיסכון במדשן כימי במונחים כספיים, נגדיר את z_{ij} כערך הכספי של 1 טון דשן כימי לגידול j באזור i (מתוך תחשיבי הגידול המומלצים). מתקבל, אם כן, שעבור כל גידול ניתן לחסוך כתוצאה משימוש בקומפוסט בוצה את הסך: $\alpha_{ij} x_{ij} z_{ij}$.

(ב) תוספת הפדיון הנובעת מהגדלת תפוקת היבול לדונם כתוצאה מטיוב הקרקע: לצורך כך יש לחשב את כמות היבול לדונם כתוצאה מיישום קומפוסט בוצה בכל גידול j באזור i . נגדיר פונקציית גידול, אשר מושפעת מכמות ומאיכות הקומפוסט המיושמת, עבור הגידולים השונים שייבחרו. באופן כללי, נבטא את כמות היבול לדונם באמצעות פונקציה ריבועית, המתאימה להציג את השפעת יישום קומפוסט על יבול גידולים שונים, בהסתמך על נתונים של מחקרי שדה. מכיוון שקיים קושי רב בהגדרת איכויות שונות לבוצה ובהיעדר נתונים על יישום קומפוסט בוצה ברמות איכות שונות והשפעתן על היבול של גידולים חקלאיים, נניח במודל האמפירי כי איכות הקומפוסט (בוצה סוג i) נתונה וקבועה ברמה אחידה עבור שני האזורים החקלאיים, ואיננה משתנה החלטה. תחת הנחה זו פונקציית הגידולים תהיה מהצורה:

$$y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) = \beta_{1j} x_{ij} + \beta_{2j} x_{ij}^2 + y_{ij}^0 \quad (3.11)$$

כאשר כמות הבוצה סוג i (קומפוסט בוצה), x_{ij} , המיושמת לדונם גידול j באזור i נמדדת ביחידות טון\דונם\שנה. המשתנה \bar{q}_2 מייצג את רמת איכות הבוצה המועברת ליישום חקלאי בצורת

קומפוסט. כלומר, הפרמטרים β_{1j}, β_{2j} מייצגים את מקדמי פונקציית היבול דלעיל. הפרמטר y_{ij}^0 מייצג את כמות היבול הממוצעת לדונם גידול j באזור i ללא יישום קומפוסט.

הנחות לגבי פונקציית הגידול במודל התיאורטי, כאשר איכות הבוצה, q_2 , הינה משתנה החלטה:

1. הפונקציה מקיימת תפוקה שולית פוחתת ביחס לשינוי ברמת איכות הבוצה סוג א' (קומפוסט הבוצה), כאשר כמות הבוצה קבועה, ועולה באופן מונוטוני. כלומר, ככל שאיכות קומפוסט הבוצה גבוהה יותר, כך גדלה תרומתו ויעילותו כזבל אורגני, אך במידה הולכת ופוחתת.
2. הנחה דומה קיימת גם לגבי כמות הבוצה, אך בנוסף עבור כל גידול וגידול הפונקציה מקיימת ערך תפוקה שולית פוחתת וקיימת רמת יישום אופטימאלית, x_{ij}^* , כך שעד לרמה זו הפונקציה עולה באופן מונוטוני, ומעבר לכמות זו ערך התפוקה החקלאית הולך ופוחת והפונקציה יורדת באופן מונוטוני. פורמאלית, הפונקציה מקיימת את התנאים הבאים:

$$\text{א. לגבי איכות הבוצה: } \frac{\partial y_{ij}}{\partial q_2} > 0, \quad \frac{\partial^2 y_{ij}}{\partial^2 q_2} < 0$$

$$\text{ב. לגבי כמות הבוצה: } \frac{\partial y_{ij}}{\partial x_{ij}} > 0, \quad \frac{\partial^2 y_{ij}}{\partial^2 x_{ij}} < 0, \quad \forall x_{ij} < x_{ij}^*$$

$$\frac{\partial y_{ij}}{\partial x_{ij}} < 0, \quad \frac{\partial^2 y_{ij}}{\partial^2 x_{ij}} > 0, \quad \forall x_{ij}^* < x_{ij}$$

בהסתמך על (3.11), ניתן להגדיר את כמות היבול המתקבלת מיישום קומפוסט בוצה עבור סך שטחי הגידולים השונים באזורים הנבחרים ע"י המשוואה הבאה:

$$\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} y_{ij} = \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} [\beta_{1j} x_{ij} + \beta_{2j} x_{ij}^2 + y_{ij}^0] \quad (3.12)$$

בהסתמך על משוואה (3.11), ובהתייחס לחיסכון בעלויות כתוצאה משימוש בקומפוסט ($\alpha_{ij} x_{ij} s_{ij}$) בהתאם ליחס התחלופה שהגדרנו, נגדיר כעת את תועלת החקלאים מיישום קומפוסט בוצה לדונם גידול מסוג j באופן הבא:

$$\Pi_{ij} = p_j^y \cdot y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) - f_{ij} + \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij}, \quad \forall i = 2, 3 \quad (3.13)$$

כאשר הפרמטר f_{ij} מייצג סך הוצאות שוטפות לדונם גידול j באזור i , כולל עלויות דשן, והפרמטר

p_j^y מייצג את מחיר יבול הגידול j (טון/דונם) עבור החקלאי בניכוי עלויות התלויות בכמות היבול. ובהתבסס על משוואות (3.12) ו-(3.13), סך התועלת עבור החקלאים מיישום קומפוסט בשטחי כל הגידולים באזור הינה:

$$\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} \Pi_{ij} = \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} [p_j^y \cdot y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) - f_{ij} + \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij}] \quad (3.14)$$

מודל ההשאה האזורי

בשלב זה אנו מניחים כי מטרתו של המתכנן מרכזי היא להשיא את סך הרווחה באזור, תוך התייחסות למספר חלופות התארגנות אפשריות. בהנחת ודאות מלאה, המתכנן המרכזי מכיר את פונקציות המטרה (התועלות) של כל אחת מהיחידות הכלכליות בהתייחס לשילובן במסגרת שיתופית אפשרית כלשהיא.

מודל האופטימיזציה האזורי מתייחס לשיתופי פעולה אפשריים בין המט"ש, יצרן הבוצה, לבין שתי יחידות כלכליות, צרכני הבוצה. המוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי מקורה בהיצע הבוצה שברשות המט"ש, לכן הנחנו כי התארגנות כלשהיא ללא שיתוף המט"ש אינה כדאית.

נסמל ב- G התארגנות מלאה של כל הצרכנים באזור, כלומר: $G = (2, 3)$. ונגדיר כל התארגנות חלקית s של צרכנים, ללא המט"ש, כקבוצה של G . כלומר, $s \subseteq G$.

התארגנות של כל תת קבוצה s עם העיר, $s \cup (1)$, יוצרת חלופת התארגנות אפשרית S לבעיית המתכנן המרכזי, כלומר: $S = \{s \cup (1)\}$.

הקואליציות של חוסר שיתוף פעולה מצד כל היחידות הכלכליות המצויות באזור הן $\{i\}$, $i=1,2,3$. חלופות אלו מייצגות למעשה את רווח כל אחת מהיחידות הכלכליות כאשר הן פועלות לבדן, ללא התארגנות כלשהי. נגדיר את האפשרות לשיתוף פעולה מלא בין כל היחידות הכלכליות (\bar{N}) כקואליציית העל (Grand Coalition) כלומר: $\bar{N} = \{(1) \cup G\}$. נשתמש בהסמלות אלו על מנת להגדיר את ערכיה של פונקציית המטרה בהתייחס לחלופות ההתארגנות האפשריות.

בעיית האופטימיזציה של המתכנן המרכזי היא לקבוע את רמת משתני ההחלטה q_2, q_1, b_1, x_{ij} ובחירת המבנה הארגוני, מבין החלופות האפשריות, ששיא את פונקציית המטרה האזורית, המוגדרת בביטוי 3.15:

פונקציית המטרה, המייצגת את סך התועלת האזורית הינה:

$$\begin{aligned} \text{MAX}_{x_{ij}, q_1, q_2} \{ & \Pi^S = -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot b_1 - [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2)] \cdot \left(\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \\ & - E + \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} [p_j^y \cdot y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) - f_{ij} + \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij}] - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} t_{ij} \} \end{aligned} \quad (3.15)$$

השאת התועלת האזורית מתבצעת בכפיפות למגבלות הבאות:

א. מגבלת כמות יישום בוצה שנתית לסך שטחי גידול j באזור i :

$$b_1 + \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} = \bar{b} \quad (3.16)$$

ב. מגבלת רמת איכות מינימאלית ליישום חקלאי של קומפוסט בוצה עבור כלל הגידולים תיראה כך :

$$\underline{q}_2 < q_2 < 1 \quad (3.17)$$

כאשר הפרמטר \underline{q}_2 מייצג את רמת איכות מינימאלית של קומפוסט בוצה ליישום חקלאי (סוג א').

ג. מגבלת היצע קומפוסט לכלל השטחים באזור :

$$x_{ij} < \bar{X}_{ij} \quad (3.18)$$

כאשר הפרמטר \bar{X}_{ij} מייצג את מגבלת יישום הבוצה השנתית לגידול j באזור i ($i = 2, 3$).

פתרון לבעיית האופטימיזציה האזורית

פונקציית הלגראנג' עבור הבעיה האזורית דלעיל הינה :

$$\begin{aligned} L = & -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot \left(\bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2)] \cdot \left(\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \\ & - E + \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} \left[p_j^y \cdot y_{ij}(\bar{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) - f_{ij} + \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij} \right] - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} t_{ij} \\ & + \lambda \left[\underline{q}_2 - q_2 \right] + \delta_{ij} \left[l_{ij} \bar{X}_{ij} - l_{ij} x_{ij} \right] \end{aligned} \quad (3.19)$$

כאשר λ, δ_{ij} הם מחירי הצל של מגבלת רמת האיכות המינימאלית ליישום חקלאי של בוצה, ומגבלת כמות היישום השנתית של בוצה בכל גידול j באזור i , בהתאמה.

פתרון תנאי סדר ראשון בהנחת פתרון פנימי :

i. לגבי כמות הקומפוסט ליישום בכל גידול ובכל אזור מתקיים התנאי הבא :

$$\frac{\partial L}{\partial x_{ij}} = 0 \Rightarrow p_j^y \cdot \frac{\partial y_{ij}}{\partial x_{ij}} + \alpha_{ij} z_{ij} = [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2) + t_{ij}] - [c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] + \delta_{ij} \quad (3.20)$$

משמעות תנאי זה היא, כי ערך התפוקה השולית של הקומפוסט בייצור החקלאי יחד עם החיסכון השולי בדשן כימי עבור כל גידול j באזור i , משתווה לעלות השולית של מערך הקומפוסט בניכוי העלות השולית הנחסכת כתוצאה מהימנעות מיישום מערך הטמנת הבוצה, בתוספת מחיר הצל של מגבלת יישום הבוצה לגידול.

ii. קביעת רמת איכות הבוצה המיועדת להטמנה במטמנה מאושרת מתקבלת מהתנאי הבא :

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = -c'(q_1) \left(\bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - \varphi'(q_1) \left(\bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) = 0 \quad (3.21)$$

ולאחר צמצום האגפים נקבל את המשוואה הבאה :

$$c'(q_1) = -\varphi'(q_1) \quad (3.22)$$

משמעות תנאי זה היא שעבור הרמה האופטימלית של איכות בוצה המיועדת להטמנה, העלות השולית לטיהור יחידת איכות זו, $c'(q_1)$, תהיה שווה לעלות החיצונית (הנוק הסביבתי) השולית של יחידת איכות להטמנה (התועלת השולית של האזור משינוי ביחידת איכות של בוצה להטמנה). תנאי זה אינו תלוי כלל בפונקציית התועלת של החקלאים, כפי שראינו גם בביטוי (3.8).

iii. קביעת רמת איכות הבוצה ליישום חקלאי כקומפוסט בוצה, מתקבלת מהתנאי הבא :

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = -c'(q_2) \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} + \left(\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} \left(\frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial q_2} \right) \right) - \lambda = 0 \quad (3.23)$$

בהנחת פתרון פנימי (לרמת איכות הקומפוסט (הבוצה) ישנה השפעה חיובית על פונקציית ערך התפוקה החקלאית) נקבל כי מחיר הצל של המגבלה הינו $\lambda = 0$ (המגבלה אינה אפקטיבית). בהתאם להנחה זו, נקבל ממשוואה (3.23) לאחר פישוט את הביטוי :

$$c'(q_2) \cdot \left(\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) = \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} \left(\frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial q_2} \right) \quad (3.24)$$

כלומר מתקבל, שסכום ערכי התפוקות השוליות של יחידת איכות בוצה ליישום חקלאי, שווה לעלות השולית לשיפור סך כמות הבוצה המשודרגת לקומפוסט ביחידת איכות אחת. במקרה זה, איכות הבוצה מתנהגת כמוצר ציבורי בעל השפעה חיצונית בייצור בדומה לתנאי סמואלסון (סמואלסון, 1961). דהיינו, שיפור רמת איכות הבוצה המסופקת לחקלאים על-ידי המט"ש, יצרן הבוצה, משפיע במישרין על הרווחים של החקלאים, צרכני בוצה.

בנוסף לתנאים אלה, מתקיימות מגבלות אי-שליליות עבור כל משתני ההחלטה ועבור ערכי הצל: λ, δ_{ij} .

עבור משתני ההחלטה: q_1, q_2 מתקיימת גם מגבלת רמת איכות מקסימלית השווה לערך 1 (נובע מהגדרת טווח רמת האיכות לקטע $[0,1]$).

פרק 4: יישום אמפירי של המודל

4.1 הגדרת האזור הנבחן

יישום המודל האמפירי נעשה עבור מט"ש השפד"ן ואזור הרי יהודה וצפון הנגב. אזורים אלו מאופיינים על-ידי שטחים חקלאיים נרחבים, קרקעות דלות בחומרי הזנה וגידולים חקלאיים בעלי רווחיות נמוכה וחלקם אף אינם רווחיים כלל. מסיבות אלה, פוטנציאל השימוש בקומפוסט באזורים אלו הוא גדול ועשוי להוות גורם מכריע לגבי רווחיות הגידול. לצורך יישום הבוצה בשטחים חקלאיים הוגדרו שני ארגונים חקלאיים המייצגים שני צרכני בוצה פוטנציאליים (i_2, i_3) בעלי מאפיינים שונים מבחינת גודל השטח, תמהיל הגידולים וסוג ההשקיה. ארגון החקלאים הגדול מאופיין בגידולי שדה, בעלי רווחיות נמוכה, ששטחם משתנה בהתאם לשינויים במחיר היבול ולא מיושם בהם קומפוסט מכל סוג שהוא (ברוקנטל, 2008). ארגון החקלאים הקטן מאופיין בעיקר בגידולי ירקות, בעלי רווחיות גבוהה ובחלקם מיושם קומפוסט תעשייתי (לא מבוצת שפכים) (שני, 2008). כל הגידולים, בשני ארגוני החקלאים, מושקים במי קולחים ברמת טיהור שלישונית (מי שפד"ן). המאפיינים העיקריים של קבוצות החקלאיות מוצגים להלן בטבלה 4.1.

טבלה 4.1: מאפייני הקבוצות החקלאיות

יחידה כלכלית	מיקום	מרחק מאתר הקומפוסט	שטחי עיבוד חקלאיים (דונם)	מאפייני גידולים עיקריים
ארגון חקלאים גדול ($i=2$)	משקי דרום, הרי יהודה וצפון הנגב	50 ק"מ לנק' ייחוס	97,000	גד"ש / פלחה
ארגון חקלאים קטן ($i=3$)	צפון מערב הנגב / עוטף עזה	60 ק"מ לנק' ייחוס	13,700	ירקות / שלחין

חלופת האפס העומדת בפני מתכנן אזורי בבואו לטפל בבעיית בוצת העיר היא הטמנת כל כמות הבוצה במטמנה מאושרת. לשם כך נבחר אתר הפסולת דודאים²⁰ כמטמנה המאושרת ולגביו יחושבו העלויות עבור חלופה זו כמפורט בסעיף 3.4. היות ומדובר בכמויות בוצה גדולות המצריכות אתר פסולת גדול, שאינו קיים היום במדינת ישראל, ועל מנת לפשט את תחשיבי ההובלה, הנחנו שאתר הקומפוסט ימוקם בסמיכות לאתר הפסולת דודאים, כלומר עלויות ההובלה מהשפד"ן למטמנה או לאתר הקומפוסט הינם זהות.

4.2 כמות הבוצה ואיכותה

כמות הבוצה, הנוצרת במט"ש השפד"ן (אומדן לפרמטר \bar{b}) מוערכת בכ- 300,000 טון בוצה רטובה (בריכוז 20% ח"י) לשנה, אשר ממנה ניתן לייצר כ- 180,000 מ"ק קומפוסט, לפי יחס ייצור של 0.6 מ"ק/טון בוצה רטובה (בן יעקב, 2008). לערך זה נעשה ניתוח רגישות כמפורט בסעיף 4.8. על מנת להתגבר על הקושי הרב בהגדרת איכויות שונות לקומפוסט (ראה סעיף 3.4), נניח במודל האמפירי כי איכות הקומפוסט נתונה וקבועה ברמה אחידה עבור שני האזורים החקלאיים, ואיננה

20 אתר דודאים (בני שמעון) הינו אתר פסולת מרכזי בישראל, המטפל בכ-1,100 טון פסולת ליום. האתר ממוקם בין צומת בית קמה לבאר שבע, משתרע על שטח של למעלה מ-400 דונם, ומסוגל עוד לקלוט יותר משלשה מיליון טונות של פסולת (האגף לטיפול בפסולת מוצקה במשרד להגנת הסביבה, www.sviva.gov.il).

משתנה החלטה במודל האמפירי. במילים אחרות, קיימת רמת איכות אחת להטמנה, היא הרמה הבסיסית של הבוצה היוצאת מן המט"ש, $c(q_1) = 0$, ורמת איכות אחת לקומפוסט בוצה, היא q_2 , כאשר הביטוי $c(q_2)$ מייצג את העלות המשתנה בייצור קומפוסט התלויה בכמות הבוצה בלבד.

4.3 הערכה ואמידה של עלויות

עלויות אספקת הקומפוסט לאזורים החקלאיים

לצורך אמידת עלויות אספקת הקומפוסט לאזורים החקלאיים עלינו להתחשב בכל מרכיבי העלויות כמפורט בסעיף 3.4 לעיל. סעיף זה מציג את אומדני העלויות ואופן חישובן.

עלות משתנה וקבועה בייצור קומפוסט על בסיס בוצת השפד"ן - תחשיבי העלות מסתמכים על סעיפי העלות המפורטים בסקר הקומפוסט (חלמיש וחובריו, 2000) וכן על פגישה שנערכה עם מנהל אתר קומפוסט בר-עידן, הממוקם באזור העיר קריית-גת (בן יעקב, 2008). התחשיבים כוללים עלויות הקמה ותפעול של מתקן קומפוסטציה בשיטת הערמות הפתוחות (windrows), המסוגל לייצר קומפוסט מבוצת שפכים בתפוקה של 180 אלף מ"ק קומפוסט לשנה. מהתחשיבים עולה, כי העלות הקבועה של הקמת אתר קומפוסטציה בסדר הגודל הנדרש, במונחי החזר הון שנתי, היא 4,389,680 ₪²¹ (ראה נספח 4.1), המהווה אומדן לפרמטר (E) , ואילו העלות השנתית המשתנה²², בהנחה שהאתר עובד בתפוקה מלאה, היא 13.3 ₪/טון בוצה רטובה (22.2 ₪/מ"ק קומפוסט), המהווה אומדן לערך הביטוי $c(q_2)$ כאשר רמת איכות הקומפוסט קבועה.

עלויות הובלה ופיזור הקומפוסט – עלות ההובלה מבוססת על חישובים שנערכו עבור סקר הקומפוסט בישראל (חלמיש וחובריו, 2000). עלות זו מתייחסת להובלת פסולת במשאית גדולה ומוערכת ב- 0.37 ₪/טון/ק"מ, ומהווה אומדן לפרמטר t_i .

אופן חישוב מרחקי ההובלה מתחלק לשני שלבי הובלה: (1) הובלה ממט"ש השפד"ן לאתר הקומפוסט/מטמנה (אתר הפסולת דודאים); (2) הובלה ממתקן הקומפוסט לאזורי היישוב בשטחים חקלאיים. על-פי ההנחה שמיקום אתר הקומפוסט הינו סמוך לאתר המטמנה ניתן, אם כן, להתעלם בחישוב תוספת ההכנסה, מעלות ההובלה של הבוצה ממט"ש השפד"ן למטמנה או לאתר הקומפוסט מכיוון שהן מקזזות זו את זו ואינן מהוות שיקול במודל התכנון לגבי כדאיות מערך הקומפוסטציה אל מול מערך ההטמנה ($c_1 = c_2$).

מרחקי ההובלה מאתר הקומפוסט לאזורים החקלאיים חושבו על פי מרחקי כבישים, לפי המרחק מאתר דודאים לנקודות ייחוס מרכזיות: כאשר לגבי אזור דרום יהודה נקודת הייחוס הוגדרה בקיבוץ רבדים (מרחק הובלה של כ- 50 ק"מ) שבו מרוכזת הפעילות החקלאית של ארגון מגדלי דרום יהודה (ברוקנטל, פגישה, 2008), ולגבי אזור עוטף עזה, הנקודה הוגדרה בקיבוץ ניר יצחק, שמרכז את הפעילות החקלאית באזור זה (מרחק הובלה של כ- 60 ק"מ).

הפרמטר t_i כולל גם את עלות פיזור הקומפוסט בשדה, שהיא 14.6 ₪/מ"ק (8.7 ₪/טון בוצה), על-פי מחירון ארגון עובדי הפלחה (ברוקנטל, 2008).

21 היות והמודל הינו חד תקופתי, החזר ההון חושב בהנחה של לקיחת הלוואה לתקופה של 10 שנים בריבית שנתית ריאלית של 6%.

22 בהתאם להנחות העלות המשתנה אינה תלויה באיכות הבוצה.

עלות ההטמנה

עלות הקליטה באתר דודאים הינה 45 ש/טון בוצה (לא כולל עלות חיצונית), המהווה אומדן לפרמטר p^m (בן יעקב, 2008; קן וחובריו, 2008).

עלויות חיצוניות

הערכת העלויות החיצוניות של מערך הקומפוסטציה וההטמנה מבוססת על דו"ח כלכלי של האיחוד האירופי העוסק בהשוואה בין חלופות שונות לטיפול בבוצה ב-15 מדינות אירופאיות. הדו"ח משקלל את העלות החיצונית נטו של כל מערך, על-פי הערכות כלכליות ממחקרים קודמים ומתחשב בעלויות הפליטה של גזים הנפליטים בכל תהליך, ומנכה מעלות זו את התועלות מניצול חוזר של חלק מאותם חומרים. עיקר העלות החיצונית של מערך ההטמנה נובעת מפליטת CO_2 ו- CH_4 , התורמים להתחממות הגלובלית (Eshet et al., 2006). האומדן לעלות זו, על-פי הדו"ח, הינה €8 לטון בוצה חומר יבש (בריכוז 20%), השווה ל-8.8 ש/טון בוצה רטובה (לפי שער חליפין 5.5 ש/לאירו). העלות החיצונית של מערך הקומפוסט מתחלקת לשני רכיבים עיקריים: (1) העלות הנובעת מתהליך ייצור הקומפוסט שעיקרה נובע מפליטת N_2O ו-(2) עלות הובלת הקומפוסט לאזורי היישוב הגורמת לפליטת CO_2 לאטמוספירה, המהווה כמחצית מסך עלות מערך הקומפוסטציה. האומדן לעלות החיצונית של סך מערך הקומפוסטציה הינה €6 לטון בוצה חומר יבש, השווה ל-6.6 ש/טון בוצה רטובה. יש לציין, כי בהיעדר נתונים, עלויות חיצוניות אלו אינן כוללות את ההשפעה על הסביבה הטבעית של צמחים ובעלי חיים, גרימת מחלות וכן פחיתת יבול כתוצאה מדישון עודף (EC, 2002). לאומדנים אלה נעשה ניתוח רגישות כמפורט בסעיף 4.8.

4.4 נתוני שטחים וגידולים חקלאיים

תמהיל הגידולים (j) בכל אזור (i) - ליישום המודל נבחרו מספר גידולים חקלאיים, שמקובל ליישם בהם קומפוסט, בהתאם למאפיינים של כל אחד משני האזורים החקלאיים, כאשר בחלקם אף בוצעו ניסויי השדה שעליהם הסתמכנו בעבודה זו. כל הגידולים בהשקיה מושקים בקולחי השפד"ן.

שטחי הגידולים (אומדן לפרמטר l_{ij}) - הנתונים עבור שטחי הגידולים בדונמים התקבלו מנציגי הארגונים החקלאיים (ברוקנטל, פגישה, 2008). נתוני הגידולים הנבחרים מוצגים בטבלה 4.2.

טבלה 4.2: נתוני שטחים וגידולים

הגידול	אינדקס הגידול (j=1,...,J)	אזור יישום (i=2,3)	שטח גידול (דונם)	סוג השקיה
חיטה בעל (2)	1	2	50,000	בעל
תירס גרעינים	2	2	10,000	טפטוף
תירס תחמיץ	3	2	10,000	טפטוף
חמניות	4	2	17,000	טפטוף
כותנה-אקלה	5	2	5,000	טפטוף
כותנה-פימה	6	2	5,000	טפטוף
חיטה בעל (3)	1	3	7,300	בעל
תפוז	7	3	4,200	שלחין / המטרה
גזר	8	3	1,200	שלחין / המטרה

צנונית	9	3	1,000	שלחין / המטרה
--------	---	---	-------	---------------

מחיר יבול (p_j^y) **והוצאות גידול** (f_{ij}) - נתונים אלו נלקחו מתחשיבי גידולי שדה וירקות במחירי אוקטובר 2007 (שלו, 2007; סלמון, 2007) ומתייחסים למחיר לחקלאי בניכוי עלויות התלויות בכמות היבולים.

כמות יבול ממוצעת (y_{ij}^0) **(טון/דונם)** - כמות היבול הממוצעת מתייחסת לכמות הממוצעת המתקבלת לדונם גידול j באזור i ללא יישום קומפוסט מכל סוג שהוא. על-מנת לאמוד כמות זו הסתמכנו, עבור מרבית הגידולים, על נתונים מתוך תחשיבי הגידול האזוריים, ומנתוני הלמ"ס, המייצגים ממוצעים רב שנתיים כלל ארציים. הנתונים עבור גידולי תירס, חמניות וכותנה נלקחו מתוך שלו, (2005-2007). הנתונים עבור גידול תפוז וגזר נלקחו מנתוני הלמ"ס. הנתונים עבור גידול צנונית נלקחו מסלמון, (2007). בנוסף לכך, עבור הגידול חיטה בעל, אשר כמות היבול שלו מושפעת בעיקר מכמות המשקעים באזור הגידול, אמדנו את כמות היבול הממוצעת מתוך משוואה המבוססת על ניסויי שדה שנערכו באזורי היישום (ראה פירוט בסעיף 4.5). כמויות המשקעים בממוצע רב שנתי עבור שני האזורים, המיוצגים על-ידי ארגון חקלאים גדול ($i=2$) וארגון חקלאים קטן ($i=3$), כפי שנתקבלו מנציגי הארגונים הן 493 מ"מ ו-280 מ"מ גשם בשנה, בהתאמה (ברוקנטל, פגישה, 2008).

הוצאות שוטפות לדונם גידול (f_{ij}) - הנתונים נלקחו מתחשיבי הגידולים שציינו לעיל, ומתייחסים לסך ההוצאות השוטפות לדונם גידול j באזור i , כולל עלויות דשן, בניכוי עלויות התלויות בכמות היבול, כגון עלויות שיווק, ובניכוי החזרי הון.

אומדן החיסכון בדשנים כימיים (אומדן לפרמטרים α_{ij}, z_{ij}) - קיימות מספר דרכים לאמידת יחס התחלופה בין קומפוסט לדשנים כימיים (α_{ij}). יש המתתייחסים רק לשווי הערך הדישוני של החנקן בבוצה, שהוא יסוד ההזנה החשוב ביותר לצמח, על-פי חלוקה לקבוצות גידולים בעלי מאפייני צריכת דשן זהה (ראה למשל: טרצ'יצקי וחובריו, 2006). אולם, המחלוקת נעוצה בהגדרת יחס התחלופה הקיים בפועל ולא התיאורטי, כלומר חישוב כמות יסודות ההזנה הזמינים²³ לצמח, ולא שקלול סך כמות החנקן האורגני בבוצה, שחלקו כלל אינו זמין לצמח (פיין, פגישה, 2008). שנית, אמידת כמות היבול כתוצאה מיישום קומפוסט בוצה (ראה סעיף 5.7) נעשתה בהתבסס על מחקרי שדה, כשבחלקם יישמו קומפוסט בשילוב עם דשן ללא התחשבות ביחס תחלופה מוגדר, כך שכלל לא ניתן לבצע הגדרה של כמות הדשן הנחסכת.

לבסוף, בעבודה הנוכחית אנו לוקחים בחשבון גם את החיסכון הנובע מעלות הקומפוסט בלבד, כלומר נפחית את עלות הקומפוסט מסך ההוצאות השוטפות לגידול, f_{ij} , אם מוגדר לפי תחשיבי הגידול. כלומר, החיסכון נלקח בחשבון רק עבור הגידולים שיושם בהם קומפוסט תעשייתי (תפוז וגזר). במצב התחילי ללא שיתוף פעולה, ולאחר שיתוף פעולה עם המט"ש יסופק קומפוסט בוצה במסגרת מודל התכנון האזורי, בהנחה שהמט"ש יישא בנטל עלויות ייצור ואספקת הקומפוסט לאזורים החקלאיים.

בנוסף, ראה נספח 4.2.

23 תחזית האספקה של יסודות הזנה מיישום חקלאי של בוצה תלויה בתהליך הטיפול בשפכים ובתהליך הקומפוסטציה. כמות החנקן האורגני בקומפוסט בוצה היא כ-1.38, אך כמות החנקן הזמין היא סך כמות החנקן המינרלי בקרקע בתוספת כמות החנקן האורגני שעבר מינרליזציה (פיין, 2000).

מגבלת כמות הבוצה המיושמת (טון/דונם/שנה)

על-פי המלצות מדריכי שדה, בממשק בעל של חיטה מקובל ליישם כמות של 1 מ"ק קומפוסט לדונם, בתירס ובכותנה מקובל ליישם כמות של עד 3 מ"ק לדונם ובתפוח"א וירקות מקובל ליישם בין שלשה לחמישה מ"ק לדונם (טרצ'יצקי וחובריו, 2006; הדס וחובריה, 2008). כמויות אלו מושפעות מאוד ממידת התחליפיות של הקומפוסט במונחי דשן כימי וכן מרווחיות הגידולים. אולם, עיקר הפוטנציאל של הקומפוסט טמון בניצולו דווקא בגד"ש שאינם רווחיים, הגדלים בקרקעות דלות ביסודות הזנה. לכן, בפועל ניתן ליישם כמויות גדולות יותר, אפילו מעל הרמות הנקובות בתקנות המים. לדוגמא, בניסויי שדה בחיטה יושמו כמויות קומפוסט של עד 18 מ"ק לדונם ולא נגרמו נזקים לצמח ולקרקע, משום שריכוז היסודות הזמינים בפועל לצמח בקומפוסט הוא נמוך והם אינם מצטברים בקרקע בריכוזים מסוכנים (פיין, 2008). לפיכך, במודל האמפירי הוגבלה כמות יישום הקומפוסט ל-5 מ"ק לדונם עבור כל הגידולים, שהם כ- 8.35 במונחי טון בוצה רטובה בריכוז 20% חומר יבש. ערך זה מהווה אומדן לפרמטר \bar{X}_{ij} .

4.5 אמידת כמות היבול המתקבלת כתוצאה מיישום קומפוסט

אמידת כמות היבול לדונם כתוצאה מיישום קומפוסט בכל גידול j באזור i , כמפורט בסעיף 3.4, לצערנו, מתבססת על מספר מועט של תצפיות, בעיקר בשל מיעוט מחקרי השדה²⁴ ועל אופן יישום הקומפוסט, שנעשה ברמות יישום מעטות וקבועות, דבר המקשה מאוד על האמידה. על מנת למזער את מגבלות האמידה, התבססנו על מספר מחקרי שדה שנערכו בארץ, מרביתם אף באזורי היישום בדרום הארץ, בהם נבדקה תוספת היבול לגידולים שונים כתוצאה מיישום קומפוסט מסוגים שונים, ביניהם קומפוסט בוצה.

בגלל מיעוט המחקרים ומחסור בנתונים על חלק מהגידולים ומבלי לפגוע בכלליות המודל, הנחנו מספר הנחות מפשטות:

הנחה I - אין הבדל בין תגובת גידולים לקומפוסט מבוצה ומאשפה.

הנחה II - שיעור השינוי ביבול כתוצאה מיישום קומפוסט זהה בקרב קבוצות גידולים בעלי מאפייני צריכת חנקן דומה (טרצ'יצקי וחובריו, 2006) לפיכך, שיעור השינוי זהה עבור הגידולים: תירס וכותנה (ניצול אקסטנסיבי) וכמו כן עבור הגידולים: תפוח"א, גזר וצנונית (ניצול אינטנסיבי).

הנחה III - תוספת היבול כתוצאה מיישום קומפוסט נבדקה כאשר סך כמות יסודות ההזנה עבור הגידול נתונה וקבועה, וכאשר כמות המשקעים עבור גידולי בעל משתנה לפי ממוצע רב שנתי אזורי, ואילו עבור גידולי שלחין כמות מי ההשקיה נתונה לפי תחשיבי גידול.

שיטת המחקר בניסויי השדה התבססה על השוואה בין חלקות שקיבלו טיפול בקומפוסט, לבין חלקות אשר קיבלו טיפול זהה מבחינת תנאי הגידול (השקיה, דישון וכיו'), פרט להוספת הקומפוסט (חלקות בקרה). לצורך כך, השתמשנו בביטוי (3.11) על מנת לתאר את כמות היבול המתקבלת כתוצאה מיישום קומפוסט בגידולים הנבחרים. מכיוון שבמרבית הניסויים מקובל ליישם קומפוסט

24 מחקרים בהם יושמה בוצה סוג ב' באופן ישיר אינם רלוונטיים למחקרנו (תקנות המים, 2004).

ביחידות מ"ק/דונם, השתמשנו בפרמטר γ , המייצג את היחס משקלי-נפחי ביצור קומפוסט, המוערך ב- 0.6 מ"ק קומפוסט/טון בוצה רטובה, כך ש- γx_{ij} היא כמות קומפוסט הבוצה המיושמת ביחידות מ"ק/דונם/שנה, ו- x_{ij} היא כמות הבוצה המיושמת ביחידות טון/דונם/שנה. בחלק קטן מהניסויים שבוצעו, בעיקר בניסויים בחיטה, נעשתה השוואה בין שיטות פיזור שונות של קומפוסט, הצנעה וחיפוי²⁵. שיטת הפיזור לא נלקחה בחשבון באמידת כמות יבול החיטה.

התאמת פונקציות גידול וכיול הפרמטרים

התאמת פונקציות הגידול מתוך מחקרי השדה התחלקה לשני סוגי גידולים: חיטה בעל ושאר הגידולים בהשקיה. בגלל ריבוי הנתונים מניסויי החיטה (32 תצפיות), הפונקציה שנאמדה מייצגת יבול שנתי ממוצע המתקבל מיישום כמות קומפוסט שנתית ממוצעת. עבור חיטה נאמדה גם כמות היבול ללא יישום קומפוסט מתוך המשוואה, וזאת בהתאם לנתוני המשקעים האזוריים. לגבי שאר הגידולים התגובה הרב שנתית של היבול ליישום קומפוסט לא נבחנה במסגרת הניסויים, ולכן הפונקציה מתארת שנה מייצגת.

