

הערכת עלויות אספקת מים מותפלים באיכויות שונות וממקורות שונים תוך שמירה על קיימות האקוויפר, בהדגמה על אזור נתניה ועמק חפר: שיקולים תכנוניים, כלכליים, הידרולוגיים וטכנולוגיים

נאוה חרובי¹, שרית שלהבת², יהודה בכמט³, דני פרימן⁴, אמנון צפתי⁵ וקובי הרוסי⁵

תקציר

English Abstract

רקע

שיטת המחקר - תיאור המודל המשולב

ממצאי המודל

סיכום ומסקנות

רשימת ספרות

נספח: משוואות המודל ההידרולוגי

לוחות ואיורים

איור 1: יחסי גומלין בין רכיבי המודל השונים

איור 2: תאי האזור הנבחר

איור 3: שטח פיזי של יישובים - תא 54

איור 4: שטחי מטעים והדרים - תא 54

איור 5: שטחים מבונים - תא 54

איור 6: תחזית ריכוז כלורידים בתאי עמק חפר

איור 7: תחזית ריכוז כלורידים בתאי שרון צפוני

איור 8: התפתחות המליחות בהשוואה בין תסריטים - תא 54

לוח 1: חישוב שטחים (אלפי דונם)

לוח 2: שימושי מים מחושבים - מלמ"ק

לוח 3: תיאור תסריטים

לוח 4: השוואה בין תסריטים - ריכוז כלוריד במי תהום בשנה ה-100 (מגכ"ל)

לוח 5: ריכוז כלוריד בשנה 100 ובמצב יציב (מגכ"ל)

לוח 6: ריכוז כלוריד במי השקיה (מגכ"ל) עבור רמת סף באקוויפר במצב יציב של 250 מגכ"ל

לוח 7: עלויות התפלה ממוצעות - סנט למ"ק

לוח 8: עלות מהוונת מחושבת ל-100 שנים (מיליוני ₪)

לוח 9: עלות שנתית מחושבת במצב יציב - מיליוני ש"ח

1 מחקר יישומי כלכלי והמכללה האקדמית נתניה navaharu@netvision.net.il

2 יועץ כלכלי

3 יועץ הידרולוגי

4 מודלים ממוחשבים

5 אדן טכנולוגיות

* מבוסס על מחקר במימון רשות המים. המחברים מודים לרשות המים על מימון מחקר זה.

הערכת עלויות אספקת מים מותפלים באיכויות שונות וממקורות שונים תוך שמירה על קיימות האקוויפר, בהדגמה על אזור נתניה ועמק חפר: שיקולים תכנוניים, כלכליים, הידרולוגיים וטכנולוגיים

נאוה חרובי¹, שרית שלהבת², יהודה בכמט³, דני פרימן⁴, אמנון צפתי⁵ וקובי הרוסי⁵

תקציר

מאמר זה מתאר "כלי עבודה" עבור מקבלי החלטות במשק המים, אשר מאפשר תכנון אספקת מים לאזור נבחר הכולל אוכלוסייה עירונית וחקלאית. אנו משלבים מקורות מים שונים (מי תהום, מי מוביל, מי קולחים ומי ים) כולל אספקה והתפלה של מים, ומשווים תסריטים שונים מבחינת הוצאות עבור אספקת מים והמליחות הנובעת של מי התהום. לשם כך, אנו מריצים מודל סימולציה משולב המבוסס על שיקולים תכנוניים, חקלאיים, הידרולוגיים, טכנולוגיים וכלכליים. המודל מתבסס על רמת מליחות התחלתית נתונה של מקורות המים השונים, ומניח "רמת סף" מוכתבת של איכות המים עבור אספקת מים לעיר או לעיר ולחקלאות או באקוויפר במצב יציב בהתאם לשיקולי מדיניות שונים. מליחות המים מחושבת לאורך זמן. כאשר מליחותם של המים המסופקים עולה על "רמת הסף" מתחילים בתהליכי התפלה של מקורות המים השונים, ומוהלים את המים המותפלים עם מקורות המים הנוספים כדי לשמור על רמת הסף.

בנינו בסיס נתונים ייחודי לאזור נבחר הכולל שמונה תאים הידרולוגיים באזורי עמק חפר והשרון הצפוני, והרצנו עבורו מודל הידרולוגי לתכנון מקורות המים ולחיוזי ריכוז כלוריד באקוויפר. כמו כן, אמדנו עלויות ממוצעות עבור תהליכי התפלה שונים, וחישבנו את עלויות אספקת המים לאזור כדי לשמור את רמות הסף שנבחרו עבור התסריטים השונים. מכאן, עבור כל רמת סף מתוכננת של מי אספקה, ניתן להציג את המשמעות הכלכלית.

Cost Estimation of Supplying Desalinated Water of Varying Quality from Different Sources, under Sustainable Aquifer Conditions, Illustrated for Netanya and Emek Heffer Region: Planning, Economic, Hydrological and Technological Considerations

Abstract

This paper presents "working tools" for decision makers in the water supply sector, which enables to plan the water supply to a given area that includes urban and rural population. We combine a variety of water supply resources (groundwater, National Carrier water, wastewater and desalinated seawater) and compare the impact of different scenarios on the cost of water supply and groundwater salinity. This aim is achieved through a combined simulation model that is based on regional planning, agricultural, hydrological, technological and economical considerations. The model is based on a given initial salinity level of the various water resources, and assumes a dictated water quality "threshold" for the water supply to the city, or to the city and agriculture, or in the aquifer under steady state conditions, according to different policy considerations. The water salinity level is calculated over time; when the salinity of the supplied water exceeds the "threshold", desalination processes of the different water sources are initiated, and the desalinated water is mixed with the additional water sources in order to maintain the threshold.

The paper utilizes a unique data base for a selected area, which includes eight hydrological cells in the Emek Heffer and Northern Sharon regions. The hydrological model is applied to this area, in order to plan the water supply and forecast the chloride concentration in the aquifer. The model estimates the average costs for various desalination processes and computes the costs of the amount of water needed to maintain the selected thresholds for the different scenarios. This scheme enables to present the economic significance of each planned threshold level of the water supply.

1 מחקר יישומי כלכלי והמכללה האקדמית נתניה navaharu@netvision.net.il

2 יועץ כלכלי

3 יועץ הידרולוגי

4 מודלים ממוחשבים

5 אדן טכנולוגיות

* מבוסס על מחקר במימון רשות המים. המחברים מודים לרשות המים על מימון מחקר זה.

רקע

הבעיות הנובעות ממליחות הקרקע והשקיה במים מליחים הן נפוצות והוערכו כמשפיעות על שליש מהשטח המושקה בעולם (Yaron, 1981). השקיה בקולחים תופסת חלק ניכר ממי ההשקיה, וכתוצאה המליחות של מי תהום מואצת (ירון וחבריו, 1999, 2000). להמלחה יש משמעות כלכלית והשלכות תכנונית. נזקי ההמלחה לגידולים חקלאיים תוארו על ידי Feinerman (2001). חרובי וחבריה (2001) אמדו את המשמעות הכלכלית של ההמלחה באמצעות מודל המבוסס על צריכת מים חקלאית ועירונית.

לאיכות מי התהום השלכות על פיתוח אורבני. al et Haruvy (2000) תיארו את ההשפעה הסביבתית של פיתוח אורבני לאור תחזית המלחת מי התהום ו- al et Haruvy (2004) תיארו את השיקולים הכלכליים והניהוליים בהשקיה בקולחים. ההשלכות על קיימות האקוויפר מושפעות מתהליכי התפלה. ההשלכות של השקיה בקולחים על מליחות האקוויפר תוארו על ידי Haruvy (2004). הערכת השפעתן של שיטות התפלה שונות על עלויות ומליחות מי תהום תוארו על ידי Haruvy (2006) גם Shalhevet and Haruvy (2005), (2006) תיארו מודל המאפשר לבחון שינויים דרושים במליחות כדי להקטין נזקים סביבתיים.

