

השבת קולחים לשימושים חקלאיים

ואקולוגיים:

שיקולים כלכליים, סביבתיים וארגוניים.

חיבור לשם קבלת תואר דוקטור לפילוסופיה

מאת:

גלעד אקסלרד

הוגש לסינט של האוניברסיטה העברית בירושלים

פברואר, 2007

עבודה זו נעשתה בהדרכתו של פרופ' פיינרמן אלי.

תוכן עניינים

-4-	רשימת טבלאות
-5-	רשימת איורים
-5-	רשימת תרשימים
6	פרק 1: מבוא
6	1.1 משבר המים
7	1.2 המסגרות המוסדיות והאדמיניסטרטיביות; מחלוקות עיקריות במשק המים
10	1.3 מי קולחים
14	1.4 המחקר הנוכחי
20	פרק 2: סקירת ספרות
20	2.1 משק המים בישראל
21	2.2 ההיבט הכלכלי, הסביבתי והארגוני
24	2.3 שיטות הקצאה
32	2.4 נתונים אמפיריים - מקורות
34	פרק 3: מודל תכנון אזורי להשבת קולחים לצרכי השקיה חקלאית ושיקום נחל
34	3.1 כללי
35	3.2 מסגרת כללית, הסמלה והנחות
40	3.3 ניסוח בעיית המתכנן המרכזי
51	3.4 תוצאות אמפיריות
58	3.5 ניתוח תוצאות מודל האופטימיזציה האזורי
	פרק 4: הקצאת רווחים בין היחידות הכלכליות לפי עקרונות מתחום תורת המשחקים הקואליציוניים
63	4.1 כללי
63	4.2 משתתפי המשחק האזורי
65	4.3 המודל הקואליציוני – מסגרת מושגית
65	4.4 פונקצית תוספת הרווח (v)
68	4.5 ליבת המשחק
74	4.6 פתרונות הגרעין והגרעינון

77	4.7 ערכי שפלי (SHAPLEY VALUES).....
79	4.8 סיכום.....
80	פרק 5: הקצאת תוספת הרווח משיתוף פעולה אזורי בתנאי חוסר וודאות.....
80	5.1 כללי.....
81	5.2 חלופה מיטבית - שלב א': מסגרת מושגית.....
92	5.3 חלופה מיטבית - שלב ב': מסגרת מושגית.....
98	5.4 תוצאות אמפיריות.....
106	5.5 חלופה ב' – מסגרת מושגית.....
116	5.6 תוצאות אמפיריות חלופה ב'.....
121	5.7 השוואה בין החלופות.....
125	פרק 6: סיכום ומסקנות.....
134	רשימת ספרות.....
134	ספרות אנגלית.....
141	ספרות עברית.....
145	נספח לפרק 3: תחשיבים.....
148	נספח לפרק 4: קדקודי הליבה.....

רשימת טבלאות

8	טבלה 1.1 : הקצאת וצריכת מים בחקלאות לפי איכויות (מלמ"ק)
36	טבלה 3.1 : הקצאות המים האפשריות באזור - הסמלות (מ"ק)
50	טבלה 3.2 : בעיית ההשאה האזורית
54	טבלה 3.3 : מאפייני קבוצות החקלאים השונות
55	טבלה 3.4 : פרוט עלויות הקמת תשתיות הולכה ושדרוג המט"ש הקיים (ש)
57	טבלה 3.5 : ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות (מיליוני ש)
59	טבלה 3.6 : מחירי צל למגבלות המים עבור הצרכנים החקלאיים (ש/מ"ק)
60	טבלה 3.7 : הקצאת חלופות מים לשחקן מספר 3 בחלופות השונות (מ"ק)
60	טבלה 3.8 : הקצאת חלופות מים לשחקן מספר 4 בחלופות השונות (מ"ק)
61	טבלה 3.9 : הקצאת שטחי הקרקע לגידולים השונים בחלופות הקיצוניות (דונם)
69	טבלה 4.1 : ליבת המשחק האזורי
71	טבלה 4.2 : אוספים מאוזנים ומשקלות מאוזנים למשחק השיתופי- אזורי
76	טבלה 4.3 : פתרון הקצאת הגרעין
77	טבלה 4.4 : פתרון הקצאת הגרעינון
79	טבלה 4.5 : סכמת הקצאת ערכי שפלי
80	טבלה 4.6 : ריכוז פתרונות ההקצאה (במיליוני ש)
99	טבלה 5.1 : ערכי הפרמטרים של החקלאים השונים (עבור $i=3,4$)
123	טבלה 5.2 : הקצאת תוספת התועלת ליחידות הכלכליות (במיליוני ש)
125	טבלה 5.3 : הקצאת תוספות הרווח האופטימאליות ליחידות הכלכליות (במיליוני ש)
128	טבלה 6.1 : התפלגות פתרונות ההקצאה (במיליוני ש)
129	טבלה 6.2 : חלקם של פתרונות ההקצאה מהתחום העליון
131	טבלה 6.3 : הקצאת תוספות הרווח האופטימאליות ליחידות הכלכליות (במיליוני ש)

נספחים

148	טבלה 4.4.1 : קדקודי ליבת המשחק השיתופי – אזורי
-----	--

רשימת איורים

- איור 5.1 : הקצאת קולחים אופטימאלית לחקלאים כפונקציה של דיווחיהם 101
- איור 5.2 : תשלומי ההעברה האופטימאליים למנהלת הנחל כפונקציה של טיפוסיהם 102
- איור 5.3 : תועלות החקלאים לקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם 103
- איור 5.4 : תועלות החקלאים משימוש בקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם (לאחר
תשלומי ההעברה) 104
- איור 5.5 : תועלת מנהלת הנחל מהתקשרות עם החקלאים, כפונקציה של W_2 בתחום
 $0 \leq W_2 \leq K$ 105

חלופה ב'

- איור 5.6 : הקצאת קולחים אופטימאלית לחקלאים כפונקציה של דיווחיהם 119
- איור 5.7 : תשלומי ההעברה האופטימאליים לעיר כפונקציה של טיפוס החקלאים 119
- איור 5.8 : תועלות החקלאים לקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם 120
- איור 5.9 : תועלות החקלאים משימוש בקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם (לאחר
תשלומי ההעברה) 121

רשימת תרשימים

- תרשים 3.1 : סכמת חלופות ההתארגנות האפשריות באזור 37

פרק 1: מבוא

1.1 משבר המים

משק המים בישראל מצוי בעיצומו של משבר, שמאפייניו הבולטים הם מחסור גובר במים שפירים, ירידה באיכויות מי האקוויפרים (עליה במליחות) וזיהום נחלים ונהרות עקב זרימת שפכים לא מטופלים של המגזר העירוני, התעשייתי והאגרוכימיקלי (Zaslavski, 2001). המדיניות המוסכמת על מקבלי ההחלטות, של שמירת איזון לאורך זמן בין זמינות המים לבין ניצול מקורות המים, אינה עולה בקנה אחד עם לחץ צרכני המים ובמיוחד הלחץ מצד צרכני המגזר החקלאי.

ביטוי כמותי מרכזי של המשבר, היא הירידה החדה ביכולת שאיבת מי התהום ומי הכנרת מבלי לחצות קווים אדומים מוגדרים [ראה: נציבות המים (2002); זסלבסקי (2002); גבירצמן (2002)], כשהמגזר החקלאי סופג את מירב הקיצוצים במכסות השימוש. מאחר ומקורות המים הטבעיים בישראל מנוצלים ביתר, עיקר תשומת הלב מתמקדת בפיתוח מקורות מים חלופיים, קרי: התפלת מי-ים ומחזור מי שפכים עירוניים ותעשייתיים. היצע השפכים המטוהרים צפוי לגדול כתוצאה מגידול באספקת המים למגזרים העירוניים והתעשייתיים המתפתחים וכתוצאה מכך, תהיה התרחבות של השימוש במים מושבים לצרכים של השקיה ושיקום נחלים.

מעבר המגזר החקלאי משימוש במים שפירים לשימוש במים מושבים דורש פיתוח נרחב של מתקני טיהור לשפכים בטוחים לסביבה, מערכות הובלה ושטחי איגום. קצב המעבר מהשקיה במים שפירים להשקיה במים מושבים במגזר החקלאי הוא איטי, והקיצוצים הדרסטיים באספקת המים השפירים, אינם מלווים עדיין בהמתם המלאה במים מושבים.

גורמים רבים תורמים למשבר המים: הגידול המתמיד באוכלוסייה ובצריכה העירונית; התרחבות הצריכה התעשייתית; תהליכי עיור מואצים במרכז הארץ שבגינם יותר ויותר שטחים פתוחים מתכסים באספלט ("שלמת בטון ומלט") וכתוצאה מכך קטן חלחול מי הגשמים אל האקוויפרים

(Yaron, 1997); העברת מים שפירים למדינת ירדן כנדרש בהסכם השלום (כ- 50 מלמ"ש) ושאיבת יתר מאקוויפר ההר המערבי ע"י הפלשתינאים.

גורם מכריע נוסף התורם למשבר הוא מערכת מוסדית ואדמיניסטרטיבית לא יעילה של הקצאה ופיקוח על המים ודרך התנהלות לקויה של מקבלי ההחלטות (ראה הרחבה בנושא בסעיף 1.2).

המחקר הנוכחי יתמקד בניתוח ההיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הכרוכים בהשבת מי קולחים עירוניים לצורך שימוש חקלאי ואקולוגי (שיקום נחלים) ברמה האזורית. תשומת לב מיוחדת תינתן ליחסים שבין העיר, יצרנית הקולחים, לבין חקלאי הסביבה ונהר, צרכני הקולחים, תוך הדגשת חלופות שונות להקצאת עלויות ורווחים בין היחידות הכלכליות הנבחנות. הניתוחים יתבצעו בהתייחס למספר חלופות ארגוניות: הקצאה על-ידי מתכנן מרכזי, הקצאת מגשר אובייקטיבי מוסכם מראש, שיכול להציע מספר חלופות הקצאה, שתתבססנה על עקרונות הקצאה מקובלים מתחום המשחקים השיתופיים (רציונאלית אישית וקבוצתית, יעילות, סימטריות ועוד), והקצאת חוזה התקשרות בין היחידות הכלכליות. הממצאים האנליטיים ייושמו לאזור השרון שבמרכז הארץ.

1.2 המסגרות המוסדיות והאדמיניסטרטיביות; מחלוקות עיקריות במשק המים

אין בעלות פרטית על המים בישראל. מכוח חוק המים משנת 1959 כל מקורות המים הם בבעלות ציבורית וניצולם נשלט על-ידי נציב המים. חברה ממשלתית אחת, "מקורות", מפעילה את המוביל הארצי¹ ומספקת כ- 60% מסך אספקת המים השפירים וכ- 65% מסך כמות המים השוליים (כולל קולחי השפד"ן), היתרה מסופקת על-ידי מפיקים פרטיים ואגודות מים אזוריות ומוניציפאליות.

ההקצאה היא מנהלתית: נציבות המים מנפיקה אישורי הפקה לספקי המים לצד הקצאת כמויות מים (מכסות) לצרכנים. בעבר, מכסות אלו שימשו כגורם המגביל את השימוש החקלאי במים, אך

¹ המוביל הארצי מופעל משנת 1964, הוא מורכב מתעלות וצינורות ותוכנן כך שיוכל להוביל את המים מצפון הארץ המשופע במקורות מים תוך הזרמת מי נהר הירדן מימת הכנרת אל מרכז הארץ ואל הנגב המדברי ובכך לאפשר התיישבות באזור צחיח זה. ייחוד המוביל הארצי, מעבר להעברת מים מהצפון לדרום הצחיח, הוא יכולתו התפעולית לחבר בין כל שלושת מקורות המים העיקריים למערכת אחת (Kislev, 1993). במהלך חודשי החורף מים נשאבים ומועברים מימת הכנרת אל אקוויפרי החוף וההר, על מנת לחדש את מלאי המים שלהם. במהלך חודשי הקיץ (מאי- נובמבר) נשאבים מים הן מימת הכינרת והן מהאקוויפריים למטרות השקיה חקלאית בכל חלקי הארץ.

כבר למעלה מעשור, עם עליית מחירי המים וירידת מחירי התוצרת החקלאית, לא ניצל המגזר החקלאי את מלוא ההקצאה שניתנה לו, כפי שמוצג בטבלה מספר 1.1 להלן. לעומת זאת, משקי הבית לא הוגבלו בצריכת המים והמכסות הרשמיות למגזר זה בוטלו לפני מספר שנים רב. חוקי המים הנוכחיים אינם מאפשרים סחר במכסות המים והעברת זכויות במים הן בתוך כל מגזר והן בין מגזרים שונים דוגמת החקלאות והתעשייה.

טבלה 1.1: הקצאת וצריכת מים בחקלאות לפי איכויות (מלמ"ק)

שנה	קולחים	שפד"ן	מליחים + שיטפונות	סך מים שוליים	סך מים שפירים	סך שפירים + שוליים
ממוצע 1996-1998	133.2	116.9	175.6	425.7	1089	1,514.7
1999	130	125.9	150.6	416	888.2	1,304.2
				439.3	823.7	1,263
	148	137.5	154.8	440.3	824.3	1,264.6
2000		118.3		433.7	755.8	1,189.5
	143.1	116.6	148.6	408.3	729.1	1,137.4
2001	149.9	135.2	175.3	460.4	608.7	1,069.1
	144.5	121.9	192.3	458.7	563.2	1,021.9
*2002		286	200	486	535	1,021
*2003		285	198	483	563	1,046
*2004		327	237	564	566	1,130

מקור הנתונים: דין וחשבון מסכם של הוועדה לעניין מחירי המים לחקלאות, 2003; * נתוני צריכה בפועל של נציבות המים, אגף ניהול הצריכה, 2005.

תהליכי קבלת ההחלטות וגיבוש מדיניות לניהול משק המים נערכים בפורומים רבים, אשר מושפעים במידה רבה מקבוצות אינטרסים שכל אחת מהן מבקשת לשרת את העדפותיה הפרטיות (הצרות) באופן הטוב ביותר האפשרי (Soffer, 2001). באופן רשמי, גיבוש מדיניות מתאימה עבור משק המים נתונה בידי של **שר התשתיות** או **שר החקלאות**, תלוי בהרכב הקואליציוני של הממשלה. **מועצת המים** היא ישות לאומית הממונה על-ידי הממשלה ותפקידה לייעץ לשר החקלאות במגוון נושאי המים כולל תמחור המים.

נציבות המים אחראית לנושא ניהול מערכת המים, גם היא ממונה על-ידי הממשלה ובראשה נציב המים. נציבות המים מנפיקה אישורי ייצור (הפקה) לספקי המים לצד הקצאת כמויות מים (מכסות) לצרכנים החקלאים, כאשר ההקצאה האחרונה נעשית בתאום ובאישור **משרד החקלאות**. חברת **מקורות** היא חברת המים הממשלתית בישראל, אחראית על רוב אספקת המים

(למעלה מ- 60%) במדינה ותחזוקת הפעילויות, כולל הפעלת המוביל הארצי והשפד"ן². **משרד הבריאות** אחראי להגדרת תקני הטיהור לכל סוגי המים ושימושיהם, כולל פיקוח על השקיה במים מושבים מעל אקוויפרים ו**משרד איכות הסביבה** אחראי על מניעת זיהום הסביבה והגנה בפני זיהום מקורות המים. **משרד הפנים** מפקח על פעילויות המים והביוב של הרשויות המקומיות. **משרד האוצר** אחראי על התקציב הכולל ולהקצאת מקורות פיננסיים (כולל מתן סובסידיות) לנושאי המים ולחברת מקורות. שינויים מבניים ופיתוחים גדולים (דוגמת טיהור שפכים מסיבי והתפלת מי-ים) אינם יכולים להתבצע ללא אישור משרד האוצר. בפורומים המקבלים החלטות הקשורות למשק המים בישראל נוטלים חלק גם מנהלת הביוב הארצית, רשויות הנהרות והנחלים, וועדות הכספים והכלכלה של הכנסת, קרן קיימת לישראל, מנהל מקרקעי ישראל ונציגי צרכני המגזר החקלאי.

תהליך קבלת ההחלטות לקוי. ריבוי הישויות המטפלות בנושא תוך ניגודי אינטרסים גורם לחוסר סינכרוניזציה ופיצול ביניהן; דבר אשר פוגם במתן מענה למרכיבים ולצרכים השונים במערכת המורכבת של משק המים בישראל.

² השפד"ן הוא מתקן טיהור שפכים עירוניים ותעשייתיים של אזור המטרופולין של תל-אביב (הכולל יותר מ-30% מאוכלוסיית המדינה) ואחראי להעברת המים המטוהרים לאזור הדרום (הנגב המערבי והצפוני) לשימושים חקלאיים.

רקע כללי

מקור השפכים למתקן טיהור השפכים (מט"ש), הינו בפעילות היומיומית של משקי הבית (שפכים עירוניים) ובתהליכי ייצור תעשייתיים (שפכים תעשייתיים). השפכים התעשייתיים הם בעלי שונות גבוהה במרכיביהם ומכילים ריכוזים גבוהים יחסית של מתכות כבדות, דטרגנטים וחומרים רעילים התלויים בסוג התעשייה ובתהליכי הייצור. הרכב השפכים העירוניים אחיד הרבה יותר.

שני סוגי השפכים מתנקזים למערכת ביוב אחת. עובדה זו מחייבת טיפול מוקדם בשפכים התעשייתיים טרם הגעתם למט"ש, הפחתת ריכוזי המזהמים ונטרול רעלנים, בכדי לאפשר טיפול משותף ושימוש בטוח בקולחים. המחקר הנוכחי יתמקד רק בשפכי משקי הבית, מתוך הנחה של "אבדן זהות" של שפכי התעשייה לאחר הטיפול המקדים, לפני הזרמתם למערכת הביוב.

תהליכי הטיפול בשפכים לרמות טיהור עיקריות

תהליך טיהור השפכים כולל שילוב אמצעים פיזיים, כימיים, ביולוגיים ופיסיקליים. בהתאם למרכיבי השפכים ייבחר השילוב המתאים לסילוק ו/או הקטנת אותם מרכיבים, אשר אינם רצויים למטרת השימוש הנבחר. באופן כללי, נהוג למיין את רמות הטיפול בשפכים לארבע קבוצות עיקריות³ (ראה: Haruvy, 1997; דו"ח הועדה למים נחותים ע"י נציבות המים, 1999; גבירצמן, 2002):

- א. טיפול קדם: בסוג טיפול זה מורחקים גופים גדולים מהשפכים, הרחקה פיזית באמצעות מגובים. בנוסף, הרחקת חול, גרוסת וכיו"ב כל זאת באגן שקוע מיוחד.
- ב. טיפול ראשוני: הרחקה גרביטציונית; תהליך פיסיקלי להרחקת חומר מרחף (אורגני ואאורגני) ע"י שיקוע ו/או פלוטציה. התהליך יעיל גם להרחקת חלק מהחנקן האורגני, זרחן אורגני ומתכות כבדות מסוימות.
- ג. טיפול שניוני: בעיקר הרחקת חומר אורגני מהשפכים ולעיתים גם חנקן וזרחן.

³ דרך נוספת למיון רמות הטיפול, מתבצעת ע"י אופי הטיפול: טיפול ביוכימי, טיפול כימי פיסיקלי, טיפול קרקע.

במרבית המקרים מבוסס טיפול זה על תהליכים ביולוגיים, אותם ניתן לסווג לתהליכים הכוללים נוכחות חמצן ולתהליכי טיפול ללא נוכחות חמצן.

ד. טיפול מתקדם: בחלק מהמקורות מוכר גם כטיפול שלישוני ורבעוני, כולל מגוון רחב של תהליכים, דוגמת: סינון גרנולרי, ניטריפיקציה – דניטריפיקציה, הרחקת זרחן, קואגולציה ושיקוע כימי, ספיחה על פחם פעיל, מחליף יונים, חיטוי, טיפולים ממברנלים ועוד.

כיום, עיקר השימוש בקולחים הוא בדרום הארץ (קולחי השפד"ן). במרכז הארץ מקור ההשקיה בקולחים הוא ממכונני טיהור שאינם קשורים לשפד"ן ועיקרם מופנה לגידולי הדירים שמרביתם מושקים בשפכים המטוהרים לרמת איכות שניונית (כ- 1/3 מסך הכמות הארצית) ולהשקיית גדי"ש (כ- 22% מסך הכמות הארצית). גידולי הפרחים, אשר כ- 46% מסך התפוקה הארצית שלהם מיוצרת במרכז הארץ, אינם מושקים כלל בקולחים בגין מגבלות השקיה המחייבות שימוש במים מאיכות גבוהה.

יתרונות וחסרונות של השקיה במי קולחים

סעיף זה יסכם את היתרונות והחסרונות העיקריים הכרוכים בהשקיה חקלאית במי קולחים.

יתרונות:

א. היצע מים נוסף ויציב לחקלאות: השפכים היוצאים מהעיר אל פתח מתקן הטיהור תלויים, כמובן, בסך תצרוכת המים העירונית. התצרוכת של מים שפירים לנפש במגזר העירוני קשיחה ועומדת על ממוצע שנתי של כ- 110 מ"ק לשנה לנפש⁴. (ראה: **הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, 2001**; דו"ח הועדה למים נחותים ע"י נציבות המים, 1999; **נציבות המים, 2002**). היצע השפכים יציב על פני זמן וחוסר הודאות באשר לכמויות השפכים המגיעות למתקן הטיהור⁵ הינה זניחה. באמצעות טיהור מתאים, ניתן לנצל היצע נוסף זה, בעל פוטנציאל מחזור הנע בין 60%-70% (מסך השימושים הביתיים) להשקיה חקלאית ולשיקום נחלים (Kislev, 2002).

ב. רמת טיהור גבוהה של השפכים מקטינה את החשש לזיהום⁶ של האקוויפרים כתוצאה מהשקיה חקלאית ומאפשרת השקיה של מגוון רחב של גידולים חקלאיים.
ג. השוואת עלות חלופית: עלות השבת מי קולחים היא הזולה ביותר מבין חלופות היצע המים שאינם קונבנציונאליים, קרי: התפלת מים מליחים והתפלת מי ים, יבוא מים מתורכיה (Yaron, 1997).

ד. דישון: מי הקולחים, ברמות טיהור מסוימות, מכילים מרכיבי הזנה⁷ הנספגים בקרקע וזמינים לקליטה עבור שורשי הגידולים השונים. דהינו, השקיה במי קולחים עשויה לצמצם את עלויות הדישון היקרות [Haruvev et al. 1997, 1999 (b)].

חסרונות:

א. בעיית רשת ההולכה: על מנת שהשפכים המטוהרים לא ימהלו עם המים השפירים, צריך להקים תשתית ורשת הולכה נפרדת לקולחים, שעלותם עלולה להיות גבוהה.

⁴ כולל השקית גינות ציבוריות, בריכות ציבוריות (ופרטיות) וכיו"ב.

⁵ הסיבה לשימוש בכמות מים זו לנפש ולא גבוהה יותר, אשר יכולה, כביכול לשקף רמת חיים גבוהה יותר היא ההנחה להכוונה ממשלתית לצריכה נמוכה למים. בתקופות שחונות ניתן אף לצפות לרמת צריכה נמוכה יותר מ- 100 מ"ק לשנה לנפש (Yaron, 1997).

⁶ נציין כי לקרקע ולגידולים החקלאיים תפקיד מכריע בנושא זה, שניהם משמשים "מסננים ביולוגיים" ומונעים חלחול חנקן, חומרי מזון ומזהמים למיניהם לתוך מי התהום.

⁷ חנקן בעיקר, אך יש לסייג, כי הורדת עלויות הדישון היא סלקטיבית ותלויה במרכיבי הקולחים וסוג הטיפול.

- ב. בעיית אגירה: בעוד שהיצע הקולחים יציב על פני חודשי השנה הביקוש החקלאי למים הוא גמיש ועונתי. בעיה עיקרית בהקצאת קולחים לחקלאות היא בעיית האגירה בחורף. הקצאת שטחי קרקע לאגירה כרוכה כמובן בעלות אלטרנטיבית גבוהה. בעיה נוספת היא של אבדן מים במאגר כתוצאה מאידוי שגם מגדיל את מליחות המים המאוחסנים.
- ג. מחלוקת בנושא הקצאת העלויות והרווחים בין העיר, יצרנית הקולחים, לבין צרכני הקולחים השונים דוגמת חקלאים, נהר, נחל וכיו"ב.
- ד. זיהום: נבחין בין הזיהומים השונים וגורמיהם;
- זיהומים העלולים לגרום למחלות באדם ובע"ח, כתוצאה משימוש בחומרי טיהור המכילים מסרטנים ורעלנים.
 - זיהום הסביבה עלול להופיע בשני מופעים עיקריים, האחד סכנת חלחול מזהמים ומלחים לאקוויפר, והשני זיהום נחלים ונהרות – פגיעה אקולוגית.
 - זיהומים העלולים לפגוע בגידולים החקלאיים, ומכאן פגיעה בהכנסות החקלאי ובענף (פגיעה בדימוי ובטיב)⁸.
 - זיהום הקרקע: קיים חשש להצטברות מזהמים בקרקע המושקית, אשר תגרום לירידה בפוריותה. לעיתים ניתן להתגבר על בעיה זו ע"י שטיפת הקרקע ממזהמים (במידה והקרקע אינה מעל מאגר של מי תהום).
- ה. הגברת הבלאי במערכות ההשקיה: בלאי צינורות, ריבוי סתימות מסננים וכיו"ב.
- ו. המלחה (תוספת כלורידים): בתהליך צריכת המים העירונית נוספים להם כ- 80-100 מיליגרם כלורידים לליטר, הניתנים לסילוק רק בהתפלה [ראה: דו"ח הועדה למים נחותים ע"י נציבות המים (1999), נציבות המים (2002)]. בעת השימוש בקולחים להשקיה, המלחים הללו פוגעים ברמת היבולים (בעיקר בגידולים הרגישים למליחות) וחלקם מגיע למי התהום וממליח את האקוויפרים (הבעיה היא בעיקר באקוויפר החוף).

⁸ בנושא זה מן הראוי להדגיש את ההתפתחויות בתחום הגנטיקה, פיתוח זנים עמידים/רגישים פחות למרכיבי הקולחים.

1.4 המחקר הנוכחי

המחסור החמור הפוקד את מקורות המים הטבעיים בישראל, דורש פיתוח מקורות חלופיים של מים לא קונבנציונאליים, בעיקר קולחים. הצפי לגידול בהיצע השפכים המטוהרים, כתוצאה מגידול באספקת המים למגזרים העירוניים והתעשייתיים המתפתחים ותכניות ההתפלה של מי ים שכבר אושרו בממשלה, יגרום להתרחבות ההשקיה במים מושבים ולשיקום נחלים. כפי שצוין, שיעור השפכים הניתנים להשבה בדרך זו מסך היצע השפכים היוצאים מהעיר הוא גבוה (70% - 60%), משך הזמן הדרוש להמרה רחבת היקף של מים שפירים במי קולחים להשקיה הוא קצר מזה הדרוש להפעלת חלופת ההתפלה בממדים גדולים היות וחלק גדול מהתשתית כבר קיים. חלופת השבת הקולחים היא גם זולה יותר מחלופת התפלת מי-ים.

מטרת המחקר הנוכחי היא לפתח וליישם מודלים, אשר יתארו את ההיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הכרוכים בהשבת מי קולחים עירוניים לצורך שימושים חקלאיים ואקולוגיים ברמה האזורית, תוך השוואת מספר חלופות להקצאת עלויות ורווחים בין היחידות הכלכליות הנבחנות (עיר, חקלאים ומנהלת נהר). תבחנה מספר חלופות ארגוניות אפשריות [מתכנן מרכזי, משא ומתן (משחק שיתופי), והתקשרות חוזית]. הממצאים האנליטיים ייושמו לאזור השרון שבמרכז הארץ.

תאור שאר פרקי עבודת המחקר

פרק 2: סקירת ספרות

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

1. סקירת ספרות בנושא משק המים בישראל המבוססת על המחקרים הבאים (רשימה חלקית):

;Soffer (2001); Kislev (2001) ; Yaron (1997) ; Di Pinto et al. (1999)

.Pereira et al. (2002)

2. דיון בהיבטים הכלכליים, סביבתיים וארגוניים הקשורים במיחזור קולחים, תוך התבססות,

בין היתר, על מחקריהם של: **Fleischer and Tsur (2000) ; Shah and Zilberman (1991)**

.Haruvy (1997) ; Haruvy et al. (1999a); Boggess et al. (1993); Loomis et al. (2000)

3. סקירת מספר סכמות הקצאה דוגמת מסחר במכסות ומסחר בזכויות מים (ראה למשל: Kislev, 2001; Sunding et al., 2002; Rosegrant et al., 2000), התערבות ממשלתית (Finkelshtain and Kislev, 1997) ורגולציית מחירים (Feinerman et al., 2001). נתמקד במודלים של תכנון משקי מורכב (ראה: Haruvy, 1998 ; Dinar and Yaron, 1986), נסקור מספר גישות מתחום המשחקים השיתופיים (הערך של שפלי, הגרעין ועוד), שיתבססו, בין היתר, על עבודותיהם של (Dinar et al. (1986; Loehman (1995; Young (1994). כמו-כן, נסקור מודלים רלוונטיים מתחום ה-Mechanism Design (ראה למשל ספריהם של Salanie, 1998 ; Fudenberg and Tirole, 1993 ; Mass-Collel, Whinston and Green, 1985).

פרק 3: מודל תכנון אזורי להשבת קולחים לצרכי השקיה חקלאית ושיקום נחל

בפרק זה מפותח מודל תכנון מתמטי המניח תנאי וודאות מלאה, שמטרתו להשיא את סך ההכנסה האזורית הכוללת, תוך כיסוי ההוצאות המשותפות הכרוכות בטיהור הקולחים (הקמת תשתיות הולכה, שדרוג מט"ש). בנוסף, ניישם את המודל לאזור השרון במרכז הארץ ונציג את התוצאות האמפיריות שנתקבלו. האזור יכול עיר (יצרנית קולחים), חקלאים קרובים לעיר וחקלאים הרחוקים ממנה ומנהלת נחל (צרכני הקולחים הפוטנציאליים).

בחלק הראשון של הפרק נתמקד בהגדרת המסגרת המושגית של מודל השיתוף האזורי, שמשלב במערכת אנדוגנית אחת את ההיבטים הכלכליים, ההנדסיים, הביולוגיים והסביבתיים הכרוכים בחלוקת מספר מקורות מים מאיכויות שונות (שפירים, קולחים) בין מספר צרכנים פוטנציאליים (שחקנים): המגזר החקלאי (השקיה) והמגזר הסביבתי (שיקום נחל), ברמה האזורית.

מודל התכנון מיושם לכל שילוב אפשרי של שחקנים (לכל קואליציה) באזור. הערך של פונקצית המטרה שמתקבל עבור כל קואליציה בניכוי ערכם העצמי⁹ (stand alone) של חברי הקואליציה מוגדר כערכה של הפונקציה האופיינית של אותה קואליציה. הפונקציה האופיינית של קואליציה במשחק שיתופי הינו מונח מתחום המשחקים השיתופיים המייצג את ערך הקואליציה במשחק ואת התמריצים להשתתפות במשחק השיתופי.

⁹ ערך (תועלת) של שחקן כאשר הוא פועל בחוסר שיתוף.

בחלקו השני של הפרק ניישם את מודל התכנון האזורי לאזור השרון שבמרכז הארץ. האזור הנבחן מכיל את מט"ש ערי כפר- סבא והוד השרון, "יצרני הקולחים" (שחקן מספר 1) ושלושה צרכני קולחים פוטנציאליים: רשות נחל הירקון, הנחל השני בגודלו בארץ (שחקן מספר 2); קבוצת חקלאים הממוקמים בסמיכות גיאוגרפית למט"ש הערים (שחקן מספר 3) וקבוצת חקלאים הממוקמים בריחוק גיאוגרפי ביחס למט"ש הערים (שחקן מספר 4). הערים מעוניינות להיפטר מהקולחים שברשותן והצרכנים הפוטנציאליים רוצים לשלב את תוספת הקולחים בתוך סל גורמי הייצור שלהם (קרקע, מכסות מים שפירים וכדומה).

בחלקו השלישי של הפרק אנו מציגים את התוצאות האמפיריות שנתקבלו מיישומו של המודל לאזור השרון הכוללות: הקצאת קולחי העיר לצרכנים השונים; הקצאת מים שפירים לקבוצת החקלאים; בחירת תמהיל הגידולים של החקלאים; ערכי הפונקציה האופיינית והקצאת סוגי המים השונים (שפירים וקולחים) בין חלקות הקרקע ובין הגידולים השונים של החקלאים.

פרק 4: הקצאת רווחים בין היחידות הכלכליות לפי עקרונות מתחום תורת המשחקים הקואליציוניים

בעיית הקצאת הרווחים, שנוצרו בגין שיתוף הפעולה האזורי בין העיר, יצרנית הקולחים, לבין צרכני הקולחים החקלאיים והאקולוגיים, מוכרת בספרות המקצועית (ראה: **Young, 1994**; **Dinar et al., 1986**) כבעיית הקצאת עלויות (cost allocation), אשר ניתן לנתח באמצעות מודלים כלכליים- מתמטיים מתחום המשחקים שיתופיים.

בפרק הנוכחי נציג מספר מושגי פתרון רלוונטיים מתחום המשחקים השיתופיים עם תשלומי צד (side payments), אשר מייצגים כללי הקצאה הוגנים (fair rules) ליחידות הכלכליות הנבחרות, תוך ניצול יתרונותיהן היחסיים. פתרונות מודל התכנון, שנתקבלו בפרק 3, ישמשו כנתונים למודלים של תורת המשחקים.

קמירות המשחק השיתופי הינה תנאי מספיק לקיומה של ליבה לא ריקה. המשחק השיתופי הנבחן אינו קמור, למרות זאת, הראנו על ידי יישום משפט **Shapley-Bondareva** כי ליבת המשחק

השיתופי הנבחן אינה ריקה. בנוסף, הוכחנו קיום ליבה לא ריקה במשחקים שיתופיים "מנורמלים אפס" בהם שחקן אחד דומיננטי (דוגמת העיר במחקר הנוכחי).

ליבת המשחק המתקבלת מכילה מספר פתרונות הקצאה אפשריים בעלי מספר תכונות רצויות: רציונאליות אישית; רציונאליות קבוצתית ויעילות. אך לאור מימדי המשחק (במרחב הארבע מימדי) קיים קושי במציאת פתרון יחיד שיהיה מקובל על כל שחקני המשחק השיתופי. בסיוע גישות פתרון דוגמת הגרעין והגרעינון¹⁰ הפחתנו את מספר אפשרויות הפתרון שמציעה הליבה לפתרון יחיד בעל תכונות ייחודיות. בנוסף, חישבנו את ערכי שפלי (Shapley value), תוך שימוש בנוסחת שפלי. ערכי שפלי הינם פתרון הקצאה הוגן ויחיד של משחקים מתחום תורת המשחקים המתייחס לאפשרויות המיקוח של כל שחקן בכל אחת מחלופות ההתארגנות, אך בניגוד לפתרון הגרעינון (והגרעין במחקר הנוכחי), ערכי שפלי אינם תלויים בקיומה של ליבה (ראה מחקריהם של **(Loehman et al., 1979 ;Young, 1994)**).

פרק 5: הקצאת תוספת הרווח משיתוף פעולה אזורי בתנאי חוסר וודאות

בחלקו הראשון של הפרק אנו מנסחים מודל התקשרות חוזית אשר מתאר את תהליך המיקוח בין היחידות הכלכליות שבאזור בתנאי חוסר וודאות ובהעדר מגשר מכל סוג שהוא (ראה למשל: **(Maskin, 2002; Feinerman and Seiler, 2002 ;Fudenberg and Tirole, 1993)**). יישומו של המודל מבוסס על הנתונים והתוצאות האופטימאליות שנתקבלו בפרקים הקודמים (פרקים 3 ו-4), להלן: "החלופה המיטבית". בחלופה המיטבית העיר, בשלב הראשון, מעבירה את כל הקולחים השלישוניים שברשותה למנהלת הנחל ובשלב השני הקולחים מועברים משפך הנחל לקבוצות החקלאים השונות.

בחלקו השני של הפרק אנו בוחנים את המקרה בו העיר מחליטה לנצל את כוחה היחסי ולפעול בצורה אופורטוניסטית ("חלופה ב'"). במקרה זה העיר משמשת כספקית הקולחים היחידה באזור הנבחן.

¹⁰ במחקר הנוכחי פתרון הגרעין והגרעינון זהים.

בחלקו השלישי של הפרק נשווה בין שתי החלופות דלעיל, תוך התייחסות להיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הכרוכים ביישום כל אחת מהחלופות.

פרק 6: סיכום ומסקנות

בפרק זה נבצע השוואה אמפירית ותיאורטית בין שיטות ההקצאה האופייניות שנותחו בפרקים הקודמים, במטרה לבחון את היתרונות והחסרונות היחסיים של כל שיטה הן מבחינת היחידות הנבחנות והן מבחינת הרווחה הכוללת. בנוסף, נגבש המלצות בדבר חלוקת תוספת הרווחים משימוש בקולחים, הנוצרת משיתוף פעולה בין היחידות הכלכליות, שתשרתנה את מקבלי ההחלטות.

סיכום

המחקר הנוכחי עוסק בבעיית שיתוף פעולה בין מספר יחידות כלכליות שונות סביב שימוש בקולחים. הקולחים עשויים לשמש את צרכני הקולחים לצרכי השקיה חקלאית (קבוצות החקלאים השונות) ו/או לצרכי שיקום נחל (מנהלת הנחל) ובאותה עת לספק תוספת הכנסה לעיר, יצרנית השפכים המטוהרים. מטרת המחקר הנוכחי היא לפתח וליישם מודלים, אשר יתארו את ההיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הכרוכים בהשבת מי קולחים עירוניים לצורך שימושים חקלאיים ואקולוגיים ברמה האזורית, תוך השוואת מספר חלופות להקצאת עלויות ורווחים בין היחידות הכלכליות הנבחנות. תבחננה מספר חלופות ארגוניות אפשריות הן בתנאי וודאות והן בתנאי חוסר וודאות.

הממצאים האנליטיים מיושמים לאזור השרון שבמרכז הארץ המאופיין במספר יחידות כלכליות הנבדלות הן בביקושים למים (מסוגים שונים) והן באופי השימוש בקולחים (השקיה, שיקום נחל, חובת סילוק).

תרומת המחקר הנוכחי מתבטאת במספר תחומים:

- בניית מודל בתנאי וודאות המשלב במערכת אנדוגנית אחת את הגישה התכנונית המכוונת להשאת תועלות אזורית משימוש בקולחים בשילוב עם גישות הקצאה אופייניות המגדירות את חלוקת התועלות. בבעיה הנוכחית, ניתן להפריד בין אופטימיזציה אזורית של הקצאת

קולחים בין היחידות הכלכליות לבין התחלקות תוספות ההכנסה הנובעות מהשיתוף. צרכני הקולחים הפוטנציאליים אינם יכולים להעביר ביניהם גורמי ייצור מוגבלים (דוגמת מכסות מים) ולכן הדרך היחידה לשמירה על מסגרת השיתוף היא באמצעות העברת תשלומי צד (הכנסות או מתן פיצוי) בין היחידות הכלכליות. העברת ההכנסות מתבצעת בנפרד ולאחר הקצאת פתרון מודל התכנון האזורי.

- בניית מודל בתנאי חוסר וודאות המשלב במערכת אנדוגנית אחת את השיקולים הכלכליים והסביבתיים הכרוכים בהשבת קולחים להשקיה חקלאית ולשיקום נחל. המודל מתרגם את תועלות היחידות הכלכליות למונחים כספיים ובכך מאפשר ליצור צמדי הקצאה "קולחים-תשלומי העברה" לכל אחת מהיחידות, תוך השאת סך תועלות האזור הנבחן.

- ניתוח המודלים דלעיל מאפשר להבין ברמה התיאורטית את (1) השפעת המעבר להשקיה בקולחים בחקלאות על תהליך קבלת ההחלטות של חקלאי יחיד הן באשר לתמהיל המים, שבו ישתמש והן באשר לבחירת מערך גידוליו; (2) השפעת המעבר לשימוש בקולחים לצרכים אקולוגיים על איכות הסביבה; (3) הבנת תהליך המשא ומתן; (4) הבנת תהליך בחירת אסטרטגיית הפעולה הרצויה של כל אחת מהיחידות הכלכליות שנבחנו ו- (5) מציאת התנאים שישפרו את רווחת היחידות הכלכליות באזור ובאותו זמן יספקו מנגנון בטחון הן לעיר והן לצרכני הקולחים, בדבר אספקת מים אמינה.

יישומם של מודלים אלו לאזור נתון יתרום להבנת השיקולים הכלכליים של שחקני האזור ולהבנת הבעייתיות הניהולית-כלכלית הכרוכה בטיהור שפכים ושימוש בהם להשקיה חקלאית ולשיקום נחל. היישום יאפשר לגבש המלצות בדבר שיטת ההקצאה הרצויה (האם רצויה התערבות מרכזית בקביעת הקצאת מי הקולחים או שמא עדיף להשאיר ליחידות הכלכליות הרלוונטיות לקבוע את ההקצאה במשא ומתן?).

פרק 2: סקירת ספרות

משק המים בישראל הוא מורכב ומגוון. חוקרים רבים, מדיסציפלינות מחקר שונות, מנסים להתמודד עם בעיות המחסור במים על ההיבטים השונים שלהן ועם פיתוח של מקורות מים חלופיים, אשר יגשרו על הפער בין הביקושים השונים להיצע. במחקר הנוכחי נשים דגש מיוחד על בחירת הכמויות והאיכויות הרצויות של מי השפכים העירוניים המטוהרים והשבתם לצורכי השקיה חקלאית ושיקום אפיק נחל. הקריטריון לבחירה יתבסס על שיקולי כדאיות כלכלית, תוך התייחסות למגבלות סביבתיות וארגוניות שונות.

2.1 משק המים בישראל

בדוח מבקר המדינה שפורסם בשנת 1990, נקבע (בין היתר) כי: "ניהול בלתי אחראי של משק המים זה 25 שנה גרם לחיסול עתודות המים של ישראל ולפגיעה חמורה באיכותם. שאיבת יתר מהמאגרים במשך שנים רבות גרמה לגירעון הידרולוגי חמור ביותר..." (מבקר המדינה, 1990). עשור מאוחר יותר מקדיש מבקר המדינה דיון נרחב לביקורת על כישלונה של הממשלה למנוע את זיהום משאבי המים של המדינה בחומרים מזהמים (מבקר המדינה, 2000).

על הניהול הכושל של משק המים במדינת ישראל מצביעים מספר חוקרים: Soffer (2001) סוקר את הגורמים הציבוריים הרבים העוסקים בניהול משק המים בישראל, ומדגיש את חוסר התיאום בתהליכי קבלת ההחלטות שלהם הפוגם ביכולת התגובה במתן מענה הולם לצרכים השונים במערכת סבוכה זו. Kislev (2001) מדגיש את ההזנחה מצד הגורמים הציבוריים. במאמרו הוא טוען כי יש צורך ברפורמה לטיפול בבעיות הרבות הכרוכות בניהול משק המים בישראל ובמתן מענה לשאיבת מי אקוויפר לא יעילה, להקצאה לא יעילה של מים לצרכנים, לפגיעה באיכויות המים ולהמלחת המאגרים הטבעיים.

קלי (1997) מתאר בספרו את ההתנצחות החריפה בין גישת הממסד החקלאי לבין גישת רוב הממסד התובע חסכנות במים, שהגיעה לשיאה לאחר הבצורות של שנות ה-90. בנוסף לניגודים הממסדיים הרבים מציג המחבר את נושא איכויות המים, תוך מתן דגש לבעיית המלחת משאבי המים הטבעיים.

Yaron (1997) סוקר את כלכלת משק המים בישראל ומונה את נזקי המלחת המקורות הטבעיים בארץ הנובעת בעיקר משאיבת היתר שלהם. **זסלבסקי (2002)** מותח ביקורת חריפה על מקבלי ההחלטות הקשורים למשק המים. בספרו הוא טוען כי המשבר הנוכחי הוא תוצאה ישירה של מדיניות קלוקלת הנעדרת תכנון ורמה מקצועית מתאימה. לדעתו ישנם מספר צעדים שיש לבצע בכדי למזער את הנזקים העלולים להיגרם בעתיד, ביניהם: שיפור איכויות המים (בעיקר קולחים); תפישת מקורות מים טבעיים נוספים והתפלת מי ים ומים מליחים. מכאן, רק שינויים ארגוניים מהותיים דוגמת הקמת רשות מרכזית למים, שתרכז בידיה את כל הסמכויות המפוזרות בין עשרה משרדי ממשלה שונים, עשויה למנוע קטסטרופה.

כאמור, מקורות המים הטבעיים בישראל מנוצלים ביתר, על- כן עיקר תשומת הלב מתמקדת בפיתוח מקורות מים לא קונבנציונאליים. **Di Pinto et al. (1999)** ו- **Pereira et al. (2002)** בוחנים במאמריהם את חלופת המעבר להשקיה חקלאית במי קולחים באזורים סמי-ארידיים (מדינות המזרח התיכון). לטענתם אין מנוס, בעיתות מחסור, משימוש במי קולחים להשקיה חקלאית. כמו-כן, הם מצביעים על הקושי במציאת ממשק השקיה אשר יוביל לשימוש יעיל במים המשיא את רווחת החקלאים, יחד עם שמירה על בריאות הציבור, איכות הגידולים והסביבה האקולוגית.

ביטוי לדרכי ההתמודדות עם המחסור הגובר במים ניתן למצוא בדו"ח הועדה למים נחותים שהוגש לנציבות המים ב- 1999 ומדו"ח מסכם לשנת 2002 של נציבות המים המציג תכנית אב (מעבר) לפיתוח משק המים לשנים 2010-2002. בדוחות אלו נצפה, בין השאר, כי היצע השפכים המטוהרים צפוי לגדול כתוצאה מגידול באספקת המים למגזרים העירוניים והתעשייתיים המתפתחים וכתוצאה מכך, תהיה התרחבות של השימוש במים מושבים להשקיה חקלאית ולצורך שיקום נחלים.

2.2 ההיבט הכלכלי, הסביבתי והארגוני

האספקטים הכלכליים של ניתוח סוגיית השבת הקולחים נדונים בספרות המקצועית בשורה רחבה של מאמרים. **Haruvy (1997)** מציגה במחקרה ניתוח עלות תועלת של השקיה במי

קולחים שמקורם במט"ש העיר רעננה, כאשר הניתוח האנליטי מיושם עבור נתוני חקלאי האזור. המאמר סוקר את יתרונות וחסרונות שיטת ההשקיה במים מושבים באזור הנחקר מול חלופת הזרמת הקולחים לדרום לצורכי השקיה ומול חלופת הסילוק לים דרך נהר. החוקרת מסיקה כי השקיה בקולחים במרכז הארץ עדיפה על פני החלופות האחרות, כאשר הקולחים המושבים להשקיה הם ברמת טיפול שניונית. במאמרה מתעלמת החוקרת במודל מהתועלת הסביבתית מסילוק הקולחים דרך הנהר לים ובנוסף אין התייחסות לעלות הפגיעה באקוויפר לאורך זמן (למשל: חלחול רעלנים, המלחה).

במאמר מוקדם יותר של **Haruvy and Sadan (1994)** משווים החוקרים בין רמת הטיהור שתבחר על ידי מתכנן חברתי, המשיא את סך תועלות החקלאים, לבין זו המתקבלת בפתרון תחרותי, המתעלם מההחצנות השליליות דוגמת פגיעה באקוויפר, בקרקע ובסביבה. החוקרים מסיקים כי באופטימום החברתי רמת הטיהור המושגת, נמוכה יותר מזו המושגת בפתרון תחרותי, הסיבה העיקרית לכך היא עלות הטיהור השולית הגבוהה, אשר אינה נלקחת בחשבון בפתרון התחרותי. בהמשך, מוצג מודל אופטימיזציה שנועד לגשר על הפער בין פתרון מתכנן מרכזי לפתרון תחרותי, ולהפנים לחקלאים את העלויות החיצוניות השליליות הכרוכות בהשקיה במי קולחים. על ידי מציאת מחיר מתאים של הקולחים להשקיה חקלאית ובהינתן רמת הטיהור המושגת בפתרון החברתי, יבחר החקלאי את כמות הקולחים אשר תשיא את רווחיו.

Shah and Zilberman (1991) טוענים כי החקלאים מייחסים למים תכונות של מוצר ציבורי ולכן ינצלו את המשאב בצורה לא יעילה המתבטאת בהשקיית יתר, ניקוז גבוה, פגיעה סביבתית, פגיעה עתידית בתפוקה ופגיעה בהכנסות. המאמר מציע מדיניות של מיסוי ומחירים המיועדת להוביל את המערכת לפתרון שהוא יעיל מבחינה חברתית. מודל האופטימיזציה מיושם לנתוני אזור עמק סאן-חואקין שבקליפורניה ארה"ב (San Joaquin Valley of California). אחת המסקנות העיקריות העולה מהניתוח היא שקיים קושי לשכנע פרט בודד להתנהג בצורה אופטימאלית מבחינה חברתית, שאינה מתבססת על רציונאליות אישית צרה. כלומר, כל פרט תחרותי משיא את תועלתו האישית מבלי להתייחס לנזק המצטבר הנגרם לחברה כתוצאה מהתנהגותו זו ובכך מכלה את משאביו בצורה לא יעילה.

Haruvy et al. (1999a) טוענים כי קיים משטר דישון/השקיה אופטימאלי, אשר משלב השאת יבול חקלאי, מזעור חלחול המזהמים לאקוויפר והפחתת סיכוני זיהום הסביבה. שילוב מסוג זה כולל התייחסות למיקום האזור החקלאי, תנאי מזג האוויר, סדרת הגידולים ומיומנות אגרונומית. טענה זו באה בעקבות בדיקה אמפירית של מספר אזורים סמי – ארידיים בישראל דוגמת: רחובות, נורדיה, בית-דגן. במחקר אחר בודקים **Haruvy et al (1999b)** את התלות שבין רמת איכות הטיהור של השפכים לבין עלות הדישון. הם מפתחים מודל אופטימיזציה, המיועד לאיתור רמת טיהור השפכים החודשית האופטימאלית, אשר תשיא את רווח החקלאי. הם מצאו שככל שרמת טיהור השפכים נמוכה יותר (רמת איכות ירודה יותר של קולחים) כך עלויות הדישון נמוכות יותר, היות והקולחים מכילים יותר רכיבי דישון. בנוסף גם עלות מי ההשקיה קטנה (בהנחה כי מחיר הקולחים עולה עם רמת הטיהור). המשמעות היא הקטנת תשומות הדישון והמים השפירים באמצעות שימוש בקולחים בעלי איכות ירודה. נעיר, כי במאמר מתעלמים החוקרים מההשפעות החיצוניות השליליות הכרוכות בהשקיה בקולחים כמו זיהום אקוויפריים.

Boggess et al. (1993) סוקרים בהרחבה את נושאי כמויות ואיכויות המים בארה"ב, תוך התמקדות באספקטים הכלכליים הקשורים להשקיה חקלאית, והדגשת הנושא של בחירת שיטות ההשקיה (טכנולוגיות השקיה). המאמר דן ביתרונות שיטות ההשקיה השונות ומציג מודל אופטימיזציה הבוחן את התנהגות החקלאי בבחירת טכנולוגיית ההשקיה המתאימה עבורו. מסימולציות אמפיריות נמצא כי מעבר לטכנולוגיות השקיה מודרניות בדרך כלל גורם לחיסכון במים ובאותה עת מגדיל את היבול החקלאי. בנוסף, נמצא כי עליה במחיר התפוקה או במחיר המים יגדיל את רמת אימוץ טכנולוגיות ההשקיה המודרנית (כמובן, גם להפחתת עלויות קבועות הכרוכות בהשקיה המודרנית תהיה השפעה דומה). נעיר כי המחברים אינם דנים במי קולחים, אך מתמקדים באיכויות המים הזמינות לרבות מליחות המים. בהמשך, דנים המחברים בסוגיות איכות הסביבה וחשיבותן, כאשר מדובר בפרויקט הקשור לאספקת מים ובבעייתיות נושא העלויות והקצאתן.

על חשיבותו של נושא איכות הסביבה וערך השיקום הסביבתי ניתן ללמוד למשל מעבודתם של **Loomis et al (2000)** אשר בוחנים את המוכנות לשלם עבור שירותי איכות הסביבה. הבחינה נעשית באמצעות מודלים כלכליים המקובלים להערכת השפעות חיצוניות, דוגמת: שיטת ההערכה

המותנית (Contingent Valuation Method, CVM), בחינת המוכנות לשלם (Willingness To Pay), ושיטת המחירים ההדוניים (Hedonic Price Method-HPM). כלים אלו מיושמים למערכת איכות סביבה השוכנת לאורך רצועת נהר (Platte River), שאורכה 45 מייל המשמשת למגוון פעילויות הכוללות, בין היתר: שליטה בארוזיה, בית גידול לבע"ח ולדגה, טיהור טבעי של המים המוזרמים לאורך הנהר, מקור לסילוק שפכים, שיקום ונוף. הנדגמים נדרשו לענות על מוכנותם לשלם (דרך חשבון המים) עבור קבלת שירותי הסביבה דלעיל. תוצאות מדגם המונה כ-100 נשאלים מצביעות על מוכנות לשלם כ-\$21 בממוצע חודשי עבור שירותי המערכת האקולוגית.

מתצפיות של מחקר אחר, שנערך על-ידי **Fleischer and Tsur (2000)**, עולה כי הערך הכלכלי של שירותי נוף המיוצרים ע"י שטחים חקלאיים בעמק החולה ובעמק יזרעאל, עולה על הרווח מהמוצרים החקלאיים המיוצרים בשטחים אלו (פי 6.3 ופי 3, בהתאמה). לתצפיות אלו חשיבות רבה כאשר דנים בכללי ההקצאה השונים של תשומת המים.

בשלב פיתוח מודל התכנון המתמטי שבמסגרתו יקבע, בין היתר, מערך הגידולים האופטימאלי (שישיא את סך ההכנסה) עבור כל אחת מקבוצות החקלאים בכפיפות למגבלות של כמויות מים (שפירים וקולחים), מגבלות השקיה סביבתיות (המגלמות השפעה לטווח ארוך) המבחינות בין סוגי הגידולים והקרקות השונים ומגבלות נוספות (שטחי קרקע, עקירה, מיקום הקרקע) ובאמצעות שילוב של מודל פיזי-ביולוגי המתייחס להשפעת רמת מליחות מי ההשקיה על יבול הגידולים השונים נעזר גם בעבודותיהם של **Gisser (1970)**, **Haouari et al (2001)**.

2.3 שיטות הקצאה

שווקים למים

בשנים האחרונות העלו כלכלנים רבים (ראה למשל: **צור, 2000** ו- **כסלו, 2001**) מספר שיטות ורעיונות הקצאה חלופיים להקצאה המנהלית-פוליטית הנוכחית הגורמת לנזקים למשק המים, לחקלאות ולסביבה האקולוגית.

לצד היתרונות העיקריים של שיטת הקצאת המים הנוכחית במדינה, עבור המגזר החקלאי, נמנים: סבסוד החקלאים דרך שתי מדרגות המחיר הראשונות ויצירת מחירים אחידים בכל הארץ, דהיינו, שוויון. בצד החסרונות נמנים חוסר ההתייחסות של שיטת ההקצאה לגידול האוכלוסייה, לשינויים ביצור החקלאי, לשיפורים טכנולוגיים ולבזבוז הנגרם מאי ניצול כל המכסה בפועל על ידי החקלאי ומדרגות מחירים שאינן משקפות את העלות השולית של המים ולכן אינן יעילות כלכלית, ראה: **Yaron (1997)**.

על – ידי יצירת מנגנוני שוק שונים שיאפשרו מסחר בזכויות מים; הקמת בנק למים; מכרזי מים, והגברת יעילות השימוש במים, ניתן לשפר וליעל את ההקצאה הנוכחית כפי שמציגים המחקרים המתוארים להלן, בישראל על - פי חוק המים מ- 1959 קיים איסור למסחר בהקצאות המים בין הפרטים המחזיקים בהן.

כסלו (2001) טוען במאמרו כי מסחר בזכויות המים עשוי לשפר את יעילות השימוש במים ולהקטין את שאיבת היתר הנוכחית. במאמרם של **Sadan and Ben- Zvi (1987)** הדנים ביתרונות שיצמחו למדינת ישראל אם תתיר מסחר בזכויות מים, מדגישים החוקרים את נושא מזעור העלויות כאחד היתרונות הבולטים כתוצאה משינוי המדיניות.

על העיתוי האופטימאלי למסחר בזכויות אלו, ניתן ללמוד ממחקרו של **Kislev (2001)** הטוען כי יש מקום לסחר במכסות ובעיקר בתקופות יובש ומעבודתם של **Sunding et al. (2002)**, אשר מחזקים טענה זו, על ידי בחינת השפעת מדיניות אספקת המים של החקלאות המושקית בצל הפחתת הקצאת מים עיליים. במאמרם מוצגים מספר מודלים נומריים אשר מיושמים למפרץ סן- פרנסיסקו שבמערב ארה"ב (San- Francisco Bay). אחת המסקנות העיקריות של המודל היא שמסחר במים יגדיל את פדיון המגדלים (החקלאים), ובעיקר בתנאים בהם קיים הצורך להקטין את הקצאת המים לאזור.

מחקרים נוספים דנים ביעילות מדיניות הסחר בזכויות המים. **Rosegrant et al. (2000)** עוסקים בהערכת תועלות כלכליות משימושי המים למגזר החקלאי ולמגזר העירוני-תעשייתי, תחת כלי ניהול ביקוש שונים המיושמים לנהר בצ'ילה (Maipo River basin in Chile). החוקרים משווים בין מצב בו ניתן לסחור בזכויות במים למצב בו אין אפשרות מסחר בזכויות אלו. תוצאות המודל מצביעות על התועלת במסחר בזכויות המים והיתרון בהעברת מים לשימושים חקלאיים,

עירוניים ותעשייתיים מוערכים יותר (חוק הגרביטציה הכלכלית). נמצא כי, מסחר בזכויות המים, בעיקר בחודשים בהם אין ייצור חקלאי, משפר את מצבו של החקלאי.

Brill et al. (1995) טוענים במחקרם כי פתרון הקצאת השיטה הנוכחית הנהוגה בארץ (שיטת המכסות ומדרגות המחירים) מביאה את המשק לפתרון הטוב - השני (Second Best) ובאמצעות פתיחת שוק למים, המתיר מסחר בזכויות המים, ניתן יהיה להגיע לפתרון אופטימאלי שהוא יעיל פארטו (First Best).

בצד חסרונות שיטת מסחור זכויות המים ניתן למנות מספר גורמים אשר מסיטים את הפתרון המתקבל מפתרון אופטימאלי. **Finkelshtain and Kislev (1997)** טוענים במחקרם, כי התערבות ממשלתית מזמינה לחץ פוליטי הפוגם בוויסות ציבורי יעיל. הממצא העיקרי של מחקרם הוא שניתן למצוא העדפה ממשלתית בבחירת המדיניות המתאימה ליישום, רק כאשר מדובר בהחצנה שלילית. משטר מחירים (הטלת מס או מתן סובסידיה) או משטר כמויות (מכסות) תלויים בערכו של הגורם (Factor) המשלב בין גודל הלובי (החלק של היצרנים המאורגנים – שיעור הלחץ הפוליטי) בענף מסוים לבין הערך של גמישות הביקוש של המוצר ובין גובה שיעור המס המוטל. מסקנתם היא שמשטר מחירים יניב שיווי משקל יעיל יותר מאשר משטר של הקצאה במכסות, כאשר הגורם דלעיל יהיה קטן מ-1, אחרת משטר המכסות יהיה יעיל יותר. **כסלו (2001)** טוען כי החיסרון העיקרי בהתרת שווקים למים הוא חיזוק זכויות הקניין הפרטיות במים (בייחוד חיזוק זכות ההפקה), אשר עלולה להחליש ואף לבטל את העיקרון החוקתי הבסיסי של בעלות ציבורית על מקורות המים של המדינה. כתוצאה מכך יקטן כוחה של נציבות המים בניהול משאבי המים של המדינה ובמניעת שאיבת היתר ממאגרי המים.

במחקר הנוכחי תוצגנה מספר שיטות חלופיות להקצאת מקורות מים מוגבלים. המדיניות הנהוגה כיום היא של צימוד עלויות הטיפול בשפכי העיר, לעיר עצמה דהיינו כלל "המזהם משלם" [ראה: דו"ח הוועדה למים נחותים ע"י נציבות המים (1999); **Kislev (2002)**; **Yaron (1997)**]. דיון בנושא ניתן למצוא במאמרם של **Feinerman et al. (2001)**, במחקרם מוצגת השאלה: האם על יצרן השפכים (העיר) לשאת בעלויות הכרוכות בטיהור או שמא על החקלאים, צרכני הקולחים, ליטול חלק בעלויות אלו?; המאמר בוחן שלושה מנגנוני הקצאת מים: הקצאה על-ידי מתכנן

מרכזי, רגולציה על ידי מחירים, ומודל מיקוח המיושם לעיר אשקלון. מסקנות המודל הוא שעיקרון "המזהם משלם" אינו בהכרח יעיל, וכי ניתן להעלות את תועלות העיר והחקלאים באמצעות מסחר בקולחים.

מודלים להקצאת מי קולחים

Dinar and Yaron (1986) מפתחים מודל תכנון חד שנתי, סימולטאני בשני שלבים. בשלב הראשון הם בוחנים כדאיות של שיתוף פעולה בין העיר לבין שלוש קבוצות של חקלאים. משתני ההחלטה עבור מבנה השיתוף הקואופרטיבי כוללים: בחירת רמת טיהור השפכים, החלטה לגבי גודל מתקן הטיהור, קביעת הקצאת הקולחים בין החקלאים והקצאת עלויות ותועלות. בשלב השני, בהינתן משתני החלטה של השלב הראשון, מוצגת בעיית החלטות החקלאים הכוללת: הקצאת מים (קולחים ושפירים) בין החלקות השונות, בחירת תמהיל גידולים ובחירת טכנולוגיית השקיה. המודל האמפירי מיושם לנתוני העיר רמלה וסביבותיה. אחת ממסקנות המודל היא, ששיתוף פעולה בין כל היחידות הכלכליות עשוי להתרחש רק כאשר ישנו סבסוד ממשלתי של כ-50% מעלות הפרויקט האזורי (הכולל הקמת מט"ש). במקרה זה יצרכו כל השפכים המטופלים של העיר, יגדלו הכנסות החקלאים (בהשוואה למצב בו אין שיתוף פעולה) ונבחנת האפשרות שהחקלאים, שמצבם שופר, יפצו את העיר עבור עלויות הטיפול בשפכים.

Haruvy (1998) מציגה במחקרה מודל תכנון ליניארי. משתני ההחלטה הם רמת הטיהור של הקולחים, בחירת תמהיל הגידולים, הקצאת הקולחים לשטחי הגידולים השונים, תוך התייחסות לעלויות ההובלה, איגום, דישון, טיהור ובנוסף התייחסות לנוק העלול להתרחש: פגיעה באקוויפר, בקרקע ובבריאות. מוצגות מספר חלופות שימוש לקולחים הכוללות השקיה במרכז הארץ, סילוק לנהר והובלה לדרום, ממצאי המודל מיושמים לאזור רעננה. אחת ממסקנות המודל היא שככל שקיימת סכנת זיהום סביבה או אקוויפר באזור המרכז, כך יופנו יותר מים להשקיה חקלאית בדרום (בעיקר השקית הדירים). [לדיון נוסף בחלופות הקצאת הקולחים לשימושי השונים ראה גם **Yaron (1997)**].

ניתוח הקצאות מים באמצעות שימוש במודלים מתחום המשחקים הקואליציוניים מתמקד בניסוח כללי הקצאה הוגנים (fair rules), של סך התועלות ו/או עלויות בין היחידות הכלכליות (קבוצת השחקנים) הפועלות באזור. כללי ההקצאה לוקחים בחשבון גם את הכוח היחסי שיש לכל תת קבוצה (קואליציה).

דוגמאות לשימוש בכלים אלו ניתן למצוא בספרות העוסקת בהקצאת עלויות או רווחים של הקמת פרויקטים גדולים על ידי מספר בעלי עניין. למשל, **Young (1994)** דן בחלוקת עלויות הקמת מתקן לטיהור שפכים יחיד המשמש 18 ערים באזור מסוים בשוודיה (Skena Region). באופן כללי, במקרה זה ישנן ¹⁸2 אפשרויות הקצאה. על מנת לצמצם את טווח אפשרויות ההקצאה מחלק החוקר את 18 הערים הנבחנות ל-6 קבוצות טבעיות בעלות מאפיינים גיאוגרפיים זהים. הקצאת העלויות מתבצעת בשני שלבים. תחילה, הקצאה ל-6 הקבוצות הטבעיות ולאחריה הקצאה פנימית בין הערים המרכיבות כל אחת מקבוצות אלו.

Loehman et al. (1979) אומדים באמצעות הערך המתוקן של שפלי (Generalized Shapley) את הקצאת העלות המתקבלת מהקמת מתקן טיהור שפכים עבור 8 רשויות השוכנות לאורך נהר בארה"ב (The Meramec River Basin). יתרונות לגודל של המתקן יוצרות את התמריץ לשיתוף פעולה כללי בין כל הרשויות בהקמת מתקן יחיד, בהשוואה לאלטרנטיבה של הקמת מספר מתקנים. החוקרים מציגים את יתרונות שיטת אמידה זו על פני אמידת הקצאת הגרעינון (Nucleolus) וביניהם אופן החישוב הקל יחסית של שיטת הקצאה זו.

במאמר מאוחר יותר של **Loehman (1995)** מציגה החוקרת תיאוריות מתחום המשחקים הקואליציוניים ומיישמת אותם לווריאציות שונות של בעיות הקשורות לאספקת מים המאופיינות ביתרונות לגודל. התוצאה העיקרית של מחקרה מצביעה על כך, שהקצאת המים היעילה המתקבלת עבור משחק שיתופי זהה לפתרונות ההקצאה המושגים במודל שוק תחרותי. לטענת החוקרת אין תשובה יחידה לשאלת הקצאת העלויות. בחירת כלל ההקצאה תלויה בתפיסת מושג הצדק וההגינות. יחד עם זאת, לטענתה, הגינות ויעילות אינן סותרות זו את זו בהקשר של משחקים שיתופיים.

Lejano and Davos (1995) מציגים מספר דרכי הקצאה של עלויות הכרוכות בהקמת מתקן לטיהור שפכים עבור N פרטים. פתרונות ההקצאה כוללים שימוש בערך של שפלי, בגרעינון ובגרעינון המנורמל (Normalized Nucleolus). הממצאים האמפיריים מיושמים לנתוני ארבע רשויות השוכנות בדרום קליפורניה. החוקרים מסיקים, שפתרון הגרעינון המנורמל שומר בצורה טובה יותר על יציבות המבנה של קואליציית העל מאשר חלופות הפתרון האחרות. בנוסף, פתרון הגרעינון המנורמל יוצר תמריץ טוב יותר להיווצרות קואליציית העל.

שיטת הקצאה נוספת ופשוטה יחסית של עלויות ניתן למצוא במחקריהם של **Okada (1985)** ו- **Young (1994)**, אשר אומדים את הקצאת העלויות הכרוכות בהקמת סכר המשרת שלוש מטרות עיקריות באמצעות שיטת (Separable Costs Remaining Benefits Methods) SCRB. התמריץ להקמת סכר המשרת סימולטאנית שלוש מטרות (השקיה חקלאית, בקרת הצפות, הפקת אנרגיה) על פני הקמת סכר המשרת מספר מטרות מועט יותר נובעת מיתרונות לגודל. החוקרים מיישמים שיטת פתרון זו לסכר המוקם ביפן (Sameura Dam Project) ולאזור רשות עמק טנסי (Tennessee Valley Authority) בהתאמה. נציין כי **Young (1994)** מסייג שיטה זו כאשר דנים בלמעלה מ-3 מטרות¹¹.

Dinar et al. (1986) אומדים את הקצאת תוספת ההכנסות באזור המכיל 4 משתתפים (עיר ושלוש קבוצות חקלאים) המשתפים פעולה בהקמת מתקן לטיהור שפכים שימש את הקבוצות החקלאיות לצרכי השקיה. באמצעות שימוש בפתרונות מודל האופטימיזציה המיושם לאזור רמלה, מוצגות מספר שיטות הקצאה¹² הכוללות את גישת העלות שולית (MCP), מרחב פתרונות הליבה (core), הערך של שפלי, הערך של שפלי המתוקן ופתרון הגרעינון. מסקנתם העיקרית של החוקרים היא ששיטת הקצאה באמצעות גישת העלויות השוליות עשויה להדחות על-ידי המשתתפים היות ואינה מצויה בליבה ומכאן שאינה מקיימת תנאי הקצאה רציונאליים (אישית וקבוצתית).

¹¹ ההסתייגות נובעת מכך שהשיטה מתייחסת רק לשלוש קואליציות: קואליציית העל (N), קואליציית הפרט הנבחן (i) וקואליציית העל בניכוי הפרט הנבחן ($N-i$) ובכך מתעלמת מכוח המיקוח של קואליציות קטנות יותר דוגמת קואליציית העל בניכוי יותר מפרט נבחן אחד.

¹² על השילוב של פתרון מודל אופטימיזציה לשיטות ההקצאה מתחום תורת המשחקים הקואליציוניים ראה מאמרו של **Lensberg, (1985)**.

בעת פיתוח המודל במחקר זה, ניתן להסתייע גם בעבודותיהם של **Shubik (1985)** מתחום המשחקים השיתופיים המתמקד, בין השאר, בהקצאה של זמן מחשב בין מספר פרטים, הקצאת שיחות במערכות טלפוניות מורכבות, ובמאמרו של **Young (1994)** הדרן בהקצאת מסלולי טיסה למטוסים בגדלים שונים ובהקצאת עלויות חיבור לרשת חשמל משותפת.

התקשרות חוזית

ניתוח הקצאות באמצעות שימוש במודלים מתחום החוזים הרלוונטיים לעבודה הנוכחית מתמקד בניסוח הסכם בין היחידות הכלכליות. להלן מספר מאמרים הדנים בהיבטים השונים של חוזה (הסכם) אפשרי.

Spulber (1992) דן בחלוקת סיכונים ועלויות משותפות באמצעות כללי הקצבה (Rationing Rules). לטענתו, כללים אלו צריכים להיות מספיק גמישים בכדי לאמץ את מגוון האפשרויות הקיימות, ובאותה עת עליהם להיות פשוטים וקלים ליישום. ההקצבה מיועדת להשיג הקצאה פרטו אופטימאלית של משאבים הקשורים לקבוצת השווקים תלויי המצב. כללים אלו מובנים בצורה הטובה ביותר בחוזה מותנה מושלם (Complete State Contingent Contract). המודל מפותח עבור שווקי האנרגיה החשמלית המאופיינים בתנודתיות בביקוש ובהיצע. אחת המסקנות העיקריות של החוקר היא, שהימנעות מכללי ההקצבה האופטימאליים תגרום להשקעה לא יעילה במשק.

לעיתים, ניסוח וחתימה על חוזים מתרחש בתנאים לא ודאיים, כאשר המידע העומד לרשות היחידות הכלכליות לגבי כל התרחישים העתידיים האפשריים לפני חתימתו (Ex-ante) אינו שלם (Incomplete Information), ראה: **Tirole (1988)**, **Che et al (1999)**.

Maskin (2002) מגדיר חוזה לא מושלם כחוזה שאינו תלוי בכל "מצבי הטבע" האפשריים. במאמרו הוא מונה שלוש סיבות לחוסר שלמות החוזה: (1) קיום מספר תרחישים אשר אינם ניתנים לאימות (Unverifiable) על-ידי האחראי לאכיפת החוזה, בית משפט למשל; (2) ישנם תרחישים שלא ניתן לחזות מראש בעת ניתוח החוזה; (3) לעיתים הוספת תרחישים מסוימים לחוזה כרוכה בעלות יקרה מידי.

החוזה, היות ואינו מושלם, עלול להיות מושפע מתרחישים לא נצפים שיתעוררו בעתיד, לאחר חתימתו (Ex-post). לכן, ייתכן מיקוח חוזר בין השחקנים (Renegotiation), ראה: **Che et al (1999)** או לחילופין פנייה למגשר, ראה: **Tirole (1988)**.

בעיה נוספת העלולה להתעורר היא בעיית חוסר היעילות בהשקעה (Hold-up problem), כפי שמתואר במאמרו של **Che et al (1999)**.

יתרונו העיקרי של החוזה, למרות היותו לא מושלם, הוא בשיפור הסטאטוס קוו ההתחלתי, הלא יעיל, של היחידות הכלכליות, ראה: **Tirole (1988)** ומאמרו של **Che et al (1999)** הטוען כי ההסכם הראשוני משפיע על הסטאטוס קוו של המיקוח העתידי ולכן עשוי לשמש להפחתת התנהגות אופורטוניסטית¹³ העלולה להתעורר בהעדר הסכם.

בעת ניסוח תנאי החוזה במחקר זה, הסתייענו גם בספרו של **Salanie (1998)** המציג מספר מודלים ותיאוריות מתחום החוזים. ובספריהם של **Fudenberg and Tirole (1993)** ו-**Mass-Collel, Whinston and Green (1985)** המציגים מספר וריאציות של מודלים מתחום החוזים וה- Mechanism Design. בנוסף, משמשים ספרים אלו כספרי הדרכה להבנת הנושא על היבטיו השונים והמגוונים.

רוב העבודות שנסקרו לעיל בהקשר למגוון היחידות הכלכליות, מניחות לכל היותר שני סוגים של יחידות כלכליות (למשל עיר וחקלאים או מספר חקלאים)¹⁴. למיטב ידיעתנו, לא היה ניסיון ליישם במערכת אנדוגנית אחת את ההיבטים הכלכליים, הסביבתיים והארגוניים הקשורים לשימוש חוזר בקולחים הן לצרכי השקיה והן לצרכי שיקום אפיק נחל. שילוב בין מודל תכנון מתמטי לבין מודלים שונים מתחום המשחקים השיתופיים מאפשר פיתוח מסגרת מושגית אינטגרטיבית (ברת יישום) לניתוח חלופות הקצאה וחלופות התארגנות שונות. שילוב מסוג זה יסייע להשיב על הסוגיות הבאות: (1) מה היא "עוגת הרווח" האזורית הגדולה ביותר שתושג בפתרון האופטימאלי של מתכנן מרכזי? (2) האם יש יתרון לשיתוף פעולה בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור? וממה הוא נובע? (3) מהן גבולות המיקוח? מהם פתרונות הקצאת המגשר, אשר יהיו מקובלים על היחידות הכלכליות? בנוסף, לא מצאנו בספרות מודל ספציפי המותאם לחלופות ההתארגנות המתוארים במחקר הנוכחי בתנאי חוסר וודאות.

¹³ **Tirole (1988)** טוען כי הטלת קנס בגין הפרת חוזה קושרת בין הפרטים ומונעת התנהגות אופורטוניסטית.
¹⁴ ראינו למשל כי במחקרם של **Dinar and Yaron (1986)** נבחן שיתוף פעולה בין עיר לבין 3 קבוצות חקלאיות.

המודלים התיאורטיים של המחקר הנוכחי מיושמים לאזור השרון, שבמרכז הארץ. באזור הנבחן ארבע יחידות כלכליות הכוללות (1) מתקן טיהור שפכים יחיד המשרת את ערי כפר-סבא והוד השרון, (2) רשות נחל הירקון, (3) חקלאים הממוקמים בסמיכות גיאוגרפית למט"ש הערים ו- (4) חקלאים הממוקמים בריחוק גיאוגרפי ממט"ש הערים.

בסעיף זה נציג את המקורות לנתונים, אשר שימשו אותנו בעת יישום המודלים המוצעים. כל הערכים הכספיים ששימשו אותנו במחקר הנוכחי מבוטאים במחירי דצמבר 2002.

ניתוחים כלכליים של עלויות הטיפול בשפכים עירוניים בישראל ניתן למצוא בעבודתם של **אדן טכנולוגיה וייעוץ כלכלי (1999)**. נתוני כמויות שפכים ניתן למצוא למשל בפרסומי **הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (2001)**, **(2002)** ומנתוני הנהלת מט"ש ערי כפר-סבא והוד השרון¹⁵. מגבלות השימוש בקולחים לפי סוג הטיפול יעמדו בדרישות **נציבות המים (1999)**, **המשרד לאיכות הסביבה (2002)** ו**משרד הבריאות (1999)**.

נתונים אודות שטחי הגידולים החקלאיים באזור, התשומות הנדרשות לכל גידול (ליחידת שטח) רלוונטי ואת מחירי הגידולים השונים. נתונים אלו ניתן למצוא בפרסומי **משרד החקלאות (א) (1999)**, **(2000)**, **(2001)**; **הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (2002)**; **משרד החקלאות ופיתוח הכפר (2001)**; **גל, ב. וחובריה (2000)**; **גל, ב. ומדלג', ג'. (2000)**; **גל, ב. ושפיגל, א. (2002)**; **ישרים, ב. וסלמון, א. (2003)**.

תמהיל גידולי החקלאיים האופייניים לחקלאי אזור השרון¹⁶, מתוארים בפרסומי **משרד החקלאות (ב) (2001)**, **(2002)**, **(2003)**, **הדס, א. וחובריה (2001)**. נתוני איכות הקולחים הנדרשת לגידולי האזור. ניתן למצוא, בין היתר, בעבודתה של חברת **אדן טכנולוגיה וייעוץ כלכלי (1999)** ובדרישות **משרד הבריאות (1999)**. נורמות השקיה בשפירים ניתן למצוא בדו"ח פנימי של **משרד החקלאות ופיתוח הכפר (2001)**.

¹⁵ המט"ש הנבחן הינו בבעלות פרטית.

¹⁶ מתוך דוח פנימי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר של ישובי מחוז מרכז, 2002.

על מנת לאמוד את פונקצית התועלת של רשות נחל הירקון נעזרנו בעבודות הבאות: **המשרד לאיכות הסביבה (2002)**; **הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (2002)**; **זכאי (2002)**; **כיוון אסטרטגיה ופיתוח עסקי בע"מ (2002)**; **פרידלר וחואניקו, (2000)**; **קפלן (2004)**; **רוזנטל וצבן (1999)** וטיוטא שהוגשה לרשות הטבע והגנים בנושא היבטים סביבתיים של משק המים (ראה: **כיוון, 2004**).

פרק 3: מודל תכנון אזורי להשבת קולחים לצרכי השקיה חקלאית ושיקום נחל

3.1 כללי

בפרק זה מוצג מודל אופטימיזציה אזורית, המתייחס לאזור עם ארבע יחידות כלכליות: עיר, חקלאים קרובים לעיר (מכאן ואילך, חקלאים קרובים), חקלאים רחוקים מהעיר (מכאן ואילך, חקלאים רחוקים) ומנהלת נחל.

לניצול קולחים עירוניים הן לצרכי השקיה חקלאית והן לצרכים אקולוגיים ברמה האזורית, אספקטים ביולוגיים, כימיים והנדסיים שיש לשלבם במסגרת מודל האופטימיזציה. העיר, בעלת מתקן לטיהור שפכים, היא יצרנית הקולחים ואילו היצרנים החקלאיים (קבוצות החקלאיים השונות) ומנהלת הנחל הם צרכניו הפוטנציאליים.

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

- א. בחירת המבנה הארגוני או מידת שיתוף הפעולה בין היחידות הכלכליות שבאזור, ששיא את סך הרווחה האזורית;
- ב. קביעת הקצאת כמויות ואיכויות הקולחים ליחידות הכלכליות הפעילות באזור;

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

- א. מבנה העלויות הכרוכות בכל אחת מחלופות ההתארגנות האפשריות;
- ב. שטחי הקרקע שלרשות היצרנים החקלאיים ותמהיל הגידולים של כל אחת מקבוצות החקלאים השונות;
- ג. מיקום היחידות הכלכליות באזור הנבחן;
- ד. גובה מכסות המים השפירים העומדים לרשות החקלאים (נתון אקסוגני).

לפתרון בעיית ההקצאה על ידי מתכנן מרכזי – אזורי, שבאחריותו לדאוג כי השפכים הגולמיים של העיר יעברו טיפול מתאים במתקן לטיהור השפכים ולחלק אותם לצרכנים השונים, עשויים להיות יתרונות כלכליים עבור כל השותפים האפשריים.

מטרת המתכנן המרכזי היא להקצות את הקולחים בין הצרכנים השונים כך שיושא \sum הרווח באזור עבור כל התארגנות אפשרית. אין המתכנן המרכזי קובע את הקצאת הרווח או את הקצאת תוספת הרווח הנוצר משיתופי פעולה אפשריים בין היחידות הכלכליות. בהינתן "עוגת הרווח המקסימאלית" על היחידות הכלכליות להחליט כיצד היא תתחלק ביניהם. אחת האפשרויות היא לפנות למגשר אובייקטיבי שיכול להציע מספר חלופות להקצאת תוספת הרווח (במונחים כספיים), שתתבססנה על מספר שיטות הקצאה מתחום המשחקים השיתופיים.

בסעיפים הבאים יוצג, בשלבים, מודל האופטימיזציה של המתכנן המרכזי.

3.2 מסגרת כללית, הסמלה והנחות

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 העיר, יצרנית השפכים, $i=2$ מייצג את מנהלת הנחל. $i=3$ ו- $i=4$ מייצגים בהתאמה את החקלאים הקרובים ואת החקלאים הרחוקים ו- $i=5$ מייצג את חלופת הסילוק לים העומדת בפני העיר.

למתכנן המרכזי האפשרות לבחון מספר אלטרנטיבות של שיתופי פעולה בין היחידות הכלכליות (ראה גם תרשים 3.1), כאשר שיתוף פעולה אזורי בין כל היחידות הכלכליות יוגדר כשיתוף פעולה מלא ("קואליציית העל" במונחי תורת המשחקים).

מודל התכנון מתייחס לטווח הקצר, לתקופה של שנה אחת. באזור הנבחן יש J מקורות מים באיכויות שונות, העומדים לרשות החקלאים ומנהלת הנחל. נסמל ב- j ($=1, 2, \dots, J$) את אינדקס מקורות המים, כאשר $j=1$ מייצג את מקורות המים השפירים הזמינים לרשות שתי קבוצות החקלאים, $j=2$ ו- $j=3$ מייצגים קולחים שמקורם במט"ש העיר ברמות טיהור שניוני ושלישוני בהתאמה¹⁷ ו- $j=4$ הינו אינדקס של קולחים ברמת טיהור שלישוני שהוזרמו בנחל. נניח, כי רמות

¹⁷ הפרמטרים והרכיבים העיקריים של ווקטור רמות הטיהור הם: ריכוז מוצקים (TSS), צריכת חמצן ביולוגית (BOD), צריכת חמצן כימית (COD), צריכת חמצן כוללת, ריכוז חנקן, זרחן, כלורידים, סידן, מגנזיום, נתרן אשלגן, פחמת הסידן, מידת חומציות/ בסיסיות (pH), תכולת פתוגנים (קוליפורמים, וירוסים, פרוזיסים). בנוסף, ישנם עוד מרכיבים דוגמת SAR, ריכוז בורון הרלוונטיים להשקיה בקולחים.

הטיהור דלעיל הן משתנים בדידים שערכיהם האפשריים נתונים אקסוגנית, בחירת רמת הטיהור שבשימוש, תעשה באופן אנדוגני על ידי המתכנן המרכזי.

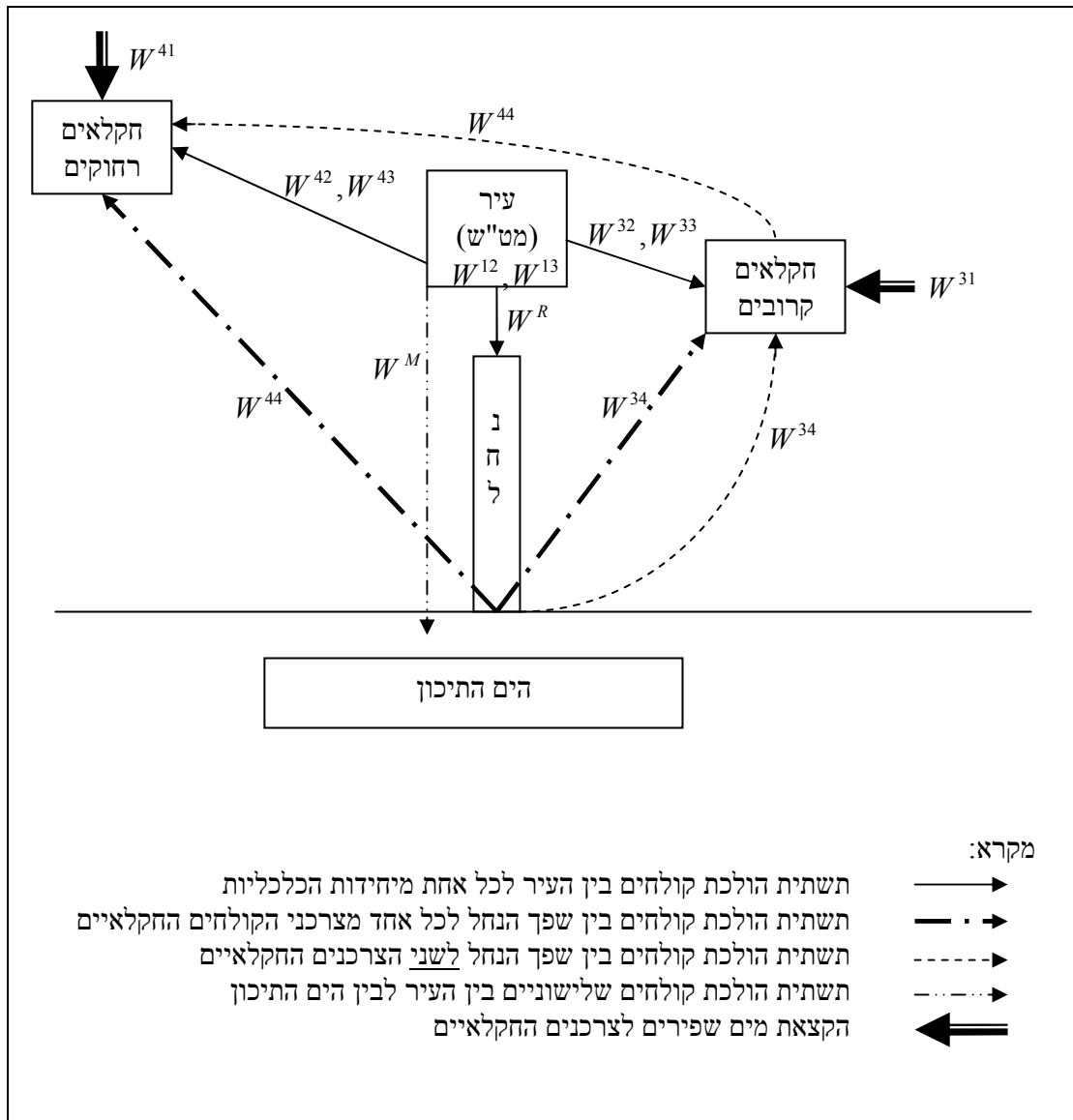
נסמל ב- W^{ij} את הקצאת המים (במ"ק) ממקור j על-ידי המתכנן המרכזי ליחידה הכלכלית ה- i . בכדי להקל על הקריאה, ריכזנו בטבלה 3.1 את ההסמלות המתארות את הקצאות המים האפשריות באזור הנבחן.

טבלה 3.1 : הקצאות המים האפשריות באזור - הסמלות (מ"ק)

פירוט	4	3	2	1	j/i
כמות הקולחים של העיר, שיטוהרו לרמות טיהור שניוני ($j=2$) ושלישוני ($j=3$)	---	W^{13}	W^{12}	---	1
כמות הקולחים, ברמת טיהור שלישונית, שתוקצה למנהלת הנחל	---	$W^{23} = W^R$	---	---	2
כמויות המים מהמקורות השונים שיוקצו לחקלאים הקרובים	W^{34}	W^{33}	W^{32}	W^{31}	3
כמויות המים מהמקורות השונים שיוקצו לחקלאים הרחוקים	W^{44}	W^{43}	W^{42}	W^{41}	4
כמות הקולחים, ברמת טיהור שלישונית, שתסולק לים	---	$W^{53} = W^M$	---	---	5

תיאור סכמאטי של חלופות ההתארגנות השונות העומדות בפני המתכנן המרכזי מוצג בתרשים 3.1. להלן,

תרשים 3.1 : סכמת חלופות ההתארגנות האפשריות באזור



מתרשים 3.1 ניתן לראות כי ישנן מספר אפשרויות לשיתוף פעולה בין היחידות הכלכליות שבאזור. מובן כי ניצול קולחים באזור יתכן רק בשיתוף העיר, כאשר בלעדיה לא תיתכן התארגנות לניצול קולחים מצד שאר המשתתפים. בנוסף, הונח כי באזור הנבחן לא קימות תשתיות להולכת קולחים, ולכן יש לקחת בחשבון את עלויות ההשקעה בן.

בהתאם לאמור לעיל ייבחנו החלופות האפשריות הבאות:

- א. חוסר שיתוף פעולה: כל יחידה פועלת באופן עצמאי ומנצלת רק את התשומות הזמינות לה. לדוגמא: כל אחת מקבוצות החקלאים משיאה את הרווח שלה, כאשר לרשותה רק מכסת מים שפירים לצרכי השקיה. הקצאת המתכנן המרכזי תהיה: W^{41} , W^{31} כמות

המים השפירים שבשימוש החקלאים הקרובים והרחוקים בהתאמה. העיר, כאשר היא פועלת בחוסר שיתוף, מחויבת לסלק את כל שפכיה לים, הקצאת הקולחים למנהלת הנחל תהיה $W^R = 0$ ולחקלאים: $W^{43} = W^{42} = W^{33} = W^{32} = 0$. בנוסף, יש לקחת בחשבון גם את העלויות הכרוכות בהקמת תשתית הולכה בין העיר לבין הים התיכון.

ב. שיתוף פעולה בין העיר לבין אחת מהיחידות הכלכליות (סה"כ 3 חלופות): בהתארגנויות אלו קיימת אפשרות לניצול הקולחים של העיר או לשימושים חקלאיים או לשימושים אקולוגיים בלבד (מנהלת הנחל). למשל שיתוף פעולה בין העיר למנהלת הנחל או שיתוף פעולה בין העיר לבין אחת מקבוצות החקלאים השונות. במקרים אלו יש לקחת בחשבון גם את העלויות הכרוכות בהקמת תשתית הולכה בין העיר לבין היחידה הכלכלית הנבחרת ו/או בין העיר לבין הים התיכון.

ג. שיתוף פעולה בין העיר לבין שתי יחידות כלכליות (סה"כ 3 חלופות): בחלופות אלו קיימת אפשרות לניצול הקולחים של העיר הן לשימושים חקלאיים בלבד והן לשימושים חקלאיים ואקולוגיים גם יחד. נבחין בין המקרים השונים, תוך התייחסות לתשתיות ההולכה ולהקצאת המתכנן המרכזי:

1. שיתוף פעולה בין העיר לבין שתי קבוצות החקלאים השונות: במקרה זה ייתכן צורך בהקמת תשתיות להולכת קולחים בין העיר לבין כל אחת מקבוצות החקלאים¹⁸ ו/או בין העיר לבין הים התיכון. הקצאת הקולחים של המתכנן המרכזי תהיה: $W^{41}, W^{31}; W^{13}, W^{12}$; סך כמויות הקולחים של העיר שיטוהרו לרמות הטיהור השניוני והשלישוני, בהתאמה; W^{33}, W^{32} כמויות הקולחים ברמות טהור שניוני ושלישוני, בהתאמה, שיועברו מהעיר לחקלאים הקרובים; W^{43}, W^{42} כמויות הקולחים ברמות טהור שניוני ושלישוני, בהתאמה, שיועברו מהעיר לחקלאים הרחוקים; W^M כמות הקולחים, ברמת טיהור שלישוני, שתסולק לים התיכון.

2. שיתוף פעולה בין העיר לבין מנהלת הנחל ובין קבוצת חקלאים אחת (למשל, חקלאים קרובים): במקרה זה ייתכן צורך בהקמת תשתיות להולכת קולחים בין העיר לבין הנחל ו/או בין העיר לחקלאים הקרובים ו/או בין העיר לבין הים התיכון. הקצאת הקולחים של המתכנן המרכזי תהיה: W^{31} ,

¹⁸ הונח כי תשתית ההולכה מסוגלת להוביל קולחים ברמות הטיהור השונות (שניוני, שלישוני) בו-זמנית.

W^R ; $W^M, W^{33}, W^{32}, W^{13}, W^{12}, W^{41}$ כמות הקולחים ברמות טהור שלישוני שתועבר מהעיר לנחל.

במודל הנוכחי, במקרה בו קיים שיתוף פעולה בין העיר לבין מנהלת הנחל ובין קבוצת חקלאים אחת (או יותר), נבחנה גם האפשרות להקמת תשתית להולכת קולחים שלישוניים בלבד בין שפך הנחל לבין קבוצת החקלאים השונות, תוך התייחסות גם לאפשרות העברה ישירה של קולחים שניוניים ושלישוניים מהעיר לקבוצת החקלאים השונות. הקצאת הקולחים של המתכנן המרכזי תהיה: W^{44}, W^{34} ; $W^R, W^M, W^{13}, W^{12}, W^{41}, W^{31}$ שלישוני שתועבר משפך הנחל לחקלאים הקרובים והרחוקים בהתאמה (סה"כ 2 חלופות אפשריות).

ד. חלופת שיתוף פעולה בין כל היחידות הכלכליות באזור (קואליציית העל): שיתוף פעולה כללי בין כל היחידות הכלכליות הפעילות באזור תוך התייחסות למיקום תשתיות הולכת קולחים (בין העיר ליחידות הכלכליות, בין מנהלת הנחל לקבוצת החקלאים השונות). הקצאת הקולחים של המתכנן המרכזי תהיה: W^{ij} לכל i ולכל j .

במקרה בו העיר פועלת בשיתוף עם מנהלת הנחל, בהחלט יתכן מצב בו לא תוקם תשתית הולכה בין העיר לבין הים התיכון (קולחי העיר יועברו לנחל ומשם יוזרמו לים התיכון).

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. אילוצי תכנון הכוללים, בין היתר, אילוצי קרקע, אילוצי מים (מסוגים שונים), אילוצי איכות הסביבה ועוד.

בסעיף זה נציג בשלבים את בעיית המתכנן המרכזי, תוך התייחסות לתרומה לרווח הכולל של כל אחת מהיחידות הכלכליות שבאזור, למבנה העלויות הכרוכות ביישום כל אחת מהחלופות האפשריות ולאילוצים העומדים בפני המתכנן המרכזי.

העיר – היחידה היצרנית

על פי חוק (פקודת בריאות העם, 1940; חוק המים, 1959) צריכה העיר לדאוג לסילוק השפכים מגבולותיה, ברמת טיהור העומדת בקריטריונים שנקבעו (צו בריאות העם, 1992; נציבות המים, 1999; משרד הבריאות, 1999). על כן נניח כי בתום תהליך ההקצאה לא נותרים שפכים בגבולות העיר. בעקבות (Yaron (1997 ואחרים נניח כי היצע השפכים העירוניים היוצאים מהעיר הוא קשיח לחלוטין, כלומר כמות השפכים המטוהרים היוצאת מהעיר, שנסמלה ב- \bar{W} היא קבועה וידועה. היות והמתכנן המרכזי פועל במסגרת החוק, עליו להקצות את \bar{W} הקולחים של העיר בין השימושים השונים האפשריים (ראה טבלה 3.1), כלומר:

$$(3.1) \quad \bar{W} = \sum_{i=3}^4 \sum_{j=2}^3 W^{ij} + W^R + W^M$$

כאמור, אנו מניחים כי ניתן לטהר את השפכים הגולמיים של העיר לשתי רמות טיהור נבחרות, כאשר רמת הטיהור הנוכחית הינה שניונית. על-פי מסקנות דו"ח ועדת הלפרין (משרד הבריאות, 1999) רמת הטיהור המינימאלית הבטוחה העומדת בקריטריונים המתאימים הן לשימוש אקולוגי (שיקום נחלים) הן לסילוק לים (תקנות מניעת זיהום הים ממקורות יבשתיים, 1990), והן להשקיית מגוון גידולים חקלאיים (דוגמת הדריס, אבוקדו תפ"א) ללא סכנת הצטברות רעלנים בקרקע ופגיעה בחי ובצומח הינה רמת הטיהור השלישונית. שפכים מטוהרים ברמת טיהור שניונית אסורים בהשקיה מעל אקוויפרים עקב סכנת חלחול רעלנים ובנוסף, אינם ראויים לשמש להשקיית מספר גידולים חקלאיים, דוגמת: ארטישוק, נשירים, פרחים, ירקות וכד'.

עקב הפוטנציאל החקלאי (השקיה חקלאית) והאקולוגי (שיקום נחל) המצוי בשימוש בקולחים ברמת טיהור שלישוני, נבחן בעבודה את כדאיותה של האפשרות להשקיע בתשתיות מט"ש העיר

ולהפכו למט"ש המטהר שפכים גם לרמת טיהור שלישוני (בנוסף לרמת הטיהור השניונית הנוכחית). דהינו, (ראה גם טבלה 3.1):

$$(3.2) \quad \overline{W} = W^{13} + W^{12}$$

נבחין כעת בין מספר עלויות עיקריות הכרוכות בהקצאת השפכים המטוהרים ליחידות השונות, העומדות בפני המתכנן המרכזי:

א. עלות הולכת הקולחים מהעיר ליעדם (לא כולל עלויות הון): נסמל ב- e^{ij} את עלות (ש"ח/מ"ק) הולכת קולחים ברמת טיהור j , ($j=2,3$), מפתח מט"ש העיר לצרכן i -ה- ($i \neq 1$). העלות מותנית, בין היתר, במיקומם הגיאוגרפי של הצרכנים ביחס לעיר (מרחק וגובה טופוגרפי), בהפרשי הלחצים בצינור ההולכה, בעלויות השאיבה, עלויות האנרגיה וכיו"ב.

ב. עלות טיהור לרמות טיהור נבחרות: נסמל ב- α^j , ($j=2,3$), את עלויות הטיהור (בש"ח/מ"ק) של קולחים לרמות טיהור שניוני ושלישוני במט"ש, הכוללות, בין היתר, עלויות אנרגיה, עלויות תפעול ותחזוקה, חומרים וסילוק בוצה.

ג. עלות הקמת תשתיות הולכה ליחידות הפועלות באזור: כאמור, באזור הנבחן אין תשתיות הולכת מי קולחים מהעיר ליחידות הצרכניות ומהעיר לים. נסמל ב- F_1^i את החזר ההון השנתי (בש"ח) על ההשקעה בתשתית הולכה בין מט"ש העיר לבין היחידות הצרכניות ($i \neq 1$), תוך התייחסות למרחק הצרכנים מהעיר, גודל הצינור, תוואי טופוגרפי ועוד.

ד. עלות שדרוג המט"ש: נסמל ב- E את החזר ההון השנתי (בש"ח) על ההשקעה בשדרוג המט"ש הקיים והפיכתו למט"ש בעל יכולת טיהור שפכים גם לרמה שלישונית, תוך התייחסות לעלויות תכנון, בניה, חומרים ועוד.

שפכים המצויים בשטח העיר גורמים לפגיעה סביבתית ומסכנים את בריאות הציבור. מבלי לפגוע בכלליות המודל ובמסקנותיו בחרנו לנרמל את תוספת התועלת לעיר (במונחים כספיים), EU^1 , מסילוק השפכים משטחה כך שהיא תהיה זהה בדיוק לעלות הולכת השפכים לים¹⁹. דהינו,

¹⁹ השינוי בערך תועלת העיר מסילוק השפכים משטחה לא משפיע על הרווחים והקצאות המים השונים של שאר היחידות הכלכליות הפעילות באזור. בנוסף, כפי שיובהר בהמשך, מטרת המודל היא לבחון גם את הקצאת תוספת הרווח הנוצרת כתוצאה משיתוף פעולה בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור, ובכללן העיר. בחישוב תוספת הרווח לקואליציה מסוימת מנוטרלים השפעות חלופות האיום העומדות בפני השחקנים באזור (חלופות בהן פועלת כל אחת מהיחידות הכלכליות לבדה, ללא שיתוף פעולה עם היחידות האחרות). בנוסף, הונח כי ללא העיר, יצרנית הקולחים, תוספת הרווח של כל קואליציה הינה זניחה, לכן כל שינוי בחלופת חוסר השיתוף של העיר תשפיע במידה שווה על תוספת הרווח של כל אחת מהקואליציות האפשריות.

$$(3.3) \quad EU^1 = e^{53} W^M$$

סך העלויות, בניכוי תוספת התועלת לעיר, EU^1 , הכרוכות בטיהור שפכי העיר וסילוקם משטח העיר באופן מלא הינה:

$$(3.4) \quad TC^1 = \sum_{i=2}^4 \sum_{j=2}^3 [(e^{ij} + \alpha^j) \cdot (W^{ij} + W^R + W^M)] + \sum_{i=2}^5 F_1^i + E$$

ממשוואה (3.1) ניתן לראות, שבמצב בו אין הקצאה של קולחים מהעיר ליחידות הצרכניות כלומר, $W^{ij} = W^R = 0$ עבור $j=2,3$ ו- $i=3,4$, יסולקו כל השפכים המטוהרים (ברמת טיהור שלישוני) מהעיר לים. על ידי הצבת ערכי ההקצאות הללו בביטוי (3.4) ובניכוי EU^1 נקבל:

$$(3.5) \quad TC_0^1 = \alpha^3 \cdot W^M + F_1^5 + E$$

המחקר הנוכחי יתייחס ל- TC_0^1 כאל חלופת האפס או חלופת ה"איום" העומדת בפני העיר, היות ובמקרה זה כל נטל העלויות הוא על העיר.

מנהלת הנחל

למנהלת הנחל תועלת אקולוגית משימוש במי הקולחים היוצאים מהעיר. זרימת המים בנחל יוצרת "ריאה ירוקה" התורמת לאיכות הסביבה ולחי ומכאן רווחיותה. כאמור, רמת הטיהור הבטוחה העומדת בקריטריונים המתאימים לשימוש אקולוגי (שיקום נחל), ללא סכנת הצטברות רעלים ופגיעה בחי ובצומח הינה רמת הטיהור השלישונית. כמו- כן, באפשרות מנהלת הנחל להעביר את תוספת הקולחים הנובעת מהתקשרות עם העיר, לאחר שזרמו בנחל, אל קבוצות החקלאים הפעילות באזור²⁰. פעילות זו דורשת השקעה בתשתיות הולכה משפך הנחל לקבוצות החקלאים השונות, כפי שיפורט בהמשך.

²⁰ חלופה זו אפשרית רק כאשר $W^R > 0$.

משוואה (3.6) מציגה את תועלת מנהלת הנחל מזרימת קולחים באפיקו :

$$(3.6) \quad EU^2 = uW^R$$

כאשר :

u - מסמל את אומדן התרומה הסביבתית של 1 מ"ק קולחים ברמת טיהור שלישונית (בש"ח), שמקורה ממט"ש העיר, הזורמת במימי הנחל.

שיתוף מנהלת הנחל בהתארגנות אזורית כרוך במספר עלויות עיקריות :

א. עלות הקמת תשתית להולכת קולחים : באזור הנבחן אין תשתיות להולכת מי קולחים בין שפך הנחל לבין קבוצות החקלאים השונות. נסמל ב- F_2^i את החזר ההון השנתי (בש"ח) על ההשקעה בהקמת תשתית הולכה בין שפך הנחל לחקלאים הקרובים ($i=3$) ולחקלאים הרחוקים ($i=4$), תוך התייחסות למרחק הצרכנים מהעיר, גודל הצינור, מיקום טופוגרפי ועוד.

ב. עלות הולכת הקולחים ליעדם (לא כולל החזרי הון בגין הקמת תשתיות ההולכה) : נסמל ב- e^{i4} את עלות (בש"ח/מ"ק) הולכת קולחים ברמת טיהור שלישוני משפך הנחל לצרכן ה- i , ($i = 3, 4$). העלות מותנית, בין היתר, במיקומם הגיאוגרפי של הצרכנים ביחס לשפך הנחל (מרחק וגובה טופוגרפי), בהפרשי הלחצים בצינור ההולכה, בעלויות השאיבה, עלויות האנרגיה וכיו"ב.

סך העלויות (TC^R) הכרוכות בהקמת תשתיות הולכת קולחים שלישוניים והעברת קולחים לצרכנים הפוטנציאליים, הינן :

$$(3.7) \quad TC^R = \sum_{i=3}^4 (e^{i4} W^{i4} + F_2^i)$$

מחיסור משוואה (3.7) מביטוי (3.6) נקבל את פונקציית המטרה הניצבת בפני המתכנן המרכזי, בהתייחסו לשיתוף פעולה בין העיר לבין מנהלת הנחל (תוך התעלמות מהיצרנים החקלאיים) :

$$(3.8) \quad \pi^2 = \sum_{i=3}^4 [u \cdot W^R - e^{i4} \cdot W^{i4} - F_2^i]$$

החקלאים

באזור הנבחן מצויות שתי קבוצות חקלאים הנבדלות במיקומן הגיאוגרפי, גודל שטח החקלאי, רמת מכסות המים השפירים, תמהיל הגידולים וכיו"ב. שימוש במי קולחים המסופקים לחקלאים ישירות מהעיר או משפך הנחל (דהיינו, ניתן להפנות להשקיה חקלאית לפחות חלק ממי הקולחים השלישוניים, שזרמו תחילה בנחל) עשוי להגדיל את מרחב אפשרויות הייצור העומד בפני החקלאים השונים.

היות ומודל התכנון בעבודה זו הוא מודל של הטווח הקצר, הנחנו כי אין אפשרות לנטוע גידולי מטעים נוספים או להרחיב את שטחם של מטעים קיימים, אך קיימת אפשרות לעקירה מוגבלת של מטעים קיימים במטרה להפנות את השטח הנעקר לגידולים חד- שנתיים, שהתמהיל שלהם יקבע אנדוגנית במודל האופטימיזציה.

הגדרות והסמלות נוספות:

\bar{Q}^i - סך מכסת מים שפירים (מ"ק) ממערכת המים הארצית העומדת לרשות החקלאי ה- i .

N - מספר הגידולים החקלאיים האופייניים לאזור הנבחן. כאשר $n=1,2,\dots,N$.

\bar{X}_g^i - סך שטח הקרקע הניתן לעיבוד חקלאי (דונם), בהתאם למיקומה (מעל אקוויפר $g=1$, לא

מעל אקוויפר $g=2$), העומדת לרשות החקלאי ה- i .

ביטוי (3.9) מציג את פונקציית המטרה הניצבת בפני המתכנן המרכזי, בהתייחסו לשילוב כל אחת מקבוצות החקלאים בחלופות ההתארגנות האפשריות באזור:

$$(3.9) \quad \pi^i = \sum_{n=1}^8 \sum_{g=1}^2 \sum_{j=1}^4 p_n^{ij} x_{ng}^{ij} - \sum_{n=1}^3 \sum_{g=1}^2 h_n^i \cdot \tilde{x}_{ng}^i - c_W W^{i1}, \quad i = 3,4$$

כאשר:

p_n^{ij} - ההכנסה הנקייה (בש"ח) מ-1 דונם של גידול n המושקה במים ממקור j מנוכה מסך ההוצאות המשתנות והקבועות, לא כולל הוצאות עבור קולחים ברמות הטיהור השונות (ראה הנחות לחישוב p_n^{ij} בנספח לפרק 3). בחישוב p_n^{ij} נלקח בחשבון מחיר המכירה של היבול בניכוי עלויות משתנות (ללא עלויות מים) התלויות ברמת היבול ועלויות קבועות שאינן תלויות ברמת

היבול. כמו-כן, השקיה בקולחים מוסיפה חנקן לקרקע, תוספת החנקן לקרקע עשויה להוזיל את עלויות הדישון היקרות. בעת חישוב p_n^{ij} , נלקח בחשבון החסכון בעלויות הדישון. חשוב יותר, רמת מליחותם של מי הקולחים גבוהה מזו של המים השפירים (בתהליך הצריכה בעיר נוספים להם מלחים רבים). טיהור הקולחים במט"ש אינו משפיע כלל על רמת מליחותם של המים המושבים והשקיה במים שהם מלוחים יחסית עלולה להשפיע לרעה על יבולי גידולים הרגישים למליחות. קימת ספרות ענפה על פונקציות התגובה של יבולי גידולים שונים לרמת מליחותם (כמו גם לכמותם כמובן) של מי ההשקיה. הסתייענו בספרות זו ולקחנו בחשבון את השפעת המליחות על רמת היבול בעת חישוב p_n^{ij} באמצעות פונקציות פחיתת יבול מתאימות.

x_{ng}^{ij} - גודל השטח (דונם) של גידול n המושקה במים ממקור j בשטח g אצל חקלאי i (משתנה החלטה).

h_n^i - עלות עקירת 1 דונם של מטע n , ($n=1,2,3$), אצל חקלאי i (בש"ח).

\tilde{x}_{ng}^i - רמת העקירה (דונם) של מטע n , ($n=1,2,3$), בחלקה g אצל חקלאי i (משתנה החלטה).

c_W - עלות 1 מ"ק מים שפירים (זהה עבור הצרכנים החקלאיים).

אילוצי התכנון העומדים בפני המתכנן המרכזי

ביטויים (3.23) - (3.10), שיוצגו להלן, מתארים את מגוון האפשרויות והאילוצים העומדים בפני המתכנן המרכזי בבחירת הקצאות המים האופטימאליות, W^{ij} , שטחי העיבוד החקלאי, x_{ng}^{ij} ורמת עקירת המטעים האופטימאלית, \tilde{x}_{ng}^i , ששיאו את פונקציית הרווחה האזורית.

1. מאזני קרקע

א. סך שטחי הקרקע \bar{X}_g^i ידוע וקבוע לחקלאי ה- i . ביטוי (3.10) מתאר את מגבלת סך שטחי הקרקע הזמינים לשימוש החקלאי ה- i .

$$(3.10) \quad \bar{X}_g^i - \sum_{j=1}^4 \sum_{n=1}^8 \sum_{g=1}^2 x_{ng}^{ij} \geq 0, \quad i=3,4$$

ב. ביטויים (3.11) ו-(3.12) מתארים, בהתאמה, את מגבלות המקסימום והמינימום של שטחי הגידולים השונים, למעט הגידולים הניתנים לעקירה. מטרת המגבלות היא לשמור שתמהיל הגידולים שיומלץ על ידי מודל התכנון לא יסטה באופן קיצוני מתמהיל הגידולים בפועל שמאפיין את האזור הנבחן.

$$(3.11) \quad \bar{b}_n^i - x_{ng}^{ij} \geq 0, \quad n = 4, \dots, 8$$

$$(3.12) \quad \underline{b}_n^i - x_{ng}^{ij} \leq 0, \quad n = 4, \dots, 8$$

כאשר:

\bar{b}_n^i ו- \underline{b}_n^i הינם פרמטרים המסמלים את מגבלות המקסימום והמינימום, בהתאמה, של שטחי הקרקע (דונם) המיועדים לגידול n אצל חקלאי i , למעט גידולים הניתנים לעקירה ($n=1,2,3$).

ג. כאמור, הונח כי קיימת אפשרות לעקירה מוגבלת, בגובה m (באחוזים), של גידולי המטעים השונים ($n=1,2,3$), והפניית השטח הנעקר, \tilde{x}_{ng}^i , לטובת גידולים חד- שנתיים.

$$(3.13) \quad m \cdot \bar{b}_n^i - \tilde{x}_{ng}^i \geq 0, \quad n = 1, 2, 3$$

ד. מאזני עקירת מטעים, ($n=1,2,3$), השטח שיוקצה לגידולי המטעים בשילוב עם סך שטח המטעים שייועדו לעקירה יהיה שווה לרמתם הנוכחית של המטעים. דהיינו,

$$(3.14) \quad \bar{b}_n^i - (x_{ng}^{ij} + \tilde{x}_{ng}^i) = 0, \quad n = 1, 2, 3$$

2. מאזני קולחי העיר

א. סה"כ כמות הקולחים (מ"ק) היוצאת מפתח המט"ש ידועה ליחידות הכלכליות שבאזור [ראה: משוואה (3.1)]. ביטוי (3.15) מתאר את מגבלת סך כמויות המים הזמינות לשימושים השונים (אילוץ סך מקורות המים מהעיר).

$$(3.15) \quad \bar{W} - \sum_{i=3}^4 \sum_{j=2}^3 W^{ij} - W^R - W^M = 0$$

ב. כאמור, ניתן לטהר את שפכי העיר לשתי רמות טיהור נבחרות (שניוני ושלישוני), ביטוי (3.16) מציג את מאזן קולחי העיר (מ"ק) הזמין ליחידות הצרכניות. סך הקולחים השניוניים והשלישוניים שווה לסך השפכים המטוהרים של העיר:

$$(3.16) \quad \bar{W} - W^{13} - W^{12} = 0$$

3. מגבלת קולחי הנחל

ניתן להעביר קולחים ברמת טיהור שלישוני משפך הנחל אל קבוצות חקלאים השונות. ביטוי (3.17) מתאר את מגבלת כמויות הקולחים (מ"ק) שמקורם בשפך הנחל ($j=4$) הזמינות לחקלאים:

$$(3.17) \quad W^R - W^{34} - W^{44} \geq 0$$

4. מאזני קולחים לחקלאים השונים

$$(3.18) \quad W^{ij} - \sum_{g=1}^2 \sum_{n=1}^8 w_{ng}^{ij} x_{ng}^{ij} = 0, \quad i = 3,4 ; j = 2,3,4$$

כאשר:

w_{ng}^{ij} - סך כמות המים השנתית (מ"ק) הנדרשת להשקיית 1 דונם של גידול n בחלקה g של חקלאי i .
 אנו מניחים כי w_{ng}^{ij} נתון אקסוגני (ברמה הנקבעת על פי הנחיות והמלצות של מדריכי חקלאות הזמינים לחקלאים).

5. מאזני מים שפירים

ביטויים (3.19) ו- (3.20) מתארים את מגבלת מכסות המים השפירים העומדות בפני החקלאים הקרובים והרחוקים²¹, בהתאמה:

$$(3.19) \quad \bar{Q}^3 - W^{31} \geq 0$$

$$(3.20) \quad \bar{Q}^4 - W^{41} \geq 0$$

²¹ חישוב W^{i1} נעשה באמצעות השימוש בשיוון (3.18) לכל j , עבור כל אחת מקבוצות החקלאים השונות ($i=3,4$).

6. מגבלות איכות הסביבה ובריאות הציבור

א. חל איסור השקיה במים ברמת טיהור שניוני מעל אקוויפר, ביטוי (3.21) מתאר את מגבלת ההשקיה מעל אקוויפר בקולחים ברמת טיהור שלישוני, שמקורם מהעיר ו/או מנהלת הנחל. במילים אחרות, החקלאים השונים יכולים להשקות, בקולחים ברמת טיהור שלישוני, בכל שטח הקרקע העומד לרשותם את כל הגידולים החקלאיים שברשותם:

$$(3.21) \sum_{i=3}^4 \sum_{j=3}^4 W^{ij} - \sum_{i=3}^4 \sum_{n=1}^8 \sum_{g=1}^2 x_{ng}^{i3} \cdot w_{ng}^{i3} \geq 0$$

ב. בהתאם למסקנות דו"ח ועדת הלפרין (משרד הבריאות, 1999), ישנם גידולים מסוימים אותם ניתן להשקות במים ברמת טיהור שניוני (הדרים, אבוקדו, תפ"א), אך כמובן אסור לגדלם בשטח המצוי מעל אקוויפר (g=1):

$$(3.22) W^{12} - \sum_{i=3}^4 \sum_{n=1,2,7} x_{n2}^{i2} \cdot w_{n2}^{i2} \geq 0$$

7. מגבלת אי שליליות

(3.23) $x_{ng}^{ij}, \tilde{x}_{ng}^i, W^{ij} \geq 0$, דהיינו, לכל i,g,j,n.

מודל ההשאה האזורי

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

מודל האופטימיזציה האזורי מתייחס לשיתופי פעולה אפשריים בין העיר, יצרנית השפכים המטוהרים, לבין שלוש יחידות כלכליות, צרכני הקולחים. המוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי מקורה בהיצע הקולחים שברשות העיר, לכן הנחנו כי התארגנות כלשהיא ללא שיתוף העיר אינה כדאית.

נסמל ב- G התארגנות מלאה של כל הצרכנים באזור, כלומר: $G = (2,3,4)$. ונגדיר כל התארגנות חלקית s של צרכנים, ללא העיר, 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: $S = \{s \cup (1)\}$.

הקואליציות של חוסר שיתוף פעולה מצד כל היחידות הכלכליות המצויות באזור הן $\{i\}$, $i=1,2,3,4$. 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 פונקצית המטרה בהתייחס לחלופות ההתארגנות האפשריות.

בעיית האופטימיזציה של המתכנן המרכזי היא לקבוע את רמת משתני ההחלטה x_{ng}^{ij}, W^{ij} , לכל i, j, n ו- g ובחירת המבנה הארגוני, מבין החלופות האפשריות, שישיא את פונקצית

המטרה האזורית (סכימת ביטויים 3.6 ו- 3.9 עבור $i=2,3$ בניכוי ביטוי 3.4):

$$(3.24) \quad \Pi^S = \sum_{i=2}^4 \pi^i - TC^1$$

$W^{ij}, x_{ng}^{ij}, \bar{x}_{ng}^{ij}$

לכל i, n, g, j בכפיפות לאילוצים (3.23) – (3.10).

טבלה 3.2 להלן, מציגה את בעיית ההשאה האזורית הניצבת בפני המתכנן המרכזי, תוך התייחסות למגבלות התכנון השונות.

טבלה 3.2 : בעיית ההשאה האזורית

בעיית ההשאה האזורית
$MAX \Pi_{W^{ij}}^S = \sum_{i=2}^4 \sum_{j=2}^3 [(-e^{ij} - \alpha^j) \cdot (W^{ij} + W^R + W^M)] - \sum_{i=2}^5 F_1^i - E +$ $\sum_{i=3}^4 [u \cdot W^R - e^{i4} W^{i4} - F_2^i] + \sum_{n=1}^8 \sum_{g=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=3}^4 p_n^{ij} x_{ng}^{ij} - \sum_{n=1}^3 \sum_{g=1}^2 \sum_{i=3}^4 h_n^i \cdot \tilde{x}_{ng}^i - \sum_{i=3}^4 c_W W^{i1}$
אילווצים
$\bar{X}_g^i - \sum_{j=1}^4 \sum_{n=1}^8 \sum_{g=1}^2 x_{ng}^{ij} \geq 0, \quad i = 3,4$
$\bar{b}_n^i - x_{ng}^{ij} \geq 0, \quad n = 4, \dots, 8$
$\underline{b}_n^i - x_{ng}^{ij} \leq 0, \quad n = 4, \dots, 8$
$m \cdot \bar{b}_n^i - \tilde{x}_{ng}^i \geq 0, \quad n = 1, 2, 3$
$\bar{b}_n^i - (x_{ng}^{ij} + \tilde{x}_{ng}^i) = 0, \quad n = 1, 2, 3$
$\bar{W} - \sum_{i=3}^4 \sum_{j=2}^3 W^{ij} - W^R - W^M = 0$
$\bar{W} - W^{13} - W^{12} = 0$
$W^R - W^{34} - W^{44} \geq 0$
$W^{ij} - \sum_{g=1}^2 \sum_{n=1}^8 w_{ng}^{ij} x_{ng}^{ij} = 0, \quad i = 3, 4; j = 2, 3, 4$
$\bar{Q}^i - W^{31} - W^{41} \geq 0$
$\sum_{i=3}^4 \sum_{j=3}^4 W^{ij} - \sum_{i=3}^4 \sum_{n=1}^8 \sum_{g=1}^2 x_{ng}^{i3} \cdot w_{ng}^{i3} \geq 0$
$W^{12} - \sum_{i=3}^4 \sum_{n=1,2,7} x_{n2}^{i2} \cdot w_{n2}^{i2} \geq 0$
$x_{ng}^{ij}, \tilde{x}_{ng}^i, W^{ij} \geq 0$

במודל האופטימיזציה האזורי המכיל את ארבעת השחקנים ישנן מספר חלופות התארגנות אפשריות, כל אחת מחלופות ההתארגנות הללו מכילה מספר משתני החלטה, שנידונו בסעיף הקודם. בפתרון מודל האופטימיזציה נעשה שימוש בתוכנת המחשב (QM) Quantities Methods שהיא יעילה בפתרון מודלים של אופטימיזציה ליניארית.

תיאור השחקנים וחלופות ההתארגנות האפשריות

הממצאים האנליטיים של מודל האופטימיזציה האזורי, יישמו לאזור השרון שבמרכז הארץ. באזור הנבחן מצויות ארבע יחידות כלכליות (עיר, מנהלת נחל, חקלאים קרובים וחקלאים רחוקים), שיתוארו להלן:

העיר

עיריית כפר- סבא ועיריית הוד – השרון התאגדו יחד לצורך הקמת מכון לטיהור שפכים בשיטת הבוצה המשופעלת (רמת טיהור שניונית). במסגרת ההתאגדות הוקמה מנהלה משותפת לשתי הערים וליחידה האזורית לאיכות הסביבה. המכון החדש הוקם ב- 1994 בחלק משטחי אגני החמצון של מכון הטיהור הישן, שפעל משנת 1972, באתר גיל עמל הנמצא בדרום מזרח הוד השרון. במצב הנוכחי, יכולת הטיהור של המט"ש הינה קבועה.

מידי יום מטוהרים כ- 33,000 מ"ק שפכים גולמיים, שמתוכם רק כ- 70% (כ- 22,000 מ"ק) ניתנים לשימוש חוזר. היצע השפכים המטוהרים העומד לרשות היחידות הכלכליות הפעילות באזור עומד על כ- 8 מיליון מטר מעוקב בשנה (מלמ"ש). בשלב פיתוחו המלא, מתוכנן המט"ש לשרת אוכלוסייה של כ- 240,000 נפש (לעומת כ- 180,000 כיום) עם תפוקת שפכים מטוהרים של כ- 46,000 מ"ק ליום, שמתוכם רק כ- 32,000 מ"ק ניתנים לשימוש חוזר מידי יום (כ- 12 מלמ"ש).

שיטת הטיהור במט"ש מבוססת על שיטת הבוצה המשופעלת הקונבנציונאלית, המקובלת ברוב מכוני הטיהור בעולם. במהלך הטיהור עוברים השפכים את שלבי הטיפול הבאים:

א. טיפול קדם להפרדת גופים גדולים, גרגירי חול וגרוסת;

ב. שיקוע ראשוני של חומרים מרחפים בבריכות עם גריפה מכאנית;

- ג. אגני איורור בבריכות בטון מצוידות במאווררים ליצירת התהליך הביולוגי- אירובי ;
- ד. שיקוע שניוני להפרדת הביומסה מהקולחים המטוהרים הכוללת סחרור רוב הביומסה לאגני האוורור ;
- ה. הזרמת הקולחים המטוהרים לסדרת בריכות עפר קיימות לליטוש הקולחים וויסות זרימתם.

בסוף התהליך מתקבלים קולחים ברמת הטיהור השניונית ($BOD=30/TSS=20$) על פי הנדרש בתקנים של משרד הבריאות. עקב ההחמרה בתקני הטיהור הנוכחים והפוטנציאל הטמון בהשבת קולחים לשימושים חקלאיים ואקולוגיים, הוחלט במתקן הטיהור להשקיע בשיפור יכולת הטיהור של המט"ש גם לרמה השלישונית.

מנהלת הנחל

רשות נחל הירקון הינה רשות סטטוטורית אשר הוקמה בשנת 1988 על פי חוק רשויות נחלים ומעיינות (1965). הרשות מאגדת 18 גופים ציבוריים בהם 7 רשויות מקומיות הנמצאות לאורך הנחל, משרדי ממשלה ותאגידים נוספים.

תפקידיה של הרשות כוללים פעילות בתחומי ניקוז, שיקום הנחל והכשרתו לצורכי קיט ונופש. בשנת 1996 גובשה תוכנית אב לנחל הירקון שעיקרה יצירת ריאה ירוקה לאזור והפיכת הירקון מ"חצר אחורית" ל"חצר קדמית". רשות הנחל פועלת לשיקום המערכת האקולוגית של הנחל, שיפור איכות המים, פתרון לבעיות הניקוז והביוב, שמירה על המבנים הארכיאולוגיים לאורך הנחל ועוד.

עבודות השיקום והתחזוקה של נחל הירקון תופסות מקום חשוב ועיקרי בעבודת הרשות. הרשות שפועלת באופן קבוע לטיפול באפיק וגדותיו, הוצאת סחף, פינוי גרוטאות ועצים שעלולים להוות סכנה לנחל ולשטים בו, שיקום סכרים וניקיון.

הירקון עובר כ- 2 ק"מ דרומית מערבית ממט"ש ערי כפר- סבא והוד השרון. כיום, הקולחים מוזרמים מפתח המט"ש דרך נחל הדס אל נחל הירקון (כ- 1,200 מ"ק לשעה), אך תרומתם לשיקום הנחל היא אפסית עקב רמת הטיהור שבשימוש. בנוסף, שאיבות מקומיות והזרמת קולחים מזהמים ברמת טיהור שניונית ממתקני טיהור שפכים סמוכים (למשל: מט"ש ניר אליהו, מט"ש רמת השרון), פוגעים באפיק הנחל ומזהמים את מימיו. במידה ומקורות הזיהום לעיל יטוהרו לרמת טיהור שלישונית, הזרמתם במימי הנחל עשויה לתרום לשיקומו.

מספר העבודות הבוחנות את הערך הכלכלי של נחלים בישראל מצומצם ביותר. ואכן, בדו"ח שהוגש למשרד לאיכות הסביבה בנושא "נחלי ישראל – מדיניות ועקרונות תכנון" בספטמבר 2004 (ראה: קפלן, 2004), ממליץ המחבר ליזום מחקרי הערכה כלכלית נוספים שיאמזו את ערכם הכלכלי של נחלים.

איתרנו שני מחקרים, שהתמקדו באומדן תרומתו הכלכלית של פארק הירקון: מחקרה של זכאי (2002) וטיוטא שהוגשה לרשות הטבע והגנים בנושא היבטים סביבתיים של משק המים (ראה: כיוון, 2004). בעבודות אלו ניתן משקל רב לתרומת שיקומו של פארק הירקון לעלית ערכי המגורים והמבנים הסמוכים. במחקר הנוכחי, הונח כי רשות נחל הירקון אינה "נהנית" מתוספת הערך השנתית למגורים ולכן למרכיב זה אין השפעה על תועלתה של מנהלת נחל הירקון.

בטיוטא שהוגשה על ידי חברת "כיוון" לרשות הטבע והגנים, נמצא כי התועלת בגין הביקור העתידי בפארק הירקון והערך המוסף מהפיתוח העסקי בפארק נאמד בכ- 78 מיליון ₪. מנגד עלויות אחזקת הפארק, עלויות תפעול רשות נחל הירקון, וערך הקרקע לשימושי הפארק נאמדו בכ- 50 מיליון ₪. במילים אחרות, התועלת נטו של רשות נחל הירקון נאמדה בכ- 30 מיליון ₪. הניתוח דלעיל מתייחס למקרה בו מוזרמים באפיק הירקון כ- 20 מלמ"ש מים. מכאן, עולה כי התועלת מהזרמת קולחים באפיק נחל הירקון הינה 1.5 ₪ לקוב.

בעבודה נוספת של רוזנטל וצבן (1999) בוצע ניתוח עלות - תועלת בסיסי לשיקום נחל שורק, אשר בדומה לנחל הירקון, אף הוא זורם בסמיכות לעיר. מהניתוח עולה כי הזרמת כ- 5.68 מלמ"ש באפיק הנחל תיצור תרומה של כ- 7.8 מיליון ₪, קרי: תרומה של כ- 1.37 ₪ לקוב. לדעת מבצעי העבודה, תרומה זו עשויה לגדול בשנים הקרובות.

בהסתמך על ממצאי העבודות דלעיל, הונח במחקר הנוכחי, כי התועלת למנהלת הנחל מהזרמת 1 קוב קולחים שלישוניים הינה 1.5 ₪ ($u=$, ראה ביטוי (3.6)).

קבוצות החקלאים

כאמור, באזור הנבחן מצויים שתי קבוצות חקלאים הנבדלות אחת מהשנייה במיקומן הגיאוגרפי, גודל שטח החקלאי, רמת מכסות המים, תמהיל הגידולים וכיו"ב. רמת מכסות המים ושטחי הקרקע החקלאית מהווים גורם מגביל בייצור. רכישת מי קולחים מהעיר או ממנהלת הנחל עשויה להגדיל את מרחב אפשרויות הייצור התחילי העומד בפני החקלאים, כאשר המבנה המשקי (תמהיל הגידולים ורגישותו לקולחים ברמות טיהור שונות) של כל אחד מהחקלאים יכתוב את ביקושו לקולחים (כמות ואיכות).

החקלאים הקרובים הינם קבוצה מייצגת של חקלאי הישובים, עדנים, אלישמע, נווה ירק וירקונה, אשר ממוקמת במרחק של כ- 4 ק"מ, בממוצע, דרומית מזרחית מפתח המט"ש. לעומתם, קבוצת החקלאים הרחוקים המורכבת מחקלאי ישובי ניר אליהו ורמת הכובש, ממוקמת במרחק של כ- 8 ק"מ צפונית מזרחית מפתח המט"ש.

טבלה 3.3 להלן, מציגה את עיקרי מאפייני קבוצות החקלאים השונות, שרלוונטיים למודל התכנון.

טבלה 3.3 : מאפייני קבוצות החקלאים השונות²²

מכסת שפירים (מלמ"ק)	שטחי עיבוד חקלאיים (דונם)	שטחי מטעים (דונם)	אוכלוסיה (נפש)	
1.635	4,007	1,982	כ- 1,000	חקלאים קרובים
1.690	4,889	1,480	כ- 2,150	חקלאים רחוקים

כאמור, מודל האופטימיזציה האזורי בוחן את הרווח האזורי הכולל תחת חלופות התארגנות שונות (קואליציות) של צרכני הקולחים השונים (מנהלת הנחל וקבוצות החקלאים השונות) בשיתוף עם העיר, יצרנית הקולחים. במונחים של תורת המשחקים, סך הרווח האזורי המוגדר כערך פונקצית המטרה של מודל האופטימיזציה הוא למעשה ערך הפונקציה האופיינית של

²² מתוך דוח פנימי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר של ישובי מחוז מרכז, 2002.

קואליציה המורכבת מחלק משחקני האזור או מכל היחידות הכלכליות הפעילות באזור. הערכים הכספיים מבוטאים במחירי דצמבר 2002 .

שיתופי פעולה אפשריים בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור כרוך בעלויות קבועות הכוללות הקמת תשתיות הולכת קולחים מהעיר ו/או מנהלת הנחל לצרכני הקולחים השונים (מנהלת הנחל וקבוצות החקלאים השונות) והשקעות לשדרוג המט"ש גם לרמת הטיהור השלישונית. כאמור, הונח כי עלויות אלו חלות, בשלב זה, על ספקי הקולחים השונים (עיר ו/או מנהלת הנחל).

היות ומודל האופטימיזציה הינו חד תקופתי ומתייחס לתקופה של שנה אחת, חושבו החזרי ההון השנתיים בגין ההשקעות דלעיל. לצורך כך, הונח כי באפשרות העיר ו/או מנהלת הנחל לקחת הלוואה לתקופה של 10 שנים בריבית שנתית ריאלית של 7%. טבלה 3.4 להלן, מציגה את העלויות השונות שתוארו לעיל (דוחות אדן, 1999; נציבות המים²³; מחירון בוני התיכון).

טבלה 3.4: פרוט עלויות הקמת תשתיות הולכה מהעיר וממנהלת הנחל ליחידות הכלכליות הפעילות באזור ועלויות הכרוכות בשדרוג המט"ש הקיים (ש)

ממנהלת הנחל		מהעיר		
החזר הון שנתי	סה"כ עלות	החזר הון שנתי	סה"כ עלות	
610,868	4,290,484	228,476	1,604,721	תשתית הולכה ל- (3)
1,047,888	7,359,926	446,986	3,139,443	תשתית הולכה ל- (4)
1,047,888	7,359,926	675,462	4,744,164	תשתית הולכה ל- (3) ו-(4)
-----	-----	119,221	837,361	תשתית הולכה ל- (2)
-----	-----	610,868	4,290,484	תשתית הולכה לים
החזר הון שנתי		סה"כ עלות		
5,556,027		39,023,208		שדרוג המט"ש הקיים

ניתן לראות מהטבלה כי העלות הגבוהה ביותר (39 מיליון ש"ח) מקורה בשדרוג המט"ש גם לרמה השלישונית (רמת הטיהור הנדרשת הן לצרכי סילוק לים הן לצרכי שיקום הנחל והן לצרכי השקיה חקלאית). מהטבלה עולה כי למתכנן המרכזי מוטיבציה לשתף את החקלאים הקרובים (שחקן 3) בקואליציות בהן שותפים העיר, מנהלת הנחל והחקלאים הרחוקים (שחקן 4) היות ושיתוף שחקן 3 בקואליציה זו אינה כרוכה בעלויות הקמת תשתית נוספות (במילים אחרות, עלות הקמת

²³ נוסחת נציבות המים

תשתית הולכה ממנהלת הנחל לשחקן 4 זהה לעלות הקמת תשתית הולכה ממנהלת הנחל לשחקנים 3 ו-4, בשני המקרים החזר ההון השנתי הינו : (1,047,888).

בהינתן ערכי פונקצית המטרה לחלופות ההתארגנות השונות, יבחן המתכנן המרכזי את תוספת הרווח האזורית משיתופי הפעולה האפשריים ויבחר את הקואליציה בעלת תוספת הרווח הגבוהה ביותר (ראה טבלה 3.5).

באזור הנבחן ארבעה משתתפים ולכאורה קיימות $2^4 - 1 = 15$ קואליציות אפשריות (לא ריקות), אך בהתייחס לנתוני האזור בהנחה שניצול קולחים יתכן רק בהסכמת העיר, קטן מספר הקואליציות האפשריות, הרעיון העומד בבסיס הנחה זו הוא, שללא שפכי העיר 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 ומנהלת הנהר, (2,3,4), שווה לסכום ערכיהם של שחקנים (2), (3) ו- (4) כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף. באופן דומה, תוספת הרווח של אותה קואליציה יהיה שווה לאפס.

בהתאם לאמור לעיל נבחן את האלטרנטיבות האפשריות הבאות :

א. קואליציות של חוסר שיתוף פעולה- דהינו, המשך המצב הקיים (stand alone) : (1), (2), (3), (4).

ב. קואליציות חלקיות של שני משתתפים : (1,2), (1,3), (1,4).

ג. קואליציות חלקיות של שלושה משתתפים : (1,2,3), (1,2,4), (1,3,4).

ד. קואליציית העל : (1,2,3,4).

סה"כ 11 קואליציות אפשריות²⁴.

עבור קואליציות הכוללות את העיר, מנהלת הנחל ולפחות קבוצת חקלאים אחת [(1,2,3), (1,2,4)]; ומשפך הנחל מועברים לחקלאים השונים עדיף על פני הזרמת קולחים ממטי"ש העיר ישירות לקבוצות החקלאים השונות. על-כן, במחקר הנוכחי, נתייחס למבנה הארגוני העדיף.

²⁴ רווח יתר הקואליציות: (2,3), (2,4), (3,4), (2,3,4) שווה לסכום רווחי היחידות הכלכליות המרכיבים את אותה קואליציה ומכאן שתוספת הרווח שלהן שווה לאפס.

ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות במודל האופטימיזציה האזורי, שהתקבלו מפתרונות של מודל האופטימיזציה הליניארי שהוצג לעיל, מוצגים בטבלה 3.5 להלן,

טבלה 3.5 : ערכי הפונקציה האופיינית של הקואליציות השונות (מיליוני ₪)

טור 3	טור 2	טור 1	
תוספת הרווח של הקואליציה $v(S)$	סכימת ערכי השחקנים, כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף $\sum_1^4 \pi(i)$	ערך הקואליציה Π^S	הקואליציה (i), (S)
0.00	-15.54	-15.54	(1)
0.00	0.00	0.00	(2)
0.00	1.99	1.99	(3)
0.00	2.87	2.87	(4)
12.82	-15.54	-2.72	(1,2)
1.70	-13.55	-11.85	(1,3)
2.54	-12.67	-10.14	(1,4)
13.83	-13.55	0.28	(1,2,3)
14.18	-12.67	1.51	(1,2,4)
4.23	-10.69	-6.46	(1,3,4)
15.87	-10.69	5.18	(1,2,3,4)

כאשר :

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

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

טור 2 : סכום ערכי הפונקציה האופיינית עבור כל אחד מהשחקנים בקואליציה (i) או (S). כלומר,

סכימת ערכי השחקנים המרכיבים קואליציה (i) או (S), כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף.

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

הרווח האזורית הנובעת מקואליציות (i) או (S).

פעילות היחידות הכלכליות ללא שיתוף פעולה עם יתר שחקני האזור משקפת את נקודת האיום העומדת בפני כל אחד מהשחקנים הספציפיים. ניתן לראות כי תוספת הרווח הנוצרת מכל אחת מחלופות ההתארגנות המכילה לפחות את העיר ושחקן נוסף תוביל לתוספת רווח חיובית, ומכאן המוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי. המתכנן החברתי יבחר בחלופת השיתוף היוצרת את תוספת הרווח הגדולה ביותר ולכן יבחר בחלופת ההתארגנות בה כלולות כל היחידות הכלכליות, קרי: קואליציית העל, (1,2,3,4), היוצרת תוספת רווח של כ- 15.9 מיליון ₪.

3.5 ניתוח תוצאות מודל האופטימיזציה האזורי

פתרונות מודל האופטימיזציה האזורי קובעים בו זמנית את המשתנים העיקריים הבאים: כמויות הקולחים שיועברו ליחידות הכלכליות באזור, תמהיל גידולי קבוצות החקלאים השונות, כמויות המים השפירים שבשימוש, רמות הטיהור שבשימוש, מבנה תשתיות ההולכה באזור ועוד.

בסעיף זה נציג את רמות המשתנים השונים עבור חלופות ההתארגנות השונות בפתרונות האופטימאליים.

פונקצית המטרה (הפונקציה האופיינית) Π^S היא פונקציה ליניארית המתארת את הרווח האזורי תחת חלופות ההתארגנות השונות. ההנחה בבסיס מודל האופטימיזציה היא קיומו של מתכנן מרכזי הפועל בתנאי וודאות המחליט על הקצאת היצע הקולחים הזמין, על פי ערך תפוקתם השולית, במטרה להשיא את סך רווחת האזור. נבחין כי אין המתכנן המרכזי קובע את הרווח של כל אחת מהיחידות הכלכליות באזור אלא קובע את הקצאות הקולחים האופטימאליות ששיאו את סך רווחת האזור.

במודל האופטימיזציה האזורי הונח כי אין העברת תשומות בין השחקנים השונים דוגמת: העברת מכסות מים שפירים, העברת שטחי קרקע בין החקלאים השונים. אך לעומת זאת ניתן לנייד את סוגי המים השונים בין חלקות הגידולים השונות, אצל כל אחת משתי קבוצות החקלאים. מי קולחים מהווים את גורם הייצור היחידי הניתן להעברה מהעיר ליתר השחקנים ו/או ממנהלת הנחל אל קבוצות החקלאים השונות.

ההבדלים בין השחקנים החקלאיים (הן במיקומם הגיאוגרפי באזור הן בכמויות גורמי הייצור העומדים לרשותם והן בתמהיל גידוליהם) קובעים באופן ישיר את הביקוש של כל אחד מהם למים מאיכויות שונות ולמעשה מכתיבים את כמויות המים שירכשו על ידם בכל אחת מחלופות ההתארגנות האפשריות.

בדומה לצרכני הקולחים החקלאיים, ביקוש צרכן הקולחים האקולוגי (מנהלת הנחל) לקולחים תלוי אף הוא במיקומו הגיאוגרפי של הנחל ובעלויות ההולכה והקמת התשתיות הכרוכות בהובלת הקולחים למימיו. אך בניגוד לשחקנים החקלאיים, הביקוש של מנהלת הנחל הוא למי קולחים ברמת טיהור שלישונית בלבד.

מעיון במחירי הצל (טבלה 3.6), שנתקבלו למגבלת המים השונות בחלופות בהן אין שיתוף פעולה בין השחקנים החקלאיים ליתר שחקני האזור (כאשר כל צרכן חקלאי פועל בנפרד עם מכסת מי השפירים העומדת לרשותו), ניתן להבחין כי מכסות המים השפירים מהוות מגבלה אפקטיבית אצל כל אחד מהצרכנים החקלאיים.

טבלה 3.6 : מחירי צל למגבלות המים עבור הצרכנים החקלאיים (ש/מ"ק)

שחקן (4)			שחקן (3)			מגבלות קואליציות
(1,2,3,4)	(1,4)	(4)	(1,2,3,4)	(1,3)	(3)	
1.08	1.08	5.27	1.08	1.08	3.87	מאזני מים שפירים
0	0	4.19	0	0	2.79	מים שפירים
0.31	0.14	---	0.41	0.08	---	מאזני קולחים ברמת טיהור שלישונית
0	0	---	0	0	---	קולחים ברמת טיהור שלישונית
0.357	0.08-	---	0.479	0.14-	---	מאזני קולחים ברמת טיהור שניונית
0	0	---	0	0	---	קולחים ברמת טיהור שניונית

מחירי הצל הגבוהים שנתקבלו עבור קבוצות החקלאיים השונות, כאשר הן פועלות בחוסר שיתוף (2.79 שקל/מ"ק ו- 4.19 שקל/מ"ק עבור שחקנים (3) ו- (4), בהתאמה) מצדיקים בחינת השקעה בפיתוח מקורות מים חליפיים לאזור. נבחין כי בקואליציות השונות, מכסת המים השפירים אינה מהווה יותר מגבלה אפקטיבית ולכן מחיר הצל של מגבלה זו שווה לאפס. יתרה מכך, בקואליציות לעיל גם מגבלות מי הקולחים אינם מהווים גורם יצור מגביל לחקלאים השונים.

טבלאות 3.7 ו-3.8 מציגות את כמויות ואיכויות המים שירכשו על ידי שחקנים 3 ו-4, בהתאמה, בחלופות ההתארגנות בהן הם שותפים. כאמור, תוצאות מודל האופטימיזציה מראות כי בכל הקואליציות בהן שותפה מנהלת הנחל, יועברו תחילה כל הקולחים (ברמת טיהור שלישונית) לצורך שיקום הנחל ורק לאחר מכן יועברו משפך הנחל אל החקלאים השונים.

טבלה 3.7: הקצאת חלופות מים לשחקן מספר 3 בחלופות השונות (מ"ק)

שחקן 3					קואליציות	נתונים
(1,2,3,4)	(1,3,4)	(1,2,3)	(1,3)	(3)		
1,250,750	1,250,750	1,250,750	1,250,750	1,635,000	שפירים	
0	520,550	0	520,550	0	קולחים שלישוניים מהעיר	
882,850	0	882,850	0	0	קולחים שלישוניים מהנהר	
0	362,300	0	362,300	0	קולחים שניוניים מהעיר	
2,133,600	2,133,600	2,133,600	2,133,600	1,635,000	סה"כ	

טבלה 3.8: הקצאת חלופות מים לשחקן מספר 4 בחלופות השונות (מ"ק)

שחקן 4					קואליציות	נתונים
(1,2,3,4)	(1,3,4)	(1,2,4)	(1,4)	(4)		
979,534.7	979,534.7	979,534.6	979,534.7	1,690,000	שפירים	
0	979,699.9	0	979,699.9	0	קולחים שלישוניים מהעיר	
1,549,200	0	1,549,200	0	0	קולחים שלישוניים מהנהר	
0	569,500	0	569,500	0	קולחים שניוניים מהעיר	
2,528,734.7	2,528,734.6	2,528,734.6	2,528,734.6	1,690,000	סה"כ	

מטבלאות 3.7 ו-3.8 ניתן לראות מספר יתרונות הנובעים משיתוף פעולה אזורי לקבוצות החקלאים השונות. חלופות השיתוף השונות מאפשרות לשחקנים החקלאיים, באמצעות תוספת הקולחים, להקצות בצורה יעילה יותר את סוגי המים השונים בין החלקות החקלאיות שברשותם ולגדל גידולים חקלאיים על פני שטחים נרחבים יותר (ראה גם טבלה 3.9). בקואליציות השיתוף לעיל, ניתן להבחין בהמרת מים שפירים במי קולחים הגורמת לחסכון אזורי של כ-1.1 מלמ"ש בשימוש במים שפירים, העשויים לשמש את הצרכנים העירוניים למשל.

טבלה 3.9 מציגה את פריסת הגידולים החקלאיים בשטחי כל אחת מקבוצות החקלאיים השונות בפתרון האופטימאלי המושג בקואליציית העל לעומת הפתרון של חוסר שיתוף פעולה.

טבלה 3.9 : הקצאת שטחי הקרקע לגידולים השונים בחלופות הקיצוניות (דונם)

שחקן 4		שחקן 3		גידולים חקלאיים (N) קואליציות
(1,2,3,4)	(4)	(1,2,3,4)	(3)	
939	704	835	627	1. הדרים
541	406	---	---	2. אבוקדו
---	---	1,251	939.3	3. נשיר
938	565	---	---	4. אבטיח
---	---	625	625	5. ארטישוק
588	353	---	---	6. צמחים ירוקים
900	540	663	398	7. תפ"א
983	1,375	633	700	8. מספוא גס (תירס)
0	370	0	519.7	סה"כ עקירת מטעים
3,318	0	2,336	0	סה"כ שטח מושקה בקולחים
4,889	3,943	4,007	3,289.3	סה"כ שטח מעובד

קבוצות החקלאים נבדלות בתמהיל גידוליהן ובשטחי הקרקע שבשימוש. תמהיל גידוליו של שחקן מספר 3 כולל את גידולי ההדרים, נשירים, תפ"א, מספוא גס וארטישוק. לעומתו, תמהיל גידוליו של שחקן מספר 4 כולל גם את גידולי האבוקדו, אבטיחים וצמחים ירוקים, אך אינו כולל את גידולי הנשירים והארטישוק. כמו-כן, שטחי הקרקע שבשימוש חקלאי אצל שחקנים 3 ו-4, כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף, עומדים על 3,289.3 דונם ו-3,943 דונם, בהתאמה.

מעיון בטבלה 3.9 נקבל הסבר נוסף למוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי. הטבלה מציגה את השפעת חלופת השיתוף המלא על כל אחד מהצרכנים החקלאיים (שחקנים 3 ו-4).

תוספת מי הקולחים, בקואליציית העל, למכלול גורמי הייצור של שחקנים 3 ו-4 מאפשרת לחקלאים לוותר על פעילות עקירת המטעים ובנוסף מגדילה את סך השטח המעובד ב-21.8% ו-24% בהתאמה (סה"כ תוספת אזורית של 1,663.7 דונם גידולים חקלאיים), תוך הגדלת כל תמהיל הגידולים שברשותם (למעט מספוא), בהשוואה למצב של חוסר שיתוף. גידולי המספוא ששימשו מעין ברירת מחדל לחקלאים במצב של חוסר שיתוף והעדר מים, מפנים את מקומם לטובת גידולים ריווחים יותר. סך השטח המושקה בקולחים מהווה כ-37.4% ו-56.8% מסך השטח המעובד אצל חקלאים 3 ו-4, בהתאמה.

לסיכום, המוטיבציה לשיתוף פעולה אזורי בניצול קולחים עירוניים לשימושים חקלאיים ואקולוגיים, נובעת מתמריצים כספיים כתוצאה מתוספות מים להשקיה חקלאית ו/או לשיקום הנחל. במודל האופטימיזציה האזורי נבחנו שיתופי פעולה אפשריים בין צרכני הקולחים השונים לבין העיר, יצרנית הקולחים. בכל חלופות השיתוף שנבחנו (סה"כ 7 חלופות), הושגה תוספת רווח לחברי הקואליציה, כאשר תוספת הרווח הגבוהה ביותר (כ- 15.9 מיליון ש"ח) הושגה בקואליציית העל, בה חברים כל שחקני האזור.

תוספת הקולחים לסל גורמי הייצור של החקלאים הקרובים והרחוקים משפר את סל הייצור התחילי של שחקנים אלו (כאשר הם פועלים בחוסר שיתוף), המתבטא בהגדלת סך שטחי הקרקע המעובדים בחקלאות וללא צורך בעקירת מטעים. עבור מנהלת הנחל, השימוש בקולחים מאפשר את שיקומו של אפיק הנחל ושיפור סביבת החי והצומח שלצידו.

שיתוף הפעולה בין העיר לצרכנים השונים מאפשר ניצול יעיל של מי קולחים המתבטא בתוספת רווח אזורית ובנוסף, מצביע על מספר יתרונות סביבתיים הכוללים, בין היתר, את :

- א. המרת מים שפירים במי קולחים גורמת לחסכון אזורי של כ- 1.1 מלמ"ש בשימוש במים שפירים, העשויים לשמש את הצרכנים העירוניים ;
- ב. הזרמת מים ברמת טיהור שלישוני עשויה למנוע זיהום של חופי הרחצה בשפך נחל הירקון ;
- ג. מניעת זיהום אקוויפר החוף על ידי איסור השקיה בקולחים שניוניים בשטחי קרקע המצויים מעל אקוויפר ;
- ד. מי הקולחים מכילים מרכיבי מזון (בעיקר חנקן) הנספגים בקרקע וזמינים לקליטה עבור שורשי הגידולים השונים. דהינו, השקיה במי קולחים עשויה לצמצם את עלויות הדישון היקרות.

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

פרק 4: הקצאת רווחים בין היחידות הכלכליות לפי עקרונות מתחום תורת

המשחקים הקואליציוניים

4.1 כללי

בעיית הקצאת הרווחים (עלויות), שנוצרו בגין שיתוף הפעולה האזורי בין העיר, יצרנית הקולחים, לבין צרכני הקולחים החקלאיים והאקולוגיים, מוכרת בספרות המקצועית [ראה: Young (1994), Dinar et al (1986)] כבעיית הקצאת עלויות (cost allocation), אשר ניתן לנתח באמצעות מודלים כלכליים- מתמטיים מתחום המשחקים הקואליציוניים (שיתופיים).

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

4.2 משתתפי המשחק האזורי

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

העיר: (שחקן 1)

שחקן 1 הוא בעל היצע שפכים קבוע ויציב (\bar{W}) ובעל חובת סילוק השפכים משטחו, לאחר שעברו טיהור מתאים במתקן הטיהור.

מבחינת העיר, החלופה הבסיסית בהעדר צרכנים היא סילוק כל השפכים המטוהרים לים. בחלופה זו (חלופת האפס) העיר נושאת בכל עלויות הטיהור וההובלה לים. הרווח של העיר כשהיא פועלת לבדה (stand alone) ללא התארגנות כלשהיא, נגזר מחלופה זו. באמצעות שיתוף פעולה עם

כל או עם חלק מהמשתתפים האחרים (הקמת קואליציה) עשויה העיר להגדיל את רווחיה, למשל על-ידי מכירת הקולחים לחברי הקואליציה ו/או הוזלת עלויות ההולכה.

מנהלת הנחל: (שחקן 2)

למנהלת הנחל תועלת אקולוגית משימוש במי הקולחים היוצאים מהעיר. זרימת המים בנהר יוצרת "ריאה ירוקה" התורמת לאיכות הסביבה ומכאן רווחיותה.

שני יתרונות עיקריים משיתוף פעולה עם הנחל הם:

- שפך הנחל הוא לים ובכך יכול לחסוך לעיר את הצורך בהשקעה בצינור ולהוזיל לה את עלות הולכת הקולחים לים (לפחות בחלק נרחב של הדרך).
- למנהלת הנחל אפשרות להזרים את הקולחים, שנקנו מהעיר, לחקלאים הקרובים ו/או לחקלאים הרחוקים.

מכאן עולה כי למנהלת הנחל מוטיבציה לשותף פעולה גם עם העיר (היצע קולחים קבוע ויציב) וגם עם החקלאים השונים (הוזלת עלויות הולכת קולחים ו/או קבלת תמורה כספית ממכירתם).

חקלאים קרובים: (שחקן 3)

שחקן זה ממוקם בסמיכות לעיר (ולשפך הנחל), עובדה זו מקנה לו יתרון המתבטא בעלויות הנמוכות של הולכת הקולחים אליו. לחקלאים הקרובים מוטיבציה לשיתוף פעולה הן עם העיר והן עם מנהלת הנחל במטרה להבטיח לעצמם היצע מים נוסף ויציב.

חקלאים רחוקים: (שחקן 4)

שחקן זה מרוחק מהעיר (ומשפך הנחל), אך בדומה לשחקן 3, לחקלאים הרחוקים מוטיבציה לשיתוף פעולה הן עם העיר, ספקית הקולחים, והן עם מנהלת הנחל במטרה להבטיח לעצמם היצע מים נוסף ויציב.

בהחלט ייתכן מצב בו ייווצר הסכם קואליציוני בין העיר לבין שאר המשתתפים או חלקם, אשר יקטין את סך העלויות ו/או יגדיל את סך הפדיון באזור כתוצאה מתוספות מים להשקיה ו/או לאיכות הסביבה, דהיינו, יגדיל את סך רווחי השחקנים. לכן במודל הנוכחי, נחקור כיצד תתבצע הקצאת תוספת הרווחים בחלופת ההתארגנות המיטבית מבין מגוון חלופות ההתארגנות האפשריות, וזאת באמצעות הצגה פורמאלית של המשחק הקואליציוני המותאם לבעיה זו.

נסמל את קבוצת כל השחקנים ב $\bar{N} = (1,2,3,4)$. קבוצה S חיובית ולא ריקה של שחקנים נקראת קואליציה, קבוצת השחקנים \bar{N} נקראת קואליציית העל. המשחק (\bar{N}, π) הוא משחק קואליציוני עם תשלומי צד (TU Games²⁵), 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 Π^S מוגדר במשוואה (3.23), שבפרק הקודם. שילוב זה מאפשר מציאת רווח של כל קואליציה S ומציאת פונקצית רווח אופיינית, (π) . נסמל את פונקצית תוספת הרווח ב- v .

4.4 פונקצית תוספת הרווח (v)

המודל יעסוק בהקצאת תוספת הרווחים הנוצרת כתוצאה משיתוף פעולה בין המשתתפים. לכל תת קבוצה S פוטנציאל תוספת רווח של (ראה טבלה מספר 3.5):

$$v(S) = \pi(S) - \sum_{i \in S} \pi(i) \quad (4.1)$$

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

²⁵ 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 מכסות של מים מתוקים או כל גורם יצור מוגבל אחר ולכן הדרך היחידה לפיצוי השחקנים לאחר הקצאת הגורם המשותף (קולחים) היא באמצעות העברת הכנסות.

$v(S)$ מייצגת את הפונקציה האופיינית (נרמול אפס, במקום לבחון את סך הרווחים אנו בוחנים את תוספת הרווח מהתארגנות לקואליציה), כאשר תוספת הרווח לקואליציה S מסוימת היא ההפרש בין רווחיה כקואליציה לבין סך רווחי חבריה כאשר הם פועלים באופן נפרד.

בבעיות המאופיינות ביתרונות לגודל, ברוב המקרים, הפונקציה האופיינית v תהיה קמורה או לפחות בעלת תכונת סופר – אדטיביות או לפחות בעלת תכונת "מונוטוניות מנורמלת אפס"²⁶, קיום אחת מהתכונות האלו מבטיח, שהפתרון האופטימאלי יושג בקואליציית העל (\bar{N}). נבחן האם מתקיימת לפחות אחת מהתכונות לעיל עבור הבעיה הנוכחית.

להלן הצגה פורמאלית של התכונות הרצויות מפונקציית תוספת הרווח, v , של הבעיה הנבחרת:

א. ההקצאה האופטימאלית היא וקטור הקצאות יעיל $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, כאשר x_i מיצג את הקצאת תוספת הרווח לפרט i המקיים:

$$\sum_{i=1}^4 x_i = v(\bar{N}) \quad (4.2)$$

שוויון (4.2) הוא תנאי יעילות המבטיח כי כל תוספת הרווח המושגת משיתוף פעולה כללי באזור יתחלק בין הפרטים במלואו²⁷.

ב. המוטיבציה למשחק שיתופי נובעת מהיכולת של קבוצה מסוימת לשפר את מצבה הנוכחי על-ידי שיתוף פעולה עם קבוצות אחרות. הניסוח הפורמאלי של תכונת סופר האדטיביות הינו:

²⁶ 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, $v(i) = 0$.

²⁷ לא ייתכן כי $\sum_{i=1}^4 x_i > v(\bar{N})$ כלומר, שסכום הקצאות תוספת הרווח לפרטים יהיה גבוה מסך רווחי הקבוצה ובמצב בו

נקבל הקצאה לא יעילה, היות ויוותרו עודפים לא מנוצלים. על-כן נקבל משוואה זו בשוויון.

$$(4.3) \quad v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) \text{ כאשר } S, T \text{ קואליציות זרות.}$$

כלומר, תוספת הרווח מאיחוד של שתי תת קבוצות (קואליציות) באזור שווה לפחות לסך תוספות הרווחים הגדולות ביותר, הנובעות מפעילות נפרדת של אותן תת קבוצות. ג. פונקציה v היא לא שלילית ומונוטונית גדלה ב- S , כלומר תוספת הרווח גדלה ככל שיש יותר משתתפים בקואליציה:

$$(4.4) \quad v(S) \leq v(T) \text{ לכל } S \subseteq T.$$

מתכונת המונוטוניות עולה ש- $v(\bar{N})$ הוא הערך האפשרי הגדול ביותר של הפונקציה v (ניתן לומר מנקודת ראות פורמאלית כי \bar{N} זו ההקצאה היעילה ביותר). ד. פונקציית תוספת הרווח היא קמורה:

$$(4.5) \quad v(S \cap T) + v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) \text{ כאשר } S, T \text{ לא בהכרח קבוצות}$$

זרות.

כאמור, באזור הנבחן ארבעה משתתפים ולכאורה קיימות 15 קואליציות אפשריות (לא ריקות), אך בהנחה שניצול קולחים יתכן רק בהסכמת העיר, קטן מספר הקואליציות האפשריות ל-11. כלומר, ללא שפכי העיר אין מוטיבציה להתארגנות מצד שאר המשתתפים. באופן פורמאלי, קואליציה אשר אינה כוללת את משתתף מספר 1 מקיימת את משוואה (4.3) רק בשוויון, או ממשוואה (4.1) נקבל כי ערך $v(S)$ של אותה קואליציה שווה לאפס (כלומר אין יתרון בהתאגדות של שחקנים אשר אינם כוללים את העיר).

בסעיף הבא, נבחן על ידי שימוש בכלים מתחום המשחקים הקואליציוניים האם ההקצאה האופטימאלית אכן מתקבלת משיתוף פעולה כללי באזור (דהיינו מהקמת קואליציית העל), כפי שקיבלנו מפתרון מודל האופטימיזציה, תוך אפיון מרחב המיקוח הנוצר מקיומה של הליבה.

בנוסף, יבחנו מספר מושגי פתרון רלוונטיים (גרעינון, ערכי שפלי ועוד), אשר יושוו ביניהם, תוך הצגת השיקולים העומדים מאחורי בחירה אפשרית בכל אחד מהפתרונות.

4.5 ליבת המשחק

ליבת המשחק (core) מוגדרת על סמך חלופות ההתארגנות האפשריות באזור, שערכן אינו שלילי. ליבת המשחק השיתופי היא מרחב המיקוח²⁸ בו תושג הקצאה המקיימת תנאי רציונאליות אישית (Individual Rationality), רציונאליות קבוצתית, והמכלה את כל תוספת ההכנסה האזורית בין הפרטים (Efficiency). טבלה 4.1 מציגה את התנאים של ליבת המשחק האזורי,

טבלה 4.1: ליבת המשחק האזורי

סימול המשואה	משוואות הליבה	ערך הפונקציה האופיינית v	תנאים
4.6	$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = v(1,2,3,4)$	15.87	יעילות
4.7	$x_1 + x_2 + x_3 \geq v(1,2,3)$	13.83	רציונאליות קבוצתית
4.8	$x_1 + x_2 + x_4 \geq v(1,2,4)$	14.18	
4.9	$x_1 + x_3 + x_4 \geq v(1,3,4)$	4.23	
4.10	$x_1 + x_2 \geq v(1,2)$	12.82	
4.11	$x_1 + x_3 \geq v(1,3)$	1.70	
4.12	$x_1 + x_4 \geq v(1,4)$	2.54	
4.13	$x_1 \geq v(1)$	0.00	
4.14	$x_2 \geq v(2)$	0.00	
4.15	$x_3 \geq v(3)$	0.00	
4.16	$x_4 \geq v(4)$	0.00	

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

²⁸ ראה גם נספח לפרק 4.

לאור המימדים הקטנים של הבעיה הנוכחית ניתן לראות בנקל כי הפונקציה האופיינית v היא מונוטונית ומקיימת את ביטוי 4.4 עבור כל משוואות הליבה (ראה טבלה 4.1).
נבחן האם הפונקציה האופיינית היא גם בעלת תכונת סופר אדטיביות.

טענה:

הפונקציה האופיינית, של המשחק השיתופי – אזורי הנבחן, המיוצגת במשוואות (4.16) – (4.6) היא בעלת תכונת סופר אדטיביות.

הוכחה:

עלינו להוכיח כי עבור כל קואליציה $S, T \subseteq \bar{N}$ כאשר S, T קבוצות זרות, מתקיים ביטוי (4.3),
 $v(S \cup T) \geq v(S) + v(T)$, בהתייחס לכך שבמשחק הנדון בעבודה הנוכחית, שחקן 1 משתתף בכל קואליציה, נוכל להסתפק במקרה פרטי של תכונת הסופר-אדטיביות בפונקציה האופיינית,
כדלקמן:

$$(4.17) \quad v(S \cup \{i\}) \geq v(S) + v(i), \quad S \cap \{i\} = \emptyset$$

מכיוון שתוספת ההכנסה של כל שחקן כאשר הוא פועל בחוסר שיתוף שווה לאפס, כלומר:
 $v(i) = 0$, ניתן לכתוב את משוואה (4.17)

$$(4.18) \quad v(S \cup \{i\}) \geq v(S), \quad S \cap \{i\} = \emptyset$$

מבחינת ערכי הפונקציה האופיינית, v , המוצגות בטבלה 4.1 מתקבל כי משוואה (4.18) מתקיימת לכל S ו- i , כאשר $S \cap \{i\} = \emptyset$. כלומר פונקצית תוספת הרווח של המשחק השיתופי היא בעלת תכונת סופר-אדטיביות ועל כן, כפי שכבר ראינו בפתרונות מודל האופטימיזציה האזורית (ראה טבלה 3.5), הפתרון האופטימאלי יושג בקואליציית העל. תכונת הסופר אדטיביות ביחס לקואליציית העל היא תנאי הכרחי לכך שליבת המשחק לא תהיה ריקה, אולם אין היא תנאי מספיק לכך. מ.ש.ל.

קיום תכונת קמירות המשחק האזורי הוא תנאי מספיק לקיומה של ליבה לא ריקה, היות והמשחק המוצג במודל הנוכחי אינו קמור²⁹ נעזר ביישום משפט Shapley – Bondareva להוכחת קיומה של ליבה לא ריקה. בנוסף, נוכיח כי במשחקים שיתופיים בעלי תכונת "מונוטוניות מנורמלת אפס" בהם קיים שחקן דומיננטי, דוגמת העיר במודל הנוכחי, קיים פתרון המקיים את כל משוואות הליבה, כלומר הליבה לא ריקה.

יישום משפט Shapley - Bondareva

הגדרה: אוסף קואליציות S_1, \dots, S_k ומספרים אי שליליים $\delta_1, \dots, \delta_k$ נקראים אוספים מאוזנים עם משקלות מאוזנים, אם לכל שחקן i מתקיים:

$$\sum_{m/i \in S_m} \delta_m = 1, \quad \forall i \in N$$

אוסף קואליציות S_1, \dots, S_k הוא אוסף מאוזן מינימאלי עם משקלות מאוזנים $\delta_1, \dots, \delta_k$ אם כל תת קבוצה שלה אינה מאוזנת.

למשחק השיתופי v יש ליבה לא ריקה אם ורק אם, לכל אוסף מאוזן מינימאלי S_1, \dots, S_k בעל וקטור משקלות מאוזנים יחיד $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_k)$, מתקיים אי השוויון:

$$\sum_{m=1}^k \delta_m v(S_m) \leq v(N)$$

בטבלה 4.2 מוצגים האוספים המאוזנים המינימאליים והמשקולות המאוזנים הרלוונטיים עבור המשחק האזורי.

²⁹ התנאי לקמירות, ביטוי (4.5), אינו מתקיים למשל עבור $S = (1,3)$ ו- $T = (1,4)$, לכן המשחק האזורי אינו קמור.

טבלה 4.2 : אוספים מאוזנים ומשקלות מאוזנים למשחק השיתופי- אזורי

משקלות מאוזנים	אוספים מינימאליים
1, 1, 1, 1	א. [(4),(3),(2),(1)]
1, 1, 1	ב. [(4),(3),(1,2)]
1, 1, 1	ג. [(4),(2),(1,3)]
1, 1, 1	ד. [(3),(2),(1,4)]
1, 1	ה. [(4),(1,2,3)]
1, 1	ו. [(3),(1,2,4)]
1, 1	ז. [(2),(1,3,4)]
1/2, 1/2, 1/2, 1/2	ח. [(4),(3),(1,2,4),(1,2,3)]
1/2, 1/2, 1/2, 1/2	ט. [(4),(2),(1,3,4),(1,2,3)]
1/2, 1/2, 1/2, 1/2	י. [(3),(2),(1,3,4),(1,2,4)]
2/3, 2/3, 1/3, 1/3, 1/3	י"א. [(4),(3),(1,2,4),(1,2,3),(1,2)]
2/3, 2/3, 1/3, 1/3, 1/3	י"ב. [(4),(2),(1,2,3),(1,3,4),(1,3)]
2/3, 2/3, 1/3, 1/3, 1/3	י"ג. [(3),(2),(1,3,4),(1,2,4),(1,4)]
2/3, 2/3, 2/3, 1/3, 1/3, 1/3	י"ד. [(4),(3),(2),(1,4),(1,3),(1,2)]

בחישוב המשקלות המאוזנים נעשה שימוש במשוואות הליבה (4.16 – 4.6). בדוגמה הבאה נראה את דרך קבלת המשקלות באוסף י"ד למשל:

מאי – שוויונות (4.10), (4.11), (4.12) ו- (4.14), (4.15), (4.16) נקבל,

$$x_1 + x_2 + x_1 + x_3 + x_1 + x_4 + x_2 + x_3 + x_4 \geq v(1,2) + v(1,3) + v(1,4) + v(2) + v(3) + v(4)$$

נזכור כי: $x_2 \geq v(2)$ ו- $x_3 \geq v(3)$ ו- $x_4 \geq v(4)$ ומארבעת אי השוויונות האחרונים וממשואה 4.6 נקבל:

$$3v(1,2,3,4) \geq v(1,2) + v(1,3) + v(1,4) + 2v(2) + 2v(3) + 2v(4)$$

או

$$v(1,2,3,4) \geq 1/3[v(1,2) + v(1,3) + v(1,4) + 2v(2) + 2v(3) + 2v(4)]$$

ניתן להראות בהתייחס לערכי פונקציה תוספת הרווח האופיינית (טבלה 4.1) כי כל האוספים

המאוזנים (א'-י"ד) מקיימים את אי השוויון $\sum_{m=1}^k \delta_m v(S_m) \leq v(N)$ ולכן **למשחק האזורי יש ליבה**

לא ריקה.

דרך נוספת להוכחת קיומה של ליבה לא ריקה היא הצגת ווקטור פתרונות הקצאה, אשר יקיים את כל משוואות הליבה [(4.16) – (4.6)] סימולטאנית.

המשחק האזורי - שיתופי מכיל שחקן דומיננטי, העיר, שבלעדיו אין מוטיבציה לשיתוף פעולה בין היחידות הכלכליות. נראה כי משחקים המאופיינים בשחקן דומיננטי ובעלי פונקציה אופיינית מונוטונית מנורמלת אפס בעלת ערכים לא שליליים מכילים ליבה לא ריקה.

טענה:

במשחקים שיתופיים "מונוטוניים מנורמלים אפס" בהם קיים שחקן דומיננטי, הליבה אינה ריקה.

הוכחה:

מספיק כי נוכיח כי קיים פתרון המקיים את כל משוואות הליבה בכדי להוכיח את קיומה של הליבה.

לתיאור תכונת המונוטוניות³⁰ נעזר באי שוויון (4.4):

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

במקרה זה נתייחס לפונקציה אופיינית v לא שלילית. ניתן לראות מאי השוויון כי ערך הפונקציה האופיינית גדל ככל שנוספים יותר שחקנים לקואליציה ולבסוף נקבל ש- $v(\bar{N})$ הוא הערך הגדול ביותר אותה יכולה לקבל פונקציה v .

³⁰ ההוכחה מתייחסת לפונקציות אופייניות המתארות תוספת הכנסה או רווח, עבור פונקציות אופייניות המתארות עלויות יש לרשום את אי השוויון בצורה הבאה: $v(S) \geq v(T)$ לכל $S \subseteq T$, כלומר, העלות הנמוכה ביותר מושגת בקואליציית העל.

כאמור, 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, $v(i) = 0$.

נתייחס למשחק שיתופי המכיל $i=1, \dots, m$ שחקנים, כאשר $i=1$ מסמל את השחקן הדומיננטי. נראה כי ווקטור ההקצאה $\Omega = (v(\bar{N}), 0, \dots, 0)$ המקצה את כל ערך קואליציית העל לשחקן הדומיננטי ומקצה אפס לשאר השחקנים מקיים את כל משוואות הליבה.

נציב את ווקטור הפתרון Ω במשוואת היעילות של הליבה ונקבל,

$$v(\bar{N}) + 0 + \dots + 0 = v(\bar{N}) \Rightarrow v(\bar{N}) = v(\bar{N})$$

נציב את ווקטור הפתרון Ω במשוואות הרציונאליות הקבוצתית (נזכור כי השחקן הדומיננטי משתתף בכל קואליציה) ונקבל,

$$v(\bar{N}) + 0 \geq v(S) \Rightarrow v(\bar{N}) \geq v(S)$$

כאשר מציבים את ווקטור הפתרון Ω במשוואות הרציונאליות האישית, יש להבחין בין שני מקרים:

- א. רציונאליות אישית של השחקן הדומיננטי: $i = 1$, $v(\bar{N}) \geq v(i) = v(\bar{N})$,
- ב. רציונאליות אישית של שחקן כלשהוא לא דומיננטי: $i \neq 1$, $0 \geq v(i) = 0$,

הראנו כי ווקטור הפתרון Ω מקיים את כל משוואות הליבה על כן הוא מצוי בתוך הליבה ומכאן שהליבה אינה ריקה. מ.ש.ל.

בהסתמך על ההוכחה דלעיל ניתן להראות כי ווקטור הפתרון $x = (15.87, 0, 0, 0)$ מקיים את כל משוואות הליבה (ראה טבלה 4.1) ולכן מהווה פתרון בליבת המשחק השיתופי – אזורי וזו דרך נוספת המוכיחה כי ליבת המשחק השיתופי בעבודה הנוכחית אינה ריקה.

הגרעינון, שיוצג להלן, מצמצם את פתרונות הליבה האפשריים ובאמצעות כללים אכסיומטיים נוספים מאתר פתרון הקצאה יחיד.

4.6 פתרונות הגרעין והגרעינון

הגרעין

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

דרך אפשרית מקובלת לצמצום אפשרויות ההקצאה הרבות, היא באמצעות חישוב הגרעין (למשל: **(Maschler (1992), Friedman (1990)**).

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

$$(4.19) \quad e(S, x) = v(S) - \sum_{i \in S} x_i$$

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

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

$$(4.20) \quad D_{ij}(x) = \max\{e(S, x) \mid S \subset N, i \in S, j \notin S\}$$

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

$$D_{12} = \max\{-x_1, v(1,3,4) - x_1 - x_3 - x_4, v(1,3) - x_1 - x_3, v(1,4) - x_1 - x_4\}$$

באופן דומה ניתן להגדיר D_{ji} כעודף של שחקן j כאשר הוא פועל בחוסר שיתוף עם שחקן i . איזון עודפים בין זוג שחקנים יתקבל כאשר:

$$(4.21) \quad D_{ij}(x) = D_{ji}(x) \quad \forall i, j \in N$$

פתרון הגרעין מתקבל מפתרון סימולטאני של ביטוי (4.21) לכל i ו- j תוך שימוש בערכי הפונקציה האופיינית (ראה טבלה 4.1).

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

פתרון הקצאת הגרעין עבור המשחק האזורי תעשה על ידי הצבת ערכי הפונקציה האופיינית (טבלה 4.1) בביטוי (4.21) עבור כל זוגות השחקנים האפשריות (סה"כ 3!) ופתירתן. טבלה 4.3 שלהלן מציגה את פתרון הגרעין שהתקבל.

טבלה 4.3: פתרון הקצאת הגרעין

שחקן	פתרון הקצאת הגרעין (מיליוני ₪)	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	8.19	51.60%
2	5.82	36.68%
3	0.84	5.30%
4	1.02	6.42%

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

הגרעינון

הקצאת הגרעינון הינה הקצאה אופטימאלית יחידה המצויה בליבה. הגרעינון הינו ווקטור התשלומים (ווקטור ההקצאה) הקטן ביותר האפשרי. חישוב הגרעינון מבוסס על השוואה בין ווקטורי העודפים (ביטוי 4.19). את רכיבי ווקטור העודפים, $e(S, x)$, מסדרים בסדר יורד, אותו המקטע שווקטור העודף שלו הוא הקטן ביותר לקסיקוגרפית [השוואה הלקסיקוגרפית מתייחסת לערך הווקטור התלוי במרכיבי הווקטור לפי סדר הופעתם משמאל לימין]. כך למשל ווקטור (1,1,2,2) קטן לקסיקוגרפית מווקטור (1,1,3,1) – שני האברים הראשונים זהים בשני הווקטורים, אך האיבר השלישי בווקטור הראשון (2) קטן יותר מהאיבר השלישי בווקטור השני (3), בדוגמא זו אין חשיבות לערכו של האיבר הרביעי בהשוואה הלקסיקוגרפית], וקיים רק מקטע אחד שכזה, הוא הגרעינון של המשחק.

בצורה פורמאלית חישוב הגרעינון מתקבל מהנוסחה הבאה:

$$(4.22) \text{ Nuc}(x) = \{x' \in x \mid x'' \in x \Rightarrow \psi(x') \leq \psi_L(x'')\}$$

כאשר:

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

$\psi(\cdot)$ מסמל את ווקטור העודפים³¹ ו- $\psi_L(\cdot)$ מסמל סידור לקסיקוגרפי של ווקטור העודפים.

על ידי שימוש בביטוי (4.22) נקבל את הקצאת הגרעינון עבור המשחק האזורי, כפי שמוצג בטבלה

4.4.

$$\psi(x) = [e_1(x), e_2(x), \dots, e_{2^n}(x)] \in R^{2^n \text{ } 31}$$

טבלה 4.4 : פתרון הקצאת הגרעינון

שחקן	פתרון הקצאת הגרעינון (מיליוני ₪)	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	8.19	51.60%
2	5.82	36.68%
3	0.84	5.30%
4	1.02	6.42%

ניתן לראות כי פתרון הגרעינון שווה לפתרון הגרעין (טבלה 4.3). הקצאת הגרעינון (והגרעין, במקרה הנבחן) מייחסת את הכוח היחסי הגדול ביותר לשחקן מספר 1.

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

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

4.7 ערכי שפלי (Shapley Values)

ערכי שפלי הינם פתרון הקצאה הוגן ויחיד של משחקים מתחום תורת המשחקים המתייחס לאפשרויות המיקוח של כל שחקן בכל אחת מחלופות ההתארגנות. ערכי שפלי מוגדרים רק כאשר ניתן להשוות בין תועלות השחקנים, בשילוב עם אפשרות להעברתן (כסף או אשראי). במילים אחרות, ערכי שפלי מוגדרים כאשר ניתן להעביר תועלות בין השחקנים (TU games).

בניגוד להקצאת פתרון הגרעינון, ערכי שפלי אינם תלויים בקיומה של ליבה ולכן ייתכן כי ערכי שפלי אינם מוכלים בליבה, כאשר היא קיימת (ראה: Loehman et al, 1979; Young, 1994).

ערכי שפלי, $g(x_i)$, מחושבים על פי הנוסחה הבאה (ראה למשל: Loehman et al, 1979 : Young, 1994):

$$(4.25) \quad g(x_i) = \sum_{S \subseteq N-i} \frac{|S|!(|N-S|-1)!}{|N|!} [v(S+i) - v(S)]$$

נוסחת שפלי

נוסחת שפלי בוחנת את כוחו של שחקן i במשחק האזורי על ידי חישוב ממוצע משוקלל של תוספת הערך השולית לקואליציה S עקב צירופו של שחקן i לקואליציה, עבור כל חלופות התארגנות, לרבות הצטרפות שחקן i לקואליציות שערכן אפס. הצבת ערכי הפונקציה האופיינית, v , (ראה טבלה 4.1) בנוסחת שפלי תוביל לסכמת ההקצאה הבאה:

טבלה 4.5: סכמת הקצאת ערכי שפלי

שחקן	ערכי שפלי (מיליוני ₪)	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	8.08	50.90%
2	5.96	37.56%
3	0.79	4.96%
4	1.04	6.58%

מהצבת ערכי שפלי שנתקבלו במשוואות הליבה (טבלה 4.1) עולה כי סכמת ההקצאה של ערכי שפלי מקיימת את כל משוואות הליבה (טבלה 4.1) ולכן מצויה בליבת המשחק השיתופי הנבחן. במילים אחרות, ערכי שפלי של המשחק האזורי הנבחן מקיימים את תנאי הרציונאליות האישית והקבוצתית ובאותה עת מבטיחים כי כל תוספת הרווח תחולק לשחקנים.

בנוסף, סכמת הקצאת שפלי מקיימת את האכסיומות הבאות:

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

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

טבלה 4.6: ריכוז פתרונות ההקצאה (במיליוני ₪)

שחקן	ערכי שפלי	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח	פתרון הקצאת הגרעין והגרעינון	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	8.08	50.90%	8.19	51.60%
2	5.96	37.56%	5.82	36.68%
3	0.79	4.96%	0.84	5.30%
4	1.04	6.58%	1.02	6.42%

מטבלה 4.6 ניתן לראות כי העיר, יצרנית השפכים, מקבלת את תוספת הרווח הגבוהה ביותר (כמחצית), בהתייחס לשיטות ההקצאה שנבחנו. במילים אחרות, לעיר יש את כוח המיקוח הגדול ביותר הנובע מעצם היותה ספקית הקולחים היחידה באזור הנבחן.

למנהלת הנחל, הקצאת תוספת הרווח השנייה בגודלה (כשליש), תפקידה הכפול של מנהלת הנחל, הן כצרכנית הקולחים השלישוניים הגדולה ביותר באזור והן כספקית הקולחים לקבוצות החקלאים השונות³² מקנה למנהלת הנחל כוח יחסי רב יותר משאר היחידות הצרכניות באזור (חקלאים קרובים וחקלאים רחוקים).

החקלאים הקרובים והרחוקים משמשים כצרכני קולחים בלבד. הקצאת תוספת הרווח לקבוצות החקלאים אינה זהה היות וקבוצות החקלאים נבדלות זו מזו (למשל: בגודל שטחי הקרקע, תמהיל הגידולים, מכסת מי שפירים וכדומה). מהסתכלות ראשונית נראה כי הקצאת תוספת הרווח לקבוצות החקלאים נמוכות, אך מהשוואה למצבם התחילי של החקלאים הקרובים והרחוקים (ראה טבלה 3.5) עולה כי אלו שיפרו את רווחיהם בכ- 40% ובכ- 35.5%, בהתאמה.

³² בקואליציות בהן היא שותפה יחד עם העיר וקבוצת חקלאים אחת לפחות.

פרק 5: הקצאת תוספת הרווח משיתוף פעולה אזורי בתנאי חוסר וודאות

5.1 כללי

בפרק זה נציע מנגנון ישיר (Direct Mechanism) להתקשרות בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור, בתנאי חוסר וודאות ובהעדר מגשר מסוג שהוא, תוך התבססות על ממצאי הפרקים הקודמים (פרקים 3 ו-4).

בפרקים הקודמים ראינו כי הקצאת כל הקולחים של העיר, ברמת הטיהור השלישונית, למנהלת הנחל והולכת הקולחים משפך הנחל אל קבוצות החקלאים השונות, הינה החלופה הטובה ביותר מבין כל חלופות ההקצאה שנבחנו (להלן: "החלופה המיטבית").

בחלופה המיטבית, למנהלת הנחל תפקיד כפול, היא רוכשת הקולחים היחידה מן העיר ומשמשת כספקית קולחים לקבוצות החקלאים השונות. בהתאם, נבחן את מנגנון ההתקשרות בין היחידות הכלכליות הפעילות באזור בשני שלבים:

שלב א': ניסוח מנגנון התקשרות בין מנהלת הנחל לבין קבוצות החקלאים השונות.

שלב ב': ניסוח מנגנון התקשרות בין העיר לבין מנהלת הנחל.

בנוסף, היות וראינו בפרקים הקודמים כי לעיר, יצרנית הקולחים, הכוח היחסי הגדול ביותר, נבחן גם את חלופת ההתקשרות (להלן: "חלופה ב'") בה העיר מציעה חוזה התקשרות, תחילה, לקבוצות החקלאים השונות ולאחר מכן מציעה חוזה התקשרות למנהלת הנחל.

התקשרויות מסוג אלו נבחנות בספרות [Fudenberg and Tirole, 1993; Maskin, 2002];
[Mass-Collel, Whinston and Green, 1985; Feinerman and Seiler, 2002], תוך שימוש במודלים מתחום תורת המשחקים הידועים בשם: Mechanism Design.

נעיר כי גם בפרק הנוכחי, בדומה לפרקים הקודמים, נתייחס לתוספת הרווח הנוצרת כתוצאה משיתוף הפעולה בין היחידות הכלכליות.

בסעיפים 5.2 ו- 5.3 יוצגו המודלים התיאורטיים עבור כל אחד מהשלבים של החלופה המיטבית ולאחריהם תוצגנה התוצאות האמפיריות בסעיף 5.4. בסעיפים 5.5 ו-5.6, יוצגו המודלים התיאורטיים של חלופה ב' והתוצאות האמפיריות עבור חלופה זו, בהתאמה. סעיף 5.7 יסכם את הממצאים האמפיריים שנתקבלו, בהתייחס לשתי החלופות שנבחנו.

5.2 חלופה מיטבית - שלב א': מסגרת מושגית

כאמור, בשלב זה נתייחס להתקשרות בין מנהלת הנחל לבין שתי קבוצות החקלאים הפעילים באזור. נסמל ב- $i=2$ את מנהלת הנחל (Principal), שמספקת קולחים לשתי קבוצות החקלאים הפעילים באזור (Agents): חקלאים קרובים וחקלאים רחוקים, שנסמלם ב- $i=3$ וב- $i=4$, בהתאמה.

הגדרות, הסמלות והנחות

נסמל ב- $V_i(W_i, \theta_i)$ עבור $i=3,4$, את התועלת (במונחים כספיים) השנתית (בשנת משקעים ממוצעת) של החקלאים משימוש בקולחים שלישוניים; כאשר:

W_i היא כמות הקולחים ברמת טיהור שלישוני שיועברו משפך הנחל אל החקלאי ה- i ($i=3,4$);

θ_i הינו פרמטר המשקף את "טיפוס החקלאי" (Farmer's type). ערכו של הפרמטר הוא מידע

פרטי (Private Information) הידוע רק לחקלאי עצמו ($i=3,4$) ואינו ידוע לחקלאי השני ו/או

למנהלת הנחל (ו/או לעיר)³³. במקרה הנוכחי, θ_i הינו ביקוש החקלאים לקולחים שלישוניים.

פונקצית התועלת V_i היא מונוטונית, עולה, גזירה פעמיים ב- W_i וקעורה מממש³⁴.

³³ אמנם העיר אינה מופיעה בשלב א' של הניתוח, אך היא חלק מרכזי במודל הכללי.

³⁴ $\frac{\partial V_i}{\partial W_i} > 0, \frac{\partial^2 V_i}{\partial^2 W_i} < 0, i = 3,4$

טיפוסי החקלאים θ_i נלקחים מפרופיל הטיפוסים $\Theta = (\theta_3, \theta_4)$ ואינם תלויים (סטטיסטית) אחד בשני. יונח כי כל טיפוס θ_i מתפלג בצורה אחידה (uniform distribution) בתחום $\left[\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i \right] \subset \mathfrak{R}$ כאשר, $\bar{\theta}_i \neq \underline{\theta}_i$. למנהלת הנחל ולקבוצת חקלאים קיימת אמונה ראשונית (a priori belief) לגבי פונקציית ההתפלגות של טיפוס החקלאי ה- i , ואנו מניחים כי ההתפלגות המצטברת $F_i(\theta_i)$, ידועה לכל המשתתפים בתהליך ההקצאה (common information).

נניח בנוסף כעת כי פונקציית התועלת של חקלאי i היא quasi-linear:

$$(5.1) \quad U_i(W_i, t_i, \theta_i) = V_i(W_i, \theta_i) \cdot \theta_i - t_i, \quad i = 3, 4$$

כאשר, t_i מסמל את תשלומי ההעברה (במונחים כספיים) מהחקלאי ה- i , למנהלת הנחל.

תועלת מנהלת הנחל הרלוונטית לשלב א' של הניתוח³⁵, היא:

$$(5.2) \quad U_2(W_3, W_4, t_3, t_4, \Theta) = t_3 + t_4 - V_2(W_3, W_4)$$

כאשר, V_2 מייצג את העלויות המשתנות מהולכת קולחים משפך הנחל אל החקלאים השונים. הפונקציה V_2 עולה ליניארית בשני הארגומנטים שלה.

מנגנון ההתקשרות

בתנאים של חוסר וודאות ואינפורמציה לא סימטרית ובהעדר מחיר אחיד לקולחים, אסטרטגית מנהלת הנחל היא להציע קולחים לחקלאים בתמורה לפיצוי כספי בגין העלויות הכרוכות בהולכת הקולחים ובתקווה להשגת רווחים מעבר לכך. לשם כך מציעה מנהלת הנחל מנגנון התקשרות לפי השלבים הבאים:

³⁵ תועלת מנהלת הנחל בשלב זה מתייחסת רק לעלויות ולתשלומי ההעברה הכרוכים בהתקשרות מנהלת הנחל עם קבוצת החקלאים השונות, בסעיף 5.3 תוצג התועלת השלמה של מנהלת הנחל.

בנוסף, על החוזה המוצע לקיים את תכונות הרציונאליות הפרטית³⁷ (Individual Rationality- IR) כדי שכל אחת מקבוצות החקלאים תסכים ליטול בו חלק. כמובן, על החוזה לקחת בחשבון את מגבלת כמות הקולחים הזמינה לחקלאים (Quantity Constraint- QC).
 בהינתן ההגדרות וההנחות דלעיל, בעיית מנהלת הנחל היא:

$$(5.3) \quad \underset{W_i(\Theta), t_i(\Theta)}{\text{MAX}} \quad E_{\Theta} \{t_3(\Theta) + t_4(\Theta) - V_2(W_3(\Theta), W_4(\Theta))\}$$

בכפיפות לאילוצים הבאים:

$$(5.4) \quad \begin{aligned} & E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_3) - t_3(\theta_3, \theta_4)\} \\ & \geq E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\tilde{\theta}_3, \theta_4) \cdot \theta_3) - t_3(\tilde{\theta}_3, \theta_4)\} \quad \forall \tilde{\theta}_3 \in [\underline{\theta}_3, \bar{\theta}_3] \end{aligned} \quad (IC_3)$$

$$(5.5) \quad \begin{aligned} & E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_4) - t_4(\theta_3, \theta_4)\} \\ & \geq E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \tilde{\theta}_4) \cdot \theta_4) - t_4(\theta_3, \tilde{\theta}_4)\} \quad \forall \tilde{\theta}_4 \in [\underline{\theta}_4, \bar{\theta}_4] \end{aligned} \quad (IC_4)$$

$$(5.6) \quad E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_3) - t_3(\theta_3, \theta_4)\} \geq 0 \quad \forall \theta_3 \in [\underline{\theta}_3, \bar{\theta}_3] \quad (IR_3)$$

$$(5.7) \quad E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_4) - t_4(\theta_3, \theta_4)\} \geq 0 \quad \forall \theta_4 \in [\underline{\theta}_4, \bar{\theta}_4] \quad (IR_4)$$

$$(5.8) \quad W_4(\theta_3, \theta_4) + W_3(\theta_3, \theta_4) \leq K \quad (QC)$$

כאשר: K הינה כמות הקולחים הזמינה לחקלאים משפך הנחל ו- E_{θ_i} הוא האופרטור של התוחלת על פני ההתפלגות הידועה של θ_i , עבור $i=3, 4$.

³⁷ תנאי זה מבטיח כי הפרטים פועלים בצורה רציונאלית יעדיפו יותר (תועלת) על פני פחות (תועלת) – More is better. בהקשר הנוכחי: על החוזה המוצע לשפר את מצבם התחילי של השחקנים. ראה גם: **Fudenberg and Tirole, (1993)**.

הפתרון לבעיית מנהלת הנחל (משוואה 5.3), תחת המגבלות השונות (5.4 – 5.8) יוצג בשלבים:

$$U_3(\theta_3) \equiv \underset{\tilde{\theta}_3}{MAX} E_{\theta_4} \left\{ V_3(W_3(\tilde{\theta}_3, \theta_4)) \cdot \theta_3 - t_3(\tilde{\theta}_3, \theta_4) \right\} \quad \text{א. נגדיר:}$$

בהנחת פתרון פנימי לבעיית מנהלת הנחל, תנאי סדר ראשון הינו:

$$E_{\theta_4} \left\{ \frac{\partial V_3}{\partial W_3} \frac{\partial W_3}{\partial \tilde{\theta}_3} \cdot \theta_3 - \frac{\partial t_3}{\partial \tilde{\theta}_3} \right\} = 0$$

מכיוון שבפתרון האופטימאלי $\tilde{\theta}_3$ שווה ל- θ_3 . אזי:

$$(5.9) \quad U_3(\theta_3) = E_{\theta_4} \left\{ V_3(W_3(\theta_3, \theta_4)) \cdot \theta_3 - t_3(\theta_3, \theta_4) \right\}$$

כדי להבטיח ש- θ_3 הוא מקסימום גלובאלי על פני התחום $[\underline{\theta}_3, \bar{\theta}_3]$ נניח כי הנגזרת השנייה של

הביטוי (5.9) היא שלילית לכל θ_3 בתחום, כלומר:

$$E_{\theta_4} \left\{ \theta_3 \left(\frac{\partial^2 V_3}{\partial^2 W_3} \left(\frac{\partial W_3}{\partial \theta_3} \right)^2 + \frac{\partial V_3}{\partial W_3} \frac{\partial^2 W_3}{\partial \theta_3^2} \right) - \frac{\partial^2 t_3}{\partial^2 \theta_3} \right\} < 0$$

היות והנגזרת הראשונה דלעיל שווה באופן זהותי לאפס עבור כל θ_3 בתחום הרלוונטי, אזי גזירת

הביטוי: $E_{\theta_4} \left\{ \frac{\partial V_3}{\partial W_3} \frac{\partial W_3}{\partial \tilde{\theta}_3} \cdot \theta_3 - \frac{\partial t_3}{\partial \tilde{\theta}_3} \right\}$ ביחס ל- θ_3 תהיה שווה אף היא לאפס, כלומר:

$$E_{\theta_4} \left\{ \theta_3 \left(\frac{\partial^2 V_3}{\partial^2 W_3} \left(\frac{\partial W_3}{\partial \theta_3} \right)^2 + \frac{\partial V_3}{\partial W_3} \frac{\partial^2 W_3}{\partial \theta_3^2} \right) + \frac{\partial V_3}{\partial W_3} \frac{\partial W_3}{\partial \theta_3} - \frac{\partial^2 t_3}{\partial^2 \theta_3} \right\} = 0$$

מביטוי זה בשילוב עם תנאי הסדר השני לעיל עולה כי $\frac{\partial V_3}{\partial W_3} \frac{\partial W_3}{\partial \theta_3} > 0$. היות ו- $\frac{\partial V_3}{\partial W_3} > 0$

(מתכונות פונקציות V_3 , ראה לעיל), אזי W_3 חייב להיות פונקציה עולה של θ_3 (כלומר:

$\left(\frac{\partial W_3}{\partial \theta_3}\right) > 0$. באופן דומה, ניתן להראות כי W_4 חייב להיות פונקציה עולה של θ_4 (כלומר:

$\left(\frac{\partial W_4}{\partial \theta_4}\right) > 0$. במילים אחרות, לחקלאי i , עבור $i=3,4$, יש לכאורה מוטיבציה לדווח על

ערך θ_i גבוה ככל הניתן במטרה לקבל כמות קולחים גדולה יותר. אולם, היות ו- $\frac{\partial V_3}{\partial W_3} \frac{\partial W_3}{\partial \theta_3} > 0$

ומכיוון שבפתרון האופטימאלי $\tilde{\theta}_3$ שווה ל- θ_3 , נקל לראות מתנאי סדר ראשון לעיל כי מתקיים

$\frac{\partial t_3}{\partial \theta_3} > 0$. באופן דומה, ניתן להראות כי $\frac{\partial t_4}{\partial \theta_4} > 0$. דהיינו, גם תשלומי ההעברה הם פונקציה

עולה של ערכי θ_i . דהיינו, התשלום שיועבר למנהלת הנחל יגדל ככל שערך θ_i של הפרט יהיה

גבוה יותר, וזו הסיבה בגינה כדאי לכל פרט לדווח את טיפוסו האמיתי ולא דווקא את $\bar{\theta}_i$ הערך

המקסימאלי של θ_i .

מדיפרנציאל שלם על $U_3(\theta_3)$ ומשימוש במשפט המעטפת נקבל:

$$\frac{\partial U_3}{\partial \theta_3} = E_{\theta_4} \{V_3(W_3, \theta_3)\}$$

אינטגרציה על שני האגפים, כאשר $\underline{\theta}_3$ ו- θ_3 משמשים כגבול תחתון

ועליון של האינטגרל, בהתאמה, מניבה:

$$(5.10) \quad U_3(\theta_3) = U_3(\underline{\theta}_3) + \int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4))\} d\hat{\theta}_3$$

ובאופן דומה עבור $i=4$, נקבל:

$$(5.11) \quad U_4(\theta_4) = U_4(\underline{\theta}_4) + \int_{\underline{\theta}_4}^{\theta_4} E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \hat{\theta}_4))\} d\hat{\theta}_4$$

נבחין כי מגבלות ה- IC (ביטויים (5.5) – (5.4)) תתמלאנה אם משוואות (5.11) – (5.10) תסופקנה.

במקרה זה ניתן להחליף את ביטויים (5.4) ו- (5.5) במשוואות (5.11) ו- (5.10), בהתאמה.

ב. נזכור כי $V_i(W_i(\theta_i))$ הינו חיובי עבור $i=3,4$. בנוסף, נבחין כי ממשוואות (5.11) – (5.10)

מתקיים: $U_i(\theta_i) > U_i(\underline{\theta}_i)$ עבור $i=3,4$. לכן מגבלות ה-IR בבעיית האופטימיזציה של מנהלת הנחל יכולים להיות מוחלפות על ידי הביטויים הבאים:

$$(5.12) \quad E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\underline{\theta}_3, \theta_4) \cdot \underline{\theta}_3) - t_3(\underline{\theta}_3, \theta_4)\} \geq 0 \quad (IR'_3)$$

$$(5.13) \quad E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \underline{\theta}_4) \cdot \underline{\theta}_4) - t_4(\theta_3, \underline{\theta}_4)\} \geq 0 \quad (IR'_4)$$

במילים אחרות, מגבלות (5.6) ו-(5.7) תסופקנה אם ורק אם יסופקו ביטויים (5.12) ו-(5.13), בהתאמה.

ג. משוואות (5.9) ו-(5.10) משמשות לחישוב תשלומי ההעברה הצפויים:

$$(5.14) \quad E_{\theta_4} \{t_3(\theta_3, \theta_4)\} = E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\theta_3, \theta_4)) \cdot \theta_3\} - \int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4))\} d\hat{\theta}_3 - U_3(\underline{\theta}_3)$$

ובאופן דומה,

$$(5.15) \quad E_{\theta_3} \{t_4(\theta_3, \theta_4)\} = E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \theta_4)) \cdot \theta_4\} - \int_{\underline{\theta}_4}^{\theta_4} E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \hat{\theta}_4))\} d\hat{\theta}_4 - U_4(\underline{\theta}_4)$$

הצבת משוואות (5.14) ו-(5.15) בפונקציית המטרה של מנהלת הנחל (ביטוי 5.3) מאפשרות לשוב ולהציג את בעיית האופטימיזציה של מנהלת הנחל תחת המגבלות השונות (ביטויים (5.8) – (5.4)) באופן הבא:

$$(5.16) \quad \begin{aligned} & \underset{W_i(\theta_i), t_i(\theta_i), i=3,4}{MAX} \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} [-V_2(W_3(\hat{\theta}_3), W_4(\hat{\theta}_4))] f_3(\hat{\theta}_3) f_4(\hat{\theta}_4) d\hat{\theta}_3 d\hat{\theta}_4 \\ & + \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \left\langle E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) \cdot \hat{\theta}_3\} - \int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} E_{\theta_4} \{V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4))\} d\hat{\theta}_3 \right\rangle f_3(\hat{\theta}_3) d\hat{\theta}_3 \\ & + \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} \left\langle E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \hat{\theta}_4)) \cdot \hat{\theta}_4\} - \int_{\underline{\theta}_4}^{\theta_4} E_{\theta_3} \{V_4(W_4(\theta_3, \hat{\theta}_4))\} d\hat{\theta}_4 \right\rangle f_4(\hat{\theta}_4) d\hat{\theta}_4 \\ & - U_3(\underline{\theta}_3) - U_4(\underline{\theta}_4) \end{aligned}$$

$$(5.17) \quad U_3(\underline{\theta}_3) \geq 0 \quad (IR'_3)$$

$$(5.18) \quad U_4(\underline{\theta}_4) \geq 0 \quad (IR'_4)$$

$$(5.19) \quad \frac{\partial W_i}{\partial \theta_i} > 0, \quad i = 3, 4$$

$$(5.20) \quad W_4(\theta_3, \theta_4) + W_3(\theta_3, \theta_4) \leq K \quad (QC)$$

ממשואות (5.18) – (5.16) ניתן לראות כי פתרון מקסימאלי יושג כאשר $U_i(\underline{\theta}_i) = 0$ עבור $i=3,4$. כלומר, מגבלות (IR') חייבות להיות תחומות (באפס), מכאן שניתן להסיר את $U_3(\underline{\theta}_3), U_4(\underline{\theta}_4)$ מבעיית מנהלת הנחל (ביטוי 5.16). כמו- כן ניתן להשמיט את מגבלות ה- IR'.

כעת נמשיך עם דרך הפתרון של בעיית מנהלת הנחל המוגדרת ב- (5.16). נבחין כי,

$$\int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \left\langle E_{\theta_4} \left\{ V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) \cdot \hat{\theta}_3 \right\} - \int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} E_{\theta_4} \left\{ V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) \right\} d\hat{\theta}_3 \right\rangle dF_3(\hat{\theta}_3) =$$

$$\int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) \cdot \hat{\theta}_3 dF_3(\hat{\theta}_3) dF_4(\hat{\theta}_4) - \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} \left[\int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \left(\int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) d\hat{\theta}_3 \right) dF_3(\hat{\theta}_3) \right] dF_4(\hat{\theta}_4) \equiv R3$$

על ידי שימוש באינטגרציה בחלקים של הביטוי הרשום בסוגריים המרובעים הגדולים נקבל,

$$[\dots] = \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \left[V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) \right] \cdot [1 - F_3(\hat{\theta}_3)] d\hat{\theta}_3$$

לכן נוכל לרשום את R3 באופן הבא :

$$R3 = \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) \cdot \hat{\theta}_3 dF_3(\hat{\theta}_3) dF_4(\hat{\theta}_4) - \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} [V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4))] \cdot [1 - F_3(\hat{\theta}_3)] d\hat{\theta}_3 dF_4(\hat{\theta}_4)$$

באותה דרך בה הצגנו את R3 ניתן להציג את R4, כלומר :

$$R4 = \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} V_4(W_4(\theta_3, \hat{\theta}_4)) \cdot \hat{\theta}_4 dF_4(\hat{\theta}_4) dF_3(\hat{\theta}_3) - \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} [V_4(W_4(\theta_3, \hat{\theta}_4))] \cdot [1 - F_4(\hat{\theta}_4)] d\hat{\theta}_4 dF_3(\hat{\theta}_3)$$

על ידי הצבת R3 ו-R4 בבעיית האופטימיזציה (ביטויים (5.20) - (5.16)) נקבל,

$$(5.21) \quad G(W_3, W_4, \theta_3, \theta_4) = \int_{\underline{\theta}_3}^{\bar{\theta}_3} \int_{\underline{\theta}_4}^{\bar{\theta}_4} \left\{ -V_2(W_3(\hat{\theta}_3), W_4(\hat{\theta}_4)) + V_3(W_3(\hat{\theta}_3, \theta_4)) \cdot \left[\hat{\theta}_3 - \frac{1 - F_3(\hat{\theta}_3)}{f_3(\hat{\theta}_3)} \right] + V_4(W_4(\theta_3, \hat{\theta}_4)) \cdot \left[\hat{\theta}_4 - \frac{1 - F_4(\hat{\theta}_4)}{f_4(\hat{\theta}_4)} \right] \right\} dF_3(\hat{\theta}_3) dF_4(\hat{\theta}_4)$$

בכפיפות לאילוצים הבאים :

$$(5.22) \quad \frac{\partial W_i}{\partial \theta_i} > 0, \quad i = 3, 4$$

$$(5.23) \quad W_4(\theta_3, \theta_4) + W_3(\theta_3, \theta_4) \leq K \quad (QC)$$

בהנחת פתרון פנימי (מגבלות 5.22 ו-5.23 תחומות) הפונקציות האופטימאליות $W_i(\theta_3, \theta_4)$ עבור $i=3,4$ חייבות לספק את תנאי הסדר הראשון של G:

$$(5.24) \quad G_{W_i} = -\frac{\partial V_2(W_3(\theta_3, \theta_4), W_4(\theta_3, \theta_4))}{\partial W_i} + \frac{\partial V_i(W_i(\theta_3, \theta_4))}{\partial W_i} \cdot H_i(\theta_i) - \lambda = 0$$

עבור $i=3,4$.

כאשר:

λ מחיר הצל של מגבלת הכמויות (QC) גדול או שווה לאפס ($\lambda \geq 0$),

עבור $i=3,4$, כאשר $H_i(\theta_i) = \theta_i - \frac{1-F_i(\theta_i)}{f_i(\theta_i)}$ היא פונקצית

ההתפלגות השולית של θ_i .

G_{W_i} היא הנגזרת החלקית של G לפי W_i , $i=3,4$.

על מנת להבטיח כי פתרון (5.24) עבור W_i , $i=3,4$ האופטימאלי הוא פתרון מקסימאלי לבעיה, אזי צריכים להתקיים שלושת התנאים הבאים:

א. $H_i(\theta_i) > 0$, כלומר³⁸: $\bar{\theta}_i > \frac{\theta_i}{2}$ עבור $i=3,4$.

ב. $G_{W_i W_i} = -\frac{\partial^2 V_2(W_3(\theta_3, \theta_4), W_4(\theta_3, \theta_4))}{\partial^2 W_i} + \frac{\partial^2 V_i(W_i(\theta_3, \theta_4))}{\partial^2 W_i} \cdot H_i(\theta_i) < 0$.

ג. $\Delta = G_{W_3 W_3} G_{W_4 W_4} - (G_{W_3 W_4})^2 > 0$.

³⁸ היות ומהנחות המודל מתקיימים: (א) $f_i(\theta_i) = \frac{1}{\bar{\theta}_i - \underline{\theta}_i}$ (התפלגות אחידה), (ב) $F_i(\theta_i) = \frac{\theta_i - \underline{\theta}_i}{\bar{\theta}_i - \underline{\theta}_i}$ אזי נקל

להוכיח כי $H_i(\theta_i) = 2\theta_i - \bar{\theta}_i$.

כעת נוכיח כי הפתרון האופטימאלי המושג עבור $i = 3, 4, W_i$ מקיים גם את מגבלה (5.22). נבחין

כי גזירת תנאי סדר ראשון, G_{W_3} , ביחס ל- θ_3 צריך להיות אף הוא להיות שווה לאפס כלומר:

$$(5.27) \quad G_{W_3, \theta_3} = -\frac{\partial^2 V_2}{\partial^2 W_3} \frac{\partial W_3}{\partial \theta_3} + \frac{\partial^2 V_3}{\partial^2 W_3} \frac{\partial W_3}{\partial \theta_3} \cdot H_3(\theta_3) + \frac{\partial H_3}{\partial \theta_3} \frac{\partial V_3}{\partial W_3} = 0$$

משוואה (5.27) עם תנאים א' ו-ב' לעיל ובהתייחס להנחות עבור $i=2,3,4, V_i$, מוכיחות כי מגבלה

$$(5.22) \quad \text{אכן מתקיימת, כלומר, } \frac{\partial W_i}{\partial \theta_i} > 0, \text{ עבור } i = 3, 4.$$

כעת נציג את פונקציות התשלומים האופטימאליים. נזכור כי $U_i(\underline{\theta}_i) = 0$ עבור $i=3,4$ ועל ידי

הצבת ערכי $i=3,4, W_i$ האופטימאליים [ערכי $i=3,4, W_i(\theta_3, \theta_4)$, המספקים את ביטוי (5.24),

$i=3,4, W_i^*(\theta_3, \theta_4)$ במשוואות (5.14) ו-(5.15), נקבל:

$$(5.28) \quad t_3^*(\theta_3, \theta_4) = V_3(W_3^*(\theta_3, \theta_4)) \cdot \theta_3 - \int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} V_3(W_3^*(\theta_3, \theta_4)) d\hat{\theta}_3$$

-ו

$$(5.29) \quad t_4^*(\theta_3, \theta_4) = V_4(W_4^*(\theta_3, \theta_4)) \cdot \theta_4 - \int_{\underline{\theta}_4}^{\theta_4} V_4(W_4^*(\theta_3, \theta_4)) d\hat{\theta}_4$$

5.3 חלופה מיטבית - שלב ב': מסגרת מושגית

בהינתן התוצאות של השלב הקודם, בשלב ב' נתמקד ביחסי הגומלין בין העיר, יצרנית השפכים, לבין מנהלת הנחל, צרכנית הקולחים. כפי שראינו בפרקים הקודמים (פרקים 3 ו-4), בחלופה המיטבית, מנהלת הנחל הינה צרכנית הקולחים היחידה המקבלת מהעיר את כל הקולחים, ברמת הטיהור השלישוני.

הגדרות הסמלות והנחות

נסמל ב- $i=1$ את העיר, הפועלת כספקית קולחים (Principle) למנהלת הנחל (Agent), שנסמלה ב- $i=2$.

נסמל ב- $D_2(W_2, \theta_2)$ את תועלת מנהלת הנחל משימוש בקולחים שלישוניים.

כאשר:

W_2 - מסמל את כמות הקולחים ברמת טיהור שלישוני שיועברו ממט"ש העיר אל מנהלת הנחל.

θ_2 - הינו פרמטר של מידע אישי (Private Information) המשקף את "טיפוס מנהלת הנחל"

(River Authority type), הידוע רק למנהלת הנחל ואינו ידוע לעיר (ו/או לחקלאים השונים)³⁹.

D_2 - פונקציה ליניארית, עולה וחיובית בשני הארגומנטים שלה.

טיפוס מנהלת הנחל θ_2 מתפלג בצורה אחידה בתחום $\theta_2 \in [\underline{\theta}_2, \bar{\theta}_2]$ כאשר, $\underline{\theta}_2 \neq \bar{\theta}_2$. פונקצית

ההתפלגות המצטברת של θ_2 ידועה לעיר, $F_2(\theta_2)$.

סך תועלת מנהלת הנחל, תהיה מהצורה הבאה:

$$(5.30) \quad U_2^R(W_2, t_2, \theta_2) = D_2(W_2, \theta_2) \cdot \theta_2 - t_2(\theta_2) + U_2(W_2)$$

³⁹ אמנם קבוצות החקלאים אינן מופיעות בשלב ב' של הניתוח, אך הן מהוות חלק מרכזי במודל הכללי.

כאשר U_2 הינה תועלת מנהלת הנחל מהתקשרות עם קבוצות החקלאים השונות (ראה שלב א',

$$U_2(W_2) = \begin{cases} U_2(W_2) & \text{for } 0 < W_2 \leq K \\ U_2(K) & \text{for } W_2 > K \end{cases} \quad \text{סעיף 5.2) הניתנת להצגה באופן הבא:}$$

פונקצית התועלת היא מונוטונית, עולה, גזירה פעמיים וקעורה ממש⁴⁰ בתחום $0 < W_2 \leq K$.

t_2 - מסמל את תשלומי ההעברה (במונחים כספיים) ממנהלת הנחל לעיר.

תועלת העיר היא מהצורה הבאה:

$$(5.31) \quad U_1(W_2, t_2, \theta_2) = t_2 - V_1(W_2) - c_5 W_5$$

כאשר:

V_1 מייצג את העלויות המשתנות הכרוכות בטיהור והולכת הקולחים מהעיר אל מנהלת הנחל.

אנו מניחים כי V_1 היא פונקציה ליניארית, חיובית ועולה.

c_5 - עלות טיהור והולכת קולחים מפתח מט"ש העיר אל הים התיכון, $c_5 > 0$.

W_5 - כמות הקולחים, ברמת טיהור שלישוני, שתסולק לים.

מנגנון ההתקשרות

בתנאים של חוסר וודאות ומידע ובהעדר מחיר לקולחים הנקבע חיצונית למערכת, אסטרטגיית העיר היא להציע קולחים, ברמת טיהור שלישוני, למנהלת הנחל בתמורה לפיצוי כספי בגין העלויות הכרוכות בהולכה ובטיהור הקולחים ובתקווה להשגת רווחים כספיים מעבר לכך. לשם כך מציעה העיר מנגנון התקשרות, בדומה לחוזה ההתקשרות בין מנהלת הנחל לחקלאים (ראה סעיף 5.2 לעיל), הבנוי מהשלבים הבאים:

$$\frac{\partial^2 U_2(W_2)}{\partial^2 W_2} < 0, \quad \frac{\partial U_2(W_2)}{\partial W_2} > 0 \quad 40$$

א. העיר מציעה חוזה התקשרות למנהלת הנחל המורכב מכמויות קולחים, W_2 , ומתשלומי העברה, t_2 . הפונקציה W_2 תלויה בדיווח הטיפוס על ידי מנהלת הנחל ונתונה על ידי: $W_2(\tilde{\theta}_2)$. כאשר הסימון "תלתל" מסמל את דיווח מנהלת הנחל לעיר, אודות טיפוסה (אינו בהכרח דיווח אמיתי). כמו-כן, פונקצית התשלומים, t_2 , תלויה אף היא בדיווח מנהלת הנחל: $t_2(\tilde{\theta}_2)$;

ב. לאחר שבחנה את החוזה, מדווחת מנהלת הנחל את $\tilde{\theta}_2$ לעיר;

ג. העיר בוחנת את דיווח מנהלת הנחל ובוחרת את השילוב האופטימאלי עבורה, של כמויות הקולחים השלישוניים, שתעביר למנהלת הנחל ושל גובה תשלומי ההעברה שתקבל. בדומה לחוזה ההתקשרות בין מנהלת הנחל לחקלאים, גם במקרה הנוכחי הונח כי לא ניתן לסגת או לשנות הן את דיווחה המקורי של מנהלת הנחל והן את נוסח החוזה המוצע. במילים אחרות, גם במקרה זה אין אפשרות למיקוח חוזר בין העיר לבין מנהלת הנחל.

מעקרון הנגלות, אנו יודעים כי על העיר להציע חוזה התקשרות שיגרום למנהלת הנחל לדווח אמת (IC), כלומר: $\tilde{\theta}_2 = \theta_2$. בנוסף, על המנגנון לקיים את תכונת הרציונאליות הפרטית (IR) כדי שמנהלת הנחל תסכים ליטול בו חלק. כמובן, על המנגנון לפעול בכפיפות למגבלת כמות הקולחים הזמינה מהעיר (QC₁).

בהינתן ההגדרות וההנחות דלעיל, בעיית העיר תהיה לכן,

$$(5.32) \quad \underset{W_2(\theta_2), t_2(\theta_2)}{\text{MAX}} E_{\theta_2} \{ t_2(\theta_2) - V_1(W_2(\theta_2)) - c_5 W_5 \}$$

בכפיפות לאילוצים הבאים:

$$(5.33) \quad E_{\theta_2} \{ D_2(W_2(\theta_2)) \cdot \theta_2 - t_2(\theta_2) + U_2(W_2) \} \geq E_{\theta_2} \{ D_2(W_2(\tilde{\theta}_2)) \cdot \theta_2 - t_2(\tilde{\theta}_2) + U_2(W_2) \}, \quad \forall \tilde{\theta}_2 \in [\underline{\theta}_2, \bar{\theta}_2] \quad (IC_2)$$

$$(5.34) \quad E_{\theta_2} \{D_2(W_2(\theta_2)) \cdot \theta_2 - t_2(\theta_2) + U_2(W_2)\} \geq U_2(W_2), \quad \forall \tilde{\theta}_2 \in [\underline{\theta}_2, \bar{\theta}_2] (IR_2)$$

$$(5.35) \quad W_2(\theta_2) + W_3 = \bar{W} \quad (QC_1)$$

כאשר:

E_{θ_2} מייצג את התוחלת על פני ההתפלגות הידועה של θ_2 ו- \bar{W} הינו היצע הקולחים השלישוניים של העיר.

נעיר כי הוספת U_2 באילוצים (5.33) ו- (5.34) נועדה לצורך הצגת המודל בשלמותו. נקל לראות כי U_2 מצטמצם בשני האגפים ולכן ניתן להסירו ממגבלות אלו.

שלבי הפתרון

שלבי הפתרון לבעיית העיר (משוואה 5.32), בכפיפות למגבלות (5.33) - (5.35) זהים לשלבי הפתרון של בעיית מנהלת הנחל והחקלאים, שהוצגו בסעיף 5.2 לעיל. על כן, בסעיף זה לא נציג שוב את שלבי הפתרון אלא נציג את עיקרי הממצאים וההנחות בהתייחס למנגנון ההתקשרות בין העיר לבין מנהלת הנחל.

להלן עיקרי הממצאים:

א. $\frac{\partial W_2}{\partial \theta_2} = 0$. כלומר, טיפוס מנהלת הנחל אינו משפיע על כמויות הקולחים המבוקשות על ידה מהעיר.

ב. $\frac{\partial t_2}{\partial \theta_2} = 0$. כלומר, התשלום אותו תעביר מנהלת הנחל לעיר אינו תלוי בטיפוס מנהלת הנחל.

ג. תשלום ההעברה של מנהלת הנחל לעיר יהיה לכן:

$$(5.36) \quad t_2 = D_2(W_2) \cdot \theta_2 - \int_{\underline{\theta}_2}^{\theta_2} D_2(W_2) d\hat{\theta}_2 = D_2(W_2) \cdot \underline{\theta}_2$$

סעיפים א' ו-ב' אינם מבהירים כיצד תיקבע כמות הקולחים שתועבר מהעיר למנהלת הנחל וכיצד ייקבע התשלום עבור קולחים אלו. שאלות אלו יקבלו מענה בהמשך.

הצבת משוואה (5.36) בפונקציית המטרה של העיר (ביטוי 5.32), תוך התייחסות לעיקרי הממצאים דלעיל, ושימוש בשיטת הפתרון שהוצגה בסעיף 5.2 לעיל מאפשרת להציג את בעיית האופטימיזציה של העיר תחת המגבלות השונות (ביטויים (5.35) - (5.33)) באופן הבא:

$$(5.37) \quad G^1(W_2, \theta_2) = \int_{\theta_2}^{\bar{\theta}_2} \left\{ -V_1(W_2) - c_5 W_5 + D_2(W_2) \left[\hat{\theta}_2 - \frac{1 - F_2(\hat{\theta}_2)}{f_2(\hat{\theta}_2)} \right] \right\} dF_2(\hat{\theta}_2)$$

בכפיפות לאילוח (5.35) או לחילופין (על ידי הצבת אילוח (5.35)):

$$(5.38) \quad G^1(W_2, \theta_2) = \int_{\theta_2}^{\bar{\theta}_2} \left\{ -V_1(W_2) - c_5 (\bar{W} - W_2) + D_2(W_2) \left[\hat{\theta}_2 - \frac{1 - F_2(\hat{\theta}_2)}{f_2(\hat{\theta}_2)} \right] \right\} dF_2(\hat{\theta}_2)$$

היות והפונקציות D_2 ו- V_1 הן ליניאריות, הפתרון האופטימאלי, W_2^* , שמתקבל מפתרון ביטוי (5.38) הינו פתרון קצה. קרי: $W_2^* = \bar{W}$ או $W_2^* = 0$, שייקבעו בהתאם לתנאי הסדר הראשון של

G^1 :

$$(5.39) \quad G_{W_2}^1 = -\frac{\partial V_1(W_2(\theta_2))}{\partial W_2} - c_5 + \frac{\partial D_2(W_2(\theta_2))}{\partial W_2} \cdot H_2(\theta_2)$$

כאשר:

$$H_2(\theta_2) = \theta_2 - \frac{1 - F_2(\theta_2)}{f_2(\theta_2)}$$

נגזרת חלקית של G^1 לפי W_2 .

על מנת להבטיח כי פתרון תנאי סדר ראשון (5.39) ייקבעו את הפתרון המקסימאלי לבעיה,

$$W_2^* = \bar{W}, \text{ אזי צריך להתקיים התנאי הבא}^{41}: H_2(\theta_2) > 0, \text{ כלומר}^{42}: \underline{\theta}_2 > \frac{\bar{\theta}_2}{2}$$

כעת נציג את פונקצית התשלומים האופטימאלית. נזכור כי $U_2^R(\underline{\theta}_2) = 0$ ועל ידי הצבת ערך W_2 האופטימאלי, W_2^* , במשוואה (5.36) נקבל:

$$(5.40) \quad t_2^* = D_2(W_2^*) \cdot \theta_2 - \int_{\underline{\theta}_2}^{\theta_2} D_2(W_2^*) d\hat{\theta}_2 = D_2^*(W_2^*) \cdot \theta_2$$

להלן מסקנות ראשוניות מניתוח שלבי הפתרון שהוצגו בסעיף הנוכחי (סעיף 5.3):

- א. הקצאת הקולחים למנהלת הנחל, W_2 , אינה תלויה בטיפוס מנהלת הנחל, θ_2 ;
- ב. הקצאת הקולחים האופטימאלית הינה פתרון פינה (corner solution): $W_2^* = \bar{W}$;
- ג. תשלום ההעברה לעיר, t_2 , אינו תלוי בטיפוס מנהלת הנחל, θ_2 , אלא במכפלת הגבול התחתון של התפלגות טיפוס מנהלת הנחל, $\underline{\theta}_2$ בתועלת האופטימאלית של מנהלת הנחל משימוש בקולחים שלישוניים $(D_2^*(W_2^*))$;
- ד. תשלום ההעברה האופטימאלי לעיר הינו: $t_2^* = D_2(\bar{W}_2) \cdot \theta_2$. במילים אחרות, מנהלת הנחל "מרוויחה" רנטה (Informational rent) בגובה של $(\theta_2 - \underline{\theta}_2) \cdot D_2(\bar{W}_2)$, הנובע מתנאי חוסר הודאות לגבי הטיפוס האמיתי שלה (ראה גם פרק 2 בספרו של **Salanie** (1998)).

⁴¹ פתרון הקצה השני, $W_2^* = 0$, למעשה אינו מצדיק שיתוף פעולה בין העיר למנהלת הנחל ולכן עומד בסתירה לפרקים הקודמים.

⁴² היות ומהנחות המודל מתקיימים: (א) $f_2(\theta_2) = \frac{1}{\theta_2 - \underline{\theta}_2}$, (ב) $F_2(\theta_2) = \frac{\theta_2 - \underline{\theta}_2}{\theta_2 - \underline{\theta}_2}$ אזי

$$H_2(\theta_2) = 2\theta_2 - \bar{\theta}_2$$

5.4 תוצאות אמפיריות

בסעיפים 5.2 ו- 5.3 לעיל הוצגו שני השלבים העיקריים של המודל התיאורטי, המתאר חוזה התקשרות בין ב2 היחידות הכלכליות הפעילות באזור. בסעיף זה נציג פתרון אמפירי למודל ההתקשרות בהתייחס לנתונים הספציפיים של האזור, שנידונו בפרקים הקודמים (פרק 3 ופרק 4). בפתרון מודל ההתקשרות נעשה שימוש בתוכנה המתמטית Maple Ver.9.01.

הפתרונות האמפיריים יוצגו בשני שלבים, בהתאם לשלבי ניתוח המודל הכללי שהוצגו בסעיפים הקודמים.

שלב א': חוזה התקשרות בין מנהלת הנחל לחקלאים

פונקציות התועלת השנתית של החקלאים משימוש בקולחים ברמת טיהור שלישוני (בשנת משקעים ממוצעת), תהיינה מהצורה הבאה:

$$(5.41) \quad V_i(W_i, \theta_i) = (a_i W_i - b_i W_i^2) \cdot \theta_i, \quad i = 3, 4$$

טבלה 5.1 מציגה את ערכי הפרמטרים המוצגים בביטוי (5.41):

טבלה 5.1: ערכי הפרמטרים של החקלאים השונים (עבור $i=3,4$)

	a_i	b_i
V_3	4.11	$2.3 \cdot 10^{-6}$
V_4	4.18	$1.5 \cdot 10^{-6}$

לצורך אמידת הפרמטרים המוצגים בטבלה 5.1 השתמשנו בפונקציות המטרה של המתכנן המרכזי, בהתייחסו לשילוב כל אחת מקבוצות החקלאים בחלופות ההתארגנות האפשריות באזור (ראה ביטוי (3.9) בפרק 3). עבור כל אחת מהפונקציות הללו, חישבנו בנפרד את הערכים הכספיים המתקבלים משימוש בכמויות שונות של קולחים שלישוניים. במילים אחרות, על ידי הצבת

כמויות שונות של קולחים שלישוניים בביטוי (3.9), נתקבלו צמדים של כמות קולחים וערך של פונקצית המטרה (במונחים כספיים) עבור כל אחת מקבוצות החקלאים, הניתנים להצגה באמצעות גרף. לצמדים הללו ביצענו קירוב טיילור ממעלה שנייה וקיבלנו פונקציות מהצורה: $a_i W_i - b_i W_i^2$ עבור $i=3,4$ ואת ערכי האומדנים a_i ו- b_i (עבור $i=3,4$) הרשומים בטבלה 5.1 לעיל.

כמובן, הצבת $\theta_i = 1$, עבור $i=3,4$, בביטוי (5.41) אינה משפיעה על תועלות החקלאים משימוש בקולחים שלישוניים. על-כן בעבודה הנוכחית, נתייחס לפונקציות התועלות שנאמדו כמייצגות את התועלות האמיתיות של כל אחת מקבוצות החקלאים שנבחנו. במילים אחרות, אנו מניחים כי "הטיפוס האמיתי" של החקלאי ה- i הינו $\theta_i = 1$, עבור $i=3,4$.

הונח בנוסף כי טיפוס החקלאים, θ_i , נמצאים בטווח: $\theta_i \in (0.75, 1.25]$, עבור $i=3,4$. כלומר, טווח הסטייה האפשרי בדיווח כל אחת מקבוצות החקלאים (במידה שתחליט שלא להצהיר אמת) על ביקושן למים הינו $\pm 25\%$ מטיפוסן "האמיתי" ($\theta_i = 1$, עבור $i=3,4$).

פונקצית העלויות, V_2 , של מנהלת הנחל תהיה מהצורה הבאה:

$$(5.42) \quad V_2(W_3, W_4) = c_3 W_3 + c_4 W_4$$

כאשר: $c_3 = 0.31$ ו- $c_4 = 0.41$ מייצגים את עלויות ההולכה משפך הנחל אל החקלאים הקרובים והרחוקים, בהתאמה. סך כמות המים המקסימאלית שתועבר לקבוצות החקלאים ממנהלת הנחל, הינה: $K = 2.2$ מלמ"ש.

על ידי יישום שלבי הפתרון שתוארו בסעיף 5.2 ובהנחת פתרון פנימי (התייחסות למגבלה (5.23) בשיוויון $\lambda > 0$) עבור פונקציות הביקושים של החקלאים השונים (ביטוי (5.40), $i=3,4$) ועבור פונקצית העלויות של מנהלת הנחל (ביטוי (5.41)), נקבל כי כמויות הקולחים השלישוניים האופטימאליים W_3^* , W_4^* , שיועברו לחקלאים הקרובים והרחוקים בהתאמה, הינן:

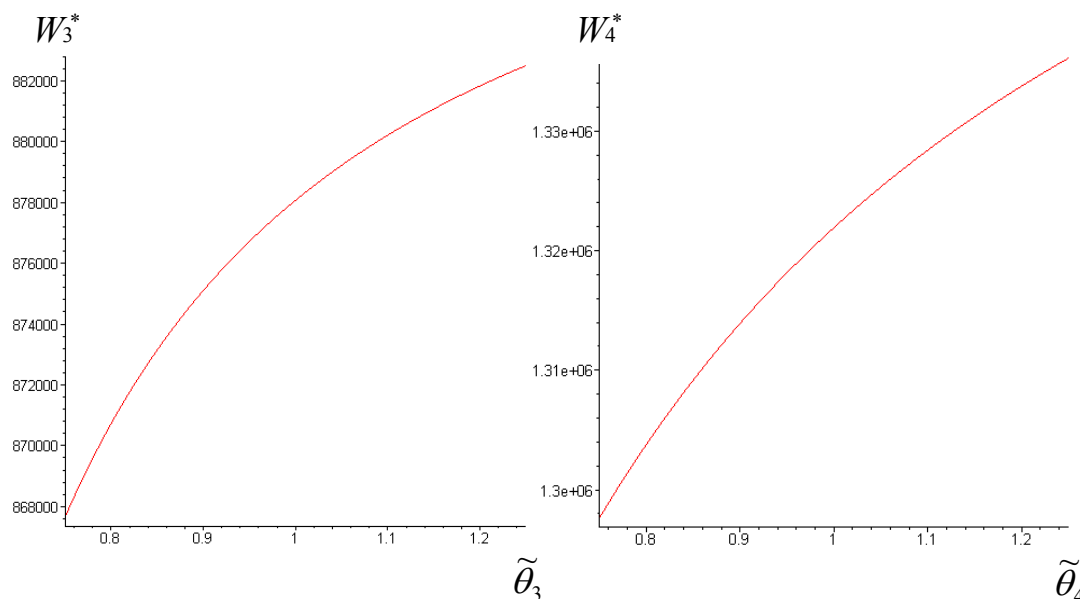
$$(5.43) \quad W_3^*(\theta_3) = \frac{-c_3 + c_4 + a_3 H_3(\theta_3) - a_4 H_4(\theta_4) + 2 \cdot b_3 H_3(\theta_3) K}{2 \cdot [b_3 H_3(\theta_3) + b_4 H_4(\theta_4)]}$$

-1

$$(5.44) \quad W_4^*(\theta_4) = \frac{-c_4 + c_3 + a_4 H_4(\theta_4) - a_3 H_3(\theta_3) + 2 \cdot b_4 H_4(\theta_4) K}{2 \cdot [b_3 H_3(\theta_3) + b_4 H_4(\theta_4)]}$$

ומהצבת ערכי הפרמטרים (ראה טבלה 5.1) בביטויים (5.43) ו- (5.44) נקבל את $W_3^*(\theta_3)$, $W_4^*(\theta_4)$. איור 5.1 שלהלן, מציג את ערכי W_i^* עבור $i = 3, 4$ כפונקציה של דיווחי החקלאים, θ_i עבור $i = 3, 4$.

איור 5.1 : הקצאת קולחים אופטימאלית לחקלאים כפונקציה של דיווחיהם



ניתן לראות מאיור 5.1 כי הכמויות האופטימאליות של קולחים, W_i^* עבור $i = 3, 4$, המועברות לחקלאים השונים גדלות ככל שהחקלאים מדווחים שהם מהטיפוס הגבוה יותר (דהיינו, מתקיים אילוץ (5.22) : $\frac{\partial W_i}{\partial \theta_i} > 0$, $i = 3, 4$). מכאן, לו לא היו החקלאים נדרשים לשלם תמורת המים, אזי הייתה להם מוטיבציה שלא לדווח אמת, אלא לבחור ב- $\tilde{\theta}_i = \bar{\theta}_i$, עבור $i = 3, 4$, על מנת לקבל יותר קולחים ממנהלת הנחל.

מהצבת פונקציות כמויות הקולחים האופטימאליות שנתקבלו, עבור $i=3,4$, במשוואות (5.28) ו-(5.29), נקבל את תשלומי ההעברה האופטימאליים לחקלאים הקרובים והרחוקים, בהתאמה:

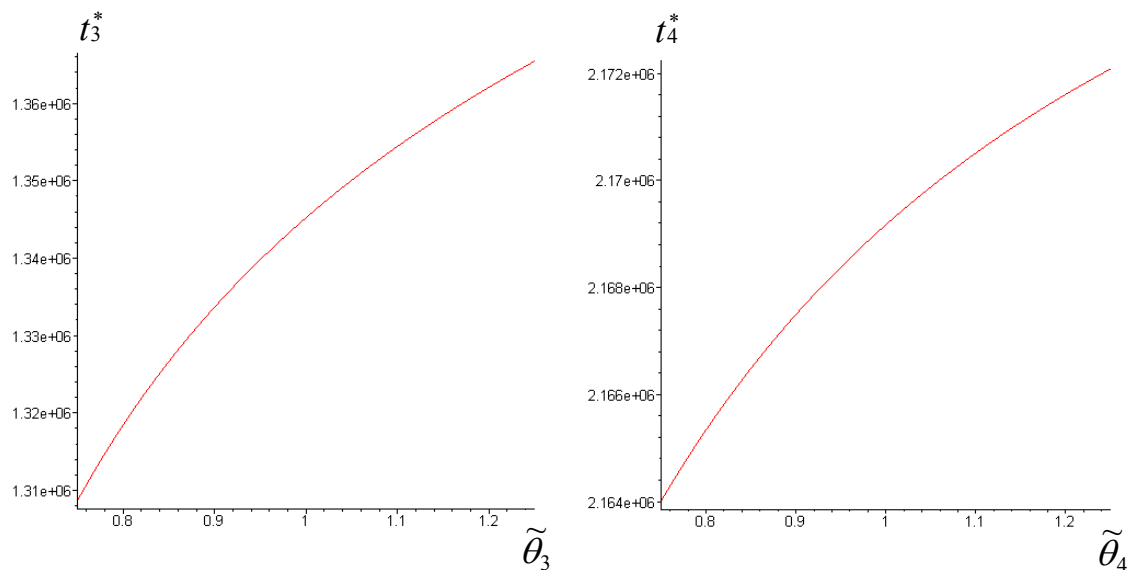
$$(5.45) \quad t_3^*(\theta_3) = (a_3 W_3^*(\theta_3) - b_3 W_3^*(\theta_3)^2) \cdot \theta_3 - \int_{\theta_3}^{\theta_3} (a_3 W_3^*(\theta_3) - b_3 W_3^*(\theta_3)^2) d\hat{\theta}_3$$

-1

$$(5.46) \quad t_4^*(\theta_4) = (a_4 W_4^*(\theta_4) - b_4 W_4^*(\theta_4)^2) \cdot \theta_4 - \int_{\theta_4}^{\theta_4} (a_4 W_4^*(\theta_4) - b_4 W_4^*(\theta_4)^2) d\hat{\theta}_4$$

ומהצבת ערכי הפרמטרים בביטויים (5.45) ו-(5.46) נקבל את $t_3^*(\theta_3)$, $t_4^*(\theta_4)$. איור 5.2 שלהלן, מציג את ערכי t_i^* עבור $i=3,4$ כפונקציה של טיפוסיהם, עבור θ_i .

איור 5.2: תשלומי ההעברה האופטימאליים למנהלת הנחל כפונקציה של טיפוסיהם



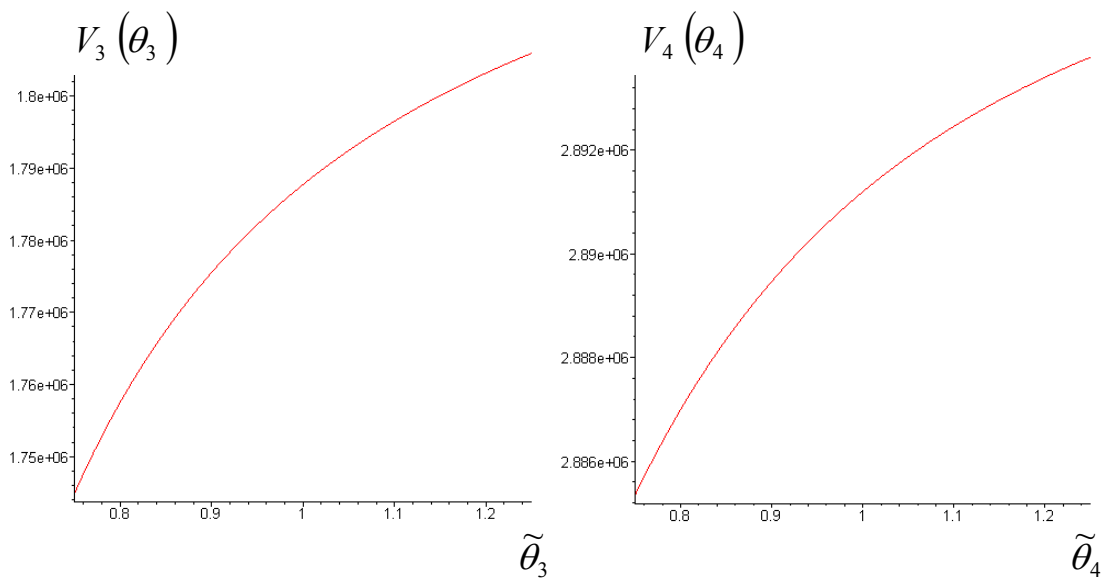
ניתן לראות מאיור 5.2 כי תשלומי ההעברה האופטימאליים, עבור $i=3,4$, המועברים למנהלת הנחל גדלים ככל שהחקלאים מדווחים שהם מהטיפוס הגבוה יותר (דהיינו, מתקיימת

הדרישה: $\frac{\partial t_i}{\partial \theta_i} > 0$, $i=3,4$). חשוב להבחין כי ללא תנאי זה לכל חקלאי היה תמריץ לדווח

שהוא מהטיפוס ה"גבוה" ביותר האפשרי בכדי לקבל יותר קולחים ממנהלת הנחל, ולשלם פחות, אך התנאי האחרון מבטיח כי התשלום שיועבר למנהלת הנחל יגדל ככל שטיפוס הפרט יהיה גבוה יותר ובכך גורם לפרט לדווח את טיפוסו האמיתי.

איור 5.3 מציג את תועלות החקלאים לקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם (ללא תשלומי ההעברה), θ_i , עבור $i = 3, 4$.

איור 5.3 : תועלות החקלאים לקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם

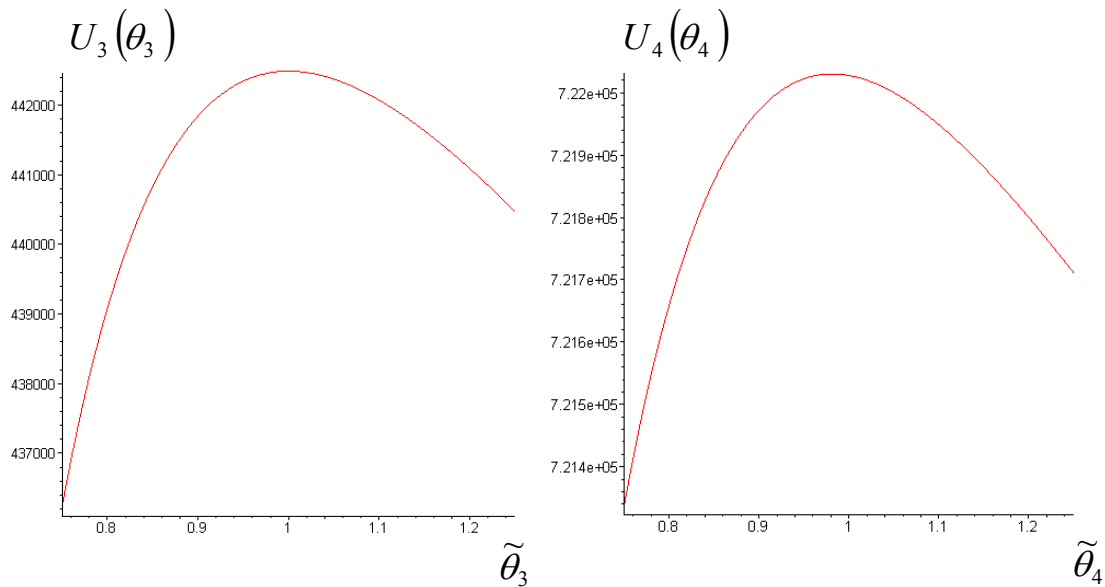


מאיור 5.3 ניתן לראות כי תועלות החקלאים השונים לקולחים גדלות ככל שהחקלאים מדווחים שהם מהטיפוס הגבוה יותר.

תועלות החקלאים לאחר התשלום משימוש בקולחים שלישוניים, כפונקציה של טיפוסם, $U_i(\theta_i)$, עבור $i = 3, 4$, מוצגות באיור 5.4 להלן,

איור 5.4 : תועלות החקלאים משימוש בקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם (לאחר

תשלומי ההעברה)



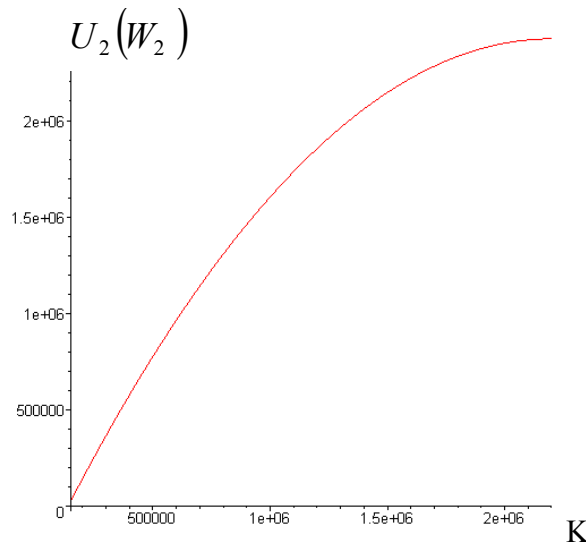
ניתן לראות מאיור 5.4 כי התועלת המקסימאלית עבור החקלאים השונים, מושגת כאשר הם מדווחים את טיפוסיהם האמיתיים, כלומר: $\tilde{\theta}_i = \theta_i = 1$, $i = 3, 4$. עבור החקלאים הקרובים נקבל כי התועלת האופטימאלית היא $U_3^* = 442,488$ ועבור החקלאים הרחוקים נקבל כי $U_4^* = 722,027$.

איור 5.5 להלן מציג את תועלת מנהלת הנחל מהתקשרות עם החקלאים כפונקציה של W_2 עבור התחום: $0 \leq W_2 \leq K$. כאמור, במקרה בו $W_2 > K$ נקבל ערך (במונחים כספיים) קבוע של

$$.U_2(K)$$

איור 5.5 : תועלת מנהלת הנחל מהתקשרות עם החקלאים, כפונקציה של W_2 בתחום

$$0 \leq W_2 \leq K$$



התועלת האופטימאלית של מנהלת הנחל משיתוף פעולה עם קבוצות החקלאים תושג כאשר יוקצו סה"כ 2.2 מלמ"ש ($K =$) לשתי קבוצות החקלאים הפעילות באזור.

מהתקשרות בין מנהלת הנחל לבין קבוצות החקלאים השונות נקבל כי תועלת מנהלת הנחל האופטימאלית הינה : 2.42 מיליון ש"ח $U_2^* = U_2(K)$.

שלב ב' : חוזה התקשרות בין מנהלת הנחל לעיר

בסעיף 5.3 ראינו כי חוזה ההתקשרות האופטימאלי שיושג הוא למעשה פתרון פינה לפיו יועברו כל הקולחים השלישוניים מהעיר למנהלת הנחל, כלומר : 8 מלמ"ש $W_2^* = \bar{W}$. הונח כי בדומה לטיפוסי החקלאים השונים, גם טיפוס מנהלת הנחל, θ_2 , מצוי בטווח : $\theta_2 \in [0.75, 1.25]$. כלומר, הנחנו כי טווח הסטייה של ערכי θ_2 מהטיפוס האמיתי ($\theta_2 = 1$) הינו $\pm 25\%$.

פונקצית התועלת של מנהלת הנחל משימוש בקולחים שלישוניים תהיה מהצורה הבאה :
 $D_2(W_2, \theta_2) = u \cdot W_2(\theta_2)$, כאשר : 1.5 ש"ח $u =$ מייצג את התועלת של 1 קוב קולחים שלישוניים הזורם בנחל (בדומה לפרק 3).

בהנחות אלו מתקבל כי תשלומי ההעברה האופטימאליים, שיועברו ממנהלת הנחל לעיר הינם :

9 מיליון ש"ח $t_2^* = D_2(\bar{W}_2) \cdot \underline{\theta}_2$. יתרה מכך, הרנטה של מנהלת הנחל כתוצאה מחוסר שלמות המידע (informational rent) אודות טיפוסה האמיתי הינה $3 = D_2(\bar{W}_2) \cdot (\theta_2 - \underline{\theta}_2)$ מיליון ש"ח.

תועלת מנהלת הנחל האופטימאלית כתוצאה משיתוף פעולה עם כל היחידות הכלכליות הינה :

5.42 מיליון ש"ח $U_2^{R*} =$.

בפרק הקודם (פרק 4) ראינו כי לעיר, יצרנית הקולחים, הכוח היחסי הגדול ביותר ולכן נציג גם את האפשרות בה העיר תבחר תחילה לנסח חוזה התקשרות עם החקלאים (שלב א') ורק לאחר מכן תנסח חוזה התקשרות עם מנהלת הנחל (שלב ב'). במקרה זה העיר פועלת כמנהלת (Principal) הן בתהליך ההתקשרות עם החקלאים והן בתהליך ההתקשרות עם מנהלת הנחל⁴³. באופן כללי, בניתוח חלופה ב' נשתמש בהגדרות, בהסמלות ובהנחות אשר שימשו בניסוח חוזה ההתקשרות בחלופה המיטבית, למעט הסמלות והנחות רלוונטיות נוספות, שיפורטו בהמשך. כמו כן, נשתמש באינדקס העליון "B" על מנת להבחין בין שתי החלופות.

שלב א': חוזה התקשרות בין העיר לבין החקלאים השונים

הגדרות הסמלות והנחות

נסמל ב- $V_i^B(W_i^B, \theta_i)$ עבור $i=3,4$, את התועלת (במונחים כספיים) השנתית (בשנת משקעים ממוצעת) של החקלאים משימוש בקולחים שלישוניים. כאשר:

W_i^B מסמל את כמות הקולחים ברמת טיהור שלישוני שיועברו ישירות מהעיר (ולא דרך הנחל) אל החקלאי ה- i ($i=3,4$);

פונקצית התועלת V_i^B זהה לפונקצית התועלת V_i ולכן גם היא מונוטונית, עולה, גזירה פעמיים ב- W_i^B וקעורה ממש⁴⁴.

פונקצית התועלת של חקלאי i היא:

$$(5.47) \quad U_i^B(W_i^B, t_i^B, \theta_i) = V_i^B(W_i^B, \theta_i) \cdot \theta_i - t_i^B, \quad i = 3,4$$

⁴³ נבחין כי בחלופה ב' מנהלת הנחל משמשת רק כסוכנת (agent) בהתקשרותה עם העיר.

⁴⁴ $\frac{\partial V_i^B}{\partial W_i^B} > 0, \frac{\partial^2 V_i^B}{\partial W_i^B} < 0, \quad i = 3,4$

כאשר, t_i^B מסמל את תשלומי ההעברה (במונחים כספיים) מהחקלאי ה- i , לעיר. תועלת העיר הרלוונטית לשלב א' של הניתוח⁴⁵, היא:

$$(5.48) \quad U_{1A}^B(W_3^B, W_4^B, t_3^B, t_4^B, \Theta) = t_3^B + t_4^B - V_{1A}^B(W_3, W_4)$$

כאשר, V_{1A}^B מייצג את העלויות המשתנות מהולכת קולחים ממט"ש העיר אל החקלאים השונים. פונקצית התועלת V_{1A}^B היא ליניארית, עולה וחיובית.

מנגנון ההתקשרות

בתנאים של חוסר וודאות ואינפורמציה לא סימטרית ובהעדר מחיר אחיד לקולחים, אסטרטגית העיר היא להציע קולחים לחקלאים בתמורה לפיצוי כספי בגין העלויות הכרוכות בהולכת הקולחים ובתקווה לקבלת רווחים מעבר לכך. לשם כך מציעה העיר מנגנון התקשרות לפי השלבים הבאים:

א. העיר מציעה לחקלאים (ומתחייבת בכך על) חוזה התקשרות, אשר קובע את כמויות

הקולחים $(W_i^B, i=3,4)$, שיועברו אליהם ואת תשלומי העברה $(t_i^B, i=3,4)$ שישלמו

החקלאים לעיר. כל אחת מכמויות הקולחים שתועברנה, פונקציות W_i^B , תלויה בדיווחי

החקלאים לעיר אודות הטיפוסים שלהם ונתונה על ידי: $(\tilde{\theta}_3, \tilde{\theta}_4)$, כאשר " $\tilde{\theta}_i$ "

עבור $i=3,4$, הינם דיווחי טיפוס הפרטים לעיר, והם לא בהכרח זהים לטיפוסים

האמיתיים (קרי: פוטנציאל לדיווח שקרי). באופן דומה, פונקציות התשלומים, t_i^B ,

תלויות אף הן בדיווחי החקלאים: $(\tilde{\theta}_3, \tilde{\theta}_4, t_i^B, i=3,4)$.

ב. לאחר שבחנו את החוזה, מדווחים החקלאים את $\tilde{\theta}_i, i=3,4$, לעיר. כפי שיובהר בהמשך,

החקלאים יבחרו לדווח את $\tilde{\theta}_i$ האופטימאלי עבורם [אותו דיווח אשר משיא את ביטוי

];(5.47)

⁴⁵ תועלת העיר בשלב זה מתייחסת רק לעלויות ולתשלומי ההעברה הכרוכים בהתקשרותה עם קבוצות החקלאים השונות, בסעיף הבא תוצג התועלת השלמה של העיר.

ג. העיר בוחנת את דיווחי החקלאים ובוחרת את השילוב האופטימאלי עבורה, של כמויות הקולחים השלישוניים, שתעביר לחקלאים השונים ושל גובה תשלומי ההעברה שתקבל [אותם כמויות ותשלומי ההעברה אשר משיאים את ביטוי (6.48)]. בדומה להנחות מודל ההתקשרות של החלופה המיטבית, גם במודל הנוכחי הונח כי בהינתן דיווח החקלאים ($i=3,4, \tilde{\theta}_i$) אין באפשרות החקלאים לשנות או לסגת מדיווחם המקורי. כמו-כן, אין באפשרות העיר לשנות או לסגת מחוזה ההתקשרות המקורי. במילים אחרות, במודל הנוכחי הונח כי אין אפשרות למיקוח חוזר (renegotiation) בין היחידות הכלכליות.

מעקרון הנגלות, אנו יודעים כי על העיר להציע חוזה התקשרות שיגרום לקבוצות החקלאים לדווח אמת (IC^B), כלומר לבחור ב- $\tilde{\theta}_i$ השווה ל- θ_i , $i=3,4$. בנוסף, על החוזה המוצע לקיים את תכונות הרציונאליות הפרטית (IR^B) על מנת, שכל אחת מקבוצות החקלאים תסכים ליטול בו חלק. כמובן, על החוזה לקחת בחשבון את מגבלת כמות הקולחים הזמינה לחקלאים (QC^B).

בהינתן ההגדרות וההנחות דלעיל, בעיית העיר הינה :

$$(5.49) \quad \underset{W_i^B(\Theta), t_i^B(\Theta)}{MAX} E_{\Theta} \{t_3^B(\Theta) + t_4^B(\Theta) - V_{1A}^B(W_3^B(\Theta), W_4^B(\Theta))\}$$

בכפיפות לאילוצים הבאים :

$$(5.50) \quad E_{\theta_4} \{V_3^B(W_3^B(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_3) - t_3^B(\theta_3, \theta_4)\} \\ \geq E_{\theta_4} \{V_3^B(W_3^B(\tilde{\theta}_3, \theta_4) \cdot \theta_3) - t_3^B(\tilde{\theta}_3, \theta_4)\} \quad \forall \tilde{\theta}_3 \in [\underline{\theta}_3, \bar{\theta}_3] \quad (IC_3^B)$$

$$(5.51) \quad E_{\theta_3} \{V_4^B(W_4^B(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_4) - t_4^B(\theta_3, \theta_4)\} \\ \geq E_{\theta_3} \{V_4^B(W_4^B(\theta_3, \tilde{\theta}_4) \cdot \theta_4) - t_4^B(\theta_3, \tilde{\theta}_4)\} \quad \forall \tilde{\theta}_4 \in [\underline{\theta}_4, \bar{\theta}_4] \quad (IC_4^B)$$

$$(5.52) \quad E_{\theta_4} \{V_3^B(W_3^B(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_3) - t_3^B(\theta_3, \theta_4)\} \geq 0 \quad \forall \theta_3 \in [\underline{\theta}_3, \bar{\theta}_3] \quad (IR_3^B)$$

$$(5.53) \quad E_{\theta_3} \{V_4^B(W_4^B(\theta_3, \theta_4) \cdot \theta_4) - t_4^B(\theta_3, \theta_4)\} \geq 0 \quad \forall \theta_4 \in [\underline{\theta}_4, \bar{\theta}_4] \quad (IR_4^B)$$

$$(5.54) \quad W_3^B(\theta_3, \theta_4) + W_4^B(\theta_3, \theta_4) \leq M \quad (QC^B)$$

כאשר:

M הינו היצע הקולחים השלישוניים של העיר הזמין לחקלאים⁴⁶ ו- E_{θ_i} הינו האופרטור של התוחלת על פני ההתפלגות הידועה של θ_i , $i=3,4$.

שלבי הפתרון

שלבי הפתרון לבעיית העיר (משוואה 5.49), תחת המגבלות השונות (5.54 – 5.50) בחלופה ב' זהים לשלבי הפתרון של בעיית מנהלת הנחל והחקלאים שהוצגו בסעיף 5.2 לעיל. על כן בסעיף זה לא נציג שוב את שלבי הפתרון, אלא את עיקרי הממצאים בהתייחס למנגנון ההתקשרות בין העיר לבין החקלאים.

להלן עיקרי הממצאים:

א. $\frac{\partial W_i^B}{\partial \theta_i} > 0$, עבור $i=3,4$. כלומר, לחקלאי ה- i יש לכאורה מוטיבציה לדווח על ערך θ_i (עבור

$i=3,4$) גבוה ככל הניתן במטרה לקבל כמות קולחים גדולה יותר. אולם,

ב. $\frac{\partial t_i^B}{\partial \theta_i} > 0$, עבור $i=3,4$. דהיינו, גם תשלומי ההעברה הם פונקציה עולה של ערכי θ_i , עבור

$i=3,4$. עובדה זו מבטיחה כי התשלום שיועבר לעיר יגדל ככל שערך θ_i של הפרט יהיה גבוה יותר,

וזו הסיבה בגינה כדאי לכל פרט לדווח את טיפוסו האמיתי.

⁴⁶ כאשר: $M \leq \bar{W}$.

ג. בהנחת פתרון פנימי מקסימאלי, הפונקציות האופטימאליות $W_i^B(\theta_3, \theta_4)$ עבור $i=3,4$ חייבות לקיים את תנאי הסדר הראשון הבא:

$$(5.55) \quad G_{W_i}^B = -\frac{\partial V_{1A}^B(W_3^B(\theta_3, \theta_4), W_4^B(\theta_3, \theta_4))}{\partial W_i^B} + \frac{\partial V_i^B(W_i^B(\theta_3, \theta_4))}{\partial W_i^B} \cdot H_i^B(\theta_i) - \lambda^B = 0$$

עבור $i = 3,4$.

כאשר:

$\lambda^B \geq 0$, (QC^B) הוא מחיר הצל של מגבלת הכמויות (QC^B).

היא פונקצית $f_i(\theta_i) = \frac{\partial F_i(\theta_i)}{\partial \theta_i}$ כאשר $i = 3,4$ עבור $H_i^B(\theta_i) = \theta_i - \frac{1 - F_i(\theta_i)}{f_i(\theta_i)}$

ההתפלגות השולית של θ_i .

$G_{W_i}^B$ נגזרת חלקית של G לפי W_i^B , $i = 3,4$.

ד. פונקציות התשלומים האופטימאליים:

$$(5.56) \quad t_3^{*B}(\theta_3, \theta_4) = V_3^B(W_3^{*B}(\theta_3, \theta_4)) \cdot \theta_3 - \int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} V_3^B(W_3^{*B}(\theta_3, \theta_4)) d\hat{\theta}_3$$

-ו

$$(5.57) \quad t_4^{*B}(\theta_3, \theta_4) = V_4^B(W_4^{*B}(\theta_3, \theta_4)) \cdot \theta_4 - \int_{\underline{\theta}_4}^{\theta_4} V_4^B(W_4^{*B}(\theta_3, \theta_4)) d\hat{\theta}_4$$

כאשר:

$W_i^{*B}(\theta_3, \theta_4)$, $i=3,4$, הם ערכי W_i^B האופטימאליים [ערכי $W_i^B(\theta_3, \theta_4)$, $i=3,4$ המקיימים את

ביטוי (5.55)].

שלב ב': חוזה התקשרות בין העיר לבין מנהלת הנחל

בשלב ב' נתמקד ביחסי הגומלין בין העיר, יצרנית השפכים, לבין מנהלת הנחל, צרכנית הקולחים. בחלופה ב' בניגוד לחלופה המיטבית, מנהלת הנחל אינה צרכנית הקולחים היחידה העומדת בפני העיר. בהינתן הקצאת הקולחים האופטימאלית לחקלאים השונים (פתרון שלב א'), $i=3,4$, $W_i^{*B}(\theta_3, \theta_4)$ נקבל כי כמות הקולחים הזמינה למנהלת הנחל נמוכה יותר מכמות הקולחים הזמינה למנהלת הנחל בהשוואה לחלופה המיטבית $(W_3^{*B} + W_4^{*B}) - \bar{W}$ לעומת \bar{W} , בהתאמה). במילים אחרות, בחלופה ב', כמות הקולחים הזמינה למנהלת הנחל תלויה בכמויות הקולחים שיוקצו לחקלאים השונים.

הגדרות, הסמלות והנחות

נסמל ב- $D_2^B(W_2^B, \theta_2)$ את תועלת מנהלת הנחל משימוש בקולחים שלישוניים והיא פונקציה ליניארית, עולה וחיובית בשני הארגומנטים שלה. הפרמטר W_2^B מסמל את כמות הקולחים ברמת טיהור שלישוני שיועברו ממט"ש העיר אל מנהלת הנחל.

תועלת מנהלת הנחל הינה:

$$(5.58) \quad U_2^B(W_2^B, t_2^B, \theta_2) = D_2^B(W_2^B, \theta_2) \cdot \theta_2 - t_2^B(\theta_2)$$

כאשר:

t_2^B - מסמל את תשלומי ההעברה (במונחים כספיים) ממנהלת הנחל לעיר.

תועלת העיר היא:

$$(5.59) \quad U_1^{CB}(W_2^B, t_2^B, \theta_2) = t_2^B - V_1^B(W_2^B) - c_5 W_5^B + U_{1A}^B$$

כאשר:

V_1^B פונקציה ליניארית, חיובית ועולה המייצגת את העלויות המשתנות הכרוכות בטיהור והולכת הקולחים מהעיר אל מנהלת הנחל.

U_{1A}^B תועלת העיר מהתקשרות עם קבוצות החקלאים [ראה ביטוי (5.48)].

מנגנון ההתקשרות

בתנאים של חוסר וודאות ומידע ובהעדר מחיר לקולחים הנקבע חיצונית למערכת, אסטרטגיית העיר היא להציע למנהלת הנחל קולחים ברמת טיהור שלישוני, בתמורה לפיצוי כספי בגין העלויות הכרוכות בהולכה ובטיהור הקולחים ובתקווה להשגת רווחים כספיים מעבר לכך. לשם כך מציעה העיר מנגנון התקשרות, בדומה לחוזה ההתקשרות בין העיר למנהלת הנחל, בהתייחס לחלופה המיטבית (ראה סעיף 5.2 לעיל), הבנוי מהשלבים הבאים:

א. העיר מציעה חוזה התקשרות למנהלת הנחל המורכב מכמויות קולחים, W_2^B , ומתשלומי העברה, t_2^B . הפונקציה W_2^B תלויה בדיווח הטיפוס על ידי מנהלת הנחל ונתונה על ידי: $W_2^B(\tilde{\theta}_2)$. כאשר הסימון "תלתל" מסמל את דיווח מנהלת הנחל לעיר, אודות טיפוסה (אינו בהכרח דיווח אמיתי). כמו-כן, פונקצית התשלומים, t_2^B , תלויה אף היא בדיווח מנהלת הנחל: $t_2^B(\tilde{\theta}_2)$;

ב. לאחר שבחנה את החוזה, מדווחת מנהלת הנחל את $\tilde{\theta}_2$ לעיר;

ג. העיר בוחנת את דיווח מנהלת הנחל ובוחרת את השילוב האופטימאלי עבורה, של כמויות הקולחים השלישוניים שתעביר למנהלת הנחל ושל גובה תשלומי ההעברה שתקבל. בדומה לשלבים הקודמים, גם במקרה הנוכחי הונח כי לא ניתן לסגת או לשנות הן את דיווחה המקורי של מנהלת הנחל והן את נוסח החוזה המוצע. במילים אחרות, גם במקרה זה אין אפשרות למיקוח חוזר בין העיר לבין מנהלת הנחל.

מעקרון הנגלות, אנו יודעים כי על העיר להציע חוזה התקשרות שיגרום למנהלת הנחל לדווח אמת (IC_2^B) , כלומר: $\tilde{\theta}_2 = \theta_2$. בנוסף, על המנגנון לקיים את תכונת הרציונאליות הפרטית (IR_2^B) כדי שמנהלת הנחל תסכים ליטול בו חלק. כמובן, על המנגנון לפעול בכפיפות למגבלת כמות הקולחים הזמינה מהעיר (QC_2^B) .

בהינתן ההגדרות וההנחות דלעיל, בעיית העיר תהיה לכן,

$$(5.60) \quad \underset{W_2^B(\theta_2), t_2^B(\theta_2)}{\text{MAX}} \quad E_{\theta_2} \left\{ t_2^B - V_1^B(W_2^B) - c_5 W_5^B + U_{1A}^B \right\}$$

בכפיפות לאילוצים הבאים :

$$(5.61) \quad E_{\theta_2} \left\{ D_2^B(W_2^B(\theta_2)) \cdot \theta_2 - t_2^B(\theta_2) \right\} \geq \\ E_{\theta_2} \left\{ D_2^B(W_2^B(\tilde{\theta}_2)) \cdot \theta_2 - t_2^B(\tilde{\theta}_2) \right\}, \quad \forall \tilde{\theta}_2 \in [\underline{\theta}_2, \bar{\theta}_2] \quad (IC_2^B)$$

$$(5.62) \quad E_{\theta_2} \left\{ D_2^B(W_2^B(\theta_2)) \cdot \theta_2 - t_2^B(\theta_2) \right\} \geq 0, \quad \forall \tilde{\theta}_2 \in [\underline{\theta}_2, \bar{\theta}_2] \quad (IR_2^B)$$

$$(5.63) \quad W_2^B(\theta_2) + W_5^B + W_3^{*B} + W_4^{*B} = \bar{W} \quad (QC_2^B)$$

כאשר :

E_{θ_2} מייצג את האופרטור של התוחלת על פני ההתפלגות הידועה של θ_2 ו- \bar{W} הינו היצע הקולחים השלישוניים של העיר.⁴⁷

שלבי הפתרון

שלבי הפתרון לבעיית העיר (משוואה 5.60), בכפיפות למגבלות (5.61) - (5.63) זהים לשלבי הפתרון של בעיית העיר והחקלאים, שהוצגו בשלב אי לעיל. על כן, בסעיף זה לא נחזור עליהם במפורט אלא נציג את עיקרי הממצאים וההנחות בהתייחס למנגנון ההתקשרות בין העיר לבין מנהלת הנחל.

להלן עיקרי הממצאים :

א. $\frac{\partial W_2^B}{\partial \theta_2} = 0$. כלומר, טיפוס מנהלת הנחל אינו משפיע על כמויות הקולחים המבוקשות על ידה מהעיר.

⁴⁷ בהנחת פתרון פנימי, ניתן לרשום את ביטוי (5.63) באופן הבא: $W_2^B(\theta_2) + W_5^B + M = \bar{W}$

ב. כולומר, התשלום אותו תעביר מנהלת הנחל לעיר אינו תלוי בטיפוס מנהלת הנחל. $\frac{\partial t_2^B}{\partial \theta_2} = 0$

ג. תשלום ההעברה של מנהלת הנחל לעיר יהיה לכן:

$$(5.64) \quad t_2^B = D_2^B(W_2^B) \cdot \theta_2 - \int_{\theta_2}^{\theta_2} D_2^B(W_2^B) d\hat{\theta}_2 = D_2^B(W_2^B) \cdot \theta_2$$

הצבת משוואה (5.64) בפונקציית המטרה של העיר (ביטוי 5.60), תוך התייחסות לעיקרי הממצאים דלעיל, ושימוש בשיטת הפתרון שהוצגה בסעיף 5.2 מאפשרת לשוב ולהציג את בעיית האופטימיזציה של העיר תחת המגבלות השונות (ביטויים (5.63) - (5.61)) באופן הבא:

$$(5.65) \quad G^{1B}(W_2^B, \theta_2) = \int_{\theta_2}^{\bar{\theta}_2} \left\{ -V_1^B(W_2^B) - c_5 W_5^B + U_{1A}^B + D_2^B(W_2^B) \left[\hat{\theta}_2 - \frac{1 - F_2(\hat{\theta}_2)}{f_2(\hat{\theta}_2)} \right] \right\} dF_2(\hat{\theta}_2)$$

בכפיפות לאילוך (5.63). או לחילופין, על ידי הצבת אילוך (5.63), נקבל:

$$(5.66) \quad G^{1B}(W_2^B, \theta_2) = \int_{\theta_2}^{\bar{\theta}_2} \left\{ -V_1^B(W_2^B) - c_5 (\bar{W} - W_2^B(\theta_2) - W_3^{*B} - W_4^{*B}) + D_2^B(W_2^B) \left[\hat{\theta}_2 - \frac{1 - F_2(\hat{\theta}_2)}{f_2(\hat{\theta}_2)} \right] \right\} dF_2(\hat{\theta}_2)$$

פונקציות D_2^B ו- V_1^B הינן פונקציות ליניאריות על פי הנחה, לכן הפתרון האופטימאלי, W_2^{*B} ,

שמתקבל מפתרון ביטוי (5.66) הינו פתרון קצה. קרי: $W_2^{*B} = \bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}$ או $W_2^{*B} = 0$

שיקבעו בהתאם לתנאי הסדר הראשון של: G^{1B}

$$(5.67) \quad G_{W_2^B}^{1B} = -\frac{\partial V_1^B(W_2^B(\theta_2))}{\partial W_2^B} - c_5 + \frac{\partial D_2^B(W_2^B(\theta_2))}{\partial W_2^B} \cdot H_2(\theta_2)$$

כאשר:

$$H_2(\theta_2) = \theta_2 - \frac{1 - F_2(\theta_2)}{f_2(\theta_2)}$$

נגזרת חלקית של G^{1B} לפי W_2^B ו- $G_{W_2^B}^{1B}$

על מנת להבטיח כי פתרון תנאי סדר ראשון (5.67) ייקבעו את הפתרון המקסימאלי לבעיה, $W_2^{*B} = \bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}$, אזי צריך להתקיים התנאי הבא⁴⁸: $H_2(\theta_2) > 0$, כלומר⁴⁹:

$$\theta_2 > \frac{\bar{\theta}_2}{2}$$

פונקציות התשלומים האופטימאליות מתקבלת על ידי הצבת הערך האופטימאלי W_2^{*B} , במשוואה (5.64),

$$(5.68) \quad t_2^{*B} = D_2^B(W_2^{*B}) \cdot \theta_2 - \int_{\underline{\theta}_2}^{\theta_2} D_2^B(W_2^{*B}) d\hat{\theta}_2 = D_2^{*B}(W_2^{*B}) \cdot \theta_2$$

מסקנות ראשוניות

- א. הקצאת הקולחים למנהלת הנחל, W_2^B , אינה תלויה בטיפוס מנהלת הנחל, θ_2 ;
- ב. הקצאת הקולחים האופטימאלית הינה פתרון פינה (corner solution): $W_2^{*B} = \bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}$ ותלויה בפתרונות שלב א' (הקצאות הקולחים האופטימאליות לחקלאים השונים);
- ג. תשלום ההעברה לעיר, t_2^B , אינו תלוי בטיפוס מנהלת הנחל, θ_2 , אלא במכפלת הגבול התחתון של התפלגות טיפוס מנהלת הנחל, $\underline{\theta}_2$ בתועלת האופטימאלית של מנהלת הנחל משימוש בקולחים שלישוניים $D_2^{*B}(W_2^*)$;
- ד. תשלום ההעברה האופטימאלי לעיר הינו: $t_2^{*B} = D_2^{*B}(\bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}) \cdot \theta_2$. במילים אחרות, מנהלת הנחל "מרוויחה" רנטה (Informational rent) בגובה של $D_2^{*B}(\bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}) \cdot (\theta_2 - \underline{\theta}_2)$, הנובע מתנאי חוסר הודאות לגבי הטיפוס האמיתי שלה.

⁴⁸ פתרון הקצה השני, $W_2^{*B} = 0$, למעשה אינו מצדיק שיתוף פעולה בין העיר למנהלת הנחל ולכן אינו מעניין בהקשר הנוכחי.

⁴⁹ היות ומהנחות המודל מתקיימים: (א) $f_2(\theta_2) = \frac{1}{\theta_2 - \underline{\theta}_2}$, (ב) $F_2(\theta_2) = \frac{\theta_2 - \underline{\theta}_2}{\theta_2 - \underline{\theta}_2}$ אזי

$$H_2(\theta_2) = 2\theta_2 - \bar{\theta}_2$$

5.6 תוצאות אמפיריות חלופה ב'

בסעיף 5.5 לעיל הוצגו שני השלבים העיקריים של המודל התיאורטי, המתייחס למקרה בו העיר מציעה חוזה התקשרות, תחילה, לחקלאים ולאחר מכן למנהלת הנחל. בסעיף זה נציג את עיקרי הפתרונות האמפיריים של מודל ההתקשרות בהתייחס לנתונים הספציפיים של האזור, שנידונו בפרקים הקודמים (פרק 3 ופרק 4).

שלב א': חוזה התקשרות בין העיר לחקלאים

פונקציות התועלת השנתית של החקלאים משימוש בקולחים ברמת טיהור שלישוני (בשנת משקעים ממוצעת), הינן:

$$(5.69) \quad V_i^B(W_i^B, \theta_i) = [a_i W_i^B - b_i (W_i^B)^2] \cdot \theta_i, \quad i = 3, 4$$

כאשר, ערכי הפרמטרים a_i , b_i עבור $i=3,4$ זהים לאלו המוצגים בטבלה 5.1 לעיל.

גם בחלופה זו הונח כי טיפוסי החקלאים, θ_i , נמצאים בטווח: $\theta_i \in (0.75, 1.25]$, עבור $i = 3, 4$. כלומר, טווח הסטייה בדיווח כל אחת מקבוצות החקלאים על ביקושן למים הינו $\pm 25\%$ מטיפוסן "האמיתי" ($\theta_i = 1$, עבור $i = 3, 4$).

פונקצית העלויות, V_1^B , של העיר תהיה מהצורה הבאה:

$$(5.70) \quad V_1^B(W_3^B, W_4^B) = c_3^B W_3^B + c_4^B W_4^B$$

כאשר: $c_3^B = 0.15$ ו $c_4^B = 0.21$ מייצגים את עלויות ההולכה (בש"ח/מ"ק) מפתח המט"ש אל החקלאים הקרובים והרחוקים, בהתאמה.

כמו בחלופה א' סך כמות המים המקסימאלית שתועבר לקבוצות החקלאים, M , הינה: 2.2 מלמ"ש.

על ידי יישום שלבי הפתרון שתוארו בסעיף 5.5 ובהנחת פתרון פנימי [התייחסות למגבלה (5.54) בשיוויון] עבור פונקציות הביקושים של החקלאים השונים [ביטוי (5.69), $i=3,4$] ועבור פונקצית

העלויות של העיר (ביטוי 5.70), נקבל כי כמויות הקולחים השלישוניים האופטימאליים W_3^{B*}, W_4^{B*} , שיועברו לחקלאים הקרובים והרחוקים בהתאמה, הינן:

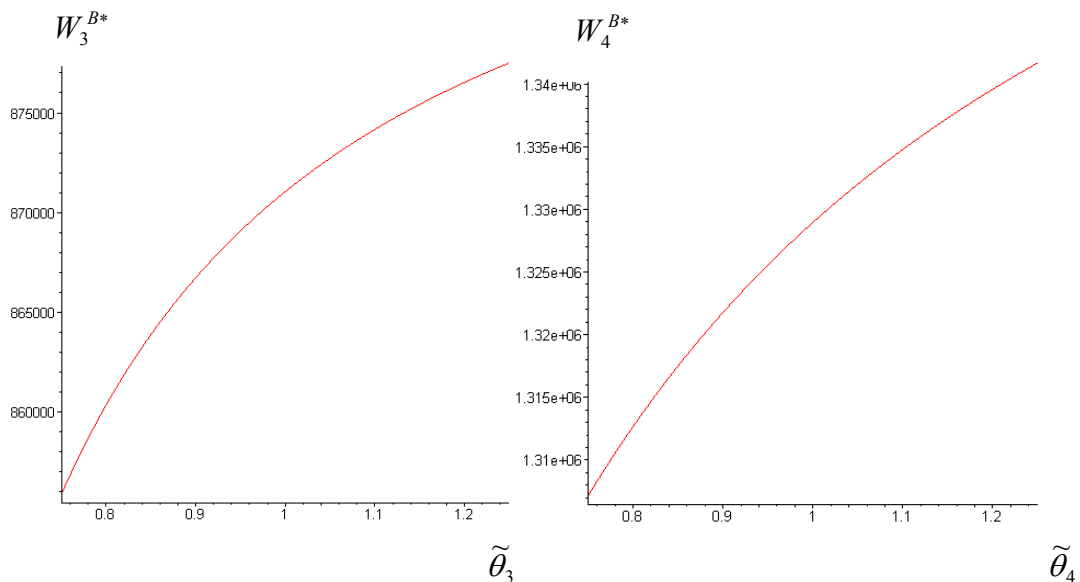
$$(5.71) \quad W_3^{B*}(\theta_3) = \frac{-c_3^B + c_4^B + a_3 H_3(\theta_3) - a_4 H_4(\theta_4) + 2 \cdot b_3 H_3(\theta_3) M}{2 \cdot [b_3 H_3(\theta_3) + b_4 H_4(\theta_4)]}$$

-1

$$(5.72) \quad W_4^{B*}(\theta_4) = \frac{-c_4^B + c_3^B + a_4 H_4(\theta_4) - a_3 H_3(\theta_3) + 2 \cdot b_4 H_4(\theta_4) M}{2 \cdot [b_3 H_3(\theta_3) + b_4 H_4(\theta_4)]}$$

ומהצבת ערכי הפרמטרים (ראה טבלה 5.1) בביטויים (5.71) ו- (5.72) נקבל את $W_3^{B*}(\theta_3)$, $W_4^{B*}(\theta_4)$. איור 5.6 שלהלן, מציג את ערכי W_i^{B*} עבור $i = 3, 4$ כפונקציה של דיווחי החקלאים, θ_i , עבור $i = 3, 4$.

איור 5.6: הקצאת קולחים אופטימאלית לחקלאים כפונקציה של דיווחיהם



ניתן לראות מאיור 5.6 כי הכמויות האופטימאליות של קולחים, W_i^{B*} עבור $i = 3, 4$, המועברות לחקלאים השונים גדלות ככל שהחקלאים מדווחים שהם מהטיפוס הגבוה יותר (דהיינו, מתקיים:

מכאן, לו לא היו החקלאים נדרשים לשלם תמורת המים, אזי הייתה להם $\left(\frac{\partial W_i^B}{\partial \theta_i} > 0\right), i = 3,4$.

מוטיבציה שלא לדווח אמת, אלא לבחור ב- $\tilde{\theta}_i = \bar{\theta}_i$, עבור $i=3,4$, על מנת לקבל יותר קולחים מהעיר.

מהצבת פונקציות כמויות הקולחים האופטימאליות שנתקבלו, $W_i^{B*}(\theta_i)$, עבור $i=3,4$, במשוואות (5.56) ו- (5.57), נקבל את תשלומי ההעברה האופטימאליים לחקלאים הקרובים והרחוקים, בהתאמה:

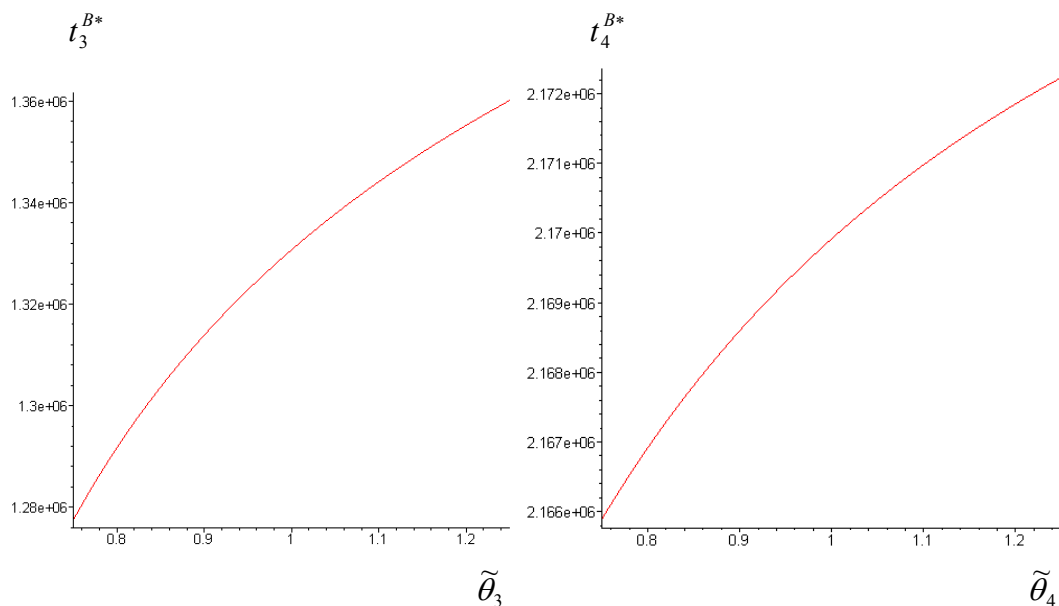
$$(5.73) \quad t_3^{B*}(\theta_3) = \left(a_3 W_3^{B*}(\theta_3) - b_3 W_3^{B*}(\theta_3)^2\right) \cdot \theta_3 - \int_{\underline{\theta}_3}^{\theta_3} \left(a_3 W_3^{B*}(\theta_3) - b_3 W_3^{B*}(\theta_3)^2\right) d\hat{\theta}_3$$

-1

$$(5.74) \quad t_4^{B*}(\theta_4) = \left(a_4 W_4^{B*}(\theta_4) - b_4 W_4^{B*}(\theta_4)^2\right) \cdot \theta_4 - \int_{\underline{\theta}_4}^{\theta_4} \left(a_4 W_4^{B*}(\theta_4) - b_4 W_4^{B*}(\theta_4)^2\right) d\hat{\theta}_4$$

ומהצבת ערכי הפרמטרים בביטויים (5.73) ו- (5.74) נקבל את $t_4^{B*}(\theta_4)$, $t_3^{B*}(\theta_3)$. איור 5.7 שלחלן, מציג את ערכי t_i^{B*} עבור $i = 3,4$ כפונקציה של טיפוסיהם, θ_i , עבור $i = 3,4$.

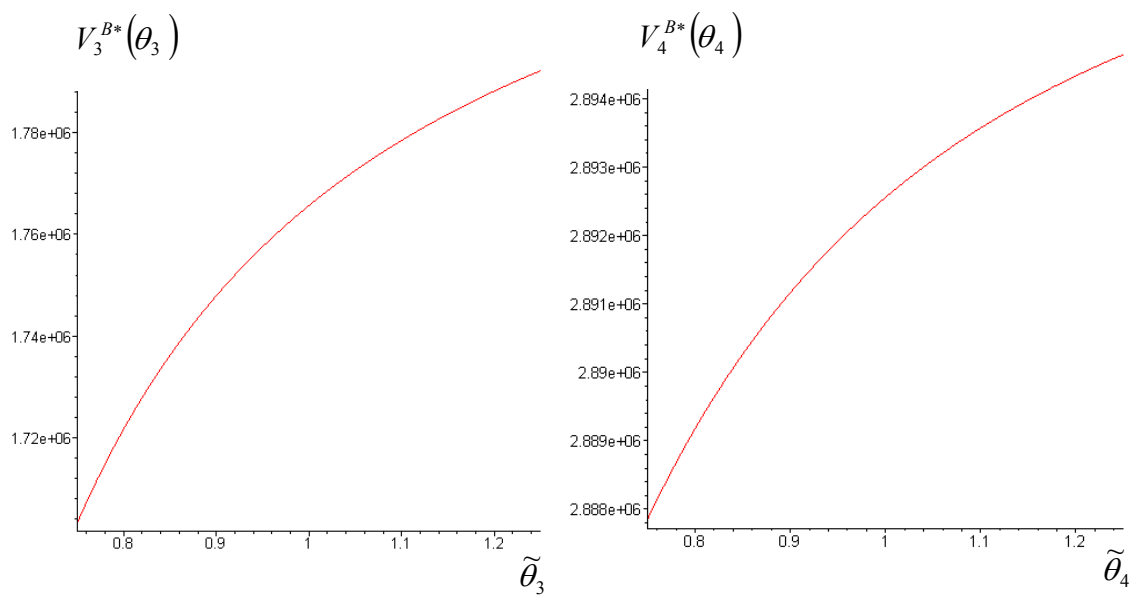
איור 5.7: תשלומי ההעברה האופטימאליים לעיר כפונקציה של טיפוסיהם החקלאים



ניתן לראות מאיור 5.7 כי תשלומי ההעברה האופטימאליים, עבור $i = 3, 4$, המועברים לעיר גדלים ככל שהחקלאים מדווחים שהם מהטיפוס הגבוהה יותר (דהיינו, מתקיימת הדרישה: $\frac{\partial t_i^B}{\partial \theta_i} > 0$, $i = 3, 4$). חשוב להבחין כי ללא תנאי זה לכל חקלאי היה תמריץ לדווח שהוא מהטיפוס ה"גבוה" ביותר האפשרי בכדי לקבל יותר קולחים מהעיר, ולשלם פחות, אך התנאי האחרון מבטיח כי התשלום שיועבר לעיר יגדל ככל שטיפוס הפרט יהיה גבוה יותר ובכך גורם לפרט לדווח את טיפוסו האמיתי.

איור 5.8 מציג את תועלות החקלאים לקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם (ללא תשלומי ההעברה), עבור θ_i , $i = 3, 4$.

איור 5.8 : תועלות החקלאים לקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם

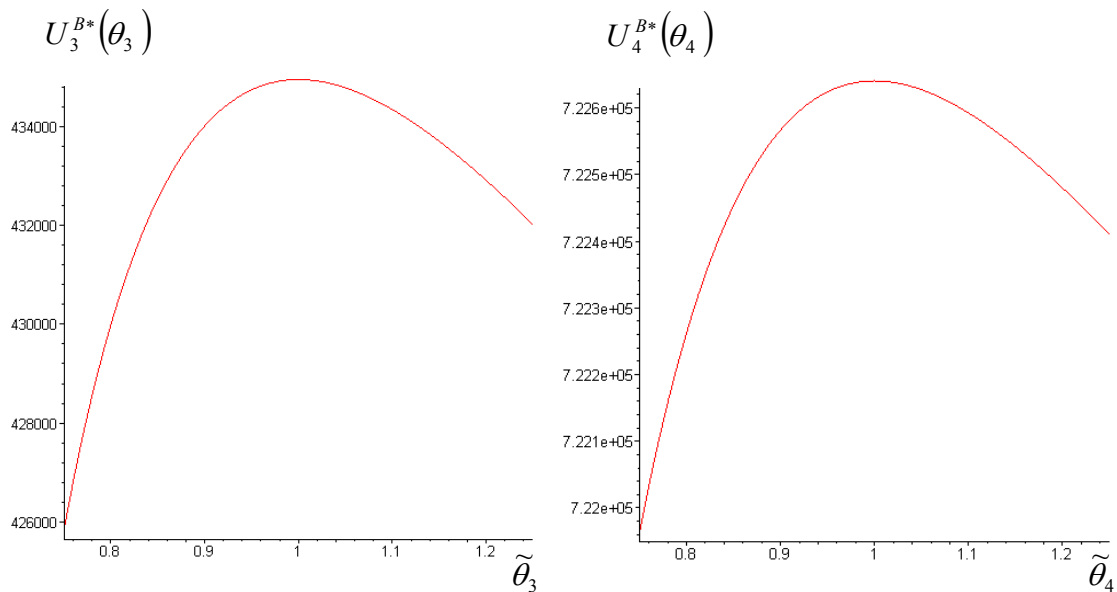


מאיור 5.8 ניתן לראות כי תועלות החקלאים השונים לקולחים גדלות ככל שהחקלאים מדווחים שהם מהטיפוס הגבוה יותר.

תועלות החקלאים לאחר תשלומי ההעברה לעיר, כפונקציה של טיפוסם, עבור $U_i^B(\theta_i)$, $i = 3, 4$, מוצגות באיור 5.9 להלן,

איור 5.9 : תועלות החקלאים משימוש בקולחים שלישוניים כפונקציה של טיפוסיהם (לאחר

תשלומי ההעברה)



ניתן לראות מאיור 5.9 כי התועלת המקסימאלית עבור החקלאים השונים, מושגת כאשר הם מדווחים את טיפוסיהם האמיתיים, כלומר: $\tilde{\theta}_i = \theta_i = 1$, $i = 3, 4$. עבור החקלאים הקרובים נקבל כי התועלת האופטימאלית היא $U_3^{B*} = 434,952$ נה"ש ועבור החקלאים הרחוקים נקבל כי

$$U_4^{B*} = 722,640 \text{ נה"ש}$$

שלב ב': חוזה התקשרות בין מנהלת הנחל לעיר

בסעיף 5.5 שלב ב', ראינו כי חוזה ההתקשרות האופטימאלי שיושג הוא למעשה פתרון פינה לפיו יועברו, לאחר שלב א', יתרת הקולחים השלישוניים מהעיר למנהלת הנחל,

כלומר: $5.8 \text{ מלמ"ש} = W_2^{*B} = \bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}$. בדומה לחלופה המיטבית, הונח כי טיפוס

מנהלת הנחל, θ_2 , מצוי בטווח: $\theta_2 \in [0.75, 1.25]$. כלומר, טווח הסטייה בדיווחה של מנהלת

הנחל על ביקושה לקולחים שלישוניים הינו $\pm 25\%$ מטיפוסה "האמיתי" ($\theta_2 = 1$).

פונקצית התועלת של מנהלת הנחל משימוש בקולחים שלישוניים תהיה מהצורה הבאה:
 $D_2^B(W_2^B, \theta_2) = u \cdot W_2^B(\theta_2)$, כאשר: $u = 1.5$ מייצג את התועלת של 1 קוב קולחים שלישוניים
 הזורם בנחל.

נקבל כי תשלומי ההעברה האופטימאליים, שיועברו ממנהלת הנחל לעיר הינם:

$$6.525 \text{ מיליון ש"ח} = t_2^{*B} = D_2^{*B}(\bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}) \cdot \theta_2$$

יתרה מכך, הרנטה של מנהלת הנחל

כתוצאה מחוסר שלמות המידע (informational rent) אודות טיפוסה האמיתי הינה:

$$2.175 \text{ מיליון ש"ח} = D_2^{*B}(\bar{W} - W_3^{*B} - W_4^{*B}) \cdot (\theta_2 - \underline{\theta}_2)$$

תועלת מנהלת הנחל האופטימאלית כתוצאה משיתוף פעולה עם העיר הינה:

$$2.175 \text{ מיליון ש"ח} = U_2^{B*}$$

במילים אחרות, בחלופה ב', תועלת מנהלת הנחל זהה לרנטה של מנהלת

הנחל כתוצאה מהתקשרות עם העיר.

5.7 השוואה בין החלופות

בסעיפים הקודמים הוצגו שלבי הפתרון של הבעיה הנוכחית, תוך התייחסות לשתי חלופות אפשריות. טבלה 5.2 להלן, מציגה את תוספת התועלת למצבם התחילי של היחידות הכלכליות שבאזור, לפני ניכוי עלויות החזרי ההון הכרוכים ביישום כל אחת משתי החלופות שנבחנו.

טבלה 5.2: הקצאת תוספת התועלת ליחידות הכלכליות (במיליוני ש"ח)

חלופה ב'		חלופה מיטבית		שחקן
חלקו באחוזים מהסה"כ	תוספת התועלת	חלקו באחוזים מהסה"כ	תוספת התועלת	
75.05%	10.03	57.75%	9	1
16.28%	2.18	34.78%	5.42	2
3.26%	0.43	2.84%	0.44	3
5.41%	0.72	4.63%	0.72	4
100%	13.36	100%	15.58	סה"כ

על מנת לחשב את תוספת הרווח שתתקבל עבור כל אחת מהיחידות הכלכליות יש להשוות בין תוספת התועלת של כל אחת מהיחידות הכלכליות כתוצאה מיישום כל אחת מהחלופות דלעיל (טבלה 5.2) לבין מצבן התחילי של אותן יחידות, כפי שתואר בפרק 3, (ראה גם טבלה 3.4) תוך התייחסות לעלויות הקמת התשתיות הכרוכות בכל אחת מהחלופות.

כאמור, תהליך המיקוח המוצג בפרק זה מתייחס למשא ומתן בתנאי חוסר ודאות ובהעדר מגשר. לכאורה, התוצאות של תהליך המיקוח תושפעה מאופן השיוך של עלויות הקמת התשתיות הכרוכות בשתי החלופות שנבחנו [האם יש להטילן באופן מלא על מוכרי הקולחים (עיר, מנהלת הנחל)? או שמא יש להטילן אך ורק על רוכשי הקולחים (מנהלת הנחל, חקלאים קרובים וחקלאים רחוקים)? או אולי יש לחלקן בין הקונים למוכרים, כחלק מהליך המיקוח?].

מכיוון שאנו מניחים במודל את קיומם של תשלומי העברה, אופן שיוך העלויות יתקזז באופן מלא עם תשלומי ההעברה ותוספת הרווח אותה יקבל כל משתתף לא תושפע מאופן שיוך העלויות. נדגים זאת אמפירית בהתייחס לשני מצבי הקיצון:

א) בהנחה כי יש לשייך את עלויות הקמת התשתיות למוכרי הקולחים בלבד, חושבה תוספת הרווח עבור העיר בחלופה המיטבית באופן הבא: לתועלת העיר, ביטוי (5.31), יש להוסיף את החזר ההון בגין אי הקמת תשתית הולכה לים בסך 0.61 מלש"ח, אך מנגד יש להפחית את החזר ההון בגין הקמת תשתית מהעיר למנהלת הנחל בסך 0.12 מלש"ח. גם בחלופה ב', יש להוסיף לתועלת העיר את החזר ההון בגין אי הקמת תשתית הולכה לים בסך 0.61 מלש"ח, ביטוי (5.48), אך בנוסף להפחתת החזר ההון בגין הקמת תשתית למנהלת הנחל בסך 0.12 מלש"ח מביטוי (5.59), יש להפחית מהרווח גם את החזרי ההון בגין הקמת תשתית הולכה לחקלאים הקרובים ולחקלאים הרחוקים בסך של 0.23 מלש"ח ו-0.44 מלש"ח מביטוי (5.48), בהתאמה.

תוספת הרווח של מנהלת הנחל בחלופה המיטבית חושבה באופן הבא: מתועלת מנהלת הנחל, ביטוי (5.2), יש להפחית את החזר ההון בגין הקמת תשתיות הולכה לחקלאים הקרובים והרחוקים בסך של 1.05 מלש"ח. לעומת זאת, בחלופה ב', תועלת מנהלת הנחל המוצגת בטבלה 5.2 הינה למעשה תוספת הרווח שלה.

עבור החקלאים הקרובים והרחוקים התועלת המוצגת בטבלה 5.2, תחת שתי החלופות האפשריות הינה למעשה תוספת הרווח של היחידות הללו.

ב) במקרה הקיצוני השני לפיו עלויות הקמת התשתיות משויכות לרוכשי הקולחים בלבד, חושבה תוספת הרווח עבור העיר בחלופה המיטבית ובחלופה ב' באופן הבא: לתועלת העיר, ביטוי (5.31) וביטוי (5.48), בהתאמה, יש להוסיף רק את החזר ההון בגין אי הקמת תשתית הולכה לים.

תוספת הרווח של מנהלת הנחל בחלופה המיטבית ובחלופה ב' חושבה באופן הבא: מתועלת מנהלת הנחל, ביטוי (5.30) וביטוי (5.58), בהתאמה, יש להפחית את החזר ההון בגין הקמת תשתית הולכה לעיר בלבד.

עבור החקלאים הקרובים, בהתייחס לחלופה המיטבית ולחלופה ב', יש להפחית מביטוי (5.1) ומביטוי (5.47), בהתאמה (עבור $i=3$), את החזר ההון בגין הקמת תשתית למנהלת הנחל. ובאופן דומה, עבור החקלאים הרחוקים, יש להפחית מביטוי (5.1) ומביטוי (5.47), בהתאמה (עבור $i=4$), את החזר ההון בגין הקמת תשתית למנהלת הנחל.

כצפוי, מהתוצאות שנתקבלו עולה כי הטלת עלויות הקמת התשתיות, הכרוכות ביישום כל אחת משתי החלופות שנבחנו, על מוכרי הקולחים (עיר, מנהלת הנחל) ו/או הטלתן על רוכשי הקולחים (מנהלת הנחל, חקלאים קרובים, חקלאים רחוקים) משפיעה על גובה תשלומי ההעברה האופטימאליים המתקבלים (בגובה העלות המוטלת), אך אינה משפיעה על תוספות הרווח המתקבלות עבור כל אחת מהיחידות הכלכליות הנבחנות (ראה טבלה 5.3). במילים אחרות, תוספות הרווח שנתקבלו זהות בשני המקרים דלעיל והן מוצגות בטבלה 5.3, בהתייחס לשתי החלופות שנבחנו.

טבלה 5.3: הקצאת תוספות הרווח ליחידות הכלכליות (במיליוני ₪) בניכוי החזרי הון

שחקן	חלופה מיטבית		חלופה ב'	
	תוספת רווח	חלקו באחוזים מהסה"כ	תוספת רווח	חלקו באחוזים מהסה"כ
1	9.49	63.16%	9.84	74.70%
2	4.37	29.09%	2.18	16.51%
3	0.44	2.94%	0.43	3.30%
4	0.72	4.80%	0.72	5.49%
סה"כ	15.03	100%	13.17	100%

מטבלה 5.3 עולה כי בשתי החלופות תוספת הרווח האופטימאלית הגבוהה ביותר מושגת על ידי העיר ולאחריה על ידי מנהלת הנחל, החקלאים הרחוקים והחקלאים הקרובים, בהתאמה. תוספת הרווח של העיר בחלופה ב' גבוהה ב- 0.35 מלש"ח (כ- 3.7%) מתוספת הרווח האופטימאלית של העיר, תחת החלופה המיטבית (9.84 מלש"ח לעומת 9.49 מלש"ח, בהתאמה). בניגוד לכך, קטנה

תוספת הרווח של מנהלת הנחל בחלופה ב' בכ- 2.19 מלש"ח (כ- 50%) בהשוואה לתוספת הרווח האופטימאלית המושגת על ידי מנהלת הנחל בחלופה המיטבית (2.18 מלש"ח לעומת 4.37 מלש"ח, בהתאמה). ניתן לראות כי החקלאים הקרובים והרחוקים כמעט אדישים בין החלופות השונות. בנוסף, נבחין כי סך תוספת ההכנסה בחלופה המיטבית הינה 15.03 מלש"ח, הגבוהה ב- 1.86 מלש"ח (כ-14%) מסך תוספת ההכנסה המושגת בחלופה ב' (13.17 מלש"ח).

השוני בסך "עוגת" תוספת הרווח בין שתי החלופות נובע מאופן צורת ההתקשרות בין היחידות הכלכליות שבאזור הנבחן. בחלופה המיטבית כל קולחי העיר (8 מלמ"ק) מועברים תחילה למנהלת הנחל ומשפך הנחל מועברים 2.2 מלמ"ק קולחים לחקלאים השונים בעוד שבחלופה ב' העיר, תחילה, מעבירה 2.2 מלמ"ק קולחים לחקלאים השונים מסך כמות הקולחים אותה היא "מייצרת", והנותרות (5.8 מלמ"ק) מועברים למנהלת הנחל לצורך שיקום הנחל. כלומר, בחלופה המיטבית ניצול הקולחים יעיל יותר ומאפשר ניצול כמות של 2.2 מלמ"ק גם לצרכי שיקום הנחל וגם לצרכי השקיה חקלאית.

למרות ההבדלים בחלופות ההקצאה שהוצגו בפרק זה, התוצאות שנתקבלו מצביעות כי המוטיבציה לשיתוף פעולה קיימת היות וכל היחידות הכלכליות שבאזור משפרות את מצבן התחילי ומכאן המסקנה כי קיימת הצדקה לשיתוף פעולה בין כל היחידות הכלכליות הפעילות באזור.

פרק 6: סיכום ומסקנות

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

תנאי וודאות מלאה

בפרק 3 הנחנו כי היחידות הכלכליות הפעילות באזור הנבחן פועלות בתנאי וודאות מלאה, כלומר התועלת שלהן משימוש בקולחים ומשימוש במים שפירים ידועות למתכנן המרכזי. מטרת המתכנן המרכזי היא להשיא את סך תוספת הרווח האזורית, תוך התייחסות למספר אפשרויות התארגנות. בהתייחס לנתוני האזור, התוצאות שנתקבלו מעידות כי קיימת מוטיבציה לשיתוף פעולה גם בקואליציות חלקיות (המכילות את העיר) המתבטאת בתוספת רווח לאזור הנבחן. תוספת הרווח הגבוהה ביותר (כ- 15.9 מליון ₪) נתקבלה בקואליציית העל, בה מועברים תחילה כל הקולחים השלישוניים של העיר למנהלת הנחל ולאחר מכן מועברים קולחים משפך הנחל לקבוצות החקלאים הקרובים והרחוקים (החלופה המיטבית).

תוספת הקולחים לסל גורמי הייצור של קבוצות החקלאיים משפרת את מצבם בהשוואה למצב התחילי בו הם פועלים בחוסר שיתוף. בחלופה המיטבית, גדל סך שטחי הקרקע המעובדים ב- 23% (תוספת של 1,667.3 דונם) ולא כדאי לעקור שטחי מטעים (בהשוואה לכדאיות של עקירת 889.7 דונם מטעים במקרה של חוסר שיתוף פעולה). עבור מנהלת הנחל, הזרמת הקולחים השלישוניים בנחל משקמת את האפיק שלו ומשפרת את סביבת החי והצומח שלצידו.

לקואליציית העל יש יתרונות סביבתיים נוספים המתבטאים, בין היתר, בהמרת מים שפירים בקולחים, מצד קבוצות החקלאים השונות, הגורמת לחיסכון אזורי של כ- 1.1 מלמ"ש בשימוש במים שפירים (כ- 33% מסך מכסות המים השפירים לחקלאיים), העשויים לשמש צרכנים נוספים דוגמת המגזרים העירוניים, תעשייתיים, חקלאיים וסביבתיים; מניעת זיהום חופי הרחצה

הממוקמים בשפך נחל הירקון כתוצאה משימוש בקולחים שלישוניים; מניעת זיהום אקוויפר החוף כתוצאה משדרוג מט"ש ערי כפר-סבא והוד השרון; צמצום עלויות הדישון היקרות כתוצאה מהשקיה בקולחים (הקולחים מכילים מרכיבי מזון (בעיקר חנקן) הנספגים בקרקע וזמינים לקליטה עבור שורשי הגידולים השונים).

מודל האופטימיזציה שהוצג בפרק 3 מציג את הקצאת הקולחים 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 4.

בפרק 4 הצגנו מספר שיטות, מתחום המשחקים השיתופיים, להקצאת תוספת הרווח שנתקבלה בפרק 3, אשר שומרים על מסגרת השיתוף האופטימאלית (קואליציית העל).

באמצעות הוכחה ויישום משפט Shapley – Bondareva הראנו כי למרות שהמשחק השיתופי הנבחן אינו קמור, הוא מכיל ליבה לא ריקה. 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 (צירופים קמורים של וקטורי קדקודי הליבה, ראה טבלה 4.4.1) מקיים את כל משוואות הליבה (טבלה 4.1) ולכן יהיה מקובל על כל שחקני המשחק השיתופי-אזורי. נקודות הקצה העליון (ראה טבלה 6.2) של ליבת המשחק האזורי מבטאות למעשה את תוספת הרווח האופטימאלית אותה עשוי לקבל כל שחקן בפתרון השיתופי (ראה טבלה 4.4.1). התחום התחתון לתוספת הרווח בפתרון השיתופי שווה לאפס עבור כל אחד משחקני האזור ובמילים אחרות, נקודת האיום עבור כל אחד משחקני המשחק השיתופי היא להישאר ברמת רווחיו, כאשר הוא פועל בחוסר שיתוף. כך למשל, התחום העליון לתוספת הרווח בפתרון השיתופי עבור שחקן 1 מצביע על כך כי במצבים שונים (6 צירופי הקצאה אפשריים), העיר עשויה לקבל את

כל תוספת הרווח האזורית (15.87 מיליון ₪). שחקן 2 יקבל במקרה הטוב תוספת רווח של 12.82 מיליון ₪ (2 צירופי הקצאה אפשריים) ושחקנים 3 ו-4 לא יזכו לתוספת רווח הגבוהה מ-1.7 מיליון ₪ ו-2.54 מיליון ₪, בהתאמה.

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. על כן, יש צורך להתייחס לקריטריונים נוספים, מלבד אלו המתקיימים בליבה. במקרה הנבחן, ראינו כי פתרונות ההקצאה שנבחנו (הגרעינון וערכי שפלי) מצויים בליבת המשחק השיתופי ולכן מקיימים את תכונות הליבה הרצויות (רציונאליות אישית, רציונאליות קבוצתית ויעילות).

בטבלה הבאה רוכזו פתרונות ההקצאה שהתקבלו עבור המשחק השיתופי הנבחן,

טבלה 6.1: התפלגות פתרונות ההקצאה (במיליוני ₪)

שחקן	ערכי שפלי	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח	פתרון הקצאת הגרעין והגרעינון	חלקו באחוזים מסך תוספת הרווח
1	8.08	50.90%	8.19	51.60%
2	5.96	37.56%	5.82	36.68%
3	0.79	4.96%	0.84	5.30%
4	1.04	6.58%	1.02	6.42%

מהתבוננות ראשונית בטבלה 6.1, ניתן לראות שכל הפתרונות שנבחנו מקצים את תוספת הרווח הגבוהה ביותר לעיר, ולאחריה, בסדר יורד, למנהלת הנחל, לחקלאים רחוקים ולחקלאים קרובים, בהתאמה. במילים אחרות, לעיר יש את כוח המיקוח הגדול ביותר הנובע מעצם היותה ספקית הקולחים היחידה באזור הנבחן ומעצם הדרישה להימצאותה בכל קואליציה אפשרית.

למנהלת הנחל, הקצאת תוספת הרווח השנייה בגודלה (כשליש), תפקידה הכפול של מנהלת הנחל, הן כצרכנית הקולחים השלישוניים הגדולה ביותר באזור והן כספקית הקולחים לקבוצות החקלאים השונות מקנה למנהלת הנחל כוח יחסי רב יותר משאר היחידות הצרכניות באזור (חקלאים קרובים וחקלאים רחוקים).

החקלאים הקרובים והרחוקים משמשים כצרכני קולחים בלבד. הקצאת תוספת הרווח לקבוצות החקלאים אינה זהה היות וקבוצות החקלאים נבדלות זו מזו (למשל: בגודל שטחי הקרקע, תמהיל הגידולים, מכסת מי שפירים וכדומה). נראה כי הקצאת תוספת הרווח לקבוצות החקלאים נמוכות, אך מהשוואה למצבם התחילי של החקלאים הקרובים והרחוקים (ראה טבלה 3.5) עולה כי אלו שיפרו את רווחיהם בכ- 40% ובכ- 35.5%, בהתאמה.

תוספת הרווח לשחקן 1 יכולה להיחשב לרנטה תמורת השימוש שעושים הצרכנים השונים בקולחים השלישוניים של העיר בחלופה המיטבית. נזכור כי בחלופה המיטבית, מועברים תחילה, כל הקולחים השלישוניים של העיר למנהלת הנחל (8 מלמ"ש) ומשך הנחל מועברים לקבוצות החקלאים השונות (2.43 מלמ"ש). במילים אחרות, בהנחות החלופה המיטבית, מצויים במערכת האזורית הנבחנת 10.43 מלמ"ש קולחים שלישוניים ולא 8 מלמ"ש המסופקים על ידי העיר. הגידול בכמות הקולחים אינו נובע מהוספת קולחים מגורם חיצוני, אלא משימוש מושכל המאפשר ניצול כמות מסוימת (2.43 מלמ"ש) של קולחי העיר הן לשיקומו של אפיק הנחל והן לצרכי השקיה חקלאית. מכאן, שהרנטה⁵⁰ תמורת השימוש בקולחים הינה 0.77 ש/מ"ק קולחים שלישוניים ו- 0.78 ש/מ"ק קולחים שלישוניים, בהתייחס להקצאות ערכי שפלי והגרעינון (והגרעין), בהתאמה.

בטבלה 6.2 מוצגים חלק מפתרונות ההקצאה מהקצאת תוספת הרווח הגבוהה ביותר האפשרית (תחום עליון⁵¹) ליחידות הכלכליות שבאזור.

טבלה 6.2: חלקם של פתרונות ההקצאה מהתחום העליון

שחקן	תחום עליון*	ערכי שפלי*	חלקו באחוזים מתחום עליון	פתרון הקצאת הגרעין והגרעינון*	חלקו באחוזים מתחום עליון
1	15.87	8.08	50.9%	8.19	51.6%
2	12.82	5.96	46.5%	5.82	45.4%
3	1.70	0.79	46.3%	0.84	49.5%
4	2.54	1.04	41.1%	1.02	40.1%

* במיליוני ש.

⁵⁰ רנטה = תוספת הרווח של העיר

סך כמות הקולחים ששימוש במערכת האזורית

⁵¹ תחום עליון הינו תוספת הרווח המקסימאלית האפשרית עבור כל אחת מהיחידות הכלכליות, בהתייחס לסדר כניסתן למיקוח (ראה גם טבלה מספר 4.4.1. שבנספח 4).

מטבלה 6.2 ניתן לראות, כי שחקן 1 מקבל את תוספת הרווח הגבוהה ביותר המהווה כמחצית מתוספת הרווח הגבוהה ביותר שיכול היה להשיג בתנאים מסוימים (ראה טבלה 4.4.1). בנוסף, נבחין כי למרות ששחקן מספר 3 מקבל את תוספת הרווח הנמוכה ביותר (במונחים כספיים), שחקן זה מקבל הקצאה הגבוהה יותר מזו שמקבל שחקן 2 בהתייחס לחלקו באחוזים של פתרון הקצאת הגרעינון (והגרעין) מהתחום העליון, 49.5% לעומת 45.4%, בהתאמה. חלקו של שחקן 4 בהשוואה לתחום העליון הינו הנמוך ביותר בשתי חלופות ההקצאה שנבחנו.

לגישות ההקצאה מתחום המשחקים השיתופיים תכונות רצויות, שפורטו בסעיפים 4.6 ו-4.7. בנוסף, הימצאותו של פתרון ההקצאה במרחב המיקוח של הליבה 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: גידול בסך שטחי הקרקע המעובדים; אי עקירת שטחי מטעים; הזרמת הקולחים השלישוניים בנחל משקמת את האפיק שלו ומשפרת את סביבת החי והצומח שלצידו; פתרון סביר לבעיית מי הביוב המטוהרים; מניעת זיהום חופי הרחצה הממוקמים בשפך נחל הירקון כתוצאה משימוש בקולחים שלישוניים; מניעת זיהום אקוויפר החוף כתוצאה משדרוג מטייש ערי כפר-סבא והוד השרון.

תנאי חוסר וודאות

בפרק 5 מנוסח ומיושם מודל התקשרות חוזית, המתאר את תהליך המיקוח בין היחידות הכלכליות שבאזור בתנאי חוסר וודאות ובהעדר מגשר, בהנחה כי יפעלו להשגת המבנה הארגוני האופטימאלי שהושג בפרק 3 (החלופה המיטבית). בנוסף, נבחנה האפשרות בה העיר, מנצלת את כוחה היחסי הגדול ופועלת בצורה אופורטוניסטית (חלופה ב').

בחלופה ב' נקבל מבנה ארגוני השונה מזה שהתקבל תחת החלופה המיטבית. ראינו כי בחלופה המיטבית למנהלת הנחל תפקיד כפול: מצד אחד היא משמשת כצרכנית הקולחים היחידה של העיר ומנגד משמשת כספקית הקולחים היחידה לקבוצות החקלאים. בחלופה ב' נקבל כי העיר היא ספקית הקולחים היחידה באזור.

השוני במבנה הארגוני משפיע בצורה ישירה על כמות הקולחים השלישוניים המצויה במערכת האזורית הנבחרת: בחלופה המיטבית, מועברים תחילה, כל הקולחים השלישוניים של העיר למנהלת הנחל (8 מלמ"ש) ומשפך הנחל מועברים לקבוצות החקלאים השונות (2.2 מלמ"ש), סה"כ 10.2 מלמ"ש קולחים שלישוניים. מנגד, בחלופה ב' נקבל כי סך כמות הקולחים שבמערכת שווה ל- 8 מלמ"ש (2.2 מלמ"ש מועברים לקבוצות החקלאים ו- 5.8 מלמ"ש מועברים למנהלת הנחל). במילים אחרות, בחלופה ב' אין שימוש מושכל בקולחי העיר המתבטא בהפחתה של 2.2 מלמ"ש בכמות הקולחים המוקצית למנהלת הנחל לטובת שיקום אפיקו.

טבלה 6.3 מציגה את תוספות הרווח שנתקבלו עבור כל אחת מהיחידות הכלכליות בהתייחס לשתי החלופות שנבחנו.

טבלה 6.3 : הקצאת תוספות הרווח האופטימאליות ליחידות הכלכליות (במיליוני ₪)

שחקן	חלופה מיטבית		חלופה ב'	
	תוספת רווח	חלקו באחוזים מהסה"כ	תוספת רווח	חלקו באחוזים מהסה"כ
1	9.49	63.16%	9.84	74.70%
2	4.37	29.09%	2.18	16.51%
3	0.44	2.94%	0.43	3.30%
4	0.72	4.80%	0.72	5.49%
סה"כ	15.03	100%	13.17	100%

מטבלה 6.3 עולה כי בשתי החלופות שנבחנו, כל היחידות הכלכליות משפרות את מצבן התחילי. כמו-כן, תוספת הרווח האופטימאלית הגבוהה ביותר מושגת על ידי העיר ולאחריה, בסדר יורד, על ידי מנהלת הנחל, החקלאים הרחוקים והחקלאים הקרובים, בהתאמה. למרות שסך תוספת הרווח המושגת בחלופה ב' נמוכה בהשוואה לזו המושגת בחלופה המיטבית, העיר תעדיף דווקא (רציונאליות צרה) לבחור בחלופה ב' כחלופה הטובה ביותר עבורה, היות ותוספת הרווח של העיר גבוהה יותר בחלופה זו.

ניתן לראות כי הרנטה משימוש בקולחים עבור העיר הינה 0.93 ₪/מ"ק קולחים שלישוניים ו- 1.23 ₪/מ"ק קולחים שלישוניים, בהתייחס לחלופה המיטבית ולחלופה ב', בהתאמה. כלומר, בתנאי חוסר וודאות גדל כוחה היחסי של העיר בהשוואה ליתר היחידות הכלכליות שבאזור.

כאשר משווים בין שתי החלופות עולה כי בחלופה ב' מנהלת הנחל היא הנפגעת העיקרית (והיחידה) מהחלטת העיר לא לבחור בחלופה המיטבית, תוספת הרווח של מנהלת הנחל קטנה ב- 2.19 מלש"ח (ההפרש בין 4.37 מלש"ח, בחלופה המיטבית לבין 2.18 מלש"ח, בחלופה ב'), בעוד שקבוצות החקלאים השונות כמעט אדישות בין שתי החלופות.

הקצאת החלופה המיטבית עדיפה על פני הקצאת חלופה ב' מהסיבות הבאות:

א. ההיבט החברתי: בחלופה זו מושגת תוספת הרווח האזורית האופטימאלית הגבוהה ביותר.

ב. ההיבט הסביבתי: בחלופה זו ניצול הקולחים של העיר טוב יותר ומתבטא בתוספת של 2.2 מלמ"ש קולחים לשיקום הנחל ללא פגיעה בהשקיה החקלאית.

מנגד, החלופה המיטבית אינה יציבה מבחינה ארגונית, לעיר עדיפה הקצאת חלופה ב' על פני הקצאת החלופה המיטבית.

מבחינת מנהלת הנחל, החלופה המיטבית עדיפה, היות ובחלופה זו היא משיגה את תוספת הרווח הפרטית הגבוהה בהשוואה לתוספת הרווח שהיא משיגה בחלופה ב'.

התנהגות אופורטוניסטית מצד העיר, כמתואר בחלופה ב', אינה פוגעת רק בסך עוגת תוספת הרווח האזורית בכלל ובהקצאת תוספת הרווח למנהלת הנחל בפרט. אלא מתבטאת גם בפגיעה משמעותית ביכולת השיקום של אפיק הנחל (הקצאת קולחים של 8 מלמ"ק בחלופה המיטבית לעומת 5.8 מלמ"ק בחלופה ב').

לפגיעה בשיקומו של אפיק נחל הירקון השפעה ישירה בעיקר על רווחתם של תושבי העיר המתבטאת למשל, בירידת ערכי דירות המגורים, פגיעה כלכלית בעסקים הסמוכים, פגיעה באיכות החיים, פגיעה נופית וכיו"ב (ראה עבודותיהם של זכאי, 2002; רוזנטל וצבן, 1999). בנוסף, כל פגיעה סביבתית תהיה מלווה בהתנגדות ארגונים סביבתיים שונים, אשר יעדיפו את יישום החלופה המיטבית. מכאן, במחקר הנוכחי נתייחס לפתרון ההקצאה של החלופה המיטבית כפתרון

המקובל על כל היחידות הכלכליות הפעילות באזור הן מבחינה חברתית, הן מבחינה סביבתית והן מהבחינה הכלכלית⁵².

דיון משווה בחלופות ההקצאה בהתייחס להנחות השונות

מהשוואת פתרונות ההקצאה שהתקבלו בהנחת תנאי וודאות מלאה (טבלה 6.1) לפתרונות ההקצאה שהתקבלו בהנחת תנאי חוסר וודאות בהתייחס לחלופה המיטבית (טבלה 6.3) עולה כי בשני המקרים העיר, יצרנית הקולחים, היא בעלת החלק הגדול ביותר ב"עוגת תוספת הרווח" (כ- 50% ו- 63% בהנחת תנאי וודאות מלאה ובהנחת תנאי חוסר וודאות, בהתאמה). יתרת עוגת תוספת הרווח מתחלקת, בשיעורים הולכים ופוחתים בין מנהלת הנחל, קבוצת החקלאים הרחוקים וקבוצת החקלאים הקרובים. רמת ההקצאות שנקבעה ליחידות הכלכליות שונה ומתבטאת בעיקר בירידת חלקם של צרכני הקולחים (מנהלת נחל, חקלאים קרובים וחקלאים רחוקים), בהנחת חוסר הוודאות. השוני בהקצאות תוספת הרווח ליחידות הכלכליות נובע מהנחות היסוד העומדות בבסיס כל אחד מהמודלים שנבחנו. בתנאי וודאות מלאה, ניתנה חשיבות לכוחם היחסי של כל אחת מהיחידות הכלכליות, שמקורה ביכולת להתאגד במספר חלופות התקשרות אפשריות. לעומת זאת, בהנחת תנאי חוסר וודאות, הונח מראש כי הפרטים יתאגדו בהתאם לחלופה המיטבית (קואליציית העל, בה (תחילה) מועברים כל קולחי העיר השלישוניים למנהלת הנחל ומשפך הנחל מועברים הקולחים לקבוצת החקלאים השונות). מכאן, קטן כוחם היחסי של צרכני הקולחים הפוטנציאליים ומנגד גדל כוחם היחסי של העיר. מכאן עולה כי בתנאי חוסר וודאות גדלה הרנטה משימוש בקולחים עבור העיר ל- 0.93 ש"ח/מ"ק בהשוואה לכ- 0.78 ש"ח/מ"ק, בהנחת וודאות מלאה.

הערות לסיכום

כיום, השפכים העירוניים מהווים מטרד הפוגע ברווחת תושבי העיר והסביבה. על פי חוק, מוטלת על העיר החובה לטהר את השפכים לרמות טיהור נדרשות ולסלקם משטחה, למשל על ידי הזרמה לוואדי סמוך או לים התיכון. טיהור השפכים וסילוקם כרוך בעלויות תפעול גבוהות ובבניית תשתיות הולכה מתאימות היוצרות נטל כלכלי כבד לעיר.

⁵² ניתן להתייחס להבדל בהקצאת תוספת הרווח לעיר כזניח (כ- 3.7% מסך תוספת הרווח לעיר).

במחקר הנוכחי, הראנו כי על ידי שימוש מושכל בקולחי העיר ניתן לשפר את הניצול הנוכחי הלא יעיל של קולחי העיר 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 הן בתנאי וודאות והן בתנאי חוסר וודאות.

תוספת הקולחים לסל גורמי הייצור של החקלאים השונים מגדילה את סך שטחי הקרקע המעובדים בחקלאות ללא צורך בעקירת מטעים. העברת קולחי העיר למנהלת הנחל מאפשרת את שיקום אפיקו ותורמת לשיפור סביבת החי והצומח שלצידו.

בנוסף, לשיתוף פעולה כולל בין כל היחידות הכלכליות לשימוש בקולחים יש מספר יתרונות נוספים, הכוללים, בין היתר: חיסכון במים שפירים כתוצאה ממעבר המגזר החקלאי להשקיה גם בקולחים; מניעת זיהום אקוויפר החוף; שימוש בקולחים שלישוניים עשוי למנוע את זיהום וחופי הרחצה שבשפך הירקון; יצירת "ריאה ירוקה" באזור המאופיין בריכוז אוכלוסין גבוה; אפשרות לצמצום עלויות הדישון היקרות.

מובן כי המחקר הנוכחי אינו כולל את כל הטווח הרחב של הנושאים הקשורים להשבת קולחים להשקיה ושיקום נחלים. כיוונים אליהם ניתן להרחיבו כוללים: פיתוח מודל תכנון רב תקופתי (20-30 שנה), שימוש בפונקציה שאינה ליניארית בהתייחס לכמויות המים, הכנסת שיקולים לתמהיל גידולים רב שנתיים, אמידת נזקי בורון על רמת היבול. המחקר הנוכחי יכול לשמש כאבן יסוד (building block) במחקרים נוספים אלו.

Boggess, W. and Lacewell, R. and Zilberman, D., "Economics of Water Use in Agriculture," in *Agricultural and Environmental Resource Economics*, Edited by Carlson, A. G. and Zilberman, D. and Miranowski, A. J. New York Oxford, Oxford University Press 1993, pp.319-391.

Brill, E. and Hochman, E. and Zilberman, D., "Allocation and Pricing of Water at the Regional Level," *Working Paper No. 9601*, December 1995.

Che, Y. K and Hausch, D.B., "Cooperative Investments and the Value of Contracting," *The American Economic Review*, Vol. 89, No.1, pp. 125-147, March 1999.

Di Pinto, AC. and Lopez, A. and Ramadori, R. and Santili, N., "Wastewater Reuse as an Alternative to the Traditional Water Resources," *Annali Di Chimica*, Vol. 89 (9-10), pp. 689-697, Sep- Oct 1999.

Dinar, A. and Yaron, D. and Kannai, Y., "Sharing Regional Cooperative Gains From Reusing Effluent for Irrigation," *Water Resources Research*, Vol.22, No. 3, pp.339-344, March, 1986.

Dinar, A. and Yaron, D.,"Treatment Optimization of Municipal Wastewater and Reuse for Regional Irrigation," *Water Resource Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 331-338, March 1986.

Feinerman, E. and Seiler, E.J.,"Private Transfers with Incomplete Information: A Contribution to the "Altruism- Exchange Motivation for Transfers debate," *Journal of Population Economics*, Vol.15, pp. 715-736, 2002.

Feinerman, E. and Plessner, Y. and M. Disegni Eshel, D.,"Recycled Effluent: Should The Polluter Pay?," *Amer. J. Agr. Econ.* 83(4), pp.958-971, November 2001.

Finkelshtain, I. and Kislev, Y.,"Prices Versus Quantities: The Political Perspective," *Journal of Political Economy*, Vol. 105, No.1, pp. 83-100, 1997.

Fleischer, A. and Tsur, Y.,"Measuring the Recreational Value of Agricultural Landscape," *European Review of Agricultural Economics*, 27(3), pp. 385-398, 2000.

Friedman. J. W.,"Game Theory with Application to Economics," *Oxford University Press*, 1990.

Fudenberg, D and Tirole, J.,"Game Theory," *The MIT Press*, Cambridge, Massachusetts, London England. Third Edition, Chapter No.7, 1993.

Gisser, M.,"Linear Programming Models for Estimating the Agricultural Demand Function for Imported Water in the Pecos River Basin," *Water Resource Research*, Vol. 6, No. 4, pp 1025-1032, August 1970.

Hart. O and Moore. J.,"Incomplete Contracts and Renegotiation," *Econometrica*, Vol 56 (4), pp 755-785, July 1988.

Haruvy, N. and Aviva, H.,"Cost Assessment of Various Means of Averting Enviromental Damage and Groundwater Contamination from Nitrate Seepage," *Agriculture Water Managment*, Vol. 32, pp. 307-320, 1997.

Haruvy, N. and Aviva, H.and Sagiv, B. (a),"Agriculture Practicies, Soil Fertility Management Modes and Resultant Nitrogen Leaching Rates Under Semi- Arid Conditions," *Agriculture Water Managment*, Vol. 42, pp. 81-95, 1999.

Haruvy, N. and Offer, R.and Ravina, I. (b),"Wastewater Irrigation- Economic Concerns Regading Beneficiary and Hazrdous Effects of Nutrients," *Water Resources Managment*, Vol. 13, pp. 303-314, 1999.

Haruvy, N. and Sadan, E.,"Cost Benefit Analysis of Wastewater Treatment in the Water Scarce Economy of Israel: A Case Study," *Journal of Financial Management and Analysis*, Vol.7, No. 1, pp. 44-51, 1994.

Haruvy, N.,"Agricultural reuse of wastewater: nation- wide cost benefit analysis," *Agriculture Ecosystems & Enviroment*, Vol. 66, pp. 113-119, 1997.

Haruvy, N., "Wastewater reuse- regional and economic considerations," *Agriculture Ecosystems & Environment*, Vol. 23, pp. 57-66, 1998.

Haouari, M. and Azaiea, M.N., "Optimal Cropping Patterns Under Water Deficits," *European Journal of Operational Research*, Vol. 130, pp 133-146, 2001.

Kislev, Y., "Urban Water in Israel," *Discussion Paper No.6.02*, Rehovot, Hebrew University, October 2002.

Kislev, Y., "The Water Economy of Israel," *Discussion Paper No.11.01*, Rehovot, Hebrew University, 2001.

Kislev, Y., "The Water Economy of Israel: Principles and Their Application," *Institute for Advanced Political Studies*, Jerusalem, 1993.

Lejano, P. R. and Davos, A. C., "Cost Allocation of Multiagency Water Resource Project: Game Theoretic Approaches and case study," *Water Resources Research*, Vol.31, No. 5, pp. 1387-1393, May, 1995.

Lensberg, T., "Bargaining and Fair Allocation," in *Cost Allocation: Methods, Principles, Application*, edited by Young, H. P., North- Holland, New York, pp.101-116, 1985.

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.

Loehman, E.T., "Cooperative Solution for Problems of Water Supply," in *Water Quality/Quantity Management and Conflict Resolution Institutions, Processes and Economic Analysis*, edited by Dinar, A. & Loehman, E.T., Praeger Publishers, Westport, Connecticut, London, pp. 301-319, 1995.

Loomis, J. and Kent, P. and Strange, L. and Faush, K. and Covich, A., "Measuring the Total Economy Value of Restoring Ecosystem Services in an Impaired River Basin: Results from a Contingent Valuation Survey," *Ecological Economics*, Vol. 33, pp. 103-117, 2000.

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.

Maskin, E., "On Indescribable Contingencies and Incomplete Contract," *European Economic Review*, Vol. 46, pp 725-733, 2002.

Maskin. E. and Moore. J., "Implementation and Renegotiation," *Review of Economics Studies*, Vol. 66 (1), pp. 39-56, Jan 1999.

Mass-Collel, A. and Whinston M.D and Green J.R.,"Microeconomic Theory,"
Oxford University Press, Chapter 23, 1985.

Mass, E.V.and Hoffman, G.L.,"Crop Salt Tolerance- Current Assessment," *ASCE, J. of the Irrigation and Drainage Division, IR2*, Vol. 10, pp. 115-134, 1977

Okada, N.,"Cost Allocation in Multipurpose Reservoir Development: the Japanese Experience," in *Cost Allocation: Methods, Principles, Application*, edited by Young, H. P., North- Holland, New York, pp.193- 205, 1985.

Pereira, L.S. and Oweis, T. and Zairi, A.,"Irrigation Management Under Water Scarcity," *Agricultural Water Management*, Vol. 57, No. 3, pp. 175-206, December 2002.

Rosegrant, M.W., Ringler, c., McKinney, D.C, Cai, X., Keller, A., Donoso, G.,
"Integrated Economic – Hydrologic Water Modeling at the basin scale: the Maipo River Basin.," *Agricultural Economics*, Vol. 24, pp. 33-46, 2000.

Sadan, E. and Ben- Zvi, R.,"The Value of Institutional Change in Israel's Water Economy," *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-8, 1987.

Salanie, B.,"The Economics of Contracts – A Primer," *The MIT Press*, Cambridge, Massachusetts London, England, 1998.

Schmitz, P. W., "Simple Contracts, Renegotiation under Asymmetric Information and the Hold-up Problem," *European Economic Review*, Vol. 46 (1), pp. 169-188, January 2002.

Shah, F. and Zilberman, D., "Government Policies to Improve Intertemporal Allocation of Water in Regions With Drainage Problems," in *The Economics and Management of Water and Drainage in Agriculture*, edited by Dinar, A. & Zilberman, D. Kluwer Academic Publishers, 1991. pp. 637-676.

Shubik, M., "The Cooperative Form, The Value, and The Allocation of Joint Costs and Benefits," in *Cost Allocation: Methods, Principles, Application*, edited by Young, H. P., North- Holland, New York, pp.79-94, 1985.

Soffer, A., "Mapping special interest Groups in Israel's Water Policy," Efficient Use of Limited Water resources, *Ramat Gan: BESA center for Strategic Studies*, Bar Ilan University, 2001.

Spulber, D.F., "Optimal Nonlinear Pricing and Contingent Contracts," *International Economic Review*, Vol. 33, No. 4, pp 747-772, November, 1992.

Sunding, D. and Zilberman, D. and Howitt, R. and Dinar, A. and MacDougall, N., "Measuring The Costs of Reallocating Water from Agriculture: A Multi- Model Approach," *Natural Resource Modeling*, Volume 15, Number 2, Summer 2002, pp 201-225.

Tirole, J.,"The Theory of Industrial Organization," MIT Press, Cambridge, 1988.

Yaron, D.,"The Israel Water Economy: An Overview," in *Decentralization and Coordination of Water Resource Management*, D. Parker & Y. Tsur (eds.), Kluwer Academic Publishers, pp. 9-22, 1997.

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.

Zaslavski, D.,"The Face of water in Israel," *Draft Manuscript*, Haifa, Technion, 2001.

Zhu, T.,"Holdups, Simple Contract and Information Acquisition," *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol. 42, pp 549-560, 2000.

ספרות עברית

אדן טכנולוגיה וייעוץ כלכלי בע"מ., "עלויות טיפול בשפכים עירוניים, " 1999.

הדס, א. וטרצ'יצקי, ח. ופיין, פ. וצוקרמן, א., "תחזית השימוש במים בחקלאות לפי איכויות ולפי אזורים, " משרד החקלאות ופיתוח הכפר, מאי 2001.

גבירצמן, ח., "משאבי המים בישראל, " הוצאת יד יצחק בן- צבי, ירושלים, 2002.

גל, ב. וחובריה, "תחשיבי השקעות בהדרים מהקמה ועד פוריות, "משרד החקלאות ופיתוח הכפר, שירות ההדרכה והמקצוע, אוגוסט, 2000.

גל, ב. ומדלג', ג', "תחשיבים בגידולי ירקות, "משרד החקלאות ופיתוח הכפר, דצמבר, 2000.

גל, ב. ושפיגל, א., "תחשיבים בענפי קישוט ירוקים, "משרד החקלאות ופיתוח הכפר, שירות ההדרכה והמקצוע, יוני, 2002.

"דין וחשבון מסכם של הועדה לעניין מחירי המים לחקלאות, "הוגש למנכ"ל משרד ראש הממשלה, אפריל 2003.

הועדה למים נחותים ע"י נציבות המים, "דין וחשבון של הועדה על השקיה בקולחין בחקלאות" מאי, 1999.

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, "הרשויות המקומיות בישראל 1999, "פרסום מס. 1170, ירושלים, דצמבר 2001.

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, "שנתון סטטיסטי לישראל 2002, "מס. 53, ירושלים, 2002.

המשרד לאיכות הסביבה, "ניטור מים ונחלים דו"ח פעילות מסכם לשנת 2001, "רשות הטבע והגנים, ירושלים, מרץ 2002.

זכאי, נ., "אמידת הערך הכלכלי- חברתי של פארק הירקון, "חיבור לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת תואר מגיסטר למדעים בתכנון ערים ואזורים, הוגש לסנט הטכניון, חיפה, מרץ 2002.

זסלבסקי, ד., "מתחת לקו האדום- על משבר המים בישראל, "קרית הטכניון, חיפה, יוני 2002.

ישרים, ב. וסלמון, א., "תחשיבי השקעות במטעים מהקמה ועד פוריות מלאה, "משרד החקלאות ופיתוח הכפר, שירות ההדרכה והמקצוע, מאי, 2003.

כיוון אסטרטגיה ופיתוח עסקי בע"מ., "תוכנית הפיתוח לנחל הירקון- ניתוח עלות תועלת," מאי 2002.

כיוון אסטרטגיה ופיתוח עסקי בע"מ., "היבטים סביבתיים של משק המים – מסמך מדיניות," טיוטא, מוגש לרשות הטבע והגנים, מרץ, 2004.

כסלו, י., "שווקים למים," מים הנדסת מים, גיליון 48, ע"מ 26-32, יוני 2001.

מבקר המדינה., "דוח על ניהול משק המים בישראל," ירושלים, מבקר המדינה, 1990, ע"מ 53 .

מבקר המדינה., "דוח שנתי 2000 50 ב', " ירושלים, מבקר המדינה, 2000, ע"מ 296-310.

משרד הבריאות., "העקרונות למתן היתרים להשקיה בקולחים," דו"ח ועדת הלפרין, אוגוסט 1999.

משרד החקלאות (א)., " דין וחשבון כלכלי על החקלאות והכפר 1999," הרשות לתכנון ופיתוח החקלאות ההתיישבותית והכפר שבמשרד החקלאות, יולי 2000.

משרד החקלאות (א)., "דין וחשבון כלכלי על החקלאות והכפר 2000," הרשות לתכנון ופיתוח החקלאות ההתיישבותית והכפר שבמשרד החקלאות, יולי 2001.

משרד החקלאות (א)., " דין וחשבון כלכלי על החקלאות והכפר 2001," הרשות לתכנון ופיתוח החקלאות ההתיישבותית והכפר שבמשרד החקלאות, אוגוסט 2002.

משרד החקלאות (ב)., "ריכוז הנתונים על החקלאות והכפר בשנים 1998-1999," הרשות לתכנון ופיתוח החקלאות ההתיישבותית והכפר שבמשרד החקלאות, דצמבר 2001.

משרד החקלאות (ב)., "ריכוז הנתונים על החקלאות והכפר בשנים 1999-2000", הרשות לתכנון
ופיתוח החקלאות ההתיישבותית והכפר שבמשרד החקלאות, אוגוסט 2002.

משרד החקלאות (ב)., "ריכוז הנתונים על החקלאות והכפר בשנים 2000-2001", הרשות לתכנון
ופיתוח החקלאות ההתיישבותית והכפר שבמשרד החקלאות, מרץ 2003.

משרד החקלאות ופיתוח הכפר., "נורמות מים מ"ק לדונם, "דו"ח פנימי של הרשות לתכנון, שרות
ההדרכה והמקצוע, 2001.

נציבות המים., "תכנית אב (מעבר) לפיתוח משק המים בשנים 2010-2002 דו"ח מסכם", יוני 2002.

נציבות המים., "קריטריונים למי קולחים להשקיה על פני אקוויפר החוף של ישראל, "המלצות
הוועדה לתקנות השקיה בקולחים על פני אקוויפר החוף, אוגוסט 1999.

פרידלר, ע. וחואניקו, מ., "שימוש בקולחים מושבים לשיקום נחלים בישראל, "מים והשקיה,
גיליון 399, ינואר 2000, ע"מ 3-11.

צור, י., "היבטים כלכליים בתמחור מים בחקלאות, "מאמר מחקר מס' 2003, המרכז למחקר
בכלכלה חקלאית, ת.ד 12, רחובות, 2000.

קלי, א., "משאב במחסור: המים בישראל ובאזור, "המכון למחקר המים, הטכניון, 1997.

קפלן, מ., "נחלי ישראל – מדיניות ועקרונות תכנון, "הוגש למשרד לאיכות הסביבה, בספטמבר
2004.

רוזנטל, ג וצבן, ש., "הקצאת קולחים לשיקום נחלים: בחינת נחל שורק, ניתוח עלות/תועלת
בסיסי, "מוגש לנציבות המים ולמשרד לאיכות הסביבה. מאי, 1999.

נספח לפרק 3: תחשיבים

חישוב p_n^{ij} :

ביטוי (3.3.1) מציג את דרך חישוב p_n^{ij}

$$(3.3.1) \quad p_n^{ij} = (\hat{p}_n - e_n^i) \cdot y_{ng}^{ij} - p^d (\bar{k}_n - k^j w_{ng}^{ij}) - F_{ng}^i$$

כאשר :

\hat{p}_n - מחיר מכירה של 1 ק"ג יבול של גידול n של חקלאי i .

e_n^i - ההוצאות משתנות לק"ג יבול n התלויות ברמת היבול, ללא עלויות מים (זהה עבור החקלאים השונים כאשר מתייחסים לגידולים זהים).

y_{ng}^{ij} - רמת היבול לדונם של גידול n (בק"ג) המושקה במים ממקור j בחלקה g אצל חקלאי i, ראה הנחות לחישוב y_{ng}^j בהמשך.

p^d - מחיר יחידת דשן חנקתי (ש"ח/ק"ג).

\bar{k}_n - רמה ממומלצת (ק"ג) של חנקן עבור דונם אחד של גידול n.

k^j - היא כמות החנקן (ק"ג) במים ממקור j (ק"ג).

F_{ng}^i - עלות קבועה לדונם גידול n בחלקה g, שאינה תלויה ברמת הגידולים (החזר הון, תשתיות וכד').

w_{ng}^{ij} - סך כמות המים השנתית (מ"ק) הנדרשת להשקיית 1 דונם של גידול n בחלקה g של חקלאי

i. אנו מניחים כי w_{ng}^{ij} נתון אקסוגני (ברמה הנקבעת על פי הנחיות והמלצות של מדריכי חקלאות הזמינים לחקלאים).

חישוב y_{ng}^{ij} :

ביטוי (3.3.2) מתאר את ההנחות העומדות בבסיס חישוב y_{ng}^{ij} :

$$(3.3.2) \quad y_{ng}^{ij} = \bar{y}_{ng}^i - \bar{y}_{ng}^i \cdot \frac{L_{ng}^j}{100}$$

כאשר :

רמת יבול מכסימלית של יבול n בשטח g (ק"ג) בהעדר עקת מליחות. y_{ng}^{-i}

L_{ng}^j פונקצית פחיתת יבול של גידול n בשטח g המושקה במים ממקור j :

לכל יבול יש סף רגישות למליחות הקרקע, פונקצית פחיתת היבול מציינת את ההפחתה ביבול הנגרמת כתוצאה מהמלחת יתר של הקרקע.

$$L_{ng}^j = \begin{cases} \gamma_n + \delta_n \cdot S_{ng}^j & \text{if } T_{ng}^j > n \\ 0 & \text{if } T_{ng}^j \leq n \end{cases}$$

רמת מליחות – סף עבור גידול n
 רמת מליחות – סף עבור גידול n

ניתן לרשום את L_{ng}^j בצורה הבאה :

$$L_{ng}^j \geq \gamma_n + \delta_n \cdot T_{ng}^j \quad \text{or} \quad 0 \geq -L_{ng}^j + \gamma_n + \delta_n \cdot T_{ng}^j$$

כאשר :

γ_n, δ_n - הינם פרמטרים (ראה עבודתם של Mass and Hoffman 1977).

T_{ng}^j - ממוצע המוליכות החשמלית בקרקע (ds/m) של גידול n בשטח g המושקה במים ממקור j .

זהו למעשה ממוצע של רמת המוליכות החשמלית של המים בקרקע בעומק בית השורשים בשטח

g בתחילת עונת הגידול (T_g^0) ושל רמת המוליכות החשמלית של שטח g , שגידול n גדל בה, בסוף

עונת הגידול, לאחר השקיה במים ממקור j (T_{ng}^{1j}), כפי שמוצג במשוואה (3.3.3) :

$$(3.3.3) \quad T_{ng}^{1j} = 0.5(T_{ng}^{1j} + T_g^0)$$

המוליכות החשמלית בתחילת העונה נתונה אקסוגנית, בעוד ש- T_{ng}^{1j} מתקבל מהמשוואה הבאה :

$$(3.3.4) \quad T_{ng}^{1j} = T_g^0 \cdot \frac{A_{ng}^j}{B_{ng}^j} + \frac{D^j w_{ng}^j}{B_{ng}^j}, \quad A_{ng}^j \equiv V_g - 0.5\beta_g(w_{ng}^j + \tau), \quad B_{ng}^j \equiv V_g + 0.5\beta_g(w_{ng}^j + \tau)$$

כאשר :

V_g - ממוצע כמות המלחים באזור בית השורשים בחלקה מסוג g (מ"ג כלוריד).

β_g - שיעור מי ההשקיה הנשטפים אל מתחת לעומק בית השורשים בשטח g.

τ - כמות הגשמים הממוצעת במהלך עונת הגידול (מ"מ גשם).

D^j רמת המוליכות החשמלית (ds/m) של מים ממקור j, רמת המליחות של המים.

נגביל את L_{ng}^j כך שלא יהיה שלילי. מכיוון שבעיית המודל היא בעיית מקסימום, נובע מ- (3.3.3)

שרמתו של L_{ng}^j בפתרון האופטימאלי תהיה שווה ל- $\max\{0, \gamma_n + \delta_n \cdot S_{ng}^j\}$. בנוסף,

$$L_{ng}^j \leq 100$$

נספח לפרק 4: קדקודי הליבה

ליבת המשחק האזורי היא פוליהדרון במרחב ארבע מימדי. דרך לחישוב קדקודי הליבה של המשחק השיתופי יעשה לפי סדר כניסתם של השחקנים לקואליציית העל. נאפשר קיומן של כל הקואליציות, לרבות אלו שערכן אפס, ונחשב את תוספת הרווח באזור מהצטרפותו של כל שחקן לקואליציה קיימת.

במשחק האזורי הנדון ישנן 4 שחקנים ולכאורה קיימות 24 (=4!) צירופים אפשריים. אך, היות ולחלק גדול מהקואליציות פונקציה אופיינית שערכה אפס, יתלכדו חלק מהצירופים האפשריים באותו קדקוד. קדקודי הליבה המוצגים בטבלה 4.4.1 מבטאים את תרומתו השולית של כל שחקן בעת צירופו לקואליציה קיימת, שהיא למעשה ההקצאה האופטימאלית הניתנת לשחקן בהתייחס לסדר כניסתו לקואליציה קיימת.

טבלה 4.4.1: קדקודי ליבת המשחק השיתופי - אזורי

הקצאת תוספת הרווח האופטימאלית לשחקן (מיליוני ₪)				צירופים אפשריים להקצאה						
1	2	3	4							
0.00	12.82	1.00	2.04	1234						
0.00	12.82	1.68	1.36	1243						
0.00	12.12	1.70	2.04	1324						
0.00	11.64	1.70	2.52	1342						
0.00	11.65	1.68	2.54	1423						
0.00	11.64	1.69	2.54	1432						
12.82	0.00	1.00	2.04	2134						
12.82	0.00	1.68	1.36	2143						
13.83	0.00	0.00	2.04	2314	3214					
15.87	0.00	0.00	0.00	2341	2431	3241	3421	4231	4321	
14.18	0.00	1.68	0.00	2413	4213					
1.70	12.12	0.00	2.04	3124						
1.70	11.64	0.00	2.52	3142						
4.23	11.64	0.00	0.00	3412	4312					
2.54	11.65	1.68	0.00	4123						
2.54	11.64	1.69	0.00	4132						

להלן דוגמה המציגה את דרך החישוב של קדקודי הליבה:

נתייחס לסידור 2314, שחקן 2 מצטרף לקואליציה (\emptyset) ויוצר קואליציה (2) שתוספת רווחיה

$v(2) = 0$, כלומר $x_2 = 0$. שחקן 3 מצטרף לקואליציה (2) ויוצר קואליציה (2,3) שתוספת רווחיה

$v(2,3) = 0$ לכן $x_3 = v(2,3) - v(2) = 0$. שחקן 1 מצטרף לקואליציה (2,3) ויוצר קואליציה

(2,3,1) שתוספת רווחיה $v(2,3,1) = 13.83$ ולכן יקבל $x_1 = v(2,3,1) - v(2,3) = 13.83$. שחקן 4

מצטרף לקואליציה (2,3,1) ויוצר את קואליציית העל (2,3,1,4) שתוספת רווחיה $v(\bar{N}) = 15.87$

לכן יקבל $x_4 = v(\bar{N}) - v(2,3,1) = 2.04$.

ליבת המשחק האזורי שקדקודיה מתוארים בטבלה 4.4.1 יוצרת מרחב מיקוח רחב מאוד ובעיקר

לשחקנים 1 ו-2. כל פתרון הקצאה המצוי בליבה (צירופים קמורים של וקטורי קדקודי הליבה)

מקיים את כל משוואות הליבה (טבלה 4.1) ולכן יהיה מקובל על כל שחקני המשחק השיתופי-

אזורי.