

האוניברסיטה העברית בירושלים  
The Hebrew University of Jerusalem



המרכז למחקר בכלכלה חקלאית  
The Center for Agricultural  
Economic Research

המחלקה לכלכלה חקלאית ומנהל  
The Department of Agricultural  
Economics and Management

**סדרת מאמרים לדיון מס' 8.10**

**השבת בוצת שפכים לחקלאות:  
היבטים כלכליים, סביבתיים וארגוניים**

**ע"י**

**גלעד אקסלרד, תומר גרשפלד, אלי פיינרמן**

Papers by members of the Department  
can be found in their home sites:

מאמרים של חברי המחלקה נמצאים  
גם באתרי הבית שלהם:

<http://departments.agri.huji.ac.il/economics/indexe.html>

P.O. Box 12, Rehovot 76100

ת.ד. 12, רחובות 76100

מאי 2010

## השבת בוצת שפכים לחקלאות:

### היבטים כלכליים, סביבתיים וארגוניים

גלעד אקסלרד, תומר גרשפלד, אלי פיינרמן

#### 1. מבוא

משק המים בישראל מצוי בעיצומו של משבר, המגביל באופן חריף את היכולת לשאוב מי התהום ומי כנרת מבלי לחצות קווים אדומים מוגדרים (זסלבסקי, 2002). משק המים מצוי בגרעון מאזני של כ-2,000 מלמ"ק וקיים חשש ממשי לפגיעה חמורה, בלתי הפיכה, במקורות מים ואו אובדן כושר שאיבה (רשות המים, 2008). גורמים רבים תורמים למשבר: הגידול באוכלוסייה, העלייה ברמת החיים, שאיבת יתר של מי כנרת, מי תהום, העברת מים שפירים לירדן ולרשות הפלשתינאית כנדרש בהסכמים (כ-102 מלמ"ק) ומספר שנות בצורת עוקבות. צריכת המים במגזר העירוני גדלה ועמה גדלה כמות השפכים המוזרמים למתקני טיהור השפכים (מט"ש). כך למשל, בשנים 2000 ו-2006 כמויות השפכים שהוזרמה למכונני הטיפול בישראל היו 380 מלמ"ק ו-437 מלמ"ק, בהתאמה (למ"ס, 2007). מגמה זו צפויה להימשך והתחזית לשנת הנוכחית קרובה ל-500 מלמ"ק. מכיוון שכל מקורות המים הטבעיים מוצו עד תומו, מואץ הפיתוח של מקורות מים חלופיים, קרי: התפלת מי-ים, מחזור והשבה של מי שפכים עירוניים ותעשייתיים. הגידול בכמות השפכים המוזרמים למט"שים כרוך בגידול מקביל של תוצרי הלוואי של תהליך המיחזור: קולחים<sup>1</sup> ובוצת שפכים<sup>2</sup>.

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. בשנת 2004 תוקנו תקנות מים, שמטרתן מניעת זיהום מקורות מים וגרימת מפגעים סביבתיים עקב סילוק לא מבוקר של בוצה שמקורה בשפכים עירוניים<sup>3</sup>. התקנות מחלקות את הבוצה לשתי רמות איכות, סוג א'<sup>4</sup> וסוג ב'<sup>5</sup> ומפרטות הנחיות ברורות לגבי אופן השימוש והסילוק של כל סוג בוצה, בדגש על שימושים. 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 המוניציפאליות<sup>6</sup>.

בוצת השפכים ("Biosolids") היא חומר אורגני מוצק הנוצר כחלק בלתי נפרד מתהליך טיהור השפכים. מקורה במוצקים השוקעים במפעל טיפול בשפכים, למעט תוצר כאמור המתקבל בתהליך המקדמי של הטיפול שבו מבוצעים סינון 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 אורגניים, חנקן, זרחן ואשלגן (ושיעורים נמוכים יותר של סידן, גפרית ומגנזיום).

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 ושמינים (תקנות המים, 2004).

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

4 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).

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

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

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

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

1. **הטמנה סניטארית (Landfilling)** - הטמנה באתרי סילוק פסולת;
2. **שריפה (Incineration)** - חלופה מקובלת במדינות ובערים צפופות אוכלוסין;
3. **ייבוש בחום (Heat drying)** - תהליך טכנולוגי משולב במתקנים אלקטרו-מכניים להסמכה, סחיטה והתססה;
4. **יישום חקלאי (Agricultural Application)** - פיזור הבוצה כתחליף לדשן חקלאי, לטיוב ולשיקום קרקעות. במחקר הנוכחי, נתמקד בחלופת יישום הבוצה במגזר החקלאי בשיטת 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 הנפלטים בשטח המטמנה; השבת חומר אורגני היכול לשמש לטיוב קרקעות חקלאיות וכתחליף לתשומות דשנים; ייצוב הבוצה על-ידי השמדת פתוגנים והפחתת ריכוזי חומרים רעילים אחרים.

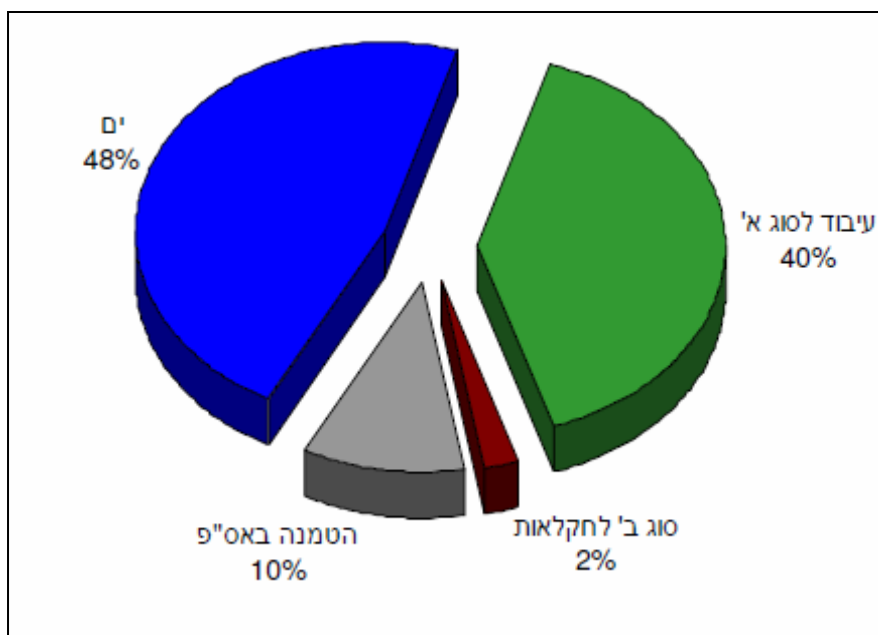
היישום החקלאי כולל פיזור ישיר של בוצה מיוצבת בשטחים חקלאיים, או פיזור עקיף של חומרים המסולקים לחקלאות לאחר תהליכי ייצוב וטיפול, כגון: קומפוסטציה, טיפול בסיד בשיטת <sup>8</sup>N-Viro, או תהליכי טיפול מקובלים אחרים. חלופת היישום החקלאי מועדפת במרבית מדינות האיחוד האירופי ובארה"ב ומקובלת גם בישראל (40-50% מהבוצה מיושמים בחקלאות, ברמות שונות של טיפול). שיטה זו מנצלת את פוטנציאל הבוצה כדשן חקלאי, המשתנה בהתאם לסוג הקרקע המיועדת לדישון ולתמהיל הגידולים המיועד. **היתרונות העיקריים 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. **החסרונות העיקריים ביישום חקלאי של בוצה** – יישום בוצה בקרקעות חקלאיות עלול לגרום נזק לאדם, לגידולים, לקרקע ולמי התהום. בוצה מכילה פתוגנים לאדם, ועודפי חומר אורגני מומס, חנקן וזרחן. בטווח הארוך, עלולים להצטבר בקרקע עודפים גדולים של זרחן ומתכות כבדות. בנוסף,

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

8 תהליך טכנולוגי המשלב מתקנים אלקטרו-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)<sub>2</sub>. 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).

כ-48% מכלל הבוצה בארץ נוצרת בשפד"ן ומסולקת 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. חלופת הסילוק לים עומדת גם בניגוד לאמנת ברצלונה (1976) עליה חתמה ישראל. כ-10% מכלל הבוצה הוטמנה באתרים לסילוק פסולת (אספיי"ם) והיתרה נצרכה בשימושים חקלאיים (איור 1)

איור 1: כמויות בוצה ויעדי סילוק בישראל 2007



(מקור: צדיקוב, 2008)

כ-4% מהבוצה יושמה בחקלאות באיכות נמוכה ("סוג ב") עד מרץ 2007 (מועד החלת האיסור ליישום בוצה סוג ב' בחקלאות) ומרבית הבוצה שיושמה בחקלאות (40% מסך הבוצה), עברה עיבוד סניטרי מיוחד (קומפוסטציה או שיטת N-Viro) והפכה לבוצה סוג א'. סה"כ, בשנת 2007 הופקו מתוך הבוצה הגולמית 42,587 טון חומר יבש (ח"י) בוצה סוג א'; כאשר 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 מטי"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, 2008; DHV Water and Balasha-Jalon, 2002). כאשר באיגוד ערים וביוב דן<sup>9</sup> 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 (אטי"ד). כל אחד מהפתרונות שייבחר יחייב הקמת תשתיות ומתקנים ויהיו לכך השלכות

9 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.

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. 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 למט"ש השפד"ן ולאזור חקלאי בדרום הארץ.

## 2. ספרות

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.

דיון כלכלי, 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. מסקנתם הייתה כי מבחינת יעילות כלכלית, שימושים חקלאיים בבוצה כדאיים יותר מאשר הטמנה או שריפה. 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. 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.

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 וסקלול אנרגטי של תהליכי ייצור תעשייתיים, לצורך הערכת השפעות

הספרות המקצועית העוסקת ביישום קומפוסט וקומפוסט בוצה בחקלאות הישראלית עדיין דלה יחסית. 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, בהתבסס על ניסויי שדה שבוצעו 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 היתה, 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.