במאמר זה נתאר מודל תומך קבלת החלטות משולב - תכנוני, הידרולוגי, טכנולוגי, וכלכלי - אשר משמש לתכנון אספקה והתפלה של מים לאזור נבחר. צר-כני המים מוגדרים כעיר וחקלאות (אזור עירוני ואזור חקלאי), ומקורות המים כוללים מי תהום, מי מוביל, מי קולחים ומי ים מותפלים. הרצות המודל בוצעו עבור תסריטים שונים בהתאם לשיקולי מדיניות הכוללים רמות סף שונות של מליחות המים המסופקים לעיר ולחקלאות. בהתייחס לתסריטים אלו אמדנו את מליחות מי התהום לאורך זמן, וחישבנו את עלויות אספקת המים עבור התפלה של מקורות מים שונים.

המודל יושם עבור אזור נבחר אשר כולל את שמונת התאים ההידרולוגיים של עמק חפר והשרון הצפוני. תנאי האזור נבחנו באמצעות הרכיב התכנוני אשר כלל הקצאת שטחים ושימושי מים בתאים ההידרו-לוגיים הרלבנטיים.

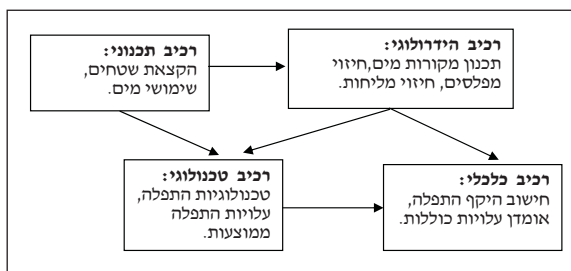
הרכיב התכנוני היווה קלט לרכיב ההידרולוגי, אשר חזה את המפלסים והמליחות לאורך זמן, וגם לרכיב הטכנולוגי, אשר בחן את טכנולוגיות ההתפלה הרלבנטיות ואת העלויות הכרוכות בהן. תוצאות הר-

כיב ההידרולוגי והרכיב הטכנולוגי היוו קלט לרכיב הכלכלי, אשר העריך והשווה את היקף ההתפלה והעלויות הנובעות עבור התסריטים השונים.

שיטת המחקר - תיאור המודל המשולב

מודל זה מתאר "כלי חשיבה" עבור מקבלי החלטות, אשר מאפשר תכנון אספקת מים לעיר ולחקלאות באמצעות שילוב מקורות מים שונים הכוללים השקיה בקולחים והתפלה. המטרה היא לקבל הוצאות נמוכות של אספקת מים ומליחות נמוכה של מי תהום. צרכני המים כוללים עיר וחקלאות, ומקורות המים כוללים מי תהום, מי מוביל, מי קולחים לחקלאות ומי ים מותפלים. המודל בכללותו הוא מודל סימולציה, אשר מחשב עבור תסריטים שונים שנבחרו לפי שיקולי מדיניות, את המליחות באקוויפר לאורך זמן ואת העלות הכוללת של אספקת מים לאזור.

המודל מורכב מארבעה רכיבים: תכנוני, הידרולוגי, טכנולוגי וכלכלי. הרכיב התכנוני שימש לתיאור הקצאת שטחים ושימושי מים בתאים ההידרולוגיים הרלבנטיים. הרכיב ההידרולוגי שימש לתכנון מקורות המים ולחיזוי רמת המפלסים וריכוז המליחות לאורך זמן. הרכיב הטכנולוגי בחן את טכנולוגיות ההתפלה הרלבנטיות ואת העלויות הממוצעות הכרוכות בהן. הרכיב הכלכלי חישב את היקף ההתפלה ואמד את העלויות הכוללות. יחסי הגומלין בין הרכיבים מתוארים באיור 1.



איור 1: יחסי גומלין בין רכיבי המודל השונים

להלן תיאור רכיבי המודל השונים:

א. רכיב תכנוני

הוכן בסיס נתונים ייחודי עבור שמונת התאים ההידרולוגיים שנבחרו וחושבו הביקושים למים של הצרכנים השונים הכוללים עיר וחקלאות, כפי שפורט בהמשך.

ב. רכיב הידרולוגי

מפני מי התהום עד לעומק הקידוחים השוא־בים.

- הגבולות המזרחי, הצפוני והדרומי של מערכת תאי המודל אטומים למעבר מים ומלח דרכם, פרט לגבול המערבי שהוא גבול פתוח.

פירוט נוסף של המרכיב המתמטי, המרכיב הנומרי, הפרמטרים (גיאומטריים, הידראוליים ותפעוליים) וכן נתוני הקלט מופיע בדו"ח הסופי שהוגש לרשות המים (חרובי וחבריה, 2006).

צריכת המים מיועדת לשני מגזרים - חקלאות ועיר, המקבלים שני סוגי מים - שפירים וקולחים. המודל ההידרולוגי מקבל נתוני קלט הידרולוגיים ותכנוניים, ומאפשר להפיק עבור כל אחד מהתאים לאורך תקור־פה מוגדרת מראש פלט הכולל מאזני מים ומסות כלוריד וכן תחזיות של מפלסים וריכוזי כלוריד בא־זור הרווי.

באמצעות המודל ההידרולוגי חושבו כמויות המים האפשריים לשאיבה בכל תא הידרולוגי כאשר בכל תא אספקת המים הייתה בהתאם לביקוש. חושבו מקורות המים לכל תא, כאשר ניתנה עדיפות ראשו־נה לאספקת מים ממקורות מקומיים, כלומר, שאי־בה מקידוחים בתחום התא אשר מתבצעת במסגרת כושר השאיבה מהם, ובכפוף לשאיבה השנתית הכו־ללת מהאקוויפר באזור. נפח המים החסר להשלמת הביקוש מסופק על ידי חברת "מקורות", וצרכני המים בתאי החוף יקבלו את מימיהם רק מחברת "מקורות". יש עדיפות בקידוחים לחקלאות, וההשקיה בקולחים תימשך בהתאם להיקפם כיום.

בהתאם לשיקולי מדיניות נבחרה "רמת סף" מוכת־בת למליחות אשר התייחסה למים המסופקים לעיר או לעיר ולחקלאות או עבור מי תהום במצב יציב. רצינו לבחון את ההשלכות של בחירת רמות סף שונות על רמת מליחות המים באקוויפר לאורך זמן ועל ההוצאות לאספקת מים לאזור. לשם כך בחנו תסריטים שונים אשר הגדירו את רמות הסף בתחום שבין 50 עד 250 מ"ג כלורידים לליטר (מגכ"ל).

באמצעות המודל ההידרולוגי המבוסס על סימולציה חושבה מליחות מי התהום במהלך מאה שנים. מש־וואות המודל ההידרולוגי מתוארות בנספח.

השווינו את התסריטים השונים גם עבור מצב יציב, כאשר במצב יציב המפלס וריכוזי הכלוריד בכל תא אינם משתנים עם הזמן. המצב היציב של מפלסים מופק מפתרון מערכת משוואות המאזן השנתי של נפח המים בתאים, כאשר סך נפח המים הנכנס

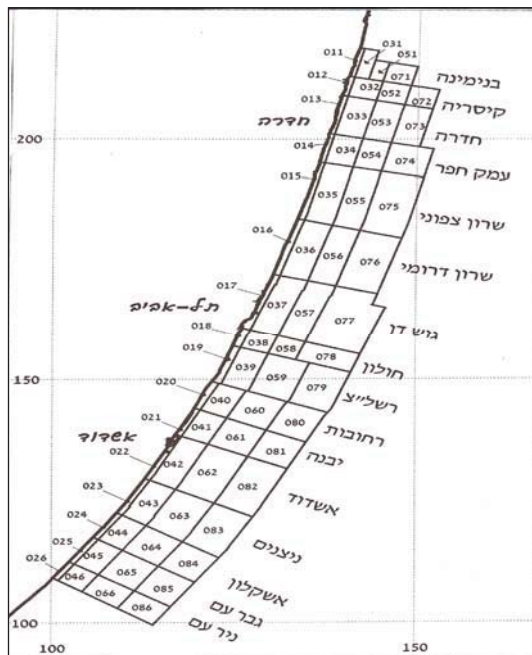
שימש לתכנון מקורות המים ולחיזוי רמת המפלסים וריכוזי הכלוריד באקוויפר. המודל ההידרולוגי מייצג את אקוויפר החוף באזורים עמק חפר ושרון צפוני בצורת מערכת בת שמונה תאים מלבניים, אשר חופפים את תאי הדיווח המקובלים בשרות ההידרו־לוגי. כל תא הוא דמוי תיבה ישרה המשתרעת מפני הקרקע עד בסיס האקוויפר וכוללת שתי שכבות: שכבה עליונה - המייצגת את האזור הבלתי רווי ומשתרעת מפני הקרקע עד פני מי התהום, ושכבה תחתונה - המייצגת את האזור הרווי (מי התהום) ומשתרעת מפני מי התהום עד בסיס האקוויפר.

המודל ההידרולוגי מתבסס על ההנחות הבאות:

- התכונות ההידראוליות של כל שכבה אחידות ואינן משתנות בזמן, אך יכולות להשתנות מתא לתא.
- האזור הבלתי רווי של תא הוא אזור מעבר של מים עם כלוריד מומס, אשר מחלחלים ממקו־רות שעל פני השטח ונעים בתנועה אנכית כלפי מטה אל האזור הרווי.
- מקורות המים החודרים לאזור הבלתי רווי מפני השטח הם: מי גשם, מים שפירים וקולחים המשמשים להשקיה וכן דלף ממקורות שונים.
- רק חלק מכל כמות מים שחדרה לאזור הבלתי רווי מגיעה למי התהום, בעוד שמסת הכלוריד המוסעת עם המים מגיעה לאזור הרווי במלו־אה.
- הכלוריד מוסע עם המים במהירותם הממוצעת ללא פיזור.
- אין מקורות או בורות של מים או כלוריד מומס באזור הבלתי רווי.
- שטף מסת הכלוריד מן האזור הבלתי רווי אל האזור הרווי של תא מאופיין על ידי שתי תקו־פות עוקבות: תקופה א' המתחילה עם הפעלת תסריט של שטף מים וכלוריד מומס אל האזור הבלתי רווי ותקופה ב' המתחילה עם הגעת החזית הראשונה של מי התסריט אל האזור הרווי.
- בנוסף לשטף המגיע מן האזור הבלתי רווי תי־תכן גם כניסה של מים וכלוריד מומס אל הא־זור הרווי של תא גם מתאים שכנים ומקידוחי החדרה.
- מסת הכלוריד באזור הרווי של תא מרוכזת בחלק ממנו הקרוי אזור המיהול, אשר משתרע

- תאי השרון הצפוני. אזור זה כולל שמונה תאים הידרולוגיים של עמק חפר (תא 14: חוף, 34: אוגר מערבי, 54: אוגר מזרחי ו-74: מזרח) ושרון צפוני (תא 15: חוף, 35: אוגר מערבי, 55: אוגר מזרחי ו-75: מזרח) (איור 2).

אקוויפר החוף חולק לצורך הדיווח ל-16 אזורים מצפון לדרום (מבנימינה ועד ניר-עם) ובכל אחד מהם ארבעה תאי דיווח ממערב למזרח: תאי חוף הסמוכים לחוף, תאי אוגר מערבי ותאי אוגר מזרחי שבהם מרוכזת מרבית השאיבה, ותאי מזרח (השי-רות ההידרולוגי, 2003). קווי המתאר של התאים הם קווים ישרים שמחלקים את השטח של שפלת החוף לתאים מרובעים לאורך ולרוחב, ללא התחשבות בחלוקת השטח לפי קווי מתאר או גבולות אדמי-ניסטרטיביים או גיאוגרפיים של היישובים. איסוף המידע לפי תאים הידרולוגיים נתקל בקשיים רבים, משום שהמידע הדרוש עבור הרכב שטחים ושימושי מים איננו קיים לגבי כל תא הידרולוגי בנפרד. (מערכת המיפוי נבנתה בעזרתו של רפי וייס ממשד החקלאות).



איור 2: תאי האזור הנבחר

אנו ייצרנו עבור התאים ההידרולוגיים מערכת מידע ייחודית באמצעות מערכת של מפות הכוללות: שטח פיזי של יישובים, שטחי המטעים ושטח בנוי (תרשי-מים 3, 4, 5, בהתאמה). את השטח של שאר הגי-

(מאזור בלתי רווי ומתאים שכנים) שווה לסך נפח המים היוצא בשאיבה. הריכוז היציב של כלוריד במי התהום של כל תא, מופק מפתרון מערכת משוואות המאזן השנתי של מסת הכלוריד בתאים, כלומר, הכפלת רכיבי מאזן המים במצב יציב בריכוזים המבוקשים, כאשר סך מסת הכלוריד הנכנסת שווה לסך מסת הכלוריד היוצאת בשאיבה.

ג. רכיב טכנולוגי

חושבו עלויות של התפלת מים עבור כל אחד ממקור-רות המים השונים בהתבסס על נתונים הנדסיים וטכנולוגיים. נבחנו חלופות התפלה שונות שנבחרו על מנת להעריך חלופות רלבנטיות ועלויות ממוצ-עות. חלופות ההתפלה בשיטת אוסמוזה הפוכה כול-לות התפלה של מים מליחים, מי מערכת, מי קולחים (בתוספת טיפולי קדם הכוללים סינון שלישוני וטי-פול קדם ממברנלי) ומי-ים (תוך כדי שילובם עם מערכת המים הארצית), שנועדו לשמש כתוספת מים עיקרית.

עלויות ההתפלה מושפעות מפרמטרים שונים כגון, גודל המתקן, איכות מי הזנה ומיקום מתקן ההתפלה וכן מנתוני תכנון הכוללים: החזרי השקעה, מרכיבי הוצאות, זמינות תפעול המתקן, מחירי אנרגיה, ממ-ברנות, כימיקלים, כוח אדם, תחזוקה ותקורה. נתוני הקלט כוללים: כמות מים, איכות מי גלם, איכות מוצר, ספיקה, עומק קידוחים, מרחק צנרת, גובה ממתקן ההתפלה ונפח איגום.

ד. רכיב כלכלי

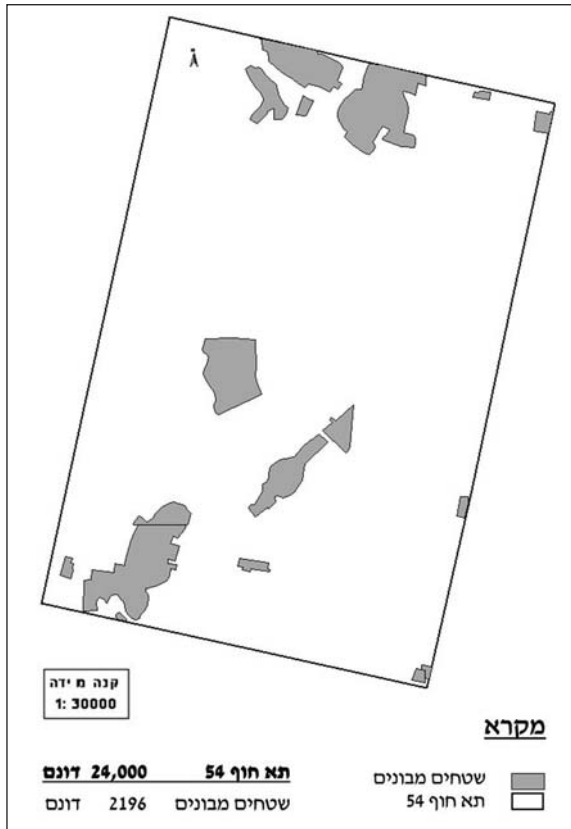
חושבה כמות המים שיש להתפיל ונאמדו סך הע-לויות של אספקת המים לאזור עבור התפלת כל אחד ממקורות המים השונים. כאשר מליחותם של המים המסופקים עולה על "רמת הסף", מתחילים בתהליכי התפלה של מקורות המים השונים. את המים המותפלים מוהלים עם מקורות המים הנר-ספים כדי לשמור על רמת הסף, בהתאם חושבה כמות המים המותפלים הדרושה. הכפלה בעלויות ההתפלה הביאה לחישוב עלות ההתפלה ובהתאם, סך עלות של אספקת המים לאזור עבור כל חלופה של התפלה.

רכיב טכנוני - תנאי האזור

האזור שנבחר לבחינה מפורטת מייצג אזור המושקה בקולחים - תאי עמק חפר - ואזור הכולל את העיר נתניה, אשר שפכיה מהווים מקור למרבית הקולחים

בין חלוקה למועצות מוניציפאליות לבין תאים הי-דרולוגיים. השטח העירוני בעמק חפר נאמד ב-1.1 אלף דונם ובשרון הצפוני - 78.7 אלף דונם, כולל העיר נתניה.

דולים חישבנו כיתה. בהתאם חישבנו את שימושי המים השונים. נדגים את המיפוי עבור תא הידרולוגי 54 כפי שמוצג באיורים 3 עד 5.

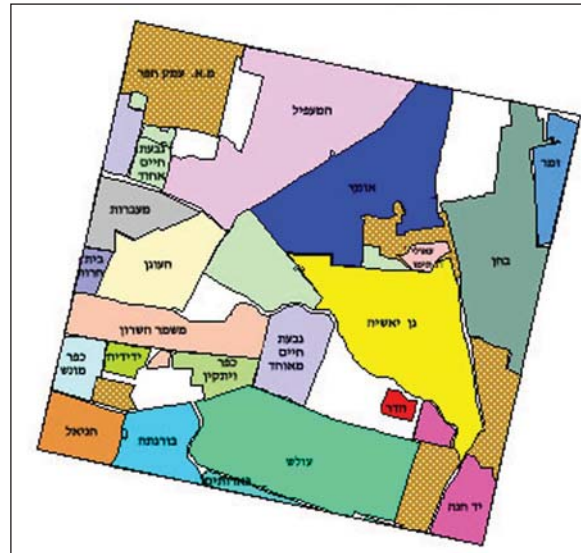


איור 5: שטחים מבונוים - תא 54

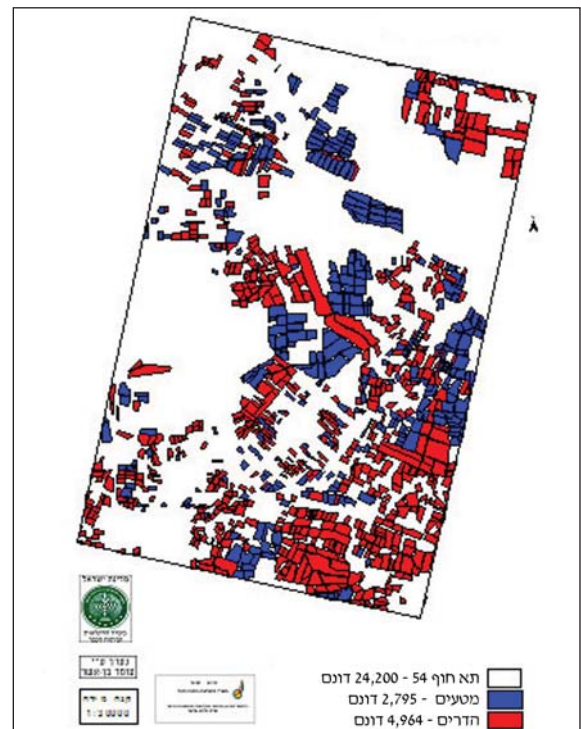
לוח 1: חישוב שטחים (אלפי דונם)

שטח	עמק חפר	שרון צפוני
סך חקלאי	82.4	82.8
בנוי	10.2	11.4
הדרים	12.1	28.9
מטעים	6.9	10.5
גידולי שדה (יתרה)	53.0	31.9
סך עירוני	1.1	78.7
כולל	83.5	161.6

עבור כל אחד מהתאים ההידרולוגיים אמדנו את שימושי המים השונים: בחקלאות על פי נורמות עבור שטחי הגידולים ובעיר על פי נורמות עבור מספר התושבים (לוח 2). השימוש במי קולחין היה נתון בעמק חפר- סך השימושים עמד על 24.6 מלמ"ק מזה, 22.0 מלמ"ק להשקיה (90% כולל קולחים) (12.4 מלמ"ק), ובשרון הצפוני - סך שימושים עמד על 59.4 מלמ"ק מזה 34.7 מלמ"ק להשקיה (58% כולל קולחים) (3.4 מלמ"ק).



איור 3: שטח פיזי של יישובים - תא 45



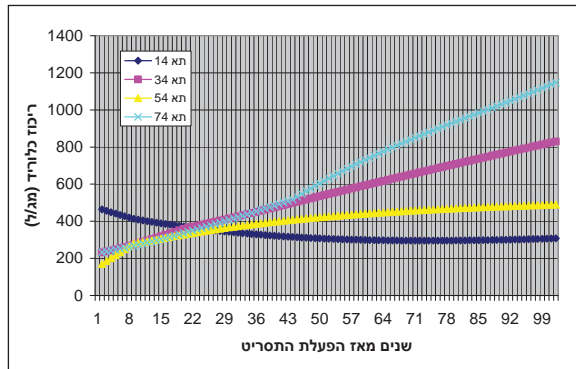
איור 4: שטחי מטעים והדרים - תא 45

סך השטח החקלאי (לוח 1) בעמק חפר - 82.4 אלף דונם, מזה מטעים והדרים 23%, ובשרון הצפוני- 82.8 אלף דונם, מזה מטעים והדרים 47%. קשה למפות את שאר ענפי החקלאות בשל חוסר התאמה

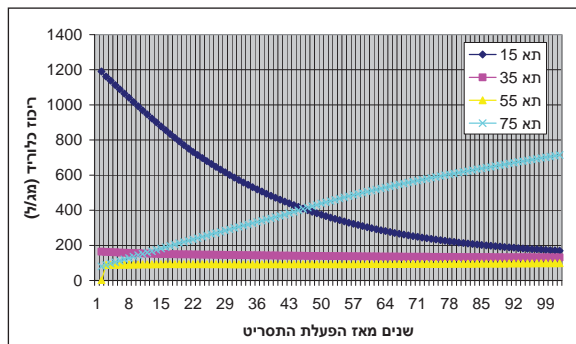
במהלך תקופה של 100 שנים. ניתן לראות את על-יית המליחות לאורך זמן בכל התאים ההידרולוגיים, למעט תאי החוף ה-14 ו-15 שבהם אין שאיבה. המליחות בשנה ה-100 מגיעה באזור עמק חפר ל-846, 497 ו-1,192 מג"ל עבור התאים 34, 54 ו-74 בהתאמה, ובאזור שרון צפוני - 132, 100 ו-739 מג"ל עבור התאים 35, 55 ו-75 בהתאמה.

לוח 2: שימושי מים מחושבים (מלמ"ק)

סה"כ	שרון צפוני	עמק חפר	
27.3	24.7	2.6	ביקוש עיר
40.9	31.3	9.6	ביקוש חקלאות שפירים
68.2	56.0	12.2	סך ביקוש שפירים
15.8	3.4	12.4	קולחים
56.7	34.7	22.0	סך השקיה
84.0	4.95	6.42	כולל



איור 6: תחזית ריכוז כלורידים בתאי עמק חפר



איור 7: תחזית ריכוז כלורידים בתאי שרון צפוני

נדגים את התפתחות המליחות לאורך זמן בהשוואה בין תסריטים שונים עבור תא 54 באמצעות איור 8. באיור זה ניתן לראות כי ככל שרמת הסף מחמירה יותר בתסריטים 1-4, רמת המליחות על פני זמן נמוכה יותר.

נשווה את השפעת התסריטים השונים על המליחות באקוויפר בשנה ה-100 לאחר תחילת הסימולציה (לוח 4).

בלוח 4 ניתן לראות את ירידת המליחות בשנה ה-100 עם התקדמות התסריט החל מתסריט 1 עם רמת סף של 250 מל"ל לעיר בלבד, דרך תסריט 2 בו נוספה רמת סף 250 גם לחקלאות, המשך בתסריט 3 עם הפחתת רמות הסף ל-150, ועד לתסריט 4 בו הופחתו רמות הסף ל-50. החמרת רמת הסף

הרכיב התכנוני המתואר לעיל, אשר כלל הקצאת שטחים ושימושי מים בתאים ההידרולוגיים הרל-בנטיים, היווה קלט לרכיב ההידרולוגי - אשר חזה את המפלסים והמליחות לאורך זמן, ולרכיב הטכנולוגי - אשר בחן את טכנולוגיות ההתפלה הרל-בנטיות ואת העלויות הכרוכות בהם. תוצאות הרכיב ההידרולוגי והרכיב הטכנולוגי היוו קלט לרכיב הכלכלי - אשר העריך והשווה את היקף ההתפלה והעלויות הנובעות עבור התסריטים השונים.

ממצאי המודל

הרכיב ההידרולוגי

הרכיב ההידרולוגי התבסס על ממצאי הרכיב התכנוני וני שתואר לעיל. רמות המליחות נחזו לאורך זמן עבור תסריטים שונים שנבדלים זה מזה במליחות סף מוכתבת לעיר ולחקלאות. התסריט הבסיסי - תסריט 1 - מתאר מצב בו נקבעת רמת סף של 250 מג"ל לעיר בלבד. בתסריטים 2, 3 ו-4 מתווספות רמות סף לא רק לעיר אלא גם לחקלאות ברמות של 250, 150 ו-50 מג"ל, בהתאמה. תסריט 6 מתאר השקיה ללא קולחים ותסריט 7 מתאר השקיה עם קולחים ברמת מליחות גבוהה, לשם השוואה. לוח 3 מתאר את התסריטים השונים.

לוח 3: תיאור תסריטים

תסריט	מליחות סף עיר (מג"ל)	מליחות סף חקלאות (מג"ל)	קולחים
1	250	-	+
2	250	250	+
3	150	150	+
4	50	50	+
6	250	-	-
7	250	-	+ מליחות גבוהה

עבור התסריטים השונים חזינו את מליחות מי התהום לאורך זמן בשנה ה-100 באמצעות הרצות המודל (לוח 6).

איורים 6-7 מציגים את תחזית המליחות לאורך זמן

לוח 4: השוואה בין תסריטים - ריכוז כלוריד במי תהום בשנה ה-100 (מגכ"ל)

תא	1	2	3	4	6	7
	רמת סף לעיר	רמת סף גם לחקלאות	רמת סף בינונית	רמת סף נמוכה	ללא קולחים	קולחים במליחות גבוהה
	250 מגכ"ל	250 מגכ"ל	150 מגכ"ל	50 מגכ"ל		
14	310	189	210	137	232	370
34	846	459	364	182	741	1016
54	497	358	243	110	418	644
74	1192	841	690	364	1639	1485
עמק חפר	716	453	357	182	716	907
15	180	115	159	122	161	192
35	132	150	116	75	133	143
55	100	102	94	66	91	112
75	739	654	438	222	693	760
שרון צפוני	158	159	130	84	157	174

בעמק חפר ו-318 מגכ"ל בשרון צפוני. בתסריט 2 עם רמת סף של 250 מגכ"ל לעיר ולחקלאות, המליחות באקוויפר במצב יציב היא 553 מגכ"ל בעמק חפר ו-265 מגכ"ל בשרון הצפוני.

בלוח 6 מוצג חישוב של ריכוז הכלוריד הנדרש במי השקיה על מנת לשמור על רמת סף באקוויפר של 250 מגכ"ל אשר שווה ל-92 מגכ"ל בעמק חפר ולוח 16.

לוח 6: ריכוז כלוריד במי השקיה (מגכ"ל) עבור רמת סף באקוויפר במצב יציב של 250 מגכ"ל

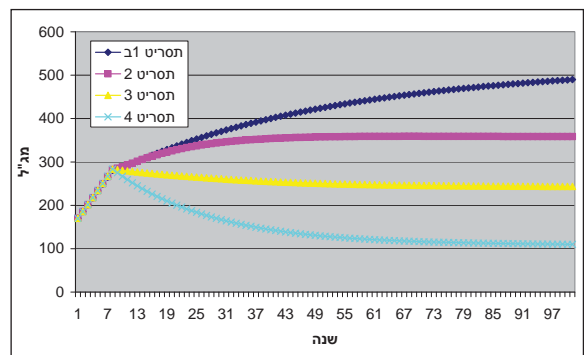
תסריט/תא	1	2	3	4
תא	רמת סף עיר	רמת סף חקלאות	רמת סף חקלאות	רמת סף חקלאות
	250 מגכ"ל	250 מגכ"ל	150 מגכ"ל	50 מגכ"ל
14	379	381	273	52
34	75	76	84	50
54	139	145	151	50
74	28	28	28	34
עמק חפר	88	92	91	45
15	1492	1522	918	314
35	283	327	195	63
55	411	333	189	53
75	72	72	72	54
שרון צפוני	243	233	142	57

בשלב זה ראינו את המשמעות של החמרת או הקלת רמת הסף על מצב האקוויפרים. בהמשך נדגים את ההשלכות על העלות הכלכלית.

הרכיב הטכנולוגי

עלויות ההתפלה הממוצעות בהתייחס לתנאים הנתונים חלתיים מייצגים מופיעות בלוח 7. על סמך החלופות שהותאמו לאזור עמק חפר רואים כי עלות ההתפלה למים מליחים היא 36 סנט למ"ק, עלות התפלת מי מוביל 29.4 סנט למ"ק (בתלות בגודל המתקן). עלות התפלת קולחים 41.6 סנט למ"ק ועלות התפלת מי ים 54.2 סנט למ"ק (מתקן של 50 מלמ"ק).

המותרת מיטיבה עם מי התהום בשנה ה-100, למשל בתא 54, החל מ-497 מגכ"ל עבור רמת סף לעיר בלבד של 250 מגכ"ל ועד ל-110 מגכ"ל עם רמת סף לעיר ולחקלאות של 50 מגכ"ל. השווינו גם את תסריט 6 ללא השקיה בקולחים עם תסריט 7 עם השקיה בקולחים שמליחותם גבוהה. השקיה ללא קולחים מורידה את המליחות בשנה ה-100 בעמק חפר ב-191 מגכ"ל. ריכוז הכלוריד חושב גם במצב יציב עבורו רמת המפלס וריכוז הכלוריד בכל תא אינם משתנים עם הזמן (לוח 5).



איור 8: התפתחות מליחות תא 54, תסריטים שונים

לוח 5: ריכוז כלוריד בשנה 100 ובמצב יציב (מגכ"ל)

תסריט/תא	תסריט 1		תסריט 2	
תא	שנה 100	מצב יציב	שנה 100	מצב יציב
14	310	704	189	329
34	846	1358	459	514
54	497	548	358	380
74	1192	2884	841	977
עמק חפר	716	1358	453	553
15	180	176	115	174
35	132	200	150	197
55	100	244	102	204
75	739	1184	654	670
שרון צפוני	158	318	159	265

בתסריט 1 עם רמת סף של 250 מגכ"ל לעיר בלבד, המליחות באקוויפר במצב יציב היא 1,358 מגכ"ל

עבור מי המוביל, לאחר מכן - מי תהום, מי קולחים ומי ים. יש לציין כי התפלת מי ים מיועדת בעיקר כדי להגדיל את מקורות המים הכוללים, ולכן עלות התפלתם לשיפור איכות המים, היא העלות הנוספת בלבד.

בהשוואה בין תסריטים, ניתן לראות כי שיפור רמת הסף מ-250 מגכ"ל לעיר בלבד ל-250 מגכ"ל גם לחקלאות, כרוך בגידול העלות המהוונת של אספקת מים לאזור עמק חפר ב-23.49 מליון ₪. החמרת רמת הסף ל-150 מגכ"ל כרוכה בתוספת עלות של 78.07 מליון ₪, ורמת סף מחמירה של 50 מגכ"ל לליטר תבטא בתוספת גבוהה יחסית של 394.45 מליון ₪.

מלוח 9 ניתן לראות כי בתסריט 1 העלות השנתית נעה מ-19.93 מליון ₪ להתפלת מי תהום ועד 21.04 מליון ₪ להתפלת מי ים. בתסריט 2 העלות השנתית נעה החל מ-22.17 מליון ₪ להתפלת מי תהום, 35.83 מליון ₪ להתפלת קולחים ועד 62.07 מליון ₪ להתפלת מי ים. בתסריט 3 העלות השנתית נעה מ-30.20 מליון ₪ להתפלת מי תהום, 41.58 מליון ₪ להתפלת קולחים ו-68.10 מליון ₪ להתפלת מי ים. בתסריט 4 העלות השנתית נעה מ-42.52 מליון ₪ להתפלת מי תהום, 47.33 מליון ₪ להתפלת קולחים ו-75.30 מליון ₪ להתפלת מי ים. בכל התסריטים העלות הנמוכה ביותר מתקבלת להתפלת מי מוביל, לאחר מכן- מי תהום, מי קולחים ומי ים.

בהשוואה בין תסריטים, ניתן לראות כי שיפור רמת הסף מ-250 מגכ"ל לעיר בלבד ל-250 מגכ"ל גם לחקלאות, כרוך בגידול העלות השנתית של אספקת מים לאזור עמק חפר ב-2.24 מליון ₪. החמרת רמת הסף ל-150 מגכ"ל כרוכה בתוספת עלות שנתית נוספת של 10.27 מליון ₪, ורמת סף מחמירה של

לוח 7: עלויות התפלה ממוצעות (סנט למ"ק)

מליחים	מערכת	קולחים	מי-ים
13.0	14.6	3.3	32.5
23.0	14.8	38.3	21.7
36.0	29.4	41.6	54.2

הרכיב הכלכלי

בשלב זה אמדנו את סך עלויות אספקת המים לאזור עמק חפר (תאים הידרולוגיים 14, 34, 54 ו-74) עבור התסריטים השונים. מהרכיב התכנוני קיבלנו כקלט את מקורות המים, מהרכיב ההידרולוגי לקחנו את תחזית ריכוז הכלוריד לאורך זמן, ומהרכיב הטכנו-לוגי - את עלויות ההתפלה הממוצעות עבור חלופות ההתפלה השונות (מי תהום, מי מוביל, קולחים ומי-ים). נציג כעת עבור אזור עמק חפר את העלויות המהוונות בלוח 8 ואת העלויות השנתיות במצב יציב בלוח 9, כפי שחושבו עבור התסריטים השונים.

מלוח 8 ניתן לראות כי בתסריט 1 (רמת סף לעיר בלבד 250 מגכ"ל ללא התפלת קולחים) עלות אספקת המים המהוונת נעה מ-380.75 מליון ₪ להתפלת מי תהום ועד 385.76 מליון ₪ להתפלת מי ים. בתסריט 2 (רמות סף לעיר ולחקלאות 250 מגכ"ל) העלות המהוונת נעה החל מ-404.31 מליון ₪ להתפלת מי תהום, 710.74 מליון ₪ להתפלת קולחים ועד 828.35 מליון ₪ להתפלת מי ים. בתסריט 3 (רמות סף 150 מגכ"ל עיר ולחקלאות) העלות המהוונת נעה מ-482.31 מליון ₪ עבור מי תהום, 866.85 מליון ₪ להתפלת קולחים ו-1413.95 מליון ₪ להתפלת מי ים. בתסריט 4 (רמות סף לעיר ולחקלאות 50 מגכ"ל) העלות המהוונת נעה מ-876.76 מליון ₪ לתסריט התפלת מי תהום, 986.78 מליון ₪ להתפלת קולחים ו-1569.86 מליון ₪ להתפלת מי ים. בכל התסריטים העלות הנמוכה ביותר להתפלה התקבלה

לוח 8: עלות מהוונת מחושבת ל-100 שנים (מיליוני ₪)

תסריט התפלה של מליחים	1	2	3	4	6
רמת סף עיר	380.75	404.24	482.31	876.76	518.29
רמת סף עיר	-	23.49	78.07	394.45	-
קולחים	-	710.74	866.85	986.78	-
מי ים	385.76	828.35	1413.95	1569.86	529.42

לוח 9: עלות שנתית מחושבת במצב יציב (מיליוני ₪)

תסריט התפלה של מליחים	1	2	3	4	6
רמת סף עיר	19.93	22.17	30.20	42.52	28.37
גידול עלויות	-	2.24	10.27	22.59	-
קולחים	-	35.83	41.58	47.33	-
מי ים	21.04	62.07	68.10	75.30	46.48
שמירה על רמת סף לאקויפר	39.60	39.29	44.25	53.14	42.60
תוספת עלויות	19.67	17.12	14.05	10.62	14.23

סיכום ומסקנות

עבור בסיס נתונים ייחודי לתאים ההידרולוגיים בא-זורי עמק חפר והשרון הצפוני, פותח והורץ מודל הידרולוגי לתכנון מקורות המים ולחיזוי ריכוזי הכלוריד באקוויפר. כמו כן, נאמדו עלויות עבור תהליכי התפלה שונים בתנאי האזור וחושבו עלויות אספקת מים לאזור עבור תסריטים שונים.

מחישוב העלויות הדרושות לשיפור רמות הסף לאספקת מים לעיר ו/או לחקלאות או לשמירת האקוויפר במצב יציב נמצאו הממצאים הבאים: התפלת מים מליחים נמצאה כזולה ביותר, התפלת מי מוביל אפקטיבית כאשר השימוש גדול, התפלת קולחים משמעותית עבור רמת סף בחקלאות ולבסוף התפלת מי-ים כדאית כאשר תרומתם חשובה למאזן המים הארצי. אם ברצוננו לשמור על רמת סף של 250 מג"ל באקוויפר יש להשקות בעמק חפר במים בריכוז של כ-90 מג"ל. ההוצאה השנתית הנוספת לשימור האקוויפר תהיה 20-10 מיליון ₪ או 0.43-0.80 ₪ למ"ק. חשוב לזכור כי לשיפור איכות מי האספקה ואיכות האקוויפר יש מחיר כלכלי אשר יש להתחשב בו בקבלת החלטות.

המודל שפיתחנו ויישמו משמש לבחינת היבטים תכנוניים, הידרולוגיים, טכנולוגיים, וכלכליים של אספקה והתפלה של מקורות המים השונים ולאומדן ההשלכות על הכלכלה, על איכות האקוויפר ועל הסביבה. יתרונותיו של המודל במולטי-דיסציפלינריות וביישומיות שלו, וביכולתו להעריך ולכוון תסריטים של אספקה וטיפול במקורות המים השונים. בשלב זה התייחסנו למרכיב המליחות אולם ניתן להרחיב את המודל לטיפול במרכיבים נוספים כגון חנקן ולפתחו כמודל ממוחשב שישפר את היכולת לקבל החלטות מושכלות.

50 מג"ל לליטר תתבטא בתוספת שנתית גבוהה יחסית של 22.59 מליון ₪. כמו כן, שמירה על רמת סף לאקוויפר של 250 מג"ל כרוכה בעלות שנתית של 39.60 עד 53.14 מיליון ₪.

מכאן, בהשוואה לרמת סף של 250 מג"ל לעיר בלבד, גידול העלויות המהוון עבור רמת סף של 150 מג"ל לעיר ולחקלאות הוא 110.56 מליון ₪, ועבור רמת סף של 50 מג"ל העלות היא 505.01 מליון ₪ (לוח 8). גידול עלות שנתית במצב יציב עבור רמת סף של 150 מג"ל לעיר ולחקלאות הוא 12.51 מליון ₪, ועבור רמת סף של 50 מג"ל - 35.10 מליון ₪. סה"כ מדובר בכמות מים של 24.6 מלמ"ק, כלומר, גידול עלויות שנתיות לעיר ולחקלאות ל-150 מג"ל ו-50 מג"ל הוא 0.50 ו-1.42 ₪ למ"ק, בהתאמה. יש לשים לב לעלות הגבוהה יחסית של החמרת רמת הסף ל-50 מג"ל.

שמירה על רמת סף לאקוויפר של 250 מג"ל כרוכה בתוספת עלות שנתית של 10.62 עד 19.67 מיליון ₪, בהשוואה לעלות הנמוכה ביותר עבור אותו תסריט ללא שמירה על רמת סף באקוויפר. כלומר, גידול עלויות שנתיות לעיר ולחקלאות על קיימות האקוויפר ברמת מליחות במצב יציב של 250 מג"ל הוא 0.43-0.80 ₪ למ"ק.

משק המים נמצא היום בתנאים של מחסור במים ובשלב של תכנון והקמת מפעלי התפלה של מי ים. החקלאות עוברת לשימוש רב במי קולחים. השימוש במי קולחים מביא לחיסכון ניכר במים שפירים להשקיה ומשמש פתרון לסילוקם של השפכים. עם זאת, נוצר צורך לטפל במליחותם של הקולחים. השימוש בקולחים ומי הים המותפלים מביאים לפתרון חלקי של בעיית כמויות המים, אולם לא ניתן להתעלם מהנושא של ההרעה באיכותם של מי התהום כפי שמתבטאת בעליית המליחות. הראי-נו חלופות להתפלת מים מתוך מטרה לשפר את איכותם. מצאנו כי תהינה עלויות נמוכות יחסית להתפלת מי תהום ומי קולחים, עם צורך להתגבר על בעיות טכנולוגיות ואדמיניסטרטיביות שונות. נושא איכות המים המסופקים וקיימות האקוויפר חשובים בטווח הקצר והארוך. הראינו את תוספת העלויות הכרוכה בהחמרת תקני המליחות שתביא לשמירה על קיימות האקוויפר. לצורך קבלת החלטות יש לשקול עלויות אלו כנגד תוספת התועלות.

רשימת ספרות

- השירות ההידרולוגי (2003). התפתחות ניצול ומצב מקורות המים עד סתיו 2002, מדינת ישראל, משרד התשתיות הלאומיות- נציבות המים, השירות ההידרולוגי, ירושלים.
- חרובי, נ., בכמט, י., פרימון, ד., צפתי, א., הרוסי, ק. (2006). השקיה בקוחלים בשילוב תהליכי התפלה- שיקולים תכנוניים, כלכליים, הידרולוגיים וטכנולוגיים, דו"ח מחקר סופי, מוגש לרשות המים.
- חרובי, נ., ירון, ד., בכמט, י., וולך, ר., ספקטור, ר. (2001). גישה להערכה כלכלית של נזקי האצת המלחה של אקויריום כתוצאה מהשקיה בקולחין, מים והשקיה 418: 16-21.
- ירון, ד., בכמט, י., וולך, ר., מאירס, ס., חרובי, נ. (1999). לא "עידן קולחין ואחריו עידן התפלה" אלא, קולחין והתפלה במשולב, מים והשקיה 393: 5-13.
- ירון, ד., חרובי, נ., מישאלי, ד. (2000). שיקולים כלכליים בשימוש בקולחין להשקיה מים והשקיה 400: 19-23.
- Feinerman, E. (2001). Economics aspects of salinity management, Appendix in Hillel, D. (Ed.), *Salinity Management for Sustainable Irrigation; Integrating Science, Environment, and Economics*: 63-87, The World Bank: Washington D.C.
- Haruvy, N., Bachmat, Y., Shalhevet, S. & Yaron, D. (2000). Effect of urban development on water quality- environmental concerns, *Proceedings, The 40th Congress of the European Regional Science Association Regional Science Association*, Barcelona, Spain
- Haruvy, N., Shalhevet, S. & Ravina, I. (2004). Irrigation with treated wastewater in Israel- financial and managerial analysis, *Journal of Financial Management and Analysis* 16 (2): 93-102
- Haruvy, N. (2004). Irrigation with treated wastewater in Israel- assessment of environmental aspects, in Linkov, I. & Ramadan, A. (eds.), *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making*: 375-384, Kluwer
- Haruvy, N. (2006), Reuse of wastewater in agriculture- economic assessment of treatment and supply alternatives as affecting aquifer pollution, in Morel, B. & Linkov, I (eds), *Environmental Security and Environmental Management: The Role of Risk Assessment*: 257-263, Springer
- Haruvy, N. & Shalhevet, S. (2005). Land use and water management in Israel- Economic and Environmental analysis of sustainable reuse of wastewater in agriculture, *Proceedings, The 45th Congress of the European Regional Science Association*, Vrije Universiteit Amsterdam, the Netherlands
- Haruvy, N. & Shalhevet, S. (2006), Wastewater modeling to reduce disaster risk from groundwater contamination, *Proceedings, International Disaster Reduction Conference*, Davos, Switzerland
- Yaron, D. (1981), The Salinity problem in irrigation - an Introductory review (1981), in Yaron, D. (ed.), *Salinity in Irrigation and Water Resources*: 1-20, Marcel

נספח: משוואות המודל ההידרולוגי

חישוב מאזן שנתי של אוגר מי התהום בתא המודל ההידרולוגי

$$delUi = Qunsat + (Qn + Qs + Qe + Qw)i - Pump \quad (1)$$

כאשר:
i מספר סידורי של שנת המאזן החל מהרצת תסריט

כמויות במלמ"ק:
delUi תוספת האוגר של מי התהום בתא בשנה i
Qunsat נפח שנתי נכנס לתא המאזן מהאזור הבלתי רווי (קבוע לאורך תקופת ההרצה של תסריט מסויים)
Qni נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו הצפוני בשנה i
Qsi נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו הדרומי בשנה i
Qwi נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו המערבי בשנה i
Qei נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו המזרחי בשנה i
Pump נפח שאיבה שנתי מתא המאזן (קבוע לאורך תקופת ההרצה של תסריט מסויים).

חישוב הרכיבים:
delUi תוספת האוגר של מי התהום בתא בשנה I מורכב מ:

$$delUi = S * A * (Hi+1 - Hi) \quad (2)$$

כאשר:
S אגירות האזור הרווי בתא המאזן
A שטח אופקי של תא המאזן (קמ"ר)
Hi מפלס מי התהום בתא המאזן בתחילת שנת המאזן
Hi+1 מפלס מי התהום בתא המאזן בסוף שנת המאזן
Qunsat נפח שנתי נכנס לתא המאזן מהאזור הבלתי רווי מורכב מ:

$$Qunsat = Alfa * A * Rain + Beta * (Pumpir + Importir + Effluent) + Gama * Urb \quad (3)$$

כאשר:
Alfa מקדם מילוי מגשם
A שטח התא (קמ"ר)
Rain עובי גשם שנתי (מ')
Beta מקדם זרימה חוזרת מצריכה חקלאית בתחום שטח התא (הונק קבוע עבור כל מקורות האספקה בגרסה הנוכחית של המודל)
Pumpir נפח שנתי של מים שאובים מהתא שנצרכו להשקיה בתחום שטח התא (מלמ"ק)
Importir נפח שנתי של מים מיובאים מהמערכת הארצית שסופקו להשקיה בתחום שטח התא (מלמ"ק)
Effluent נפח שנתי של קולחין שסופקו להשקיה בתחום שטח התא (מלמ"ק)
Gama מקדם דליפה מצריכת מים עירונית
Urb נפח שנתי של מים מסופקים לגינון בשטח עירוני + נפח דלף שנתי מצנרת מים עירונית (מלמ"ק)
Qni נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו הצפוני בשנה i מורכב מ:

$$Qni = (TnLn/Dn) * (Hni - Hi) \quad (4)$$

כאשר:
Tn תולכה בגבול הצפוני של תא המאזן (מיליון מ"ר לשנה)
Ln אורך גבול צפוני של תא המאזן (ק"מ)
Dn מרחק בין מרכז התא השכן הצפוני לבין מרכז תא המאזן (ק"מ)
Hni מפלס מי התהום בתא השכן הצפוני בשנת המאזן (מ')

Hi מפלס מי התהום בתא המאזן בשנת המאזן (מ')
Qsi נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו הדרומי בשנה i מורכב מ:

$$Qsi = (TsLs/Ds) * (Hsi - Hi) \quad (5)$$

כאשר הצינן התחתי של כל סמל מתייחס לגבול הדרומי
Qwi נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו המערבי בשנה i מורכב מ:

$$Qwi = (TwLw/Dw) * (Hwi - Hi) \quad (6)$$

כאשר הצינן התחתי של כל סמל מתייחס לגבול המזרחי
Qei נפח נכנס לתא המאזן דרך גבולו המזרחי בשנה i מורכב מ:

$$Qei = (TeLe/De) * (Hei - Hi) \quad (7)$$

כאשר הצינן התחתי של כל סמל מתייחס לגבול המערבי
בגרסה הנוכחית של המודל הונק כי
עבור התאים 14, 34, 54, 74 : Qn=0
עבור התאים 15, 35, 55, 75 : Qs=0
עבור התאים 14, 15 : Hw=0
עבור התאים 74, 75 : He=0

חישוב מאזן שנתי של מסת הכלוריד בתא המודל ההידרולוגי

$$A * Bi * n [C(i+1) - C(i)] = (Qunsat * Cunsat(i) + \sum Qin(i) * Cin(i)) - (Qunsat + \sum Qin(i)) * C(i) \quad (8)$$

כאשר:
A שטח אופקי של תא המאזן (קמ"ר)
Bi עובי אזור המיהול של התא בשנת המאזן
n = S נקבוביות אזור המיהול של התא
C(i) ריכוז הכלוריד באזור המיהול של התא בתחילת שנת המאזן
C(i+1) ריכוז הכלוריד באזור המיהול של התא בסוף שנת המאזן
Qunsat נפח שנתי נכנס לתא המאזן מהאזור הבלתי רווי
Cunsat(i) ריכוז הכלוריד במים המגיעים לאזור המיהול של התא מן האזור הבלתי רווי בשנת המאזן
 $\sum Qin(i) * Cin(i)$ סכום מסות הכלוריד הנכנסות אל אזור המיהול של התא מהתאים השכנים בשנת המאזן
 $\sum Qin(i)$ סכום נפחי המים הנכנסים אל אזור המיהול של התא מהתאים השכנים

חישוב הרכיבים עבור מאזן המסה

$$Bi = B + Hi \quad (9)$$

כאשר:
Bi עובי אזור המיהול של התא בשנת המאזן
B עומק בסיס אזור המיהול של התא מדוד מפני הים
Hi מפלס מי התהום בתא המאזן בשנת המאזן (מ')

חישוב Cunsat(i)

ריכוז הכלוריד במים המגיעים לאזור המיהול של התא מן האזור הבלתי רווי בשנת המאזן
מבחינים בין שתי תקופות, כאשר:
N תקופת המעבר
i מספר השנים
i < N תקופה א'
i > N תקופה ב'

$$Cunsat(i) = e1 + e2 \cdot C(i-n) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

כאשר: $C(i-n)$ הוא ריכוז הכלוריד במים שאובים מהתא בשנה $i-n$

נגדיר:
 $e1$ ריכוז המלח כתוצאה ממקורות עיליים
 $e2$ ריכוז המלח כתוצאה מהשקיה במים שאובים
 יהיו $e2, e1$ כדלקמן

$$e1 = (Rain \cdot A \cdot Crain + Importir \cdot Cimportir + Effluent \cdot Ceffluent + Urb \cdot Curb) / Qunsat \quad (15)$$

$$e2 = Pumpir / Qunsat \quad (16)$$

כאשר:
 $Crain$ ריכוז הכלוריד במי גשם
 $Cimportir$ ריכוז הכלוריד במי המערכת הארצית המסופקים להשקיה
 $Ceffluent$ ריכוז הכלוריד בקולחין המשמשים להשקיה
 $Curb$ ריכוז הכלוריד במים המסופקים לצריכה עירונית

מקרה ב: המים שאובים המשמשים להשקיה מותפלים לרמת ריכוז מוכתבת $Cpumpir$

$$Cunsat(i) = e1 + e2 \cdot Cpumpir \quad i > N \quad (17)$$

כאשר:
 מסת הכלוריד המגיעה מהאזור הבלתי רווי אל האזור הרווי בשנה i
 $Massunsat(i) = Cunsat(i) \cdot Qunsat(i)$

$$C(i+1) = C(i) + [(Qunsat \cdot Cunsat(i) + \sum(Qin(i) \cdot Cin(i)) - (Qunsat + \sum(Qin(i)) \cdot C(i)) / (A \cdot Bi \cdot n)] \quad (18)$$

$i = 1, 2, 3, \dots$

הגודל N נקבע על ידי הנוסחאות הבאות:

$$delZ = Qunsat / (A \cdot Theta) \quad (10)$$

$$N = L / delZ \quad (11)$$

כאשר:
 $delZ$ אורך התוזה השנתית של המים הנעים דרך האזור הבלתי רווי של תא בהשפעת $Qunsat$ נפח שנתי הנכנס לתא המאזן מהאזור הבלתי רווי
 $Theta$ תכולת הרטיבות באזור הבלתי רווי של התא
 L אורך האזור הבלתי רווי של התא לשם כך נחשב פרופיל התחלתי של ריכוז כלוריד לאורך האזור הבלתי רווי של תא
 Zi יהיה המיקום באזור הלא רווי של המים הנמצאים במרחק של i שנות תוזה מפני מי התהום
 $Zi = i \cdot delZ \quad i = 0, 1, 2, \dots, N$
 $C(Zi)$ ריכוז הכלוריד ברום Zi מפני מי התהום

$$C(Zi) = Cunsat0(0) + (CunsatL(0) - Cunsat0(0)) \cdot Zi / L \quad (12)$$

$Cunsat0(0)$ ריכוז הכלוריד בבסיס האזור הבלתי רווי בזמן 0 (התחלת הפעלת תסריט)
 $CunsatL(0)$ ריכוז הכלוריד בראש האזור הבלתי רווי ($L = Zi$) בזמן 0 (התחלת הפעלת התסריט)
 L אורך האזור הבלתי רווי של התא

ריכוז הכלוריד במים המגיעים מהאזור הבלתי רווי אל האזור הרווי במהלך תקופה א:

$$Cunsat(i) = [C(Z_{i-1}) + C(Zi)] / 2 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

ריכוז הכלוריד במים המגיעים מהאזור הבלתי רווי אל האזור הרווי במהלך תקופה ב:
מקרה א: המים שאובים המשמשים להשקיה נשארים במליחותם המקורית