חיטה בעל - הנתונים נלקחו מהמחקרים הבאים: כיתאין וחובריו, 2003; איזנקוט וחובריו, 2004; Agassi et al., 2004). המשוואה שנאמדה היא מהצורה:

$$y_j(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, \gamma x_j, \bar{q}_2) = \hat{\beta}_{01} + \hat{\beta}_{11}(\gamma x_j) + \hat{\beta}_{21}(\gamma x_j)^2 + \hat{\beta}_{31}r_i + \varepsilon \quad (4.1)$$

כאשר, $\hat{\beta}_{31}$, מייצג את המקדם הליניארי של כמות המשקעים הממוצעת לשטחי גידול החיטה, ובצירוף החותך, $\hat{\beta}_{01}$, הם מהווים אומדן לכמות היבול הממוצעת ללא תוספת קומפוסט (y_{ij}^0). הפרמטרים β_{21}, β_{11} מייצגים את המקדם הליניארי והמקדם הריבועי של פונקציות יבול החיטה, בהתאמה. לכל שלושת האומדנים נתקבלה מובהקות סטטיסטית טובה (ראה נספח 4.3).

חמניות, תפוזי תירס - הנתונים נלקחו מהמחקרים: איזנקוט וחובריו, 2004 (חמניות); פיין וחובריו 2005 (תפוזי); Avnimelech, et al., 1990; מור וחובריו, 1990 (תירס). עבור גידולים אלו השתמשנו בפונקציות הגידול המתוארת בביטוי (3.11), כאשר הפרמטרים β_{2j}, β_{1j} מייצגים את המקדם הליניארי והמקדם הריבועי של פונקציות היבול עבור הגידולים הנ"ל.

התאמת פונקציות גידול עבור הגידולים כותנה, גזר וצנונית – בהתאם להנחה השנייה שהצגנו לעיל, השתמשנו בנתונים שנתקבלו מניסויי תפוזי בכדי לאמוד את פונקציות היבול עבור גזר וצנונית, ואילו בנתונים שהתקבלו עבור תירס בכדי לאמוד את פונקציות היבול עבור גידולי החיטה. התאמה זו נעשתה בשלושה שלבים: בשלב הראשון אמדנו את כמות היבול הממוצעת המתקבלת ללא יישום קומפוסט בגידול (y_{ij}^0), כמפורט בסעיף 4.4. בשלב השני חישבנו את המקדם הליניארי והריבועי של שיעור תוספת היבול בגידול j (ראה: קן וחובריו, 2008).

²⁵ בהצנעה מתבצעת החדרה של הקומפוסט לקרקע על-ידי הפיכת הקרקע לאחר היישום, ואילו בחיפוי היישום מתבצע על פני הקרקע בלבד.

לשם כך, ראשית נבודד את השינוי ביבול j , כתוצאה מיישום קומפוסט, על-ידי סידור מחדש של ביטוי (3.11) כך שנבודד את שיעור השינוי בכמות היבול כתוצאה מיישום קומפוסט. באופן פורמאלי נקבל את הביטוי הבא:

$$\frac{y_j - y_j^0}{y_j^0} = \frac{\hat{\beta}_{1j}}{y_j^0} (\gamma x_j) + \frac{\hat{\beta}_{2j}}{y_j^0} (\gamma x_j)^2 \quad (4.2)$$

כעת נגדיר $\tilde{\beta}_{1j} = \frac{\hat{\beta}_{1j}}{y_j^0}$ כמקדם ליניארי של שיעור תוספת היבול בגידול j ו- $\tilde{\beta}_{2j} = \frac{\hat{\beta}_{2j}}{y_j^0}$ כמקדם

הריבועי של שיעור תוספת היבול בגידול זה.

בשלב האחרון, נתאים את הפרמטרים β_{1j}, β_{2j} עבור היבול j באמצעות הכפלת מקדמי שיעור

השינוי, $\tilde{\beta}_{1j}, \tilde{\beta}_{2j}$, בכמות היבול ללא יישום קומפוסט (y_{ij}^0).

כיול הפרמטרים - על-פי הנחה השנייה, כמפורט בסעיף 4.5, השתמשנו בנתונים מניסוי שדה של תירס על מנת לכייל את הפרמטרים עבור הכותנה, ובאותו אופן בנתוני ניסוי שדה של תפוח"א לכיול הפרמטרים עבור הגזר והצנונית.

תוצאות כיול ערכי הפרמטרים עבור פונקציות הגידול מוצגות להלן בטבלה 4.3.

טבלה 4.3: כיול ערכי פרמטרים ומובהקות האומדנים

כמות יבול ממוצעת ללא יישום קומפוסט (טון/דונם)	מקדם ריבועי		מקדם ליניארי		מס' תצפיות	אינדקס	הגידול
	Sig.	ערכי $\hat{\beta}_{2j}$	Sig.	ערכי $\hat{\beta}_{1j}$			
0.427	0.003	-0.0013	0.004	0.0210	32	X21	חיטה בעל (2)
1.350	0.025	-0.0015	0.038	0.0437	6	X22	תירס-גרעינים
2.20	-	-0.0025	-	0.0712	-	X23	תירס-תחמיץ
0.198	0.610	-0.0001	0.307	0.0022	5	X24	חמניות
0.579	-	-0.0006	-	0.0187	-	X25	כותנה-אקלה
0.522	-	-0.0006	-	0.0169	-	X26	כותנה-פימה
0.214	0.003	-0.0013	0.004	0.0210	32	X31	חיטה בעל (3)
3.36	-	-0.0085	-	0.1077	3	X37	תפוח"א
6.26	-	-0.0158	-	0.2007	-	X38	גזר
2.0	-	-0.0050	-	0.0641	-	X39	צנונית

הערכים המוצגים בטבלה 4.3 הינם אומדני מקדמי פונקציות הגידול וכמויות היבול הממוצעות ללא יישום קומפוסט עבור הגידולים הנבחרים. בנוסף, מפורטים בטבלה ערכי המובהקות של האומדנים, במידה ומספר התצפיות אפשרי. בכל הגידולים, מלבד חיטה, מספר התצפיות קטן מאוד בגלל מיעוט ניסויי ולכן לא ניתן להתייחס למשמעות הסטטיסטית של מובהקות האומדנים, עובדה שעלולה לפגוע בתוצאות האמידה (ראה פירוט בסעיף 4.8 לגבי ניתוחי רגישות לאומדנים).

תוצאות השלב האמפירי התבססו על פונקציות הגידול שהורכבו מהנתונים הנ"ל, ויתכן ואם היו בידינו נתונים נוספים האמידה הייתה מדויקת יותר.

4.6 מגבלות המודל האמפירי

1. נתוני שטחים וגידולים חקלאיים – במסגרת המודל הנוכחי הנחנו כי תמהיל הגידולים ושטחי החקלאים השונים נתונים וקבועים ואינם נקבעים אנדוגנית.
2. מפעל הקומפוסטציה – נתייחס לסוגיית המיקום ולסוגיית חישוב העלות המשתנה בייצור קומפוסט :
 - א. מיקום המפעל אינו נקבע אנדוגנית במסגרת המודל אלא נתון מראש (אקסוגני), כמפורט בסעיף 4.1.
 - ב. חישוב העלות המשתנה בייצור קומפוסט המיושם במודל מבוסס על עבודה בתפוקת ייצור מלאה.
3. אמידת כמות היבול המתקבלת כתוצאה מיישום קומפוסט - בגלל מיעוט ניסויי השדה ומחסור בנתונים על תגובת הגידולים ליישום קומפוסט נעשתה התאמה של פונקציות הגידול עבור כל אחד מהגידולים הנבחרים לפי קבוצות גידולים מוגדרות, כמפורט בסעיף 4.5.

4.7 תוצאות אמפיריות

מודל האופטימיזציה האזורי המכיל את שלשת השחקנים יושם עבור כל אחת מאפשרויות ההתארגנות שהצגנו (ראה סעיף 3.2). פתרון המודל נעשה באמצעות תוכנת המחשב Maple 13.

בהינתן ערכי פונקציות המטרה לחלופות ההתארגנות השונות, יבחן המתכנן המרכזי את תוספת הרווח (ערך הקואליציה פחות ערכי חבריה, כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף) האזורית משיתופי הפעולה האפשריים ויבחר את הקואליציה בעלת תוספת הרווח הגבוהה ביותר.

באזור הנבחן שלשה משתתפים ולכאורה קיימות $2^3 - 1 = 7$ קואליציות אפשריות (לא ריקות), אך בהתייחס לנתוני האזור בהנחה שניצול קומפוסט הבוצה יתכן רק בהסכמת המט"ש, קטן מספר הקואליציות האפשריות ל-6. הרעיון העומד בבסיס הנחה זו הוא, שללא בוצת המט"ש אין מוטיבציה להתארגנות מצד שאר המשתתפים. באופן פורמאלי, קואליציה אשר אינה כוללת את משתתף מספר 1 שווה לערכי השחקנים המרכיבים אותה. למשל, רווחיה של קואליציה הכוללת את קבוצות החקלאים השונות (2,3), שווה לסכום ערכיהם של שחקנים (2) ו-(3) כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף. באופן דומה, תוספת הרווח של אותה קואליציה יהיה שווה לאפס.

בהתאם לאמור לעיל נבחן את האלטרנטיבות האפשריות הבאות (סה"כ 6 קואליציות אפשריות) :

- א. קואליציות של חוסר שיתוף פעולה- דהינו, המשך המצב הקיים (stand alone) : (1), (2), (3).
- ב. קואליציות חלקיות של שני משתתפים : (1,2), (1,3).
- ג. קואליציית העל : (1,2,3).

ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות במודל האופטימיזציה האזורי, שהתקבלו מפתרונות של מודל האופטימיזציה שהוצג בפרק 3, מוצגים להלן בטבלה 4.4.

טבלה 4.4: ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות (מיליוני ₪)

טור 3	טור 2	טור 1	הקואליציה (i), (S)
תוספת הרווח של הקואליציה $v(S)$	סכימת ערכי השחקנים, כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף $\sum_1^4 \pi(i)$	ערך הקואליציה Π^S	
0.00	-16.14	-16.14	מטי"ש (1)
0.00	36.16	36.16	ארגון חקלאים גדול (2)
0.00	11.83	11.83	ארגון חקלאים קטן (3)
5.34	20.02	25.36	(1,2)
0.75	-4.31	-3.56	(1,3)
7.36	31.85	39.21	(1,2,3)

כאשר,

טור 1: ערך פונקציה המטרה של מודל האופטימיזציה האזורי עבור קואליציה (i) או (S). זהו

למעשה סך הרווח האזורי, (π^i, Π^S) , של קואליציה (i) או (S).

טור 2: סכום ערכי הפונקציה האופיינית עבור כל אחד מהשחקנים בקואליציה (i) או (S). כלומר, סכימת ערכי השחקנים המרכיבים קואליציה (i) או (S), כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף.

טור 3: טור 1 פחות טור 2. ערך מנורמל של קואליציה (i) או (S). $v(S), v(i)$ מסמלים את תוספת הרווח האזורית הנובעת מקואליציות (i) או (S).

פעילות היחידות הכלכליות ללא שיתוף פעולה עם יתר שחקני האזור משקפת את נקודת האיום העומדת בפני כל אחד מהשחקנים הספציפיים. ניתן לראות כי תוספת הרווח הנוצרת מכל אחת מחלופות ההתארגנות המכילה לפחות את המטי"ש ושחקן נוסף תוביל לתוספת רווח חיובית, ומכאן המוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי. תוספת הרווח מתקבלת הן מהתוספת לפדיון הגידולים החקלאיים כתוצאה מיישום קומפוסט בוצה והן ממניעת מערך הטמנת הבוצה (חלופת האפס של המטי"ש), שעלותו גבוהה ממערך ייצור ואספקת הקומפוסט לאזורים החקלאיים. המתכנן המרכזי יבחר בחלופת השיתוף היוצרת את תוספת הרווח הגדולה ביותר ולכן יבחר בחלופת ההתארגנות בה כלולות כל היחידות הכלכליות, קרי: קואליציית העל, (1,2,3), היוצרת תוספת רווח של כ- 7.36 מיליון ₪.

פתרונות הקצאת הבוצה והקומפוסט עבור הגידולים הנבחרים, שהתקבלו מפתרון מודל האופטימיזציה עבור קואליציית העל המועדפת, מוצגים להלן בטבלה 4.5.

טבלה 4.5 : הקצאת הקומפוסט והבוצה המתקבלות עבור הגידולים הנבחרים

גידול	הקצאת קומפוסט בוצה (מ"ק/דונם/שנה)	הקצאה במונחי בוצה (טון/דונם/שנה)	מחירי הצל של מגבלת כמות היישום לדונם (ש/דונם)	סך הקצאת קומפוסט לשטחי הגידול (מ"ק/שנה)
כותנה-פימה	5.0	8.3	4.09	5,000
תירס - תחמיץ	5.0	8.3	0.11	50,000
כותנה-אקלה	5.0	8.3	0.06	25,000
גזר	5.0	8.3	0.01	5,000
תפוז"א	4.7	7.8	0	20,000
תירס - גרעינים	4.5	7.5	0	45,500
צנונית	4.5	7.5	0	4,500
חיטה (2)	0.1	0.2	0	5,000
חיטה (3)	0	0	0	0
חמניות	0	0	0	0
סה"כ				180,000

מטבלה 4.5 ניתן לראות, כי מגבלת יישום הקומפוסט של 5 מ"ק/דונם/שנה תופסת עבור הגידולים: כותנה-פימה, תירס-תחמיץ, כותנה אקלה וגזר. עבור הגידולים: תפוז"א, תירס-גרעינים, צנונית וחיטה – מתקבל פתרון פנימי, כלומר, התועלת האזורית המקסימלית מושגת ברמת יישום קומפוסט (בוצה) נמוכה ממגבלת היישום. עבור הגידולים: חיטה בשטח של ארגון החקלאים הקטן וחמניות, לא יושם קומפוסט כלל. חלוקה זו משקפת הקצאה לפי סדר ערכי תפוקה שולית של הגידולים מהגבוה לנמוך. הקצאה זו מושפעת ממגבלת היישום של הקומפוסט וכן ממגבלת השטחים עבור כל גידול וגידול (בהנחה שמחיר השוק של הגידול נתון). ניתן לראות, שבאופן כללי גידולי הגד"ש הפחות רווחיים, כגון: חיטה וחמניות, קיבלו את הקומפוסט רק לאחר שגידולי הירקות, התירס והכותנה, שהם בעלי מחיר שוק גבוה יותר, ניצלו את כל מגבלת היישום. למגבלת יישום הקומפוסט נערך ניתוח רגישות כמפורט בסעיף 4.8. עוד ניתן ללמוד מנתוני טבלה 4.5, כי עבור קואליציית העל, מגבלת יישום הקומפוסט עבור הגידול כותנה-פימה היא בעלת מחיר הצל הגבוה ביותר (כ-4 ש/דונם). כלומר, אם מגבלת היישום לדונם גידול הייתה ברמה של 6 מ"ק/דונם/שנה (תוספת של 1 מ"ק/דונם/שנה למגבלה) הייתה מתקבלת תוספת לפונקציית המטרה האזורית של כ-4 ש לכל דונם כותנה-פימה (סה"כ 5,000 דונם) ולכן תוספת של כ-20,000 ש לרווחת הקואליציה.

השוואת פתרונות הקצאת הבוצה ליחידות הכלכליות ולהטמנה עבור החלופות הארגוניות השונות מוצגות להלן בטבלה 4.6.

טבלה 4.6 : פתרונות הקצאת הבוצה ליחידות הכלכליות עבור החלופות הארגוניות השונות

הקואליציה (S), (i)	הקצאת בוצה לשחקן (2) (טון/שנה)	הקצאת בוצה לשחקן (3) (טון/שנה)	הקצאת הבוצה להטמנה (טון/שנה)
ארגון גדול (2)	0	0	300,000

300,000	0	0	ארגון קטן (3)
0	0	300,000	(1,2)
185,605	114,395	0	(1,3)
0	50,500	249,500	(1,2,3)

מטבלה 4.6 ניתן לראות, כי עבור הקואליציה (1,2) ועבור קואליציית העל, (1,2,3), כל כמות הבוצה מועברת ליישום חקלאי כקומפוסט ואין כל הקצאה להטמנה, בעוד שעבור הקואליציה (1,3) קיימת הקצאה של למעלה ממחצית מכמות הבוצה (185,605 טון/שנה) ליישום חקלאי והיתר מועברת להטמנה. תוצאה זו מתקבלת עקב מגבלת שטחי הגידולים באזור החקלאי הקטן (סה"כ 13,700 דונם) לעומת עודף שטחי יישום בארגון הגדול (97,000 דונם).

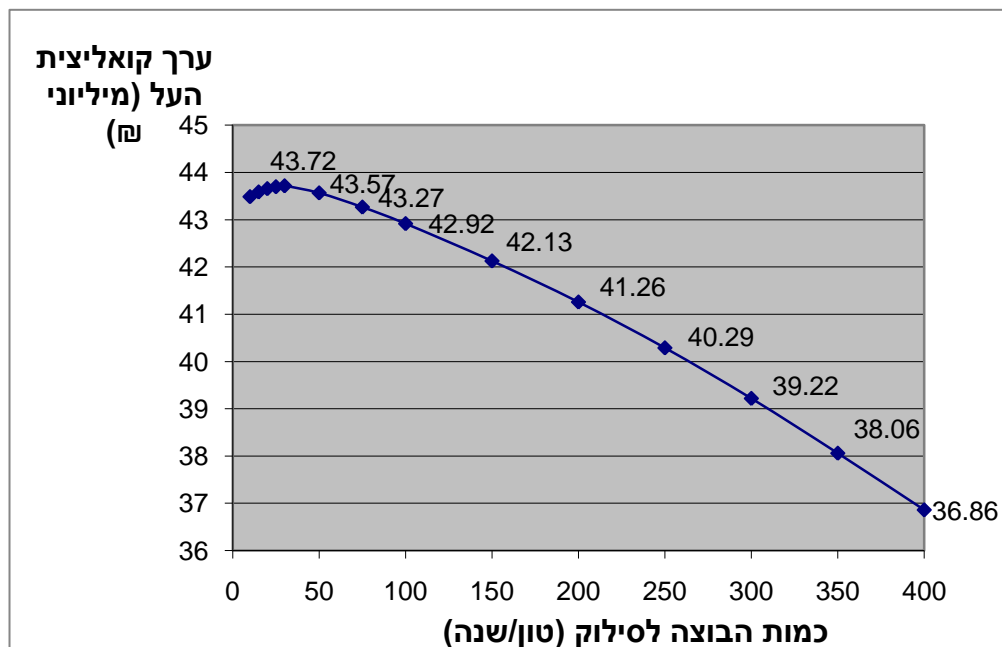
4.8 ניתוחי רגישות

בשלב היישום האמפירי של המודל השתמשנו בנתונים ובאומדנים שונים, המבוססים על מחקרים, ניסויי שדה וראיונות. בשל מיעוט מידע לגבי חלק מהנתונים עליהם התבססנו, או היעדר מידע לגבי גידולים מסוימים, יש לסייג את מהימנות התוצאות. בסעיף זה נפרט לגבי ניתוחי הרגישות שנערכו עבור חלק מן הפרמטרים והאומדנים במודל.

כמות הבוצה

היצע הבוצה האזורי עליו התבססנו בעבודה זו עומד על 300,000 טון/בוצה לשנה. לערך זה נערך ניתוח רגישות בכדי לבחון את השפעת השינוי בכמות הבוצה המסולקת על ערך קואליציית העל. תוצאות הניתוח מוצגות באיור 4.1.

איור 4.1: השפעת השינוי בכמות הבוצה על ערך קואליציית העל



מאיור 4.1 ניתן לראות, כי הערך המקסימאלי עבור קואליציית העל מתקבל עבור כמות בוצה שנתית של כ-30,000 טון/שנה. כמות זו נמוכה משמעותית מן הכמות הנדרשת לסיילוק ואינה ריאלית, ומכיוון שיש חובה לסלק את כל הבוצה לאחת מן החלופות שהוגדרו (הטמנה או יישום חקלאי), הערכים

המתקבלים הם המיטביים עבור כל כמות וכמות. תוצאה זו מתקבלת מכיוון שערכי התפוקות השוליות של הבוצה הולכות ויורדות עם הגידול בכמות הבוצה המיושמת (התפוקה השולית פוחתת) ולכן גם התועלת האזורית מיישום הבוצה הולכת ופוחתת בהתאם, בעוד שעלויות ההטמנה ועלויות ייצור הקומפוסט הם ליניאריים. אך עדיין בכל כמות של בוצה שנדרשת לסילוק מתקבל, שכל הבוצה מועברת ליישום חקלאי (חלופה זו עדיפה בהשוואה לחלופת ההטמנה).

אומדני פונקציות היבול

אמידת מקדמי פונקציות היבול של הגידולים הנבחרים נעשתה בהתבסס על ניסויי שדה, שחלקם אף בוצעו בשטחי היישום של הארגונים החקלאיים שנבחרו ליישום המודל בעבודה זו. תוצאות האמידה שהתקבלו עבור חיטה מבוססות על 32 תצפיות, כולל נתוני משקעים, מובהקות האומדנים טובה ומהימנותם גבוהה. לא ניתן לומר זאת לגבי יתר הגידולים, שלגביהם האמידה מבוססת על לא יותר מ-6 תצפיות וחלקן נאמדו בהתבסס על גידולים מייצגים (תירס ותפוז"א), כמפורט בסעיף 4.5. לאומדנים שהתקבלו עבור פונקציות היבול של הגידולים המייצגים נערכו מבחני רגישות. כמובן ששינויים בערכי המקדמים משפיעים באופן ישיר על ערכי התפוקות השוליות של הגידולים ועל פתרונות ההקצאה.

המקדם הליניארי והריבועי שנתקבלו במחקר זה עבור הגידול תפוז"א הינם 0.1077 ו-0.0085 בהתאמה, ועבור הגידול תירס הינם 0.0437 ו-0.0015 בהתאמה (ראה טבלה 4.3). בחנו את השינוי המתקבל בערך קואליציית העל מהגדלת ערכים אלו ב-50% וב-100% (עבור כל גידול מייצג בנפרד) ובהתאם לכך שונו גם אומדני הגידולים המבוססים על גידולים אלה, כמפורט בסעיף 4.5. התוצאות שנתקבלו עבור השינוי במקדמי פונקציות היבול של תפוז"א מצביעים על גידול של 3.2% ו-6.4% בהתאמה, בערך קואליציית העל, והתוצאות שנתקבלו עבור השינוי במקדמי פונקציות היבול של תירס מצביעים על גידול של 5.5% ו-11.4% בהתאמה, בערך קואליציית העל. כלומר, ניתן לראות שההשפעה של שינויים בערכי האומדנים של התירס והגידולים שמיוצגים על ידו על ערך פונקציות המטרה היא גדולה יותר מאשר זו של קבוצת גידולי תפוז"א והירקות. ניתן לומר שסטיות אלה בערך פונקציות המטרה סבירים במונחי מגבלות האמידה שתיארנו בסעיף 4.6.

עלויות חיצוניות מהטמנה וקומפוסטציה

האומדנים לעלויות החיצוניות כתוצאה ממערך ההטמנה והקומפוסטציה שעליהם התבססנו במחקר זה הם 8.8 ו-6.6 ₪/טון בוצה רטובה בהתאמה (ראה סעיף 4.3). מבדיקת רגישות לערך קואליציית העל משינויים בעלויות החיצוניות מהטמנה נתקבל, שאין השפעה להעלאת העלות החיצונית. הסיבה לכך היא שהבוצה מועברת ליישום חקלאי ועלות ההטמנה נמנעת. מכאן, חלופת האפס של המט"ש מתייקרת ולכן תהיה מאיימת יותר, דבר העשוי להגדיל את המוטיבציה לשיתוף פעולה מצד המט"ש. יש לציין שהעלות החיצונית שנבחרה במחקר זה נמוכה משמעותית מהיטל ההטמנה החל על הטמנת בוצה בישראל, שעומד על 72 ₪ לטון בוצה רטובה (נכון לשנת 2009). מבדיקת רגישות לערך קואליציית העל משינויים בעלויות החיצוניות ממערך הקומפוסטציה נתקבל, שיש להעלות את ערך האומדן בכ-30 ₪ לטון בוצה רטובה (כמעט פי 5) על מנת שתיווצר כדאיות

להטמנה חלקית של הבוצה. תוצאה זו מתקבלת ישירות מתנאי סדר ראשון לבעיית ההשאה האזורית (ראה סעיף 3.4, ביטוי 3.20).

על מנת להבהיר האמור לעיל, נרשום את ביטוי 3.20 מחדש, כאשר נתעלם מההיסכון השולי בדשן שלא נאמד בשלב האמפירי.

מהעברת אגפים נקבל את הביטוי הבא :

$$x_{ij} = - \frac{[c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2) + t_{ij}] - [c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] + \delta_{ij} - p^{y_{ij}} \cdot \beta_{1j}}{2p_j^y \beta_{2j}} \quad (4.3)$$

מהביטוי שהתקבל ניתן לראות, שכאשר נשנה את אחד ממרכיבי העלות של מערך הקומפוסטציה, או את אחד ממרכיבי עלות מערך ההטמנה, במקרה זה את הפרמטר $\varphi(q_2)$, נשנה את הפער בין העלות השולית של מערך הקומפוסטציה לעלות השולית של מערך ההטמנה (סימן המינוס בביטוי 4.3 מתקבל כתוצאה מהמקדם הריבועי השלילי, β_{2j} , שנאמד עבור פונקציות היבול של כל הגידולים), ונאלץ לאזן את המשוואה על-ידי הקטנת כמות הבוצה המוקצית ליישום חקלאי לגידולים השונים. איזון זה מתבטא בהקטנת ההקצאה לגידולים בעלי ערכי התפוקות השוליות הנמוכים ביותר במצב הנתון, בעיקר על חשבון הכמות המוקצית לגידול החיטה. בנוסף, מתקבל שערך קואליציית העל קטן בלמעלה מ-9 מליון ₪ (כ-23.8%). ניתן להתייחס למצב זה כאל מצב קיצוני, משום שבפועל קיים פער גדול בין עלות מערך ההטמנה לבין עלות מערך הקומפוסטציה.

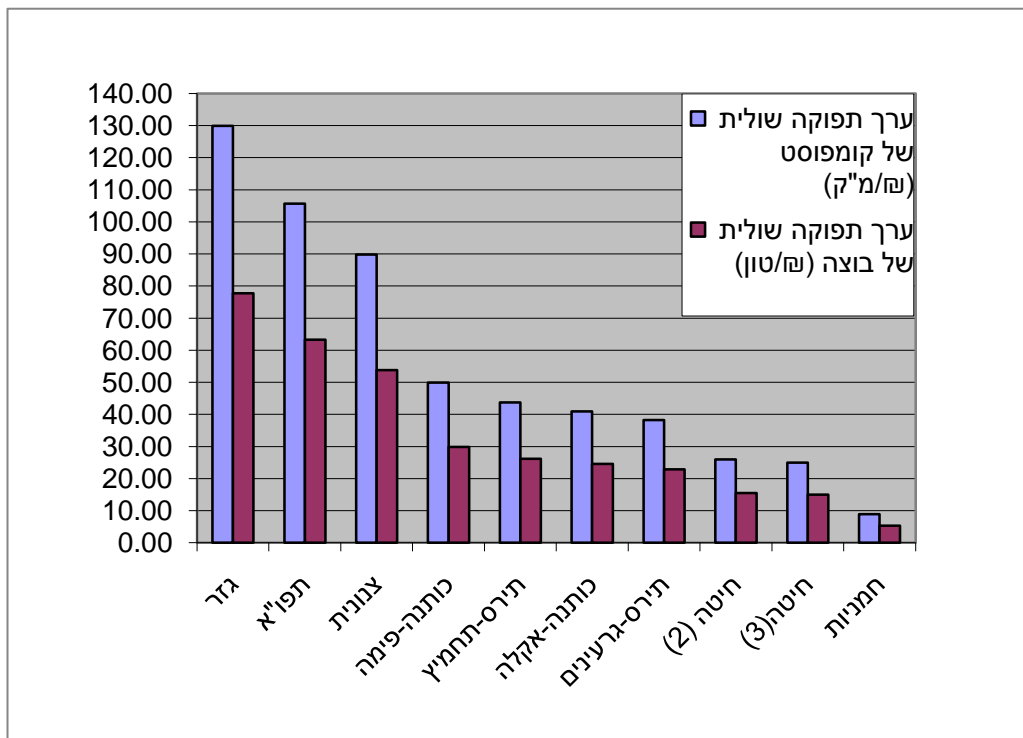
מגבלת יישום קומפוסט הבוצה בשטחי הגידולים

מגבלת יישום הקומפוסט (או במונחי בוצה) משפיעה באופן ישיר על ערכי התפוקות השוליות של הגידולים הנבחרים וכתוצאה מכך על הקצאת הבוצה לגידולים.

בכדי לנתח את ההשפעה על פתרונות ההקצאה, ניתחנו את השפעת השינויים בערכי התפוקות השוליות בהתאם לשינויים בערך מגבלת היישום של הקומפוסט. בשלב ראשון נתייחס לערכי התפוקות השוליות עבור מגבלת יישום של 1 מ"ק קומפוסט לדונם לשנה.

ערכי התפוקות השוליות של קומפוסט הבוצה (ובוצה) לגידולים הנבחרים מוצגת להלן באיור 4.2.

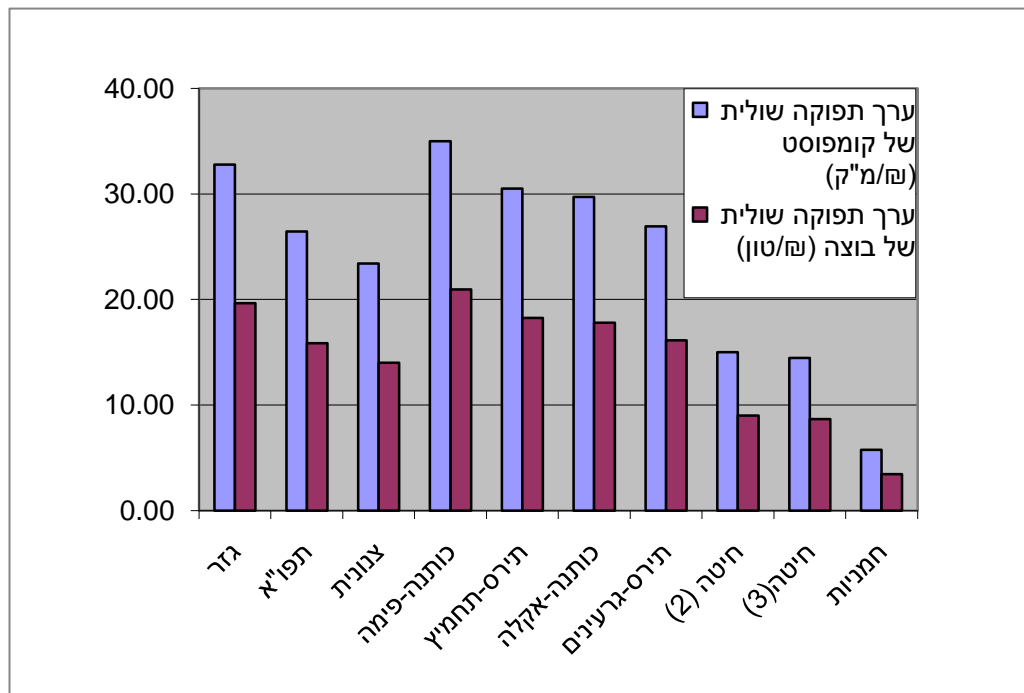
איור 4.2: ערכי התפוקות השוליות של הקומפוסט (ובוצה) במגבלת יישום של 1 מ"ק/דונם



מאיור 4.2 ניתן לראות כי הקומפוסט יוקצה תחילה לשטחי הגזר כל עוד ערך התפוקה השולית של הקומפוסט עבור הגזר גבוה מערכי התפוקות השוליות של המ"ק הראשון עבור גידולים אחרים. עיקרון זה מתווה את סדר הקצאת קומפוסט הבוצה לגידולים השונים. לפיכך, ההקצאה תעבור לגידול הבא כאשר ערך התפוקה השולית של אחד הגידולים האחרים, עבור המ"ק הראשון של הקומפוסט, יעלה על ערך התפוקה השולית של הגזר עבור גידול נוסף בכמות הקומפוסט. ערך קואליציית העל המתקבל עבור רמת המגבלה של 1 מ"ק/דונם (קומפוסט) או 1.67 טון/דונם (בוצה רטובה) הינו 33.37 מיליון ₪. אם נגדיל את מגבלת היישום לרמה 3 מ"ק/דונם, או 5 טון/דונם, בהתאמה, נקבל שערך קואליציית העל יגדל בכ- 15.71% (38.62 מיליון ₪). הגדלה נוספת של רמת המגבלה לרמת של 5 מ"ק/דונם, שהם 8.35 טון/דונם, בהתאמה (הרמה שנבחרה במודל), תגדיל את ערך קואליציית העל ב- 1.55% בלבד (39.22 מיליון ₪), ואילו עבור מגבלה ברמה של 10 מ"ק/דונם, שהם 16.7 טון/דונם, בהתאמה, נקבל שערך קואליציית העל יגדל ב- 0.06% בלבד (39.24 מיליון ₪). כלומר ניתן להסיק שהרגישות הגדולה של פונקציית המטרה למגבלת היישום היא במעבר ממגבלת יישום של 1 מ"ק קומפוסט לדונם לרמה של 3 מ"ק קומפוסט לדונם. בטווח זה מתקבלת התוספת הגבוהה ביותר לערך קואליציית העל, מכיוון שבטווח זה ערכי התפוקות השוליות של קומפוסט הבוצה עבור הגידולים, בעיקר קבוצת גידולי הירקות, הם גבוהים יותר ביחס לרמות מגבלה גבוהות יותר. בנוסף לכך, מתקבל שהחל ממגבלת יישום של 2 מ"ק קומפוסט לדונם כל כמות הבוצה מועברת ליישום חקלאי.

נבחן כעת את ערכי התפוקה השולית במגבלת היישום שנבחרה במחקר זה ברמה של 8.35 טון בוצה, או 5 מ"ק קומפוסט לשנה.

איור 4.3: ערכי התפוקות השוליות של הקומפוסט (והבוצה) במגבלת יישום של 5 מ"ק/דונם



מאיור 4.3 עולה, כי החל במגבלת יישום קומפוסט של 5 מ"ק/דונם לשנה עבור הגידולים, כפי שנבחרה במודל האמפירי, הפערים בין התפוקות השוליות מצטמצמים ומשתנים, דבר הגורם לשינוי בסדר ההקצאה של הקומפוסט (הבוצה). תוצאה זו תלויה כמובן במקדמי פונקציה הגידול שנתקבלו. ככל שעולה ערך מגבלת כמות היישום, מתקבל שערכי התפוקות השוליות של גדיש יורדים בקצב איטי יותר מערכי התפוקות השוליות של גידולי הירקות, ונראה כי גידולי השדה מסוגלים לקלוט כמויות גדולות יותר של קומפוסט בוצה ולשמור על ערכי תפוקות שוליות חיוביים, אפילו עד רמה של 10 מ"ק לדונם ואף יותר. תוצאה זו מתיישבת עם מסקנות ניסויי השדה בכמויות יישום גדולות של קומפוסט בגידול חיטה בממשק בעל (ראה: כיתאין וחובריו, 2003; איזנקוט וחובריו, 2004; Agassi et al., 2004). ניתן להסביר תוצאה זו, בהבדלים בסוג הקרקע, בשיטות ההשקיה ובכמויות הדשנים שיישמו בניסויים עליהם התבססנו. בעוד שגידולי הירקות הושקו בממשק שלחין ודושנו בדשנים כימיים בנוסף לתוספת הקומפוסט, יתר הגידולים (גדיש) הושקו בטפטוף (או שמדובר בגידולי בעל), ויישמו בהם כמויות דשנים נמוכות יותר (למשל: בניסויי החיטה לא הייתה תוספת דשנים מעבר ליישום הקומפוסט, פרט לחלקות בקרה בהם לא יושם קומפוסט). ההשקיה בממשק שלחין גורמת לשיטפה של חומרי ההזנה מבית השורשים, ועלולה אף ליצור עומס חומרי הזנה בקרקע וחלחול למי תהום (פיין, ראיון, 2008). לעומת זאת, בגדיש ובעיקר בגידולי בעל, חומרי ההזנה חודרים לקרקע ומתפרקים בקצב איטי ואינם נשטפים, כך שזמינותם לצמח היא הדרגתית וקיימת אף השפעה רב שנתית (לא נבחנה במסגרת מחקר זה).

בהנחה שאין מתכנן מרכזי, אם נתייחס לעקומות ערכי התפוקות השוליות שנתקבלו עבור מגבלות יישום שונות של קומפוסט, כאל עקומת הביקוש לקומפוסט עבור החקלאים, כחלק מהביקוש הארצי המצרפי, ניתן לראות כי כבר במגבלת היישום של 1 מ"ק לדונם (ראה איור 4.2), שעבורה מתקבלים ערכי התפוקות השוליות הגבוהים ביותר עבור כל הגידולים, החקלאים יהיו מוכנים לשלם מעל 50 ₪ למ"ק קומפוסט רק עבור גידולי הירקות: תפוז"א, גזר וצנונית. ובהתייחס למגבלת היישום של 5 מ"ק לדונם, כפי שנלקחה בחשבון במחקר זה, ניתן לומר שהחקלאים עדיין יהיו מוכנים לשלם כ-30 ₪

למ"ק עבור יישום בגידולים: כותנה, תירס לתחמיץ וגזר, אך אם מחיר הקומפוסט צריך לשקף את ערך התפוקה השולית הנמוך ביותר, מחירו צריך להיות נמוך מ-20 ש"ח למ"ק.

בהתאם למחירי השוק של הקומפוסט והזבל אורגאני על-פי תחשיבי הגידול, העומדים על 84 ש"ח ו-90 ש"ח בהתאמה (שלו, 2007; סלומון וחובריו, 2007), ובהתאם למאפייני הגידולים באזור הנבחר, ניתן לומר שכדאיות היישום של הקומפוסט תתקבל רק ביישום בגידולי הירקות וברמה של בין 2 ל-3 מ"ק לדונם, בדומה למצב בפועל בו ארגוני החקלאים פועלים ללא שיתוף פעולה (ברוקנטל, ראיון, 2008; שני, ראיון, 2008). כמובן שגם לשינויים במחירי היבול תהיה השפעה על ערך התפוקות השוליות של הגידולים ועל החלטות החקלאים לגבי תמהיל הגידולים, אך השפעות אלו חורגות ממסגרת העבודה הנוכחית.

יש לציין כי לא קיים שוק לקומפוסט בוצה בישראל, אך קיים היצע נמוך של קומפוסט בוצה בשוק. מחיר קומפוסט בוצה מוערך בכ-30 ש"ח למ"ק, כולל הובלה (ברוקנטל, ראיון, 2008). מחיר זה נמוך ממחיר הקומפוסט התעשייתי ככל הנראה בגלל התפיסה שמקור החומר אורגאני שבקומפוסט הוא בשפכים עירוניים וקיים חשש לנוכחות גורמי מחלות, לפגיעה ביבול ויתכן אף לסירוב של הצרכן הסופי לרכישת התוצרת החקלאית, שבמסגרת גידולה יושמה בוצה.

4.9 סיכום השלב הראשון

המוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי בניצול בוצת שפכים לשימושים חקלאיים, נובעת כתוצאה מתוספות הפדיון לגידולים חקלאיים ובמקביל ממניעת העלויות הכרוכות ביישום חלופת ההטמנה. במודל האופטימיזציה האזורי נבחנו שיתופי פעולה אפשריים בין צרכני הבוצה השונים לבין המט"ש, יצרן הבוצה. בכל חלופות השיתוף שנבחנו (סה"כ 3 חלופות), הושגה תוספת רווח לחברי הקואליציה, כאשר תוספת הרווח הגבוהה ביותר (כ-7.36 מיליון ש"ח) הושגה בקואליציית העל, בה חברים כל שחקני האזור.

תוספת קומפוסט הבוצה לסל גורמי הייצור של שני ארגוני החקלאים משפר את סל הייצור התחילי של שחקנים אלו (כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף), המתבטא בתוספת יבול הגורמת לגידול בפדיון לדונם עבור חלק מהגידולים החקלאיים באזור.

שיתוף הפעולה בין המט"ש לצרכנים השונים מאפשר ניצול יעיל של בוצה המתבטא בתוספת רווח אזורית ובנוסף, מצביע על מספר יתרונות סביבתיים הכוללים, בין היתר, את:

- א. שימוש חוזר בחומר האורגאני בבוצה מקיים את עיקרון המחזור ומהווה פתרון בר-קיימא;
- ב. צמצום מערך ההטמנה כמענה למחסור צפוי בשטחי הטמנה.
- ג. מניעת זיהום הים כתוצאה מסילוק הבוצה, בהתאם למגבלות החוקתיות (החוק למניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים ואמנת ברצלונה).
- ד. הבוצה מכילה יסודות הזנה (בעיקר חנקן) המשפרים את תכונות הקרקע וזמינים בקרקע לקליטה עבור הגידולים השונים. דהיינו, יישום בוצה עשוי להביא לתוספת יבול וכן לצמצום את עלויות הדישון היקרות.

מודל האופטימיזציה שהוצג לעיל מציג את הקצאת הבוצה האופטימאלית שתביא להשאת הרווח הכולל של האזור או לתוספת הרווח הגדולה ביותר. בהעדר האפשרות להעברת גורמי יצור בין היחידות הכלכליות באזור, הדרך היחידה לשמירה על המבנה האופטימאלי היא באמצעות העברת תשלומי צד (העברות כספיות) בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור. בפרק הבא יידונו מספר שיטות, מתחום המשחקים השיתופיים, להקצאת תוספת הרווח המתקבלת, אשר ישמרו על מסגרת השיתוף.

פרק 5: הקצאת רווחים בין היחידות הכלכליות לפי עקרונות מתחום תורת המשחקים

הקואליציוניים

5.1 כללי

בעיית הקצאת הרווחים (עלויות), שנוצרו בגין שיתוף הפעולה האזורי שהצגנו, מוכרת בספרות המקצועית כבעיית הקצאת עלויות (cost allocation), אשר ניתן לנתח באמצעות מודלים כלכליים-מתמטיים מתחום המשחקים הקואליציוניים (שיתופיים). בהקשר זה נעשו מספר עבודות העוסקות בהקצאת קולחים לשימושים חקלאיים, למשל: **Young, Axelrad and Feinerman (2009)**, **Dinar et al (1986)**, **(1994)**.

הפרק הנוכחי מציג מספר מושגי פתרון רלוונטיים דוגמת ליבה, גרעין, גרעינון, הערך של שפלי, אשר מייצגים כללי הקצאה יעילים והוגנים (fair rules), של סך רווחי האזור, בין קבוצת שחקני האזור (עיר, ארגון חקלאים גדול וארגון חקלאים קטן), בהתחשב בכוח היחסי שיש לכל תת קבוצה (קואליציה).

5.2 משתתפי המשחק האזורי

למען שלמות ההצגה, נשוב ונתאר בקצרה את חלופות הפעולה הניצבות בפני יחידות ההחלטה הכלכליות המשתתפות במשחק האזורי, תוך מתן דגש ליתרונותיהן היחסיים ולדרכי הפעולה השונות העומדות בפניהן.

המט"ש: (שחקן 1)

שחקן 1 הוא בעל היצע בוצה קבוע ויציב (\bar{b}) ובעל חובת סילוק הבוצה משטחו, לאחר שעברה טיהור מתאים במתקן הטיהור לבוצה סוג ב', המתאימה, לפי תקנות הבוצה החדשות, לשינוע למפעל קומפוסטציה או למטמנה (אינה מתאימה עדיין ליישום חקלאי ללא שדרוגה לבוצה סוג א'). מבחינת המט"ש, החלופה הבסיסית בהעדר צרכנים היא סילוק כל הבוצה למטמנה מאושרת. בחלופה זו (חלופת האפס) המט"ש נושא בכל עלויות הטיפול וסילוק הבוצה. הרווח של המט"ש כשהוא פועל לבדו (stand alone) ללא התארגנות כלשהיא, נגזר מחלופה זו. באמצעות שיתוף פעולה עם כל או עם חלק מהמשתתפים האחרים (הקמת קואליציה) עשוי המט"ש להגדיל את רווחיו, למשל על-ידי מכירת קומפוסט בוצה לחברי הקואליציה ו/או הוזלת עלויות ההובלה אליהם וכן על-ידי חיסכון בעלויות הגבוהות הכרוכות בהטמנת הבוצה.

ארגון החקלאים הגדול: (שחקן 2)

שחקן זה בעל פוטנציאל שטחי יישום גדול (97,000 דונם), אשר מאופיינים על-ידי קרקעות בעלות פוריות נמוכה וגד"ש בעלי רווחיות נמוכה (מחירי שוק נמוכים) וכושר תשלום נמוך לדשנים. לארגון זה מוטיבציה לשיתוף פעולה עם המט"ש במטרה לעשות שימוש בקומפוסט הבוצה לקבלת תוספת יבול וחיסכון בדשנים כימיים.

ארגון החקלאים הקטן: (שחקן 3)

לשחקן זה, בדומה לשחקן 2, קיימת מוטיבציה לשיתוף פעולה עם המט"ש להשגת אותן תועלות. אך בשונה משחקן 2, לשחקן 3 פוטנציאל שטחי יישום קטן יותר (13,700 דונם בלבד), אולם גידוליו מאופיינים בעיקר על-ידי גידולי ירקות רווחיים (מחירי שוק גבוהים) בעלי יכולת ניצול דשן גבוהה, ולכן תוספת קומפוסט לגידולים אלה עשויה לחסוך כמות דשנים רבה יותר ולתרום לתוספת יכול גדולה יותר באופן יחסי לשחקן 2.

בהחלט ייתכן מצב בו ייווצר הסכם קואליציוני בין המט"ש לבין שני המשתתפים או אחד מהם, אשר יקטין את סך העלויות ו/או יגדיל את סך הפדיון באזור כתוצאה מתוספות קומפוסט בוצה לגידולים החקלאיים, דהיינו, יגדיל את סך רווחי השחקנים. לכן במודל הנוכחי, נבחן כיצד תתבצע הקצאת תוספת הרווחים בחלופת ההתארגנות המיטבית מבין מגוון חלופות ההתארגנות האפשריות, וזאת באמצעות הצגה פורמאלית של המשחק הקואליציוני המותאם לבעיה זו.

5.3 המודל הקואליציוני – מסגרת מושגית

נסמל את קבוצת כל השחקנים ב $\bar{N} = (1,2,3)$. קבוצה S חיובית ולא ריקה של שחקנים נקראת קואליציה, קבוצת השחקנים \bar{N} נקראת קואליציית העל. המשחק (\bar{N}, π) הוא משחק קואליציוני עם תשלומי צד (TU Games²⁶), שבו לכל קואליציה $S \subseteq \bar{N}$, קיימת פונקצית רווח אופיינית $\pi(S)$ המייצגת את רווח קואליציה S . כמקובל, נניח כי $\pi(\emptyset) = 0$, כאשר \emptyset הינה הקבוצה הריקה.

השילוב בין מודל האופטימיזציה שהוצג בפרק הקודם לבין המודל הקואליציוני יעשה באמצעות הפונקציה האופיינית. ספציפית, הערך הנבחר של פונקציה אופיינית של קואליציה מסוימת S הוא הערך של פונקציה המטרה (במודל האופטימיזציה) עבור אותה קואליציה S , כלומר $\pi(S) = \Pi^S$, כאשר Π^S מוגדר במשוואה (3.15), שבפרק 3. שילוב זה מאפשר מציאת רווח של כל קואליציה S ומציאת פונקצית רווח אופיינית, נסמל את פונקצית תוספת הרווח ב- v .

5.4 פונקצית תוספת הרווח (v)

המודל יעסוק בהקצאת תוספת הרווחים הנוצרת כתוצאה משיתוף פעולה בין המשתתפים. לכל תת קבוצה S פוטנציאל תוספת רווח של (ראה טבלה מספר 5.4, טור 3):

$$v(S) = \pi(S) - \sum_{i \in S} \pi(i) \quad (5.1)$$

כאשר $\pi(S)$ רווח קואליציה S ו- $\pi(i)$ רווח שחקן i , כאשר הוא פועל בחוסר שיתוף.

26 משחקים עם תשלומי צד TU=Transferable Utility. ניתן להתייחס לבעיית האזור כאל משחק שיתופי של חלוקת תוספת ההכנסה האזורית באמצעות תשלומי צד: השחקנים אינם יכולים להעביר ביניהם גורמי יצור ולכן הדרך היחידה לפיצוי השחקנים לאחר הקצאת הגורם המשותף (בוצה) היא באמצעות העברת הכנסות.

$v(S)$ מייצגת את הפונקציה האופיינית (נרמול אפס, במקום לבחון את סך הרווחים אנו בוחנים את תוספת הרווח מהתארגנות לקואליציה), כאשר תוספת הרווח לקואליציה S מסוימת היא ההפרש בין רווחיה כקואליציה לבין סך רווחי חבריה כאשר הם פועלים באופן נפרד. בבעיות המאופיינות ביתרונות לגודל, ברוב המקרים, הפונקציה האופיינית, v , תהיה קמורה או לפחות בעלת תכונת סופר – אדטיביות או לפחות בעלת תכונת "מונוטוניות מנורמלת אפס"²⁷. קיום אחת מהתכונות האלו מבטיח, שהפתרון האופטימאלי יושג בקואליציית העל (\bar{N}).

להלן הצגה פורמאלית של התכונות הרצויות מפונקציות תוספת הרווח, v , של הבעיה הנבחנת:

א. ההקצאה האופטימאלית היא וקטור הקצאות יעיל $x = (x_1, x_2, x_3)$, כאשר x_i

מיצג את הקצאת תוספת הרווח לפרט i המקיים:

$$\sum_{i=1}^3 x_i = v(\bar{N}) \quad (5.2)$$

שוויון (5.2) הוא תנאי יעילות המבטיח כי כל תוספת הרווח המושגת משיתוף פעולה כללי

באזור יתחלק בין הפרטים במלואו. לא ייתכן מצב שבו $\sum_{i=1}^3 x_i > v(\bar{N})$, כלומר שסכום

הקצאות תוספת הרווח לפרטים יהיה גבוה מסך רווחי הקבוצה. מצד שני, במצב בו

$\sum_{i=1}^3 x_i < v(\bar{N})$ נקבל הקצאה לא יעילה, היות ויוותרו עודפים לא מנוצלים. על-כן נקבל

משוואה זו בשוויון.

ב. המוטיבציה למשחק שיתופי נובעת מהיכולת של קבוצה מסוימת לשפר את מצבה הנוכחי על-

ידי שיתוף פעולה עם קבוצות אחרות. הניסוח הפורמאלי של תכונת "סופר האדטיביות" הינו:

$$v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) \quad (5.3)$$

כלומר, תוספת הרווח מאיחוד של שתי תת קבוצות (קואליציות) באזור שווה לפחות לסך תוספות הרווחים הגדולות ביותר, הנובעות מפעילות נפרדת של אותן תת קבוצות.

ג. פונקציה v היא לא שלילית ומונוטונית גדלה ב- S , כלומר תוספת הרווח גדלה ככל

שיש יותר משתתפים בקואליציה:

$$v(S) \leq v(T) \quad \text{לכל } S \subseteq T \quad (5.4)$$

מתכונת המונוטוניות עולה ש- $v(\bar{N})$ הוא הערך האפשרי הגדול ביותר של הפונקציה v (ניתן

לומר מנקודת ראות פורמאלית כי \bar{N} זו ההקצאה היעילה ביותר).

ד. פונקציות תוספת הרווח היא קמורה:

$$v(S \cap T) + v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) \quad (5.5)$$

כאשר S, T לא בהכרח זרות.

27 הכוונה ב"נרמול אפס" היא שערכי הקואליציות אשר אינן מכילות את השחקן הדומיננטי שוות לאפס, $v(S) = 0$, כאשר S הינה קואליציה ללא שיתוף השחקן הדומיננטי. כמו-כן, ערכי קואליציות של חוסר שיתוף פעולה שווים אף הם לאפס, $v(i) = 0$.

כאמור, באזור הנבחן שלושה משתתפים ולכאורה קיימות 7 קואליציות אפשריות (לא ריקות), אך בהנחה שניצול קולחים יתכן רק בהסכמת העיר, קטן מספר הקואליציות האפשריות ל- 6. כלומר, ללא שפכי העיר אין מוטיבציה להתארגנות מצד שאר המשתתפים. באופן פורמאלי, קואליציה אשר אינה כוללת את משתתף מספר 1 מקיימת את משוואה (5.3) רק בשוויון, או ממשוואה (5.1) נקבל כי ערך $v(S)$ של אותה קואליציה שווה לאפס (כלומר אין יתרון בהתאגדות של שחקנים אשר אינם כוללים את העיר).

בסעיף הבא, נבחן על ידי שימוש בכלים מתחום המשחקים הקואליציוניים האם ההקצאה האופטימאלית אכן מתקבלת משיתוף פעולה כללי באזור (דהיינו מהקמת קואליציית העל), כפי שקיבלנו מפתרון מודל האופטימיזציה, תוך אפיון מרחב המיקוח הנוצר מקיומה של הליבה. בנוסף, יבחנו מספר מושגי פתרון רלוונטיים (גרעין, גרעינון וערכי שפלי), אשר יושוו ביניהם, תוך הצגת השיקולים העומדים מאחורי בחירה אפשרית בכל אחד מהפתרונות.

5.5 ליבת המשחק

ליבת המשחק (core) מוגדרת על סמך חלופות ההתארגנות האפשריות באזור, שערכן אינו שלילי. ליבת המשחק השיתופי היא מרחב המיקוח בו תושג הקצאה המקיימת תנאי רציונאליות אישית (Individual Rationality), רציונאליות קבוצתית, והמכלה את כל תוספת ההכנסה האזורית בין הפרטים (Efficiency). טבלה 5.1 מציגה את התנאים של ליבת המשחק האזורי (קדקודי ליבת המשחק האזורי מוצגים בנספח 5.1).

טבלה 5.1 : ליבת המשחק האזורי

תנאים	ערך הפונקציה האופיינית v	משוואות הליבה	סימול המשוואה
יעילות	7.36	$x_1 + x_2 + x_3 = v(1,2,3)$	6.6
רציונאליות קבוצתית	5.34	$x_1 + x_2 \geq v(1,2)$	6.7
	0.75	$x_1 + x_3 \geq v(1,3)$	6.8
רציונאליות אישית	0.00	$x_1 \geq v(1)$	6.9
	0.00	$x_2 \geq v(2)$	6.10
	0.00	$x_3 \geq v(3)$	6.11

המשחק האזורי- שיתופי, שליבתו מתוארת לעיל מאופיין בפונקציה אופיינית המקיימת $v(\phi) = 0$, כאשר ϕ הינה הקבוצה הריקה.

נבחן האם מתקיימת לפחות אחת מהתכונות לעיל עבור הבעיה הנוכחית. קיום תכונת קמירות המשחק האזורי הוא תנאי מספיק לקיומה של ליבה לא ריקה ולכך שהפתרון האופטימאלי יושג בקואליציית העל.

טענה: פונקצית תוספת הרווח היא קמורה, כלומר מקיימת את משוואה (5.5):

$$v(S \cap T) + v(S \cup T) \geq v(S) + v(T)$$
 כאשר S, T לא בהכרח זרות.

הוכחה: נבחן את קיום המשוואה (5.5) עבור כל S, T (לא בהכרח זרות), כאשר לפחות אחת מהן בקואליציה של שני שחקנים כוללת את השחקן הדומיננטי, המטי"ש (שחקן 1), שהרי עבור S, T שאינן כוללות את שחקן 1 משוואה (5.5) תתקיים תמיד בשוויון אפס כי ערכי הפונקציות האופייניות יקיימו $v(S) = 0, v(T) = 0$. עבור יתר הצירופים, בהתאם לטבלה 5.1, נקבל את המשוואות הבאות, כמפורט בטבלה 5.2:

1.

טבלה 5.2: משוואות תנאי הקמירות עבור הצירופים האפשריים של S, T

סימול המשוואה	S	T	$v(S \cap T) + v(S \cup T)$	\geq	$v(S) + v(T)$
6.12	(1,2)	(1)	5.34	=	5.34
6.13	(1,2)	(2)	5.34	=	5.34
6.14	(1,2)	(3)	5.34	=	5.34
6.15	(1,3)	(1)	0.75	=	0.75
6.16	(1,3)	(2)	0.75	=	0.75
6.17	(1,3)	(3)	0.75	=	0.75
6.18	(1,2)	(1,3)	7.36	>	6.09
6.19	(1,2,3)	(1)	7.36	=	7.36
6.20	(1,2,3)	(2)	7.36	=	7.36
6.21	(1,2,3)	(3)	7.36	=	7.36
6.22	(1,2,3)	(1,2)	12.7	=	12.7
6.23	(1,2,3)	(1,3)	8.11	=	8.11
6.24	(1,2,3)	(2,3)	7.36	=	7.36

מטבלה 5.2 ניתן לראות, כי משוואות תנאי הקמירות מתקיימת עבור כל הצירופים של S, T , כאשר מלבד משוואה מספר (5.18) המתקיימת באי שוויון, כל יתר המשוואות מתקיימות בשוויון. כלומר הוכחנו בכך שהמשחק האזורי המתאים לבעיה שלנו הינו קמור, כלומר, הליבה אינה ריקה והפתרון האופטימאלי יושג בקואליציית העל.

5.6 פתרונות הגרעין והגרעינון

הגרעין

ליבת המשחק השיתופי הנבחן אומנם מקיימת את תנאי הרציונאליות האישית והקבוצתית ואף עומדת בתנאי היעילות, אך מימדיה הגדולים הכוללים אפשרויות הקצאה מרובות מקשות על בחירת ההקצאה המיטבית לשחקנים השונים.

דרך אפשרית מקובלת לצמצום אפשרויות ההקצאה הרבות, היא באמצעות חישוב הגרעין (ראה למשל: **Maschler (1992)**).

לצורך חישוב הגרעין נגדיר את העודף e של כל מקטע x (ווקטור ההקצאות) ביחס לקואליציה S מסוימת, באופן הבא:

$$e(S, x) = v(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad (5.25)$$

העודף e מודד את מגמת הקואליציה S ביחס להקצאה x מסוימת. במילים אחרות, העודף e מיצג את מידת חוסר שביעות הרצון של קואליציה מסוימת מהקצאה אפשרית. כמובן, ככל שהעודף e גדל כך יגדל חוסר שביעות הרצון של הקואליציה מההקצאה.

נסמל ב- D_{ij} את העודף של שחקן i כאשר הוא פועל ללא שיתוף שחקן j :

$$D_{ij}(x) = \max \{e(S, x) \mid S \subset N, i \in S, j \notin S\} \quad (5.26)$$

D_{ij} היא למעשה פונקציה הממזערת את עודפי ההקצאה הנוצרים עבור חלופות התארגנות בהן שחקן i פועל ללא שיתוף עם שחקן j , עבור $j \neq i$. כך למשל, עבור $i=1$ ו- $j=2$ תהיה הפונקציה D_{ij} מהצורה הבאה:

$$D_{12} = \max \{-x_1, v(1,3) - x_1 - x_3\}$$

באופן דומה ניתן להגדיר D_{ji} כעודף של שחקן j כאשר הוא פועל בחוסר שיתוף עם שחקן i .

איזון עודפים בין זוג שחקנים יתקבל כאשר:

$$D_{ij}(x) = D_{ji}(x) \quad \forall i, j \in N \quad (5.27)$$

פתרון הגרעין מתקבל מפתרון סימולטאני של ביטוי (5.27) לכל i ו- j תוך שימוש בערכי הפונקציה האופיינית (ראה טבלה 5.1).

פתרון הגרעין אינו אלא הקצאת מקסמין (max-min) של תוספת הרווח המביאה למקסימום את ההפרשים שבין תוספת הרווח של קואליציה כלשהיא לבין סכום ההקצאות לחברי אותה קואליציה. עודף זה מבטא את מגמת הקואליציה S ביחס לווקטור ההקצאות. קואליציה עם התנגדות חזקה לווקטור ההקצאות המוצע תהיה בעלת עודף גדול יותר.

פתרון הקצאת הגרעין עבור המשחק האזורי תעשה על ידי הצבת ערכי הפונקציה האופיינית (טבלה 5.1) בביטוי (5.27) עבור כל זוגות השחקנים האפשריות (סה"כ 2) ופתירתן. טבלה 5.3 שלהלן מציגה את פתרון הגרעין שהתקבל.

טבלה 5.3: פתרון הקצאת הגרעין

שחקן	פתרון הקצאת הגרעין (מיליוני ₪)	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	3.18	43.14%
2	3.18	43.14%
3	1.01	13.71%

עבור המקרה הנבחן התקבל פתרון הקצאה יחיד המצוי בגרעין, נבחן האם פתרון ההקצאה מזדהה עם הגרעינון.

הגרעינון

הקצאת הגרעינון הינה הקצאה אופטימאלית יחידה המצויה בליבה. הגרעינון הינו ווקטור התשלומים (ווקטור ההקצאה) הקטן ביותר האפשרי. חישוב הגרעינון מבוסס על השוואה בין ווקטורי העודפים (ביטוי 5.25). את רכיבי ווקטור העודפים, $e(S, x)$, מסדרים בסדר יורד, אותו המקטע שווקטור העודף שלו הוא הקטן ביותר לקסיקוגרפית (ההשוואה הלקסיקוגרפית מתייחסת לערך הווקטור התלוי במרכיבי הווקטור לפי סדר הופעתם משמאל לימין. כך למשל ווקטור (1,2,2) קטן לקסיקוגרפית מווקטור (1,3,1) – שני האברים הראשונים זהים בשני הווקטורים, אך האיבר השני בווקטור הראשון (2) קטן יותר מהאיבר השני בווקטור השני (3), בדוגמא זו אין חשיבות לערכו של האיבר השלישי בהשוואה הלקסיקוגרפית), וקיים רק מקטע אחד שכזה, הוא הגרעינון של המשחק. בצורה פורמאלית חישוב הגרעינון מתקבל מהנוסחה הבאה:

$$Nuc(x) = \{x' \in x \mid x'' \in x \Rightarrow \psi(x') \leq \psi_L(x'')\} \quad (5.28)$$

כאשר:

x' ו- x'' מסמלים ווקטורי הקצאה אפשריים (המצויים בליבה).

$\psi(\cdot)$ מסמל את ווקטור העודפים²⁸ ו- $\psi_L(\cdot)$ מסמל סידור לקסיקוגרפי של ווקטור העודפים.

על ידי שימוש בביטוי (5.28) נקבל את הקצאת הגרעינון עבור המשחק האזורי, כפי שמוצג להלן בטבלה 5.4.

טבלה 5.4: פתרון הקצאת הגרעינון

שחקן	פתרון הקצאת הגרעינון (מיליוני ₪)	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	3.18	43.14%
2	3.18	43.14%
3	1.01	13.71%

ניתן לראות כי פתרון הגרעינון שווה לפתרון הגרעין (טבלה 5.3). הקצאת הגרעינון (והגרעין, במקרה הנבחן) מייחסת את הכוח היחסי הגדול ביותר לשחקנים 1 ו-2 באופן זהה.

לגרעינון (ולגרעין, במקרה הנבחן) תכונות רצויות המאפשרות לו להיות סכמת הקצאה רצויה על ידי השחקנים (או על ידי מגשר המוסכם עליהם):

- א. פתרון הגרעינון מהווה פתרון הקצאה יחיד במשחק;
- ב. פתרון הגרעינון מצוי בליבת המשחק ולכן מקיים את תנאי הרציונאליות האישית והקבוצתית ומבטיח כי לא יוותרו עודפי הקצאה (יעילות);
- ג. הקצאת הגרעינון היא אנונימית, שחקנים סימטריים יקבלו הקצאות שוות;
- ד. שיתוף שחקני דמה במשחק לא ישנה את הקצאת הגרעינון. שחקני הדמה יקבלו את ערכם העצמי בפתרון;
- ה. פתרון הגרעינון הינה הקצאה הגיונית, תקבולי השחקנים מבטאים את כוחם היחסי במשחק.

$$\psi(x) = [e_1(x), e_2(x), \dots, e_{2^n}(x)] \in R^{2^n \ 28}$$

5.7 ערכי שפלי (Shapley Values)

ערכי שפלי הינם פתרון הקצאה הוגן ויחיד של משחקים מתחום תורת המשחקים המתייחס לאפשרויות המיקוח של כל שחקן בכל אחת מחלופות ההתארגנות. ערכי שפלי מוגדרים רק כאשר ניתן להשוות בין תועלות השחקנים, בשילוב עם אפשרות להעברתן (כסף או אשראי). במילים אחרות, ערכי שפלי מוגדרים כאשר ניתן להעביר תועלות בין השחקנים (TU games). בניגוד להקצאת פתרון הגרעינון, ערכי שפלי אינם תלויים בקיומה של ליבה ולכן ייתכן כי ערכי שפלי אינם מוכלים בליבה, כאשר היא קיימת (ראה: Loehman et al, 1979 ; Young, 1994). ערכי שפלי, $\varphi(x_i)$, מחושבים על פי הנוסחה הבאה (ראה למשל: Loehman et al, 1979 Young, 1994):

$$(6.23) \quad \varphi(x_i) = \sum_{S \subseteq N-i} \frac{|S|!(|N-S|-1)!}{|N|!} [v(S+i) - v(S)] \quad \text{נוסחת שפלי}$$

נוסחת שפלי בוחנת את כוחו של שחקן i במשחק האזורי על ידי חישוב ממוצע משוקלל של תוספת הערך השולית לקואליציה S עקב צירופו של שחקן i לקואליציה, עבור כל חלופות התארגנות, לרבות הצטרפות שחקן i לקואליציות שערכן אפס. הצבת ערכי הפונקציה האופיינית, v , (ראה טבלה 5.1) בנוסחת שפלי תוביל לסכמת ההקצאה הבאה:

טבלה 5.5 : פתרון הקצאה לפי ערכי שפלי

שחקן	ערכי שפלי (מיליוני ₪)	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	3.47	47.13%
2	3.09	42.03%
3	0.79	10.84%

מהצבת ערכי שפלי שנתקבלו במשוואות הליבה (טבלה 5.1) עולה כי סכמת ההקצאה של ערכי שפלי מקיימת את כל משוואות הליבה ולכן מצויה בליבת המשחק השיתופי הנבחן. במילים אחרות, ערכי שפלי של המשחק האזורי הנבחן מקיימים את תנאי הרציונאליות האישית והקבוצתית ובאותה עת מבטיחים כי כל תוספת הרווח תחולק לשחקנים.

בנוסף, סכמת הקצאת שפלי מקיימת את האכסיומות הבאות:

- א. ליניאריות – ניתן לפרק משחק למספר משחקים מבלי לשנות את ערך המשחק;
- ב. אנונימיות – שחקנים סימטריים יקבלו הקצאות שוות;
- ג. שחקני דמי (dummy) – שילוב שחקני דמה במשחק לא ישנו את ערכי שפלי;
- ד. יעילות – סכום ההקצאות לשחקנים שווה לערך הקואליציה, ללא תלות בהמצאות הפתרון בליבה.

5.8 סיכום השלב השני

בסעיפים הקודמים נבחנו מספר מושגי פתרון מתחום תורת המשחקים, בטבלה הבאה רוכזו פתרונות ההקצאה שנתקבלו למשחק האזורי תחת ההנחות השונות:

טבלה 5.6: ריכוז פתרונות ההקצאה (במיליוני ₪)

שחקן	ערכי שפלי	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח	פתרון הקצאת הגרעין והגרעינון	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	3.47	47.13%	3.18	43.14%
2	3.09	42.03%	3.18	43.14%
3	0.79	10.84%	1.01	13.71%

מטבלה 5.6 ניתן לראות כי המט"ש, יצרן הבוצה, מקבל את תוספת הרווח הגבוהה ביותר, בהתייחס לשיטות ההקצאה שנבחנו. במילים אחרות, למט"ש יש את כוח המיקוח הגדול ביותר הנובע מעצם היותו ספק הבוצה היחיד באזור הנבחן. מהשוואה למצבו התחילי של המט"ש (ראה טבלה 4.4), עולה כי הוא שיפר את רווחיו (מזעור עלויות) בכ-21.5% בחישוב לפי ערכי שפלי, ובכ-19.7% בחישוב לפי הקצאת הגרעין/גרעינון.

לארגון החקלאים הגדול, הקצאת תוספת הרווח השנייה בגודלה לפי ערכי שפלי, והקצאת תוספת רווח זהה להקצאת המט"ש לפי פתרון הקצאת הגרעין/גרעינון.

שני ארגוני החקלאים משמשים כצרכני בוצה בלבד. הקצאת תוספת הרווח לקבוצות החקלאים אינה זהה היות וקבוצות החקלאים נבדלות זו מזו (למשל: בגודל שטחי הקרקע, תמהיל הגידולים, שיטת השקיה, מרחקי הובלה וכדומה). מהשוואה למצבם התחילי של ארגוני החקלאים הגדול והקטן (ראה טבלה 4.4), עולה כי אלו שיפרו את רווחיהם בכ-8.5% וכ-6.75% בהתאמה - בחישוב ההקצאות לפי ערכי שפלי, ובכ-8.8% וכ-8.5% בהתאמה - בחישוב לפי הקצאת הגרעין/גרעינון.

פרק 6: סיכום ומסקנות

בפרקים הקודמים בחנו מספר חלופות ארגוניות באזור המכיל שלוש יחידות כלכליות שונות. בפרק זה נבצע השוואה אמפירית ותיאורטית בין שיטות ההקצאה האופייניות שחושבו בפרקים הקודמים, במטרה לבחון את היתרונות והחסרונות היחסיים של כל שיטה הן מבחינת היחידות הנבחנות והן מבחינת הרווחה הכוללת. בבחינת פתרונות ההקצאה נתייחס להיבטים של הגינות ויעילות כלכלית הן מנקודת מבט כלכלית והן מנקודות מבט סביבתיות וארגוניות.

בפרק 3 הנחנו כי מטרת המתכנן המרכזי היא להשיא את סך תוספת הרווח האזורית בתנאי ודאות מלאה, תוך התייחסות למספר אפשרויות התארגנות. נקודת האיום עבור כל אחד משחקי המשחק השיתופי היא להישאר ברמת רווחיו, כאשר הוא פועל בחוסר שיתוף. בהתייחס לנתוני האזור, התוצאות שנתקבלו מעידות כי קיימת מוטיבציה לשיתוף פעולה גם בקואליציות חלקיות (המכילות את המט"ש) המתבטאת בתוספת רווח לאזור הנבחן. כמו כן, תוספת קומפוסט הבוצה לסל גורמי הייצור של ארגוני החקלאים משפרת את מצבם בהשוואה למצב התחילי בו הם פועלים בחוסר שיתוף.

חשוב לציין, כי בהיעדר פתרון הקצאה על-ידי מתכנן מרכזי, בפועל, יישום הקומפוסט כלל לא היה מתקיים בשטחי ארגון החקלאים הגדול, ומתקיים בחלקו, באופן שאינו בהכרח אופטימאלי, בשטחי הארגון הקטן (ראה סעיף 4.1). בנוסף, פתרון ההקצאה המתקבל מקואליציית העל מאפשר הקצאת קומפוסט לשטחי דרום הארץ, המאופיינים בגד"ש בעלי רווחיות נמוכה, הגדלים על קרקעות דלות בחומר אורגאני. חשיבות יישום החומר האורגאני בקרקעות אלו הוא משמעותי מאוד לכדאיות הגידולים, הרגישים מאוד לשינויים אפשריים במחירי השוק ובעלויות גורמי הייצור, ובעיקר לשינוי אפשרי במחירי המים לחקלאות עקב המשבר החמור והמתמשך הפוקד את משק המים בישראל.

תוספת הרווח הגבוהה ביותר לאזור (כ- 7.36 מליון ₪) נתקבלה בקואליציית העל, בה שותפות כל שלושת היחידות הכלכליות (החלופה המיטיבית). בחלופה זו, תוספת הרווח לשחקן 1 יכולה להיחשב לרנטה²⁹ תמורת השימוש שעושים הצרכנים השונים בבוצת המט"ש. מכאן, שהרנטה תמורת השימוש בבוצה הינה 11.57 ₪/טון בוצה, או 19.28 ₪/מ"ק קומפוסט, ו- 10.59 ₪/טון בוצה, או 17.65 ₪/מ"ק קומפוסט, בהתייחס להקצאות ערכי שפלי והגרעינון (גרעיין), בהתאמה. בהנחה שמחיר הקומפוסט לחקלאי צריך לשקף את ערך התפוקה השולית הנמוך ביותר המתקבל באזור הנבחר, מחירו צריך להיות כ- 15 ₪ למ"ק בהתאם לערך התפוקה השולית של גידול החיטה. ניתן לראות שהרנטה שהתקבלה עבור שימוש בקומפוסט הבוצה גבוהה במקצת ממחיר זה, אך נמוכה ממחיר קומפוסט השוק הנוכחי של הקומפוסט (כ- 85 ₪/מ"ק) וממחיר קומפוסט הבוצה, המוערך בכ- 30 ₪/מ"ק, כולל הובלה. מהשוואה זו מתקבל, שהפתרונות מציגים הקצאה, לפיה החקלאים משלמים עבור קומפוסט הבוצה הרבה פחות מהמחיר המוערך שלו, בהנחה שאין מתכנן מרכזי, ועדיין כל היחידות הכלכליות משפרות את תועלתן בהשוואה למצבן התחילי.

כמובן שפתרונות ההקצאה שהצגנו אינם מאפשרים התייחסות למחירי שיווי משקל לקומפוסט בוצה ברמה הארצית, מכיוון שמדובר במודל אזורי סגור ללא אפשרות להעברה וקבלה של קומפוסט, ומכיוון שלא קיים עדיין בישראל שוק לקומפוסט בוצות.

29 הרנטה שווה לתוספת הרווח למט"ש מחולקת בסך כמות הבוצה המנוצלת על-ידי צרכני האזור.

מודל האופטימיזציה שהוצג בפרק 3 מציג את הקצאת הבוצה האופטימאלית שתביא לתוספת הרווח הגדולה ביותר באזור הנבחן. בהעדר האפשרות להעברת גורמי יצור בין היחידות הכלכליות באזור הדרך היחידה לשמירה על המבנה האופטימאלי (קואליציית העל) היא באמצעות העברת תשלומי צד (העברות כספיות) בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור, שנידונו בפרק 5.

בפרק 5 הצגנו מספר שיטות, מתחום המשחקים השיתופיים, להקצאת תוספת הרווח שנתקבלה בפרק 3, אשר שומרים על מסגרת השיתוף האופטימאלית (קואליציית העל).

פתרון ההקצאה על פי עקרונות הליבה, צריך להיות מקובל על כל חברי הקואליציה (acceptability) במובן שמצבו של כל שחקן או קואליציה לא יורע בעקבות ההקצאה בהשוואה למצבם התחילי, כאשר השחקן או חברי הקואליציה פועלים בחוסר שיתוף (רציונאליות אישיות ורציונאליות קבוצתית, בהתאמה). כמו-כן, על הפתרון להיות יעיל ולהקצות את כל תוספת הרווח האזורית בין הפרטים (Efficiency). כל פתרון הקצאה המצוי בליבה מקיים את כל משוואות הליבה (טבלה 5.1) ולכן יהיה מקובל על כל שחקני המשחק השיתופי-אזורי.

במקרה הנבחן, ראינו כי פתרונות ההקצאה שנבחנו (הגרעין, הגרעינון וערכי שפלי) מצויים בליבת המשחק השיתופי ולכן מקיימים את תכונות הליבה הרצויות (רציונאליות אישית, רציונאליות קבוצתית ויעילות). כלומר, פתרון זה מבטיח כי יהיה מקובל, הוגן, הגיוני ויעיל על כל היחידות הכלכליות שבאזור.

יתר על כן, סביר להניח כי פתרונות ההקצאה יהיו מקובלים גם על ארגונים סביבתיים שונים דוגמת הירוקים, היות והם כרוכים במספר יתרונות סביבתיים, לרבות: שימוש חוזר בחומר האורגאני בבוצה נחשב לפתרון בר-קיימא; צמצום מערך ההטמנה כמענה למחסור צפוי בשטחי הטמנה בעתיד; מניעת זיהום הים כתוצאה מסילוק הבוצה, בהתאם למגבלות החוקתיות (החוק למניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים ואמנת ברצלונה).

הערות לסיכום

כיום, בוצת המט"ש מהווה מטרד הפוגע בסביבת האזור. בהנחה של איסור סילוק הבוצה לים התיכון, מוטלת על המט"ש החובה לטהר את הבוצה לרמה הנדרשת ולסלקה משטחו, למשל על ידי הטמנה. טיהור הבוצה וסילוקה כרוך בעלויות תפעול גבוהות ובהשקעה בתשתיות מתאימות, היוצרות נטל כלכלי כבד על המט"ש או איגוד הערים שאחראי על הפעלתו.

במחקר הנוכחי, הראנו כי על ידי שימוש מושכל בבוצת המט"ש ניתן לשפר את הניצול הנוכחי הלא יעיל של הבוצה (כיום מסולקת לים), הן מהבחינה הכלכלית והן מהבחינה הסביבתית. שיתוף פעולה בין כל היחידות הכלכליות שבאזור מסוים מגדיל את סך ההכנסות שלהן. על ידי יישום גישות הקצאה שונות ניתן לתכנן מספר אלטרנטיבות של הקצאת תוספת הרווח בין היחידות הכלכליות אשר יהיו הוגנות, הגיוניות ויעילות ולכן גם מקובלות על משתתפי המשחק האזורי. התוצאות שהתקבלו עשויות לסייע למקבלי ההחלטות במציאת פיתרון לבעיית סילוק הבוצה.

ניתן להרחיב את המחקר הנוכחי לכיווני מחקר נוספים הדנים בהשבת בוצה: כך למשל, על בסיס המסגרת המושגית וההנחות של המחקר הנוכחי ניתן לפתח מודל תכנון רב תקופתי (20-10 שנה), לבחינת השפעה רב שנתית של איכות וכמות הקומפוסט על הקצאת שטחים ותמהיל גידולים, המשלב בחירת מיקום אופטימאלי של אתר הקומפוסט וכן אופטימיזציה בייצור קומפוסט; כמו-כן, אפשר לבחון את הקצאת קומפוסט הבוצה בתנאי חוסר ודאות לגבי "ביקושי החקלאים" לקומפוסט. בנוסף, ניתן לקחת בחשבון תועלות אפשריות נוספות של יישום הבוצה, שלא נלקחו בחשבון במחקר זה, כגון: חיטוי הקרקע ודיכוי מחלות צמחים (פיין, ראיון, 2008).

כמו כן, אנו ממליצים לעודד ביצוע מחקרי שדה נוספים, שיכללו גידולים נוספים ויאפשרו טווח יישום קומפוסט רחב יותר, בדגש על יישום קומפוסט בוצה, על מנת שנוכל לאמוד ביתר דיוק את פונקציות התגובה של הגידולים השונים ליישום קומפוסט בוצה.

1. Agassi M., Levy G.J., Hadas A., Benyamini Y., Zhevelev H., Fizik E., Gotessman M., Sasson N., (2004), "Mulching with Composted Municipal Solid Wastes in the Central Negev, Israel 1. Effects on Minimizing Rainwater Losses and on Hazards to the Environment", *Soil & Tillage Research*, 78, pp. 103–113.
2. Avnimelech Y., Cohen A., & Shkedi D., (1990), "The Effect of Municipal Solid Waste Compost on the Fertility of Clay Soils", *Soil Technology*, Vol. 3, pp. 275-284.
3. Axelrad, G. and Feinerman, E., (2009), "Regional Planning of Wastewater Reuse for Irrigation and River Rehabilitation." *Journal of Agricultural Economics*, Vol. 60, No.1, pp. 105-131.
4. Brinton, F. W. (2000), "Compost Quality, Standards and Guidelines: An International View, Final Report", Prepared for: New York State Association of Recycles, Woods End Research Laboratory, Inc.
5. Cooperband, L. (2002), "The Art and Science of Composting", University of Wisconsin-Madison, Center of integrated Agricultural Systems.
6. Crohn, D.M., and Thomas, A.C. (1998), "Mixed-Integer Programming Approach for Designing Land Application Systems at A Regional Scale", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp.170-176.
7. DHV Water BV, The Netherlands and Balasha-Jalon Consulting Engineers Ltd., Israel (2002), "Evaluation Study on the Treatment, Use and Disposal of Waste Sludge from the SHAFDAN WWTP, Summary Report".
8. Dinar, A. and Yaron, D. (1986), "Treatment Optimization of Municipal Wastewater and Reuse for Regional Irrigation", *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 331-338.
9. Dinar, A., Yaron, D. and Kannai, Y. (1986), "Sharing Regional Cooperative Gains from Reusing Effluent for Irrigation", *Water Resources Research*, Vol.22, No. 3, pp. 339-344.
10. Ellis, K.V. and Tang, S.L. (1991), "Wastewater Treatment Optimization Model for Developing World. I: Model Development", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 117, No. 4, pp. 501-508.

11. Ellis, K.V. and Tang, S.L. (1994), "Wastewater Treatment Optimization Model for Developing World. II: Model Testing", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, No. 3, pp. 610-624.
12. Ellis, K.V., Phil, M., Wong, C.L. and Tang, S.L. (1997), "An Optimization Model for the Selection of Wastewater and Sludge Treatment Alternatives", *Journal of Water and Environmental Management*, Vol. 11, No. 1, pp. 14-23.
13. Epstein, E., (1997), "The Science of Composting," Technomic Publishing, Pennsylvania, USA, Part 2, pp. 1020-1034.
14. Eshet T., Ayalon O. and Shechter M., (2006), "Valuation of Externalities of Selected Waste Management Alternatives: A Comparative Review and Analysis", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 46, pp. 335–364.
15. European Commission, DG Environment – B/2 (2002), "Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge, Part 4 – Economic Report",
16. Golabi, H.M., Denney, J. M. and Iyekar, C. (2007), "Value of Composted Organic Wastes As an Alternative to Synthetic Fertilizers For Soil Quality Improvement and Increase Yield", *Compost Science and Utilization*, Vol. 15, No. 4, pp. 267-271.
17. Griffin, S.T and Hutchinson, M. (2007), "Compost Maturity Effects on Nitrogen and Carbon Mineralization and Plant Growth", *Compost Science and Utilization*, Vol. 15, No. 4, pp. 228-236.
18. Harrison, Z.E., McBride, B.M. and Bouldin, R.D. (1999), "Land Application of Sewage Sludges: An Appraisal of the US Regulations", *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-36.
19. Haug T.R., (1993), "The practical hand book of Compost engineering", Lewis publishers, Florida.
20. Isaac, J., Shuval, H., Qumsieh, V., Safar, A., Haddad, M., Al-Khatib, N., Hmaid, M.S., Bachmat, Y., Fattal, B., Wollman, S. (2000), "Environmental Protection of the Shared Israeli-Palestinian Mountain Aquifer", Jerusalem and Bethlehem, The University of Michigan, The Hebrew University, The Palestine Consultancy Group.
21. Keener, M.H., Ekinici, K. and Michael, C.F. (2005), "Composting Process Optimization – Using On/Off Controls", *Compost Science and Utilization*, Vol. 13, No. 4, 288-299.

22. Loehman, E. and Orlando, J. and Tschirhart, J. and Whinston, A., "Cost Allocation for a Regional Wastewater Treatment System", *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 193-202, April, 1979.
23. Lundin, M., Olofsson, M., Pettersson, G.J., Zetterlund, H. (2004), "Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 41, pp. 255–278.
24. Maschler, M., "The Bargaining Set, Kernel and Nucleolus", in *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, Aumann, J. R. & Hurt, S. (eds.), Elsevier Publishers. Vol.1, pp.591- 668 , 1992.
25. Ott, S.L., and Forster, D.L. (1978), "Landspreading: An Alternative to Sludge Disposal", *American Journal of Agriculture Economics*, Vol. 60, No. 3, pp. 555-558.
26. Pepper, L.I., Gerba, P.C., Brusseau, L. M. (1996), "Pollution Science" (book), pp. 139-148.
27. Perlack, R.D., and Willis, C.E. (1985), "Multi-Objective Decision-Making in Waste Disposal Planning", *Journal of Environmental Engineering* Vol. 111, No. 3, pp. 373-385.
28. Poulsen, T.G. and Hansen, J.A. (2003), "Strategic Environmental Assessment of Alternative Sewage Sludge Management Scenarios", *Waste Management and Research*, Vol. 21, pp. 19-28.
29. Snyder, C. (2005), "The Dirty Work of Promoting Recycling of America's Sewage Sludge", *Journal of Environmental Health*, Vol. 11, pp. 415-427.
30. Suh, Y.-J. and Rousseaux, P. (2002), "An LCA of Alternative Wastewater Sludge Treatment Scenarios", *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 35, No. 3, pp. 191-200.
31. Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, D. (2003), "Wastewater Engineering, Treatment and Reuse", (book) Fourth Edition, pp. 11-12.
32. United Nation Environment Program (2005), "Guide Lines For Sewage Treatment, Disposal and Use", Meeting of the MED POL National Coordinators Barcelona, Spain.
33. Werther, J. and Ogada, T. (1999), "Sewage Sludge Combustion, Progress in Energy and Combustion Science", Vol. 25, pp. 55-116.

34. Young, H. P., "Cost Allocation", in Handbook of Game Theory with Economic Applications, Aumann, J. R. & Hurt, S. (eds.), Elsevier Publishers, 1994. Vol.2, pp. 1193- 1236.
35. Zenz, R.D., Lue-Hing, C., Kuchenrither, R. (1998), "Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal" (book), Vol. 4.

ספרות עברית

36. איזנקוט א., זילברמן א. , (2004), "סיכום רב שנתי של השפעת פיזור קומפוסט בוצה ובוצת שפכים בגידולי פלחה בשלושה אזורים על הגידולים והקרקע 2003 – 1999 עבור מדען ראשי - המשרד לאיכות הסביבה". עמ' 1-41.
37. גולדמן, ד' (1996), "ניהול מערכות המים – המסגרת המשפטית בישראל", מכון פלורסהיימר למחקרי מדיניות, ירושלים.
38. המשרד לאיכות הסביבה (1992), "איכות המים, השפכים והנחלים, איכות הסביבה לישראל, דו"ח 17-18", 267-281, ירושלים.
39. המשרד לאיכות הסביבה (2004), "תקנות המים - מניעת זיהום מים, שימוש בבוצה וסילוקה, התשס"ד – 2004", ירושלים.
40. זסלבסקי, ד. (2002), "מתחת לקו האדום - על משבר המים בישראל", קריית הטכניון, חיפה.
41. חלמיש, נ., טל, ע., חן, י., הדר, י., בן-נון, ג., חפץ, ב., לביא, ד., אטס, א. (2000), "הקומפוסט בישראל- סקר מקורות ושימושים ובחינת כדאיות כלכלית", המשרד לאיכות הסביבה ומשרד החקלאות- לשכות המדען הראשי.
42. חן, י., בוסק, א., זוהר, ד., טרצייצקי, ח., פילהבר, ש., ליאור, ע. (2003), "יישום בוצה, קומפוסט בוצה וגזם עירוני בשטחי פלחה (בית ניר)", ועדת מגדלים דרום, ש.ה.מ, הפקולטה למדעי החקלאות.
43. טרצייצקי, ח. (2006), "תקנות שימוש בבוצת שפכים בארץ ובעולם", מים והשקיה, (475), 14-19.
44. טרצייצקי, ח., גל, ב., מדלג, ג., רופא, ת., דותן, ש., זילברמן, ג., ברנר, מ. (2006), "אומדן הביקוש לקומפוסט", משרד החקלאות ופיתוח הכפר, שירות ההדרכה והמקצוע, בית דגן.
45. מסינג, א. (2006), "טיפול בבוצת השפד"ן", מים והשקיה, (474), 8-13.
46. משרד הבריאות (1999), "עקרונות למתן היתרים להשקיה בקולחים", דו"ח ועדת הלפרין, משרד הבריאות, שירותי בריאות הציבור, המחלקה לבריאות הסביבה, ירושלים.
47. משרד מבקר המדינה (1990), "דו"ח מיוחד על ניהול משק המים בישראל", 1-53, ירושלים.
48. משרד מבקר המדינה (1996), "משרד הפנים – הקמת מתקנים לטיפול בשפכים, הובלתם וסילוקם", דו"ח מבקר המדינה (46), 518-537, ירושלים.
49. משרד מבקר המדינה (2000), "משרד הבריאות – איכות מי השתייה", דו"ח מבקר המדינה (50ב), 296-309, ירושלים.
50. משרד מבקר המדינה (2003), "דוחות על הביקורת בשלטון המקומי, באיגודים ומוסדות להשכלה גבוהה - מערך הטיפול בשפכים ברשויות המקומיות", 201-244, ירושלים.

51. נציבות המים (2004), "איסוף וטיפול בשפכים וניצול קולחין – ממצאי סקר ארצי", אגף איכות המים.
52. סלומון, ד. (2006), "טיפול תרמי: פתרון מוכח, זמין וידידותי לתושבים", מים והשקיה (476), 8-11.
53. סלומון, א., גרף, ש., רבינוביץ' א. (2007), "תחשיבים בגידולי שדה", משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
54. סמואלסון, פ.א. (1961), "תורת הכלכלה", תל-אביב: סטימצקי (מהדורה עברית), 35-55.
55. פיין, פ. (2000), "בחינת חלופות לסילוק בוצת שפכי השפד"ן בחקלאות", מרכז וולקני, מינהל המחקר החקלאי.
56. פלודה ד. (2002), "פרוגרמה – מערך קומפוסטציה מרכזי לטיפול בזבלים במרחב עמק יזרעאל", עבור מרכז חקלאי עמק יזרעאל.
57. פרידלר, ע., חואניקו, מ' (1997), "דרישות איכות וטיפול בשפכים המיועדים לשימוש חוזר בחקלאות", מים והשקיה (373), 27-32.
58. צדיקוב, א. (2005), "סילוק בוצת ממט"שים עירוניים", המשרד לאיכות הסביבה, תשתיות.
59. צדיקוב, א. (2008), "סילוק בוצת ממט"שים עירוניים 2007", המשרד לאיכות הסביבה, תשתיות.
60. שלו, פ., (עורך) (2007), "תחשיבי גידולי שדה", מגדלי דרום ויהודה, ועדת מגדלי נגב, אחדות ישראל חשבונאות בע"מ, 73 עמ'.

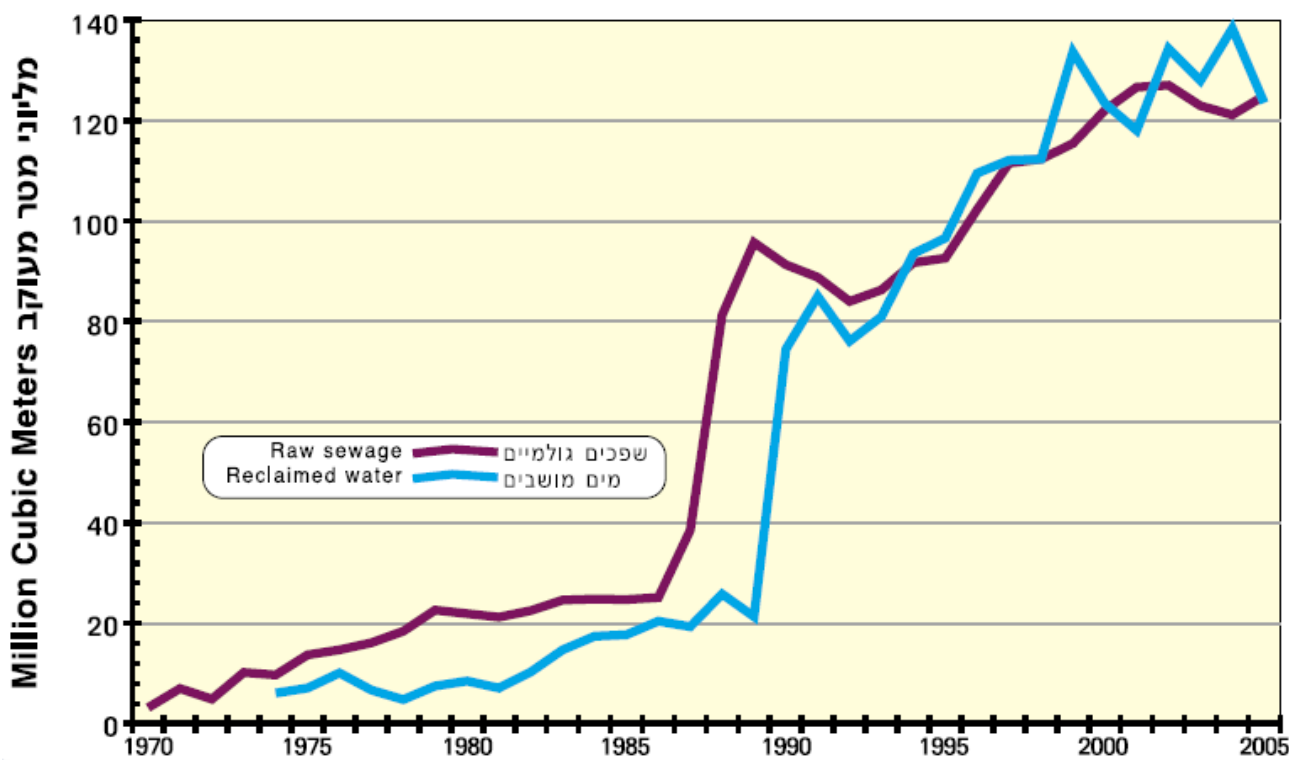
אתרי אינטרנט

- www.sviva.gov.il, המשרד לאיכות הסביבה, אתר רשמי,
- www.cbs.gov.il, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, אתר רשמי,
- www.water.gov.il, הרשות הממשלתית למים וביוב, אתר רשמי,
- www.mni.gov.il, משרד התשתיות הלאומיות, אתר רשמי,
- United Nation Environment Program, Mediterranean Action Plan for the Barcelona Convention, Official Website, www.unepmap.org/index.php.

ראיונות:

- בן-יעקב, מ., מנהל אתר קומפוסט "בר עידן", שיחה אישית, 26.11.2008.
- ברוקנטל, מ., מנכ"ל ארגון מגדלי דרום יהודה, שיחה אישית, 27.7.2008.
- פיין, פ. (ד"ר), מינהל המחקר החקלאי, שיחה אישית, 19.11.2008.
- שני, נ., אחראי גידולים ארגון בדרום, שיחה אישית, 4.8.2008.

נספח 1.1: כמות שנתית של שפכים גולמיים ומים מושבים במפעל השפד"ן (1970-2005)



מקור: הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, "שנתון סטטיסטי לישראל 2007, שפכים במכוני טיפול", לוח מס' 27.13.

נספח 1.2: מאזן היצע וביקוש של קומפוסט על בסיס חנקן (מ"ק/שנה)

עודף ביקוש קומפוסט	הקטנת הביקוש לקומפוסט עקב השקיה בקולחים (2 מ"ק/דונם)	היצע קומפוסט בוצה	היצע קומפוסט בעלי חיים	ביקוש לקומפוסט (חנקן)	אזור
151,329	99,754	2,757	125,928	379,768	גליל-גולן
227,785	54,836	24,441	106,920	413,982	גליל מערבי
1,095,672	209,112	55,152	270,864	1,630,800	דרום נגב
41,037	16,744	1,387	35,640	94,808	דרום הערבה
357,225	125,815	19,602	193,644	696,287	מרכז
307,626	187,865	4,417	412,236	912,144	עמקים
163,906	150,002	29,091	218,592	561,591	השפלה וההר
2,344,579	844,127	136,847	1,363,824	4,689,378	סה"כ

מקור: טרציצקי וחובריו, 2006.

נספח 1.3: תחזית אספקת יסודות הזנה ממנה של 1.5 טון בוצה (ח"י) כתלות בתהליך הטיפול

ובקומפוסטציה

סוג בוצה			יחידות	מדד
בוצה סוג א'	בוצה סוג ב'	בוצה סוג ג'		
25-0 •	30 •	70-60 •	% מינרליזציה •	מינרליזציה של חנקן אורגני
5-0 •	15 •	50-30 •	ק"ג N •	
17-0 •	50 •	170-100 •	% מהמנה •	
עד 2.7 ק"ג •	2.6 •	10.7 •	ק"ג •	חנקן מינרלי
עד 10% •	3.5 •	36 •	% מהמנה •	
עד 7.5 •	18 •	60-40 •	ק"ג •	ס"כ ה; חנקן הזמין
עד 25% •	74 •	200 •	% מהמנה •	
2.7 •	12 •	21 •	ק"ג •	ס"כ חנקן זמין בניסוי החיטה
18 •	22 •	68 •	% זמינות •	זרחן זמין
4.1 •	3.5 •	40 •	ק"ג P •	
100 •	0.9 •	1000 •	% מהמנה •	
16.4 •	15.9 •	15.9 •	ק"ג •	אשלגן כללי
41 •	40 •	40 •	% מהמנה •	

מקור: פיין, 2000.

נספח 3.1: אינדקסים, פרמטרים ומשתנים במודל התיאורטי

יחידת מדידה	תיאור	הסימול
	$i = 1$ - המט"ש - הטמנה (חלופת האפס עבור המט"ש) $i = 2$ - ארגון חקלאים גדול (קומפוסט בוצה) $i = 3$ - ארגון חקלאים קטן (קומפוסט בוצה)	i
	סוג הגידול ($j = 1, \dots, J$)	j
פרמטרים במודל		
דונם	שטח קרקע המוקצה לגידול j באזור i ($i = 2, 3$)	l_{ij}
טון\דונם שנה	כמות היבול לדונם גידול j באזור i (אמידה מתוך פונקצית יבול)	y_{ij}
טון\דונם שנה	כמות היבול הממוצעת לדונם גידול j באזור i ללא יישום קומפוסט	y_{ij}^0
	יחס תחלופה בין כמות קומפוסט בוצה לכמות דשן כימי עבור כל גידול j באזור i : 1 טון בוצה שווה ל- α טון דשן, כאשר $0 < \alpha < 1$	α_{ij}
טבלה 4.3	מקדם ליניארי של כמות היבול המתקבלת ביישום כמות קומפוסט בוצה x_{ij} באיכות q_2 לדונם גידול j באזור i	β_{1j}
טבלה 4.3	מקדם ריבועי של כמות היבול המתקבלת ביישום כמות קומפוסט בוצה x_{ij} באיכות q_2 לדונם גידול j באזור i	β_{2j}
שטון\יבול	מחיר יבול הגידול j עבור החקלאי בניכוי עלויות התלויות בכמות היבול	p_j^y
שטון\דונם	סך הוצאות שוטפות לדונם גידול j באזור i , כולל עלויות דשן	f_{ij}
שטון\בוצה	הערך הכספי של 1 טון דשן כימי לגידול j באזור i	z_{ij}
שטון\בוצה	עלות הובלה ופיזור בשדה למ"ק קומפוסט באזור i	t_i
שטון\בוצה	אגרת קליטה במטמנה לטון בוצה	p^m
שטון\בוצה	העלות (הנזק) החיצונית של מערך הטמנת הבוצה באיכות q_1	$\varphi(q_1)$
שטון\בוצה	העלות (הנזק) החיצונית מיישום קומפוסט	$\varphi(q_2)$
שטון\בוצה	עלות הובלה של 1 טון בוצה לאתר לסילוק פסולת	c_1
שטון\בוצה	עלות הובלת הבוצה המיוצבת לאתר הקומפוסט	c_2
שטון\שנה	החזר הון שנתי בגין עלויות הקמה ותשתית של מפעל קומפוסט	E
שטון\בוצה	עלות משתנה בייצור קומפוסט מבוצה התלויה באיכות הקומפוסט	$c(q_i)$
טון\שנה (סעיף 4.2)	סך כמות הבוצה השנתית הנוצרת במט"ש (בוצה רטובה בריכוז 20% ח"י)	\bar{b}
0.6 (סעיף 4.2)	יחס משקלי-נפחי ביצור: מ"ק קומפוסט\טון בוצה	γ
	רמת איכות מינימאלית של קומפוסט בוצה ליישום חקלאי (סוג א')	\underline{q}_2
משתני החלטה במודל התיאורטי		
טון\דונם שנה	כמות הבוצה (קומפוסט) השנתית שתיושם לגידול j באזור i ($i = 2, 3$)	x_{ij}
	סך כמות הבוצה השנתית שתועבר להטמנה באתר הטמנה מאושר	b_1
$0 \leq q_1 \leq 1$	רמת איכות הבוצה המועברת להטמנה	q_1
$0 \leq q_2 \leq 1$	רמת איכות הבוצה המועברת ליישום חקלאי בצורת קומפוסט	q_2

נספח 4.1: מאפייני גידולים באזור הנבחר

הוצאות שוטפות*** (₪/דונם)	מחיר** (₪/טון)	יבול ממוצע* (טון/דונם)	סוג השקיה	שטח הגידול (דונם)	אינדקס	הגידול
250.2	1,364	0.427	ללא	50,000	X ₂₁	חיטה בעל + 75% קש
930.0	938.3	1.350	טפטוף	10,000	X ₂₂	תירס גרעינים
833.0	660	2.20	טפטוף	10,000	X ₂₃	תירס תחמיץ
517.3	4,430	0.198	טפטוף	17,000	X ₂₄	חמניות
1,052.1	2,340	0.579	טפטוף	5,000	X ₂₅	כותנה-אקלה
1,181.1	3,170	0.522	טפטוף	5,000	X ₂₆	כותנה-פימה
229.4	1314	0.214	ללא	7,300	X ₃₁	חיטה בעל + 60% קש
2,357.0	1,165.3	3.36	שלחין / המטרה	4,200	X ₃₇	תפוז"א
3,244.0	768	6.26	שלחין / המטרה	1,200	X ₃₈	גזר
1,191.0	1,660	2.0	שלחין / המטרה	1,000	X ₃₉	צנונית

* ראה פירוט המקורות בסעיף 4.4.

** מחיר יבול הגידול j עבור החקלאי בניכוי עלויות התלויות בכמות היבול (p_j^y).

*** סך ההוצאות השוטפות כוללות: עלויות דשן בניכוי עלויות שימוש בקומפוסט או זבל אורגאני

(ראה פירוט בסעיף 4.4), בניכוי עלויות התלויות בכמות היבול ובניכוי החזרי הון (f_{ij}).

נספח 4.2: תמחור הקמת מתקן קומפוסטציה לפי כושר ייצור של 180,000 מ"ק לשנה*

נושא	יחידת מדידה	כמות	עלות יחידה (₪)	סה"כ עלות (₪)
תשתיות				
הכשרת קרקע	מ"ר	32,000	25	8,000,000.00
כבישים/אספלט	מ"ר	160,000	70	11,200,000.00
מערכות מים	קמפ'	12	30,000	360,000.00
ביוב	קמפ'	12	50,000	600,000.00
גידור היקפי	מטר אורך	16,800	150	2,520,000.00
שילוט ושערים	קמפ'	4	20,000	80,000.00
תשתיות חשמל ובקרה	קמפ'	14	180,000	2,520,000.00
יריעות	₪	288	102,600	ללא
מערכת אוורור ובקרת ריח	₪	16	820,000	ללא
סה"כ תשתיות				25,280,000.00
מבנים ומתקנים				
משרדים ומבני שרות	מ"ר	600	1000	600,000.00
מעבדה	קמפ'	4	50,000	200,000.00
סה"כ מבנים ומתקנים				800,000.00
ציוד ומכונות				
מהפכת	יח'	4	800,000	3,200,000.00
מכונת ניפוי	יח'	2	230,000	460,000.00
טרקטור מעמיס אופני	יח'	4	240,000	960,000.00
סה"כ ציוד ומכונות				4,620,000.00
שונות				
תכנון / הקמה / אגרות	קמפ'	8	250,000	2,000,000.00
סה"כ שונות				2,000,000.00
סה"כ הוצאות קבועות - הקמה				32,700,000.00
עבודה וניהול				
פועלים רגילים		10	120,000	1,200,000.00
מפעילים		4	150,000	600,000.00
ניהול		4	250,000	1,000,000.00
סה"כ עבודה וניהול				2,800,000.00
תפעול ותחזוקה				
עלות חכירת קרקע	דונם	500	300	150,000.00
הפעלת מערכת אוורור ובקרה / היפוכים				לא נדרש
הפעלת מערכת ניפוי + ערבול				400,000.00
דלקים ותחזוקת טרקטורים				400,000.00
הנהלה וכלליות (משרד/תקשורת/ביטוחים)				250,000.00
סה"כ תפעול ותחזוקה				1,200,000.00
סה"כ הוצאות שוטפות לשנה				4,000,000.00

* מבוסס על סעיפי העלות המפורטים בסקר הקומפוסט (ראה פירוט בסעיף 4.3).

נספח 4.3: מובהקות אומדני פונקצית היבול של חיטה (32 תצפיות)

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.657	3	.219	20.264	.000 ^a
	Residual	.303	28	.011		
	Total	.960	31			

a. Predictors: (Constant), r, x, x_2

b. Dependent Variable: y

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-.066	.075		-.876	.388
	x_2	-.001	.000	-.936	-3.287	.003
	x	.021	.007	.872	3.105	.004
	r	.001	.000	.684	6.191	.000

a. Dependent Variable: y

נספח 5.1: קדקודי ליבת המשחק השיתופי – אזורי

חישוב קדקודי הליבה של המשחק השיתופי יעשה לפי סדר כניסתם של השחקנים לקואליציית העל. נאפשר קיומן של כל הקואליציות, לרבות אלו שערך אפס, ונחשב את תוספת הרווח באזור מהצטרפותו של כל שחקן לקואליציה קיימת. במשחק האזורי הנדון ישנן 3 שחקנים ולכאורה קיימות 6 ($3! = 6$) צירופים אפשריים. קדקודי הליבה המוצגים בטבלה 5.7 מבטאים את תרומתו השולית של כל שחקן בעת צירופו לקואליציה קיימת, שהיא למעשה ההקצאה האופטימאלית הניתנת לשחקן בהתייחס לסדר כניסתו לקואליציה קיימת.

טבלה 5.7: קדקודי ליבת המשחק השיתופי - אזורי

סידורי הקצאה אפשריים	הקצאת תוספת הרווח האופטימאלית לשחקן (מיליוני ₪)		
	1	2	3
123	0	5.34	2.02
132	0	6.61	0.75
213	5.34	0	2.02
231	7.36	0	0
312	0.75	6.61	0
321	7.36	0	0

ליבת המשחק האזורי שקדקודיה מתוארים בטבלה 5.7 יוצרת את מרחב המיקוח בין משתתפי האזור. כל פתרון הקצאה המצוי בליבה (צירופים קמורים של וקטורי קדקודי הליבה) מקיים את כל משוואות הליבה (טבלה 5.1) ולכן יהיה מקובל על כל שחקני המשחק השיתופי- אזורי.