### 3. מודל אופטימיזציה להקצאת בוצה ברמה אזורית

#### 3.1 מסגרת מושגית

פיתוח מודל המתאר את פתרון מתכנן אזורי לבעיית סילוק הבוצה, המשיא את רווחת האזור הנבחר, 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 ראותו של מתכנן אזורי הפועל בתנאי ודאות 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-  $(i=1, \dots, I)$  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 הנבחר.

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 חקלאים. 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 בוצת 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.

### 3.3 הנחות המודל

- 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 שדרוגה 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 ולאילו ציפים העומדים בפני המתכנן המרכזי (בנוסף ראה טבלת ריכוז פרמטרים ומשתנים בנספח 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:

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

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:

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

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

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

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

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 האופטימיזציה של המט"ש תחת חלופת האפס מוגדרת על-ידי:

$$Max_{q_1} \left\{ \Pi_1^0 = -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot \bar{b} \right\} \quad (3.3)$$

לפיכך, ביישום חלופת האפס המט"ש ייבחר את רמת איכות הבוצה המיועדת להטמנה  $q_1^1$  כך שישא את תועלתו, וזאת ללא קשר לתועלת החקלאים (תועלתם אינה מושפעת מאיכות הבוצה המופנית להטמנה). מתנאי סדר ראשון לבעיה (3.3) נקבל:

$$\frac{\partial \Pi_1^0}{\partial q_1} = 0 \Rightarrow c'(q_1) = -\varphi'(q_1) \quad (3.4)$$

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 (3.3) 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 (כלומר, קומפוסט הבוצה מסופק לחקלאים בחנם), פונקצית הוצאות המט"ש תהא:

$$\Pi_1 = -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot \left( \bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2)] \cdot \left( \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - E \quad (3.5)$$

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

סך עלות שינוע ופיזור הקומפוסט בשדה לשטחי הגידול השונים נתונה על-ידי:  $\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} t_{ij}$

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 נוספים<sup>10</sup>: חסכון בדשן כתוצאה מהחלפת דשנים כימיים, ותוספת פדיון בגידולים חקלאיים כתוצאה מטיוב הקרקע והגדלת תפוקת היבול לדונם.

**(א) החלפת דשנים כימיים (חסכון בדשן):** נניח כי בוצה סוג א' (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: טרצ'יצקי וחובריו, 2006). לפיכך, נניח כי 1 טון בוצה המיושם בכל גידול  $j$  באזור  $i$  מחליף  $\alpha_{ij}$  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 בדשנים כימיים במונחים כספיים, נגדיר את  $z_{ij}$  כערך הכספי הממוצע של 1 טון קומפוסט במונחי דשן כימי לגידול  $j$  באזור  $i$  (בהתבסס על 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 פונקצית גידול, אשר מושפעת מכמות ומאיכות הקומפוסט המיושמת, עבור הגידולים השונים שייבחרו. באופן

כללי, נבטא את פונקציות הגידולים החקלאיים כך:  $y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, q_2)$

כאשר כמות הבוצה סוג א' (קומפוסט בוצה),  $x_{ij}$ , המיושמת לדונם גידול  $j$  באזור  $i$  נמדדת ביחידות טון/דונם/שנה, והמשתנה  $q_2$  מייצג את רמת איכות הבוצה סוג א' המועברת ליישום חקלאי.

## ההנחות לגבי פונקציות הגידול הן:

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:

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

10 בעבודה זו לא נעשתה השוואה בין התועלת הסביבתית מיישום בוצה בחקלאות לעומת יישום דשנים כימיים, כך שהחיסכון המתואר בעלויות דשנים כימיים הינו החיסכון המינימאלי, וייתכן וקיימת אף תועלת סביבתית מיישום הבוצה בשטחים חקלאיים.

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

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

באופן דומה, ניתן להגדיר את כמות היבול המתקבלת מיישום קומפוסט בוצה עבור סך שטחי הגידולים השונים באזורים הנבחרים ע"י הביטוי:

$$\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} y_{ij}$$

בהתייחס לחיסכון בעלויות כתוצאה משימוש בקומפוסט  $(\alpha_{ij} x_{ij} z_{ij})$  בהתאם ליחס התחלופה שהגדרנו לעיל, נגדיר כעת את תועלת החקלאים מיישום קומפוסט בוצה לדונם גידול מסוג  $j$  באופן הבא:

$$\Pi_{ij} = p_j^y \cdot y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, q_2) - (f_{ij} - \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij}), \quad \forall i = 2, 3 \quad (3.6)$$

כאשר הפרמטר  $f_{ij}$  מייצג סך הוצאות שוטפות לדונם גידול  $j$  באזור  $i$ , כולל עלויות דשן כאשר לא נלקח בחשבון יישום קומפוסט, והפרמטר  $p_j^y$  מייצג את מחיר יבול הגידול  $j$  (טון/דונם) עבור החקלאי בניכוי עלויות התלויות בכמות היבול.

בהתבסס על (3.6), סך התועלת עבור החקלאים מיישום קומפוסט בשטחי כל הגידולים באזור הינה:

$$\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} \Pi_{ij} = \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} [p_j^y \cdot y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, q_2) - (f_{ij} - \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij})] \quad (3.7)$$

### 3.5 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 כתת קבוצה 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:  $S = \{s \cup (1)\}$ . 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  $\bar{N}$  (קואליציית 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 החלטה  $q_2, q_1, b_1, x_{ij}$  ובחירת המבנה הארגוני  $(S)$ , מבין החלופות האפשריות, ששיא את פונקציית המטרה האזורית, המוגדרת בביטוי 3.8:

פונקצית המטרה, המייצגת את סך התועלת האזורית הינה :

$$\begin{aligned} \text{MAX}_{x_{ij}, b_1, q_1, q_2} \{ \Pi^S = & -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot b_1 - [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2)] \cdot \left( \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \\ & - E + \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} [p_j^y \cdot y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) - (f_{ij} - \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij})] - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} t_{ij} \} \end{aligned} \quad (3.8)$$

השאת התועלת האזורית מתבצעת בכפיפות למגבלות הבאות :

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

$$b_1 + \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} = \bar{b} \quad (3.9)$$

ב. מגבלת רמת איכות הבוצה המיועדת להטמנה, המוגדרת בטווח  $[0,1]$  :

$$0 \leq q_2 \leq 1 \quad (3.10)$$

מכך ואילך נניח כי המגבלה התחתונה אינה אפקטיבית.

ג. מגבלת רמת איכות מינימאלית ליישום חקלאי של קומפוסט בוצה עבור כלל הגידולים :

$$\underline{q}_2 < q_2 \leq 1 \quad (3.11)$$

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

ד. מגבלת היצע קומפוסט לכלל השטחים באזור :

$$x_{ij} < \bar{X}_{ij} \quad (3.12)$$

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

פתרון לבעיית האופטימיזציה האזורית

פונקצית הלגראנג' עבור הבעיה האזורית דלעיל הינה :

$$\begin{aligned} L = & -[c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] \cdot \left( \bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2)] \cdot \left( \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \\ & - E + \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} [p_j^y \cdot y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) - (f_{ij} - \alpha_{ij} x_{ij} z_{ij})] - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} t_{ij} \\ & + \lambda_1 [1 - q_1] + \lambda_2 [1 - q_2] + \lambda_3 [q_2 - \underline{q}_2] + \delta_{ij} [l_{ij} \bar{X}_{ij} - l_{ij} x_{ij}] \end{aligned} \quad (3.13)$$

כאשר  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \delta_{ij}$  הם מחירי הצל של מגבלת רמת האיכות המקסימלית להטמנה, רמת האיכות המקסימלית ליישום חקלאי של בוצה, רמת האיכות המינימאלית ליישום חקלאי של בוצה ומגבלת כמות היישום השנתית של בוצה בכל גידול  $j$  באזור  $i$ , בהתאמה.

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

$$\frac{\partial L}{\partial x_{ij}} = 0 \Rightarrow p_j^y \cdot \frac{\partial y_{ij}}{\partial x_{ij}} + \alpha_{ij} z_{ij} = [c_2 + c(q_2) + \varphi(q_2) + t_{ij}] - [c_1 + c(q_1) + p^m + \varphi(q_1)] + \delta_{ij} \quad (3.14)$$

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:

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = -c'(q_1) \left( \bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - \varphi'(q_1) \left( \bar{b} - \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) - \lambda_1 = 0 \quad (3.15)$$

בהנחה שמגבלת רמת האיכות המקסימלית אינה אפקטיבית, נקבל לאחר צמצום האגפים את המשוואה הבאה:

$$c'(q_1) = -\varphi'(q_1) \quad (3.16)$$

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 (3.4).

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

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = -c'(q_2) \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} + \left( \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} \left( \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial q_2} \right) \right) - \lambda_2 - \lambda_3 = 0 \quad (3.17)$$

ולאחר סידור אגפים נקבל את המשוואה הבאה:

$$\sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} \left( \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial q_2} \right) - \lambda_2 - \lambda_3 = c'(q_2) \cdot \left( \sum_{i=2}^3 \sum_{j=1}^J l_{ij} x_{ij} \right) \quad (3.18)$$

כלומר, סכום ערכי התפוקות השוליות של יחידת איכות בוצה ליישום חקלאי בניכוי מחירי הצל של מגבלות קצה טווח רמת איכות הבוצה ליישום חקלאי, שווה לעלות השולית לשיפור  $\pi$  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 המטייש, יצרן הבוצה, משפיע במישרין על הרווחים של החקלאים, צרכני בוצה. בנוסף לתנאים אלה, מתקיימות מגבלות אי-שליליות עבור כל משתני ההחלטה ועבור ערכי הצל:  $\lambda$ ,  $\delta_{ij}$ .

#### 4. יישום אמפירי של מודל האופטימיזציה

##### 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	גדי"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 דודאים<sup>11</sup> 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 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.

11 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).

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 3,347,069 ש"ח<sup>12</sup> (ראה פירוט בנספח 2), המהווה אומדן לפרמטר ( $E$ ), ואילו העלות השנתית המשתנה<sup>13</sup>, בהנחה שהאתר עובד בתפוקה מלאה, היא 13.3 ש"ח/טון בוצה רטובה (22.2 ש"ח/מ"ק קומפוסט), המהווה אומדן לערך הביטוי  $c(q_2)$  כאשר רמת איכות הקומפוסט קבועה.

**עלויות הובלה ופיזור הקומפוסט (הפרמטר  $t_i$ )** - הערכת עלות הובלת הקומפוסט מבוססת על תחשיב שנערך עבור סקר הקומפוסט בישראל (חלמיש וחובריו, 2000), שלפיו עלות הובלת הקומפוסט במשאית גדולה מוערכת ב- 0.37 ש"ח/טון/ק"מ.

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 היישום בשטחים חקלאיים. על-פי ההנחה שמיקום אתר הקומפוסט הינו סמוך לאתר המטמנה ניתן, אם כן, להתעלם 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 (כלומר, על-פי הנחה זו אומדני עלות הובלת הבוצה בשני המערכים הן שוות,  $c_1 = c_2$ ).

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 הן את מרכיב עלות ההובלה לפי המרחק לכל אזור והן עלות פיזור הקומפוסט בשדה, שהיא 14.6 ש"ח/מ"ק (שלו, 2007), או 24.4 ש"ח/טון לפי יחס נפח משקל של 0.6 טון לכל 1 מ"ק קומפוסט.

עלות ההטמנה

עלות הקליטה (מחיר כניסה) באתר דודאים הינה 45 ש"ח/טון בוצה, לא כולל עלויות חיצוניות, המהווה אומדן לפרמטר  $p^m$  (בן יעקב, 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, מתחשב בעלויות הפליטה של גזים הנפלטים 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, הינו €8 לטון בוצה חומר יבש (בריכוז 20%), השווה ל- 8.8 ש"ח/טון

12 היות והמודל הינו חד תקופתי, החזר ההון חושב בהנחה של לקיחת הלואה לתקופה של 15 שנים בריבית שנתית ריאלית של 6%.

13 בהתאם להנחות העלות המשתנה אינה תלויה באיכות הבוצה.



$$\varphi(q_1)$$

2

$N_2O$

$$\varphi(q_2)$$

**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, 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"א	7	3	4,200	שלחין / המטרה
גזר	8	3	1,200	שלחין / המטרה
צנונית	9	3	1,000	שלחין / המטרה

**מחיר יבול ( $p_j^x$ ) 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, (2007). הנתונים עבור גידול תפוז"א 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, 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.

#### 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 יושומו 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 אומדן החיסכון בדשנים כימיים

קיימות מספר דרכים לאמידת פוטנציאל החיסכון בדשנים כימיים כתוצאה מיישום קומפוסט בוצה. יש המתייחסים לשווי הערך הכספי של סך יסודות ההזנה בקומפוסט, בעיקר חנקן שהוא יסוד ההזנה החשוב ביותר לצמח, על-פי חלוקה לקבוצות גידולים בעלי מאפייני צריכת דשן זהה (טרצ'יצקי וחובריו, 2006). יש החולקים על גישה זו מהנימוק שיש לאמוד את פוטנציאל החיסכון בדשנים כימיים באמצעות הערכת אספקת יסודות ההזנה הזמינים<sup>14</sup> לצמח בפועל, כתוצאה מיישום קומפוסט בוצה, ולא שקלול סך תכולת היסודות האורגניים בבוצה, שחלקם כלל אינו זמין לצמח (פיין, 2008). בעבודה זו בחרנו לייצג את הגישה השנייה, השמרנית יותר לגבי אומדן החיסכון בדשנים כימיים. הערכת תכולת יסודות ההזנה מבוססת על חישוביו של ד"ר פנחס פיין ממכון וולקני (פיין, 2000), אשר מפורטים בטבלה 4.3.

טבלה 4.3: ריכוז יסודות ההזנה בקומפוסט בוצה ומצב זמינותם

דשן כימי בשוק	תכולת החלק הזמין (ק"ג/טון בוצה יבשה)	תכולה כללית <sup>15</sup> (ק"ג/טון בוצה יבשה)	יסודות הזנה
N (חנקן צרוף)	1.8	13.8	חנקן
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.7	15	זרחן
K <sub>2</sub> O	10.9	10.9	אשלגן

בשלב הבא חישובנו את השווי הכספי הממוצע של טון בוצה רטובה במונחי דשן כימי, עבור כל גידול וגידול. החישוב בוצע על-ידי סכימת השווי הכספי (במחירי 2007) של יסודות ההזנה הזמינים לפי מגבלת יישום מקסימלית של 3 טון קומפוסט לדונם (5 מ"ק/דונם), במונחי דשנים כימיים<sup>16</sup>, עבור קבוצות גידולים בעלי יכולת ניצול דשן דומה, כמפורט בתחשיבי הגידול (סלמון, 2007; שלו, 2007). ביחס לשווי זה חושב שווי ממוצע עבור 1 טון בוצה, המהווה אומדן לפרמטר  $z_{ij}$ .

התוצאות מוצגות בטבלה 4.4.

14 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).

15 כמות החומר האורגני בקומפוסט בוצה פוחתת בכ- 35% לאחר תהליכי הטיפול והקומפוסטציה, ומהווה כ- 13% מכמות הבוצה הרטובה.

16 מחירי שוק: 4.16 ₪/ק"ג N ראש, 4.55 ₪/ק"ג N יסוד, 2.78 ₪/ק"ג P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 2.83 ₪/ק"ג K<sub>2</sub>O.

טבלה 4.4: שווי כספי ממוצע של 1 טון בוצה רטובה במונחי דשן כימי עבור הגידולים הנבחרים

הגידול	אינדקס	המלצת דישון (ק"ג/דונם)			שווי מקסימלי (ש"ח/3 טון)	שווי ממוצע - $z_{ij}$ (ש"ח/1 טון)
		K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N		
חיטה בעל	X <sub>21</sub> , X <sub>31</sub>	0	2	10	28.02	9.34
תירס	X <sub>22</sub> , X <sub>23</sub>	18	12	32	98.04	32.68
חמניות	X <sub>24</sub>	-	-	-	0	0
כותנה	X <sub>25</sub> , X <sub>26</sub>	5	4	20	49.83	16.61
תפוז/אגוז	X <sub>37</sub> , X <sub>38</sub>	50	10	35	139.62	46.54
צנונית	X <sub>39</sub>	-	-	-	0	0

יש לציין, כי שווי החיסכון עבור הגידולים חמניות וצנונית שווה לאפס, וזאת מהסיבה שבמצב הקיים, ללא יישום קומפוסט, לא מתבצע דישון בגידולים אלה באזורי המחקר שנבחרו בהתאם לתחשיבי הגידול. בנוסף, השפעות רב שנתיות של עודפי יסודות הזנה בקרקע או עודפי דשנים כימיים לא נלקחו בחשבון במסגרת עבודה זו.

#### 4.6 אמידת תוספת היבול המתקבלת כתוצאה מיישום קומפוסט

לצערנו, אמידת כמות היבול לדונם כתוצאה מיישום קומפוסט בכל גידול  $j$  באזור  $i$  (כמפורט בסעיף 3.4) מתבססת על מספר מועט של תצפיות, בעיקר בשל מיעוט מחקרי השדה<sup>17</sup> 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: I. אין הבדל בין תגובת גידולים לקומפוסט מבוצה ומאשפה; II. שיעור השינוי ביבול כתוצאה מיישום קומפוסט זהה בקרב קבוצות גידולים בעלי מאפייני צריכת חנקן דומה (טרציצקי וחובריו, 2006) לפיכך, שיעור השינוי זהה עבור הגידולים: תירס וכותנה (ניצול אקסטנסיבי) וכמו כן עבור הגידולים: תפוז/אגוז וצנונית (ניצול אינטנסיבי); 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"ו), פרט להוספת הקומפוסט (חלקות בקרה). מכיוון שבמרבית הניסויים מקובל ליישם קומפוסט ביחידות של מ"ק/דונם, השתמשנו בפרמטר  $\gamma$ , המייצג את היחס משקלי-נפחי ביצור קומפוסט, המוערך ב-0.6 מ"ק קומפוסט/טון בוצה רטובה, כך ש- $\gamma x_{ij}$  היא כמות קומפוסט הבוצה המיושמת ביחידות מ"ק/דונם/שנה, ו- $x_{ij}$  היא כמות הבוצה הרטובה המיושמת ביחידות טון/דונם/שנה. בחלק קטן מהניסויים שבוצעו, בעיקר בניסויים בחיטה, נעשתה השוואה בין שיטות פיזור שונות של קומפוסט, הצנעה וחיפוי<sup>18</sup>. שיטת הפיזור לא נלקחה בחשבון באמידת כמות יבול החיטה.

#### התאמת פונקציות גידול וכיול הפרמטרים

בסעיף 3.4 הוגדרה באופן כללי פונקציה תגובה של גידולים חקלאיים ליישום קומפוסט בוצה, מהצורה  $y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, q_2)$ , אשר מושפעת הן מכמות והן מאיכות הקומפוסט המיושמת עבור

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

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

$$y_{ij}(\tilde{n}_{ij}, \bar{w}_{ij}, x_{ij}, \bar{q}_2) = \beta_{1j}x_{ij} + \beta_{2j}x_{ij}^2 + y_{ij}^0 \quad (4.1)$$

כאשר כמות הבוצה סוג א' (קומפוסט בוצה),  $x_{ij}$ , המיושמת לדונם גידול  $j$  באזור  $i$  נמדדת ביחידות טון/דונם/שנה. המשתנה  $\bar{q}_2$  מייצג את רמת איכות הבוצה האחידה המועברת ליישום חקלאי בצורת קומפוסט. הפרמטרים  $\beta_{1j}, \beta_{2j}$  מייצגים את המקדם הליניארי והמקדם הריבועי של פונקציית היבול דלעיל, בהתאמה. הפרמטר  $y_{ij}^0$  מייצג את כמות היבול הממוצעת לדונם גידול  $j$  באזור  $i$  ללא יישום קומפוסט.

התאמת פונקציית 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. תוצאות כיוול ערכי הפרמטרים עבור פונקציית הגידול מוצגות להלן בטבלה 4.5. הערכים המוצגים בטבלה הינם אומדני מקדמי פונקציית הגידול וכמויות היבול הממוצעות ללא יישום קומפוסט עבור הגידולים הנבחרים. בנוסף, מפורטים בטבלה ערכי המובהקות של האומדנים, במידה ומספר התצפיות אפשרי. זאת. בכל הגידולים, מלבד חיטה, מספר התצפיות קטן מאוד בגלל מיעוט ניסויי ולכן לא ניתן להתייחס למשמעות הסטטיסטית של מובהקות האומדנים.

טבלה 4.5: כיוול ערכי פרמטרים ומובהקות האומדנים

כמות יבול ממוצעת ללא יישום קומפוסט (טון/דונם) $y_{ij}^0$	מקדם ריבועי		מקדם ליניארי		מס' תצפיות	אינדקס	הגידול
	מובהקות	ערכי $\hat{\beta}_{2j}$	מובהקות	ערכי $\hat{\beta}_{1j}$			
0.427	0.003	-0.0013	0.004	0.0210	32	X <sub>21</sub>	חיטה בעל (2)
1.350	-	-0.0015	-	0.0437	6	X <sub>22</sub>	תירס-גרעיניים
2.20	-	-0.0025	-	0.0712	-	X <sub>23</sub>	תירס-תחמיץ
0.198	-	-0.0001	-	0.0022	5	X <sub>24</sub>	חמניות
0.579	-	-0.0006	-	0.0187	-	X <sub>25</sub>	כותנה-אקלה
0.522	-	-0.0006	-	0.0169	-	X <sub>26</sub>	כותנה-פימה
0.214	0.003	-0.0013	0.004	0.0210	32	X <sub>31</sub>	חיטה בעל (3)
3.36	-	-0.0085	-	0.1077	3	X <sub>37</sub>	תפוח"א
6.26	-	-0.0158	-	0.2007	-	X <sub>38</sub>	גזר
2.0	-	-0.0050	-	0.0641	-	X <sub>39</sub>	צנונית

התוצאות חושבו בהנחה כי תמהיל הגידולים ושטחי הגידולים נתונים אקסוגני (דהיינו, אנו מניחים במובלע כי תמהיל הגידולים הקיים הוא אופטימאלי ואינו מושפע מהאפשרות לשימוש בקומפוסט בוצה). מודל האופטימיזציה האזורי המכיל את שלשת השחקנים - - מט"ש (i=1), ארגון חקלאים גדול (i=2), ארגון חקלאים קטן (i=3) - יושם עבור כל אחת מאפשרויות ההתארגנות שהצגנו (ראה סעיף 3.2). פתרון המודל נעשה באמצעות תוכנת המחשב Maple 13.

אמידת כמות היבול כתוצאה מיישום קומפוסט בוצה נעשתה בהתבסס על מחקרי שדה שפורטו בסעיף 4.6, כשברובם יישמו קומפוסט בשילוב עם דשן ללא התחשבות ביחס תחלופה מוגדר, כך שלא ניתן לבצע הפרדה מדויקת בין מרכיב החיסכון בדשן למרכיב תוספת היבול ויש חשש לשקלול מוטה של סך התועלת מיישום הבוצה בחקלאות. בשל כך, הרצנו שלושה תרחישים אפשריים עבור פונקצית המטרה האזורית  $\Pi^S$  (ראה 3.8), כמפורט להלן:

**תרחיש מס' 1:** מבוסס על ההנחה כי אין כלל שינוי ביבול כתוצאה מיישום קומפוסט, וכי התועלת היחידה מתקבלת מהחיסכון הנובע מהחלפת דשנים כימיים, כמפורט בסעיף 4.5. המודל האמפירי של תרחיש זה מתבטא בפונקצית מטרה ליניארית.

**תרחיש מס' 2:** מבוסס על ההנחה כי החקלאים משתמשים בקומפוסט הבוצה מבלי לקחת בחשבון את מרכיב החיסכון בדשנים כימיים, והם ממשיכים לדשן בהתאם להמלצות המופיעות בתחשיבי הגידול. המודל האמפירי של תרחיש זה מתבטא בפונקצית מטרה ריבועית, המשקללת את תוספת היבול בלבד, כמפורט בסעיף 4.6.

**תרחיש מס' 3:** "התרחיש הסביר" - מבוסס על הנחה כי מיישום קומפוסט בגידולים חקלאיים מתקבלת תוספת יבול של 5%, הערכה המקובלת בספרות המחקרית (EC, 2002; חלמיש וחוברי, 2000), וכי החקלאים מודעים לערך הכספי של הקומפוסט במונחי דשנים כימיים. תרחיש זה מתבטא בפתרון ביניים, המשלב בין שני תרחישי הקצה 1 ו-2.

בהינתן ערכי פונקצית המטרה לחלופות ההתארגנות השונות, יבחן המתכנן המרכזי את תוספת הרווח (ערך הקואליציה  $\Pi^S$ ) 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- דהיינו, 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 ופתרונות הקצאת הבוצה עבור הקואליציות השונות במודל האופטימיזציה האזורי, שנתקבלו מהרצת מודל האופטימיזציה עבור התרחישים השונים, מוצגים בטבלאות הבאות.

השוואת פתרונות הקצאת הבוצה ליחידות הכלכליות ולהטמנה עבור החלופות הארגוניות השונות מוצגות להלן בטבלה 4.6. הקצאה זו זהה עבור שלושת התרחישים.

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

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

טבלה 4.7 : ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות (מיליוני ₪) – תרחיש מס' 1

טור 3	טור 2	טור 1	
תוספת הרווח של הקואליציה $v(S)$	סכימת ערכי השחקנים, כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף $\sum_{i=1}^4 \pi(i)$	ערך הקואליציה $\Pi^S$	הקואליציה (i), (S)
0.00	-16.14	-16.14	מט"ש ("שחקן" $i=1$ )
0.00	36.16	36.16	ארגון חקלאים גדול ("שחקן" $i=2$ )
0.00	11.83	11.83	ארגון חקלאים קטן ("שחקן" $i=3$ )
0.85	20.02	20.87	(1,2)
-1.27	-4.31	-5.58	(1,3)
1.34	31.85	33.19	(1,2,3)

כאשר,

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

למעשה סך הרווח האזורי,  $(\pi^i, \Pi^S)$ , 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).

טבלה 4.8 : ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות (מיליוני ₪) – תרחיש מס' 2

טור 3	טור 2	טור 1	
תוספת הרווח של הקואליציה $v(S)$	סכימת ערכי השחקנים, כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף $\sum_{i=1}^4 \pi(i)$	ערך הקואליציה $\Pi^S$	הקואליציה $(S), (i)$
0.00	-16.14	-16.14	מט"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)

טבלה 4.9 : ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות (מיליוני ₪) – תרחיש מס' 3

טור 3	טור 2	טור 1	
תוספת הרווח של הקואליציה $v(S)$	סכימת ערכי השחקנים, כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף $\sum_{i=1}^4 \pi(i)$	ערך הקואליציה $\Pi^S$	הקואליציה $(S), (i)$
0.00	-16.14	-16.14	מט"ש (1)
0.00	36.16	36.16	ארגון חקלאים גדול (2)
0.00	11.83	11.83	ארגון חקלאים קטן (3)
4.41	20.02	24.44	(1,2)
0.11	-4.31	-4.20	(1,3)
6.02	31.85	37.87	(1,2,3)

פעילות היחידות הכלכליות ללא שיתוף פעולה עם יתר שחקני האזור משקפת את כוחו היחסי באזור של כל אחד מהשחקנים הספציפיים. מהתוצאות דלעיל עולה כי תוספת הרווח הנוצרת מכל אחת מחלופות ההתארגנות המכילה לפחות את המט"ש (פרט לחלופה (1,3) בתרחיש 1) ושחקן נוסף היא 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 המט"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 את תוספת הרווח הגבוהה ביותר ביחס לכל אחד משלושת התרחישים.

### ניתוחי רגישות

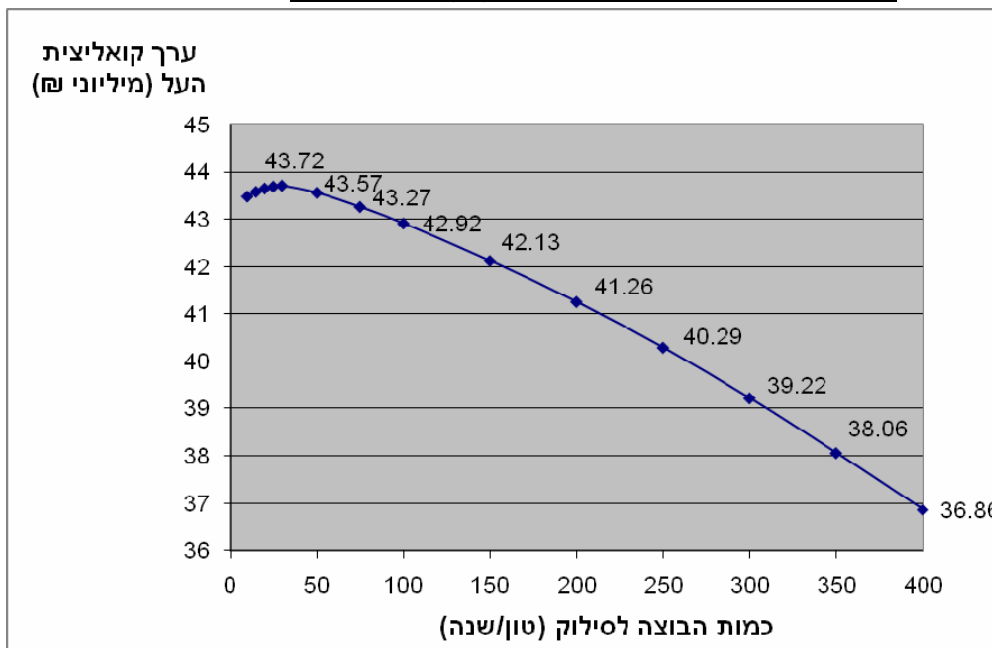
בשלב היישום האמפירי של המודל השתמשנו בנתונים ובאומדנים שונים, המבוססים על מחקרים, ניסויי שדה וראיונות. בשל מיעוט מידע לגבי חלק מהנתונים עליהם התבססנו, או היעדר מידע לגבי גידולים מסוימים, יש לסייג את מהימנות התוצאות.

בסעיף זה נציג חלק מניתוחי הרגישות שביצענו בהתייחס למחירי הדשנים הכימיים, אומדני פונקציות היבול, עלויות חיצוניות מהטמנה וקומפוסטציה, היצע הבוצה לאזור ומגבלות על רמת הבוצה המקסימאלית פר דונם גידול. ניתוחי הרגישות בוצעו עבור תרחישים מס' 1 ו-2, אשר מהווים את הבסיס לתוצאות תרחיש מס' 3. למען הקיצור, נציג כאן את שני ניתוחי הרגישות האחרונים כשאת האחרים ניתן לקבל על פי דרישה.

### היצע הבוצה האזורי (תרחיש מס' 2)

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 (בתרחיש 2). תוצאות הניתוח מוצגות באיור 4.1.

איור 4.1: השפעת השינוי בכמות הבוצה על ערך קואליציית העל

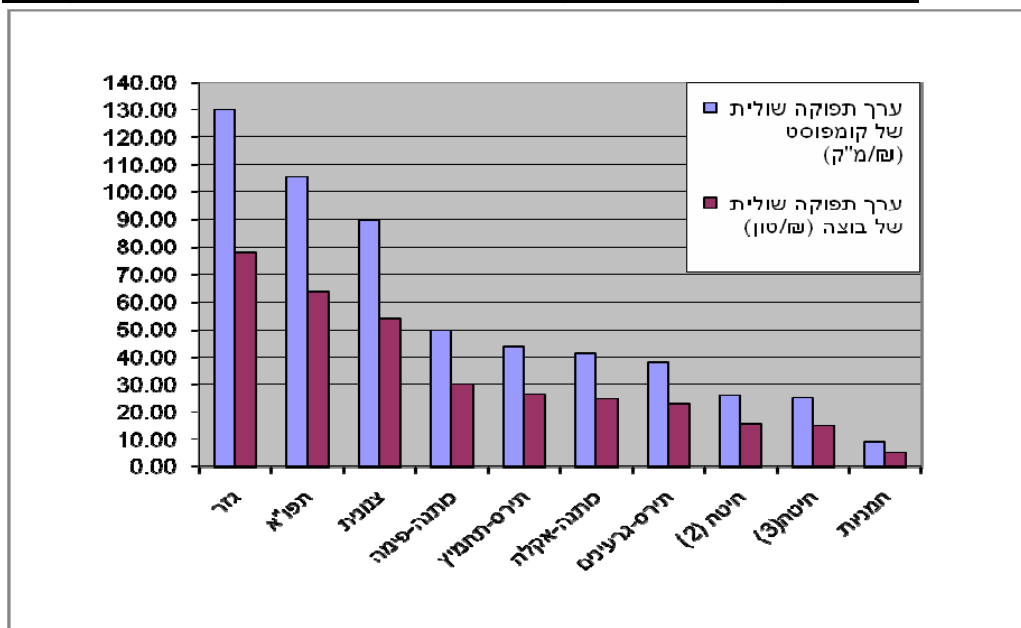


מהאיור ניתן לראות, כי הערך המקסימאלי עבור קואליציית העל מתקבל עבור כמות בוצה שנתית של כ-30,000 טון/שנה. כמות זו נמוכה משמעותית מן הכמות הנדרשת לסילוק ואינה ריאלית, ומכיוון שיש חובה לסלק את כל הבוצה לאחת מן החלופות שהוגדרו (הטמנה או יישום חקלאי), הערכים המתקבלים הם המיטביים עבור כל כמות וכמות. תוצאה זו 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 הן ליניאריות. אך עדיין בכל כמות של בוצה הנדרשת לסילוק מתקבל, שכל הבוצה מועברת ליישום חקלאי (חלופה זו עדיפה על לחלופת ההטמנה).

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. תרשים 4.2 מציג את ערכי התפוקות השוליות של מספר גידולים עבור מגבלת יישום של 1 מ"ק קומפוסט לדונם לשנה.

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





מהאיור ניתן לראות כי הקומפוסט יוקצה תחילה לשטחי הגזר (ברמה של 1 מ"ק/דונם), לאחר מכן לשטחי תפוז, שטחי הצנונית וכך הלאה כאשר החמניות בעדיפות אחרונה. ערך קואליציית העל המתקבל עבור רמת המגבלה של 1 מ"ק/דונם (קומפוסט) או 1.67 טון/דונם (בוצה רטובה) הינו 33.37 מיליון ₪. במידה ונרחיב את רמת מגבלת היישום לרמה 3 מ"ק/דונם, שהם או 5 טון/דונם, ערך קואליציית העל יגדל בכ- 15.71% (38.62 מיליון ₪). הגדלה נוספת של רמת המגבלה ל 5 מ"ק/דונם, שהם 8.35 טון/דונם, בהתאמה (רמת המגבלה שנבחרה עבור מודל האופטימיזציה), 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 ₪) בהשוואה לרמה של 5 מ"ק לדונם. מהתוצאות האלה עולה בבירור שהרגישות הגדולה של פונקציית המטרה למגבלת היישום היא בתחום שבין 1 ל 3 מ"ק קומפוסט לדונם. כמו כן, מצאנו כי החל ממגבלת יישום של 2 מ"ק קומפוסט לדונם כל כמות הבוצה מועברת ליישום חקלאי (ושוים כמות לא נשלחת להטמנה). מערכי התפוקות השוליות שנתקבלו עבור מגבלות היישום השונות, ניתן לאמוד את עקומת הביקוש לקומפוסט של חקלאי האזור הנבחר. 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, גזר וצנונית. באופן דומה, מצאנו כי כאשר מגבלת היישום היא של 5 מ"ק לדונם, החקלאים עדיין יהיו מוכנים לשלם כ-30 ₪/מ"ק עבור יישום בגידולים: כותנה, תירס לתחמיץ וגזר, במחיר של 20 ₪/מ"ק יהיה כדאי ליישמו גם לגידולי הצנונית, תפוז, והתירס לגרעינים ובמחיר של 10 ₪/מ"ק, יהיה כדאי ליישם הקומפוסט גם לגידול החיטה.

במחירי השוק של הקומפוסט בשנת 2007, שעמדו בממוצע על 84 ₪/מ"ק (שלו, 2007; סלמון, 2007), ובהתאם למאפייני הגידולים באזור הנבחר, ניתן לומר שכדאי היה לרכוש קומפוסט רק עבור יישום בגידולי הירקות וברמה של בין 2 ל-3 מ"ק לדונם. כמובן ששינויים במחירי היבול ישפיעו על ערך התפוקות השוליות של הגידולים ועל החלטות החקלאים לגבי תמהיל הגידולים, אך בדיקת השפעות אלו חורגת ממסגרת העבודה הנוכחית.

#### 4.8 סיכום

המוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי בניצול בוצת שפכים לשימושים חקלאיים, נובעת הן מתוספות הפדיון לגידולים חקלאיים וחסכון בעלויות הדישון הכימי והן 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 ליחידות הכלכליות באזור, כאשר תוספת הרווח הגבוהה ביותר (כ- 6 מיליון ש"ח) הושגה, כמצופה, ב"קואליציית" העל, בה חברים כל שחקני האזור (כל היחידות הכלכליות באזור). שיתוף הפעולה בין המט"ש לחקלאים מאפשר ניצול יעיל של בוצה המתבטא בתוספת רווח אזורית ובנוסף, מקנה מספר יתרונות סביבתיים (שאינם מכומתים באופן מפורש בעבודה הנוכחית) הכוללים, בין היתר, את: א. שימוש חוזר בחומר האורגני 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).

מודל האופטימיזציה מציג את הקצאת הבוצה האופטימאלית שמובילה להשאת הרווח הכולל של היחידות הכלכליות באזור. בהעדר האפשרות להעברת גורמי יצור בין היחידות הכלכליות (השחקנים) באזור, ניתן לתמרץ את המט"ש והחקלאים לשותף פעולה מרצון באמצעות העברת תשלומי צד (העברות כספיות) ביניהן. חידות הכלכליות הפעילות באזור. בפרק הבא יידונו מספר שיטות, מתחום המשחקים השיתופיים, להקצאת תוספת הרווח המתקבלת, אשר ישמרו על מסגרת השיתוף. התוצאות והניתוח האמפירי שבפרק הבא יתבססו על תוצאות תרחיש מס' 3.

## 5. הקצאת רווחים בין היחידות הכלכליות לפי עקרונות מתחום תורת המשחקים הקואליציוניים

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: Axelrad and Feinerman (2009), Young (1994), Dinar et al (1986).

### 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 יבול 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.

### 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  $(\bar{N}, \pi)$  הוא משחק קואליציוני עם תשלומי צד (<sup>19</sup>TU Games), 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 פונקצית המטרה (במודל האופטימיזציה) עבור אותה קואליציה  $S$ , כלומר  $\pi(S) = \Pi^S$ , כאשר  $\Pi^S$  מוגדר במשוואה (3.8), שבפרק 3. שילוב זה מאפשר מציאת רווח של כל קואליציה  $S$  ומציאת פונקצית רווח אופיינית. נסמל את פונקצית **תוספת** הרווח ב-  $v$ .

### פונקצית תוספת הרווח ( $v$ )

המודל יעסוק בהקצאת **תוספת** הרווחים הנוצרת כתוצאה משיתוף פעולה בין המשתתפים. לכל תת קבוצה  $S$  פוטנציאל תוספת רווח של (בהתאם לתרחיש מס' 3: ראה טבלה מספר 4.11, 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.  $v(S)$  מייצגת את הפונקציה האופיינית (נרמול אפס, במקום לבחון את סך הרווחים או 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"<sup>20</sup>. קיום אחת מהתכונות האלו מבטיח, שהפתרון האופטימאלי יושג בקואליציית העל ( $\bar{N}$ ).

למען הקיצור, לא נציג כאן באופן פורמאלי את התכונות הרצויות מפונקצית תוספת הרווח,  $v$ , ולא נציג באופן מפורט מושגים רלוונטיים לפתרון בעיית הקצאת הרווח (או תוספת הרווח) המצרפי בין השחקנים השונים, כמו: ליבת המשחק, גרעין, גרעינון וערך שפלי. נשמח להעביר אינפורמציה נוספת, על פי פניה, לקוראים (שאינם בקיאים בנושאים דלעיל) החפצים בכך. נסתפק במספר הגדרות כלליות:

#### I. 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). ניתן להראות כי במשחק האזורי המתאים לבעיה שלנו הליבה אינה ריקה והפתרון האופטימאלי יושג בקואליציית העל.

#### II. פתרונות הגרעין והגרעינון 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) והגרעינון. פתרון הגרעין אינו אלא הקצאת מקסמין (max-min) של תוספת הרווח המביאה למקסימום את ההפרשים שבין

19 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.

20 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,  $v(i) = 0$ .

III. 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: Young, 1994; Loehman et al, 1979). ערכי שפלי,  $\varphi(x_i)$ , מחושבים על פי הנוסחה הבאה (ראה למשל: Loehman et al, 1979; Young, 1994).

### תוצאות

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). מן הראוי להזכיר כאן כי התוצאות האמפיריות בפרק זה מתבססות על תוצאות תרחיש מס' 3 שהוצג בפרק הקודם.

טבלה 5.1: ריכוז פתרונות ההקצאה (במיליוני ₪)

שחקן	ערכי שפלי	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח*	פתרון הקצאת הגרעין והגרעינון	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	2.76	45.85%	2.61	43.33%
2	2.71	44.97%	2.61	43.33%
3	0.55	9.18%	0.8	13.33%

\*סך תוספת הרווח בקואליציית העל בתרחיש 3 הינה 6.02 מיליוני ₪ (ראה טבלה 4.9)

מטבלה 5.1 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 עולה כי הוא שיפר את רווחיו (מזעור עלויות) בכ-17% בחישוב לפי ערכי שפלי, ובכ-16% 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, עולה כי אלו שיפרו את רווחיהם בכ-7.5% וכ-4.7% בהתאמה - בחישוב ההקצאות לפי ערכי שפלי, ובכ-7.2% וכ-6.8% בהתאמה - בחישוב לפי הקצאת הגרעין/גרעינון.

## סיכום

בפרק זה הוצגו 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 שפלו) 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).

## 6. 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.

במודל האופטימיזציה המוצג בפרקים 3 ו 4 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 משחקני 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 אורגני. חשיבות יישום החומר האורגני בקרקעות אלו לרווחיות הגידולים היא רבה ביותר.

בהתאם לתוצאות תרחיש מס' 3, תוספת הרווח הגבוהה ביותר לאזור (כ- 6 מיליון ₪) נתקבלה בקואליציית העל, בה שותפות כל שלושת היחידות הכלכליות (החלופה המיטבית). בחלופה זו, תוספת הרווח לשחקן 1 יכולה להיחשב לרנטה<sup>21</sup> תמורת השימוש שעושים הצרכנים בשוויים בבוצת המט"ש. מכאן, שהרנטה תמורת השימוש בבוצה הינה 9.2 ₪/טון בוצה, או 15.3 ₪/מ"ק קומפוסט, ו- 8.7 ₪/טון בוצה, או 14.5 ₪/מ"ק קומפוסט, בהתייחס להקצאות ערכי שפלי והגרעינון (גרעין), בהתאמה. ניתן לראות שהרנטה שהתקבלה עבור שימוש בקומפוסט הבוצה נמוכה משמעותית ממחיר השוק הנוכחי של הקומפוסט (כ- 85 ₪/מ"ק) ומהווה כמחצית ממחיר קומפוסט הבוצה, המוערך בכ- 30 ₪/מ"ק, כולל הובלה. כמובן שפתרונות ההקצאה שהצגנו אינם מאפשרים התייחסות למחירי שיווי משקל של קומפוסט בוצה ברמה הארצית, מכיוון שמדובר במודל אזורי סגור ללא אפשרות להעברה וקבלה של קומפוסט, ומכיוון שלא קיים עדיין בישראל שוק של ממש לקומפוסט בוצות.

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).

ניתן להרחיב את המחקר הנוכחי לכיוונים 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, 2008). כמו כן, אנו ממליצים לעודד ביצוע מחקרי שדה

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

1. 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.
2. 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.
3. 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".
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. European Commission, DG Environment – B/2 (2002), "Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge, Part 4 – Economic Report".
8. Kan, I., Ayalon, O. and Federman, R. (2008), *Economic Efficiency of Compost Production: The Case of Israel*, Discussion Paper No. 8.08, The Hebrew University of Jerusalem, The Department of Agricultural Economics and Management.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. 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.
15. United Nation Environment Program (2005), "Guide Lines For Sewage Treatment, Disposal and Use", Meeting of the MED POL National Coordinators Barcelona, Spain.
16. 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.
17. Zenz, R.D., Lue-Hing, C., Kuchenrither, R. (1998), "Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal" (book), Vol. 4.

### ספרות עברית

18. 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' 41-1.
19. המשרד לאיכות הסביבה (2004), "תקנות המים - מניעת זיהום מים, שימוש בבוצה וסילוקה, התשס"ד – 2004", ירושלים.
20. הדס א., איזנקוט א., פיין פ., צוקרמן, א. (2008), "השימוש המיטבי בפרש בקר", מדינת ישראל, משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
21. זסלבסקי, ד. (2002), "מתחת לקו האדום - על משבר המים בישראל", קריית הטכניון, חיפה.
22. 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.
23. טרצ'יצקי, ח. (2006), "תקנות שימוש בבוצת שפכים בארץ ובעולם", מים והשקיה, (475), 14-19.
24. טרצ'יצקי, 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.
25. מסינג, א. (2006), "טיפול בבוצת השפד"ן", מים והשקיה, (474), 8-13.
26. סלומון, ד. (2006), "טיפול תרמי: פתרון מוכח, זמין וידידותי לתושבים", מים והשקיה (476), 8-11.
27. סלומון, א., גרף, ש., רבינוביץ' א. (2007), "תחשיבים בגידולי שדה", משרד החקלאות ופיתוח הכפר.
28. סמואלסון, פ.א. (1961), "תורת הכלכלה", תל-אביב: סטימצקי (מהדורה עברית), 35-55.
29. פיין, פ. (2000), "בחינת חלופות לסילוק בוצת שפכי השפד"ן בחקלאות", מרכז וולקני, מינהל המחקר החקלאי.
30. פרידלר, ע., חואניקו, מ' (1997), "דרישות איכות וטיפול בשפכים המיועדים לשימוש חוזר בחקלאות", מים והשקיה (373), 27-32.
31. צדיקוב, א. (2005), "סילוק בוצת ממט"שים עירוניים", המשרד לאיכות הסביבה, תשתיות.
32. צדיקוב, א. (2008), "סילוק בוצת ממט"שים עירוניים 2007", המשרד לאיכות הסביבה, תשתיות.
33. 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](http://www.sviva.gov.il), המשרד לאיכות הסביבה, אתר רשמי,
- [www.cbs.gov.il](http://www.cbs.gov.il), הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, אתר רשמי,
- United Nation Environment Program, Mediterranean Action Plan for the Barcelona Convention, Official Website, [www.unepmap.org/index.php](http://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: 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 ( $j = 1, \dots, J$ )	$j$
<b>פרמטרים במודל</b>		
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- $\alpha$ טון דשן, כאשר $0 < \alpha < 1$	$\alpha_{ij}$
טבלה 4.5	מקדם ליניארי של כמות היבול המתקבלת ביישום כמות קומפוסט בוצה $x_{ij}$ באיכות $q_2$ לדונם גידול $j$ באזור $i$	$\beta_{1j}$
טבלה 4.5	מקדם ריבועי של כמות היבול המתקבלת ביישום כמות קומפוסט בוצה $x_{ij}$ באיכות $q_2$ לדונם גידול $j$ באזור $i$	$\beta_{2j}$
שטון\יבול	מחיר יבול הגידול $j$ עבור החקלאי בניכוי עלויות התלויות בכמות היבול	$p_j^y$
שדונם	סך הוצאות שוטפות לדונם גידול $j$ באזור $i$ , כולל עלויות דשן	$f_{ij}$
שטון בוצה	הערך הכספי הממוצע של 1 טון קומפוסט במונחי 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	$c_2$
ששנה	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	$\gamma$
	רמת איכות מינימאלית של קומפוסט בוצה ליישום חקלאי (סוג א')	$\underline{q}_2$
<b>משתני החלטה במודל התיאורטי</b>		
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 2: תמחור הקמת מתקן קומפוסטציה לפי כושר ייצור של 180,000 מ"ק לשנה\*

נושא	יחידת	כמות	עלות יחידה	סה"כ עלות (₪)
<b>תשתיות</b>				
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
<b>סה"כ תשתיות</b>				<b>25,280,000.00</b>
<b>מבנים ומתקנים</b>				
משרדים ומבני שרות	מ"ר	600	1000	600,000.00
מעבדה	קמפ'	4	50,000	200,000.00
<b>סה"כ מבנים ומתקנים</b>				<b>800,000.00</b>
<b>ציוד ומכונות</b>				
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
<b>סה"כ ציוד ומכונות</b>				<b>4,620,000.00</b>
<b>שונות</b>				
תכנון / הקמה / אגרות	קמפ'	8	250,000	2,000,000.00
<b>סה"כ שונות</b>				<b>2,000,000.00</b>
<b>סה"כ הוצאות קבועות - הקמה</b>				<b>32,700,000.00</b>
<b>עבודה וניהול</b>				
פועלים רגילים		10	120,000	1,200,000.00
מפעילים		4	150,000	600,000.00
ניהול		4	250,000	1,000,000.00
<b>סה"כ עבודה וניהול</b>				<b>2,800,000.00</b>
<b>תפעול ותחזוקה</b>				
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
<b>סה"כ תפעול ותחזוקה</b>				<b>1,200,000.00</b>
<b>סה"כ הוצאות שוטפות לשנה</b>				<b>4,000,000.00</b>

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

## PREVIOUS DISCUSSION PAPERS

- 1.01 Yoav Kislev - Water Markets (Hebrew).
- 2.01 Or Goldfarb and Yoav Kislev - Incorporating Uncertainty in Water Management (Hebrew).
- 3.01 Zvi Lerman, Yoav Kislev, Alon Kriss and David Biton - Agricultural Output and Productivity in the Former Soviet Republics.
- 4.01 Jonathan Lipow & Yakir Plessner - The Identification of Enemy Intentions through Observation of Long Lead-Time Military Preparations.
- 5.01 Csaba Csaki & Zvi Lerman - Land Reform and Farm Restructuring in Moldova: A Real Breakthrough?
- 6.01 Zvi Lerman - Perspectives on Future Research in Central and Eastern European Transition Agriculture.
- 7.01 Zvi Lerman - A Decade of Land Reform and Farm Restructuring: What Russia Can Learn from the World Experience.
- 8.01 Zvi Lerman - Institutions and Technologies for Subsistence Agriculture: How to Increase Commercialization.
- 9.01 Yoav Kislev & Evgeniya Vaksin - The Water Economy of Israel--An Illustrated Review. (Hebrew).
- 10.01 Csaba Csaki & Zvi Lerman - Land and Farm Structure in Poland.
- 11.01 Yoav Kislev - The Water Economy of Israel.
- 12.01 Or Goldfarb and Yoav Kislev - Water Management in Israel: Rules vs. Discretion.
- 1.02 Or Goldfarb and Yoav Kislev - A Sustainable Salt Regime in the Coastal Aquifer (Hebrew).
- 2.02 Aliza Fleischer and Yacov Tsur - Measuring the Recreational Value of Open Spaces.
- 3.02 Yair Mundlak, Donald F. Larson and Rita Butzer - Determinants of Agricultural Growth in Thailand, Indonesia and The Philippines.
- 4.02 Yacov Tsur and Amos Zemel - Growth, Scarcity and R&D.
- 5.02 Ayal Kimhi - Socio-Economic Determinants of Health and Physical Fitness in Southern Ethiopia.
- 6.02 Yoav Kislev - Urban Water in Israel.
- 7.02 Yoav Kislev - A Lecture: Prices of Water in the Time of Desalination. (Hebrew).

- 8.02 Yacov Tsur and Amos Zemel - On Knowledge-Based Economic Growth.
- 9.02 Yacov Tsur and Amos Zemel - Endangered aquifers: Groundwater management under threats of catastrophic events.
- 10.02 Uri Shani, Yacov Tsur and Amos Zemel - Optimal Dynamic Irrigation Schemes.
- 1.03 Yoav Kislev - The Reform in the Prices of Water for Agriculture (Hebrew).
- 2.03 Yair Mundlak - Economic growth: Lessons from two centuries of American Agriculture.
- 3.03 Yoav Kislev - Sub-Optimal Allocation of Fresh Water. (Hebrew).
- 4.03 Dirk J. Bezemer & Zvi Lerman - Rural Livelihoods in Armenia.
- 5.03 Catherine Benjamin and Ayal Kimhi - Farm Work, Off-Farm Work, and Hired Farm Labor: Estimating a Discrete-Choice Model of French Farm Couples' Labor Decisions.
- 6.03 Eli Feinerman, Israel Finkelshtain and Iddo Kan - On a Political Solution to the Nimby Conflict.
- 7.03 Arthur Fishman and Avi Simhon - Can Income Equality Increase Competitiveness?
- 8.03 Zvika Neeman, Daniele Paserman and Avi Simhon - Corruption and Openness.
- 9.03 Eric D. Gould, Omer Moav and Avi Simhon - The Mystery of Monogamy.
- 10.03 Ayal Kimhi - Plot Size and Maize Productivity in Zambia: The Inverse Relationship Re-examined.
- 11.03 Zvi Lerman and Ivan Stanchin - New Contract Arrangements in Turkmen Agriculture: Impacts on Productivity and Rural Incomes.
- 12.03 Yoav Kislev and Evgeniya Vaksin - Statistical Atlas of Agriculture in Israel - 2003-Update (Hebrew).
- 1.04 Sanjaya DeSilva, Robert E. Evenson, Ayal Kimhi - Labor Supervision and Transaction Costs: Evidence from Bicol Rice Farms.
- 2.04 Ayal Kimhi - Economic Well-Being in Rural Communities in Israel.
- 3.04 Ayal Kimhi - The Role of Agriculture in Rural Well-Being in Israel.
- 4.04 Ayal Kimhi - Gender Differences in Health and Nutrition in Southern Ethiopia.
- 5.04 Aliza Fleischer and Yacov Tsur - The Amenity Value of Agricultural Landscape and Rural-Urban Land Allocation.

- 6.04 Yacov Tsur and Amos Zemel – Resource Exploitation, Biodiversity and Ecological Events.
- 7.04 Yacov Tsur and Amos Zemel – Knowledge Spillover, Learning Incentives And Economic Growth.
- 8.04 Ayal Kimhi – Growth, Inequality and Labor Markets in LDCs: A Survey.
- 9.04 Ayal Kimhi – Gender and Intrahousehold Food Allocation in Southern Ethiopia
- 10.04 Yael Kachel, Yoav Kislev & Israel Finkelshtain – Equilibrium Contracts in The Israeli Citrus Industry.
- 11.04 Zvi Lerman, Csaba Csaki & Gershon Feder – Evolving Farm Structures and Land Use Patterns in Former Socialist Countries.
- 12.04 Margarita Grazhdaninova and Zvi Lerman – Allocative and Technical Efficiency of Corporate Farms.
- 13.04 Ruerd Ruben and Zvi Lerman – Why Nicaraguan Peasants Stay in Agricultural Production Cooperatives.
- 14.04 William M. Liefert, Zvi Lerman, Bruce Gardner and Eugenia Serova - Agricultural Labor in Russia: Efficiency and Profitability.
- 1.05 Yacov Tsur and Amos Zemel – Resource Exploitation, Biodiversity Loss and Ecological Events.
- 2.05 Zvi Lerman and Natalya Shagaida – Land Reform and Development of Agricultural Land Markets in Russia.
- 3.05 Ziv Bar-Shira, Israel Finkelshtain and Avi Simhon – Regulating Irrigation via Block-Rate Pricing: An Econometric Analysis.
- 4.05 Yacov Tsur and Amos Zemel – Welfare Measurement under Threats of Environmental Catastrophes.
- 5.05 Avner Ahituv and Ayal Kimhi – The Joint Dynamics of Off-Farm Employment and the Level of Farm Activity.
- 6.05 Aliza Fleischer and Marcelo Sternberg – The Economic Impact of Global Climate Change on Mediterranean Rangeland Ecosystems: A Space-for-Time Approach.
- 7.05 Yael Kachel and Israel Finkelshtain – Antitrust in the Agricultural Sector: A Comparative Review of Legislation in Israel, the United States and the European Union.
- 8.05 Zvi Lerman – Farm Fragmentation and Productivity Evidence from Georgia.
- 9.05 Zvi Lerman – The Impact of Land Reform on Rural Household Incomes in Transcaucasia and Central Asia.

- 10.05 Zvi Lerman and Dragos Cimpoiu – Land Consolidation as a Factor for Successful Development of Agriculture in Moldova.
- 11.05 Rimma Glukhikh, Zvi Lerman and Moshe Schwartz – Vulnerability and Risk Management among Turkmen Leaseholders.
- 12.05 R.Glukhikh, M. Schwartz, and Z. Lerman – Turkmenistan’s New Private Farmers: The Effect of Human Capital on Performance.
- 13.05 Ayal Kimhi and Hila Rekah – The Simultaneous Evolution of Farm Size and Specialization: Dynamic Panel Data Evidence from Israeli Farm Communities.
- 14.05 Jonathan Lipow and Yakir Plessner - Death (Machines) and Taxes.
- 1.06 Yacov Tsur and Amos Zemel – Regulating Environmental Threats.
- 2.06 Yacov Tsur and Amos Zemel - Endogenous Recombinant Growth.
- 3.06 Yuval Dolev and Ayal Kimhi – Survival and Growth of Family Farms in Israel: 1971-1995.
- 4.06 Saul Lach, Yaacov Ritov and Avi Simhon – Longevity across Generations.
- 5.06 Anat Tchetchik, Aliza Fleischer and Israel Finkelshtain – Differentiation & Synergies in Rural Tourism: Evidence from Israel.
- 6.06 Israel Finkelshtain and Yael Kachel – The Organization of Agricultural Exports: Lessons from Reforms in Israel.
- 7.06 Zvi Lerman, David Sedik, Nikolai Pugachev and Aleksandr Goncharuk – Ukraine after 2000: A Fundamental Change in Land and Farm Policy?
- 8.06 Zvi Lerman and William R. Sutton – Productivity and Efficiency of Small and Large Farms in Moldova.
- 9.06 Bruce Gardner and Zvi Lerman – Agricultural Cooperative Enterprise in the Transition from Socialist Collective Farming.
- 10.06 Zvi Lerman and Dragos Cimpoiu - Duality of Farm Structure in Transition Agriculture: The Case of Moldova.
- 11.06 Yael Kachel and Israel Finkelshtain – Economic Analysis of Cooperation In Fish Marketing. (Hebrew)
- 12.06 Anat Tchetchik, Aliza Fleischer and Israel Finkelshtain – Rural Tourism: Development, Public Intervention and Lessons from the Israeli Experience.
- 13.06 Gregory Brock, Margarita Grazhdaninova, Zvi Lerman, and Vasilii Uzun - Technical Efficiency in Russian Agriculture.

- 14.06 Amir Heiman and Oded Lowengart - Ostrich or a Leopard – Communication Response Strategies to Post-Exposure of Negative Information about Health Hazards in Foods
- 15.06 Ayal Kimhi and Ofir D. Rubin – Assessing the Response of Farm Households to Dairy Policy Reform in Israel.
- 16.06 Iddo Kan, Ayal Kimhi and Zvi Lerman – Farm Output, Non-Farm Income, and Commercialization in Rural Georgia.
- 17.06 Aliza Fleishcer and Judith Rivlin – Quality, Quantity and Time Issues in Demand for Vacations.
- 1.07 Joseph Gogodze, Iddo Kan and Ayal Kimhi – Land Reform and Rural Well Being in the Republic of Georgia: 1996-2003.
- 2.07 Uri Shani, Yacov Tsur, Amos Zemel & David Zilberman – Irrigation Production Functions with Water-Capital Substitution.
- 3.07 Masahiko Gemma and Yacov Tsur – The Stabilization Value of Groundwater and Conjunctive Water Management under Uncertainty.
- 4.07 Ayal Kimhi – Does Land Reform in Transition Countries Increase Child Labor? Evidence from the Republic of Georgia.
- 5.07 Larry Karp and Yacov Tsur – Climate Policy When the Distant Future Matters: Catastrophic Events with Hyperbolic Discounting.
- 6.07 Gilad Axelrad and Eli Feinerman – Regional Planning of Wastewater Reuse for Irrigation and River Rehabilitation.
- 7.07 Zvi Lerman – Land Reform, Farm Structure, and Agricultural Performance in CIS Countries.
- 8.07 Ivan Stanchin and Zvi Lerman – Water in Turkmenistan.
- 9.07 Larry Karp and Yacov Tsur – Discounting and Climate Change Policy.
- 10.07 Xinshen Diao, Ariel Dinar, Terry Roe and Yacov Tsur – A General Equilibrium Analysis of Conjunctive Ground and Surface Water Use with an Application To Morocco.
- 11.07 Barry K. Goodwin, Ashok K. Mishra and Ayal Kimhi – Household Time Allocation and Endogenous Farm Structure: Implications for the Design of Agricultural Policies.
- 12.07 Iddo Kan, Arie Leizarowitz and Yacov Tsur - Dynamic-spatial management of coastal aquifers.
- 13.07 Yacov Tsur and Amos Zemel – Climate change policy in a growing economy under catastrophic risks.



- 14.07 Zvi Lerman and David J. Sedik – Productivity and Efficiency of Corporate and Individual Farms in Ukraine.
- 15.07 Zvi Lerman and David J. Sedik – The Role of Land Markets in Improving Rural Incomes.
- 16.07 Ayal Kimhi – Regression-Based Inequality Decomposition: A Critical Review And Application to Farm-Household Income Data.
- 17.07 Ayal Kimhi and Hila Rekah – Are Changes in Farm Size and Labor Allocation Structurally Related? Dynamic Panel Evidence from Israel.
- 18.07 Larry Karp and Yacov Tsur – Time Perspective, Discounting and Climate Change Policy.
- 1.08 Yair Mundlak, Rita Butzer and Donald F. Larson – Heterogeneous Technology and Panel Data: The Case of the Agricultural Production Function.
- 2.08 Zvi Lerman – Tajikistan: An Overview of Land and Farm Structure Reforms.
- 3.08 Dmitry Zvyagintsev, Olga Shick, Eugenia Serova and Zvi Lerman – Diversification of Rural Incomes and Non-Farm Rural Employment: Evidence from Russia.
- 4.08 Dragos Cimpoies and Zvi Lerman – Land Policy and Farm Efficiency: The Lessons of Moldova.
- 5.08 Ayal Kimhi – Has Debt Restructuring Facilitated Structural Transformation on Israeli Family Farms?.
- 6.08 Yacov Tsur and Amos Zemel – Endogenous Discounting and Climate Policy.
- 7.08 Zvi Lerman – Agricultural Development in Uzbekistan: The Effect of Ongoing Reforms.
- 8.08 Iddo Kan, Ofira Ayalon and Roy Federman – Economic Efficiency of Compost Production: The Case of Israel.
- 9.08 Iddo Kan, David Haim, Mickey Rapoport-Rom and Mordechai Shechter – Environmental Amenities and Optimal Agricultural Land Use: The Case of Israel.
- 10.08 Goetz, Linde, von Cramon-Taubadel, Stephan and Kachel, Yael - Measuring Price Transmission in the International Fresh Fruit and Vegetable Supply Chain: The Case of Israeli Grapefruit Exports to the EU.
- 11.08 Yuval Dolev and Ayal Kimhi – Does Farm Size Really Converge? The Role Of Unobserved Farm Efficiency.
- 12.08 Jonathan Kaminski – Changing Incentives to Sow Cotton for African Farmers: Evidence from the Burkina Faso Reform.
- 13.08 Jonathan Kaminski – Wealth, Living Standards and Perceptions in a Cotton Economy: Evidence from the Cotton Reform in Burkina Faso.

- 14.08 Arthur Fishman, Israel Finkelshtain, Avi Simhon & Nira Yacouel – The Economics of Collective Brands.
- 15.08 Zvi Lerman - Farm Debt in Transition: The Problem and Possible Solutions.
- 16.08 Zvi Lerman and David Sedik – The Economic Effects of Land Reform in Central Asia: The Case of Tajikistan.
- 17.08 Ayal Kimhi – Male Income, Female Income, and Household Income Inequality in Israel: A Decomposition Analysis
- 1.09 Yacov Tsur – On the Theory and Practice of Water Regulation.
- 2.09 Yacov Tsur and Amos Zemel – Market Structure and the Penetration of Alternative Energy Technologies.
- 3.09 Ayal Kimhi – Entrepreneurship and Income Inequality in Southern Ethiopia.
- 4.09 Ayal Kimhi – Revitalizing and Modernizing Smallholder Agriculture for Food Security, Rural Development and Demobilization in a Post-War Country: The Case of the Aldeia Nova Project in Angola.
- 5.09 Jonathan Kaminski, Derek Headey, and Tanguy Bernard – Institutional Reform in the Burkinabe Cotton Sector and its Impacts on Incomes and Food Security: 1996-2006.
- 6.09 Yuko Arayama, Jong Moo Kim, and Ayal Kimhi – Identifying Determinants of Income Inequality in the Presence of Multiple Income Sources: The Case of Korean Farm Households.
- 7.09 Arie Leizarowitz and Yacov Tsur – Resource Management with Stochastic Recharge and Environmental Threats.
- 8.09 Ayal Kimhi - Demand for On-Farm Permanent Hired Labor in Family Holdings: A Comment.
- 9.09 Ayal Kimhi – On the Interpretation (and Misinterpretation) of Inequality Decompositions by Income Sources.
- 10.09 Ayal Kimhi – Land Reform and Farm-Household Income Inequality: The Case of Georgia.
- 11.09 Zvi Lerman and David Sedik – Agrarian Reform in Kyrgyzstan: Achievements and the Unfinished Agenda.
- 12.09 Zvi Lerman and David Sedik – Farm Debt in Transition Countries: Lessons for Tajikistan.
- 13.09 Zvi Lerman and David Sedik – Sources of Agricultural Productivity Growth in Central Asia: The Case of Tajikistan and Uzbekistan.
- 14.09 Zvi Lerman – Agricultural Recovery and Individual Land Tenure: Lessons from Central Asia.

- 15.9 Yacov Tsur and Amos Zemel – On the Dynamics of Competing Energy Sources.
- 16.09 Jonathan Kaminski – Contracting with Smallholders under Joint Liability.
- 1.10 Sjak Smulders, Yacov Tsur and Amos Zemel – Uncertain Climate Policy and the Green Paradox.
- 2.10 Ayal Kimhi – International Remittances, Domestic Remittances, and Income Inequality in the Dominican Republic.
- 3.10 Amir Heiman and Chezy Ofir – The Effects of Imbalanced Competition on Demonstration Strategies.
- 4.10 Nira Yacouel and Aliza Fleischer – The Role of Cybermediaries in the Hotel Market.
- 5.10 Israel Finkelshtain, Iddo Kan and Yoav Kislev – Are Two Economic Instruments Better Than One? Combining Taxes and Quotas under Political Lobbying.
- 6.10 Ayal Kimhi – Does Rural Household Income Depend on Neighboring Communities? Evidence from Israel.
- 7.10 Anat Tchetchik, Aliza Fleischer and Israel Finkelshtain – An Optimal Size for Rural Tourism Villages with Agglomeration and Club-Good Effects.
- 8.10 Gilad Axelrad, Tomer Garshfeld and Eli Feinerman – Agricultural Utilization of Sewage Sludge: Economic, Environmental and Organizational Aspects. (Hebrew)