

מודל לחיזוי מליחות הכנרת

•רימר א. 2002. מנגנון ההמלחה של הכנרת כמיכל ליניארי. מים והשקייה 433: 8-16.

אלון רימר

המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים לישראל, alon@ocean.org.il

1. הקדמה

ההיסטוריה של מליחות הכנרת מתועדת מתחילת המאה ה-20 (Dalinsky 1969). מדידת המליחות הראשונה המתועדת ע"י תה"ל נעשתה ע"י Annandale (1913) שדיווח על 239 מג"ל. מדידה מאוחרת יותר נעשתה ע"י השרות ההידרולוגי של המנדט הבריטי שדיווח בשנת 1934 על מליחות של 300 מג"ל. לפחות שבע מדידות מליחות נוספות נרשמו ע"י תה"ל בין השנים 1945 עד 1950, ובהן מליחות האגם נעה בין 260 ל-300 מג"ל. מדידת מליחות ראשונה שבה נדגמו מים מעומקים שונים בוצעה בסקר שנערך ב-1949 (Oren 1957). במאגר המידע של השרות ההידרולוגי מצויים ערכים מדודים של מליחות הכנרת החל משנת 1952 (תרשים 1).

בין השנים 1953 ל-1960 עלתה מליחות הכנרת מ-300 מג"ל לכ-390 מג"ל. במהלך שנים אלה מתועדת גם עלייה במפלס האגם, ולפיכך תקופה זו מהווה פרק זמן יוצא דופן בהיסטוריה של מליחות האגם, מאחר ובדרך כלל עלייה במליחות באה במקביל לירידה במפלס ולהיפך. ההסבר המוצע לתופעה ייחודית זו הוא הפרת יחסי העומדים בין הכנרת לאקוויפרים המלוחים שסביבה, כתוצאה מקידוחים בקרקעית האגם. במסגרת המאמר הנוכחי קצרה היריעה מלהרחיב בנושא, ולכן תופעה זו לא תידון בהמשך. בשנת 1964 הופעל המוביל הארצי, ומליחות האגם החלה לרדת. מגמה זו הואצה בשנת 1965 עם הפעלת המוביל המלוח, והטיית חלק מממעינות החוף המערבי של הכנרת. עונת הגשמים יוצאת הדופן של חורף 1968/69 שבה נכנס לאגם נגר עילי בשעור של 200% מהממוצע השנתי גרמה לשטיפה מואצת של המלח ולירידה חזקה במליחות. ההטייה שבוצעה במשך כל השנים הביאה את מליחות הכנרת לרמה הנמוכה בתולדותיה – 192 מג"ל- בחודש מאי 1988. בעקבות שלוש השנים השחונות שבאו לאחר מכן (1988-1991) חלה עליה במליחות עד 250 מג"ל, ובעונת 1991/92 שהיתה אף היא קיצונית בכמות הגשמים, ירדה המליחות חזרה ל-210 מג"ל. מסוף עונת 1993/94 חלה למעשה עלייה מתמדת במליחות הכנרת במקביל לירידה במפלס.

משתנה חשוב לבחינת התנודות שחלו במליחות האגם במשך הזמן הוא כמות המלח השנתית הנכנסת אליו (טון/שנה). Dalinsky (1969) דיווח כי כמות מלח נכנס בשעור 153,000 נדרשה ע"מ לקיים מאזני מים ומלח לתקופה שבין 1912 ל-1926. בהיעדר מדידה אמינה של כמויות מים נכנסות לאגם בתקופה זו מאזנים אלה מבוססים על הערכות מתוך נתוני גשם בבירות (לבנון) ובכפר גלעדי. Mero (1978) העריך את כמות המלח השנתית הנכנסת לאגם ב-150,000 טון עם שגיאה של כ-20%. Simon and Mero (1992) חישובו ממוצע של 146,100 טון עבור השנים 1960-1989, ו Rimmer (1996) מצא כי כמות המלח השנתית הממוצעת בשנים 1968-1996 כוללת כ-40,000 טון המוטים ע"י המוביל המלוח; 15,000 טון נוספים משפיעות מדודות הנכנסות לאגם; ועוד כ-90,000 טון ממעינות מלוחים שאינם מנוטרים. בחישוב כולל כמויות אלה דומות לאלו שחושבו ע"י Simon and Mero (1992).

למליחות הכנרת חשיבות רבה מבחינת משק המים הארצי, מאחר ומליחות המים הנשאבים בה משפיעה הן על מליחות מי תהום (דרך החדרת מים לאקוויפר החוף), והן על מליחות קרקעות (דרך השקיה). קיים לפיכך צורך להגדיר מספר דרכי תפעול של האגם ולבחון באמצעות מודלים כיצד תשפיע דרך תפעול כלשהי על מליחות עתידית של הכנרת. ניתן למשל לבחון את ההיבטים הבאים בתפעול האגם: א. תפעול תוך שאיפה לשמור על מפלס אגם קבוע ברום נתון (למשל מפלס גבוה 210- מ', או נמוך 214-). ב. מה תהיה השפעת ההגדלה בהטיית המעיינות המלוחים על מליחות הכנרת, ובאיזה קצב יחול שינוי במליחות כתוצאה מהגדלה כזו. ו-ג. כיצד תשפיע על המליחות הפחתה בכמויות המים הנכנסות לאגם מהירדן ומנחלי רמת הגולן והגליל.

במודל לתאור מליחות האגם מחושבים קודם כל השינויים הצפויים באוגר המלח, שיוגדר להלן ככמות יון כלור (טון) באגם. חלוקת אוגר המלח בנפח האגם (מלמ"ק) היא המליחות הממוצעת במיליגרם כלור לליטר. מודל מוקדם לחיזוי המליחות כתוצאה מהיבטים תפעוליים של האגם כגון שעור הטיית מעיינות ושאובה פותח ע"י המהנדס פליקס מירו מתה"ל (Mero and Simon, 1992) עוד בשנות ה-70. Assouline et al. (1994) הציעו מודל לחיזוי מליחות הכנרת, על בסיס פונקציה סטטיסטית לתאור השפיעה החודשית הממוצעת של המעיינות המלוחים. Berger (2000) פיתח את המודל שהציע אסולין לצורך תפעול של כל מערכת הכנרת, וכלל בו גם היבטים תפעוליים רבים כגון הפחתה במים זמינים; הטייה מהירמוך; שאובה מוגברת בחודשים מוגדרים ועוד.

המודל המוצג במאמר זה מבוסס על נתוני מאזני המים והמלח השנתיים של הכנרת (תאור מפורט של מאזן המים והמלח של הכנרת נמצא במאמר של Assouline 1993 והשגיאות הכרוכות בחישוב המאזן חושבו ע"י Rimmer and Gal 2002). המודל מתייחס למליחות הכנרת כגודל שנקבע ע"י מספר לא גדול של משתנים, שערכם הממוצע על פני טווח זמן ארוך ניתן לחיזוי. בשונה מהמודלים שהוצעו בעבר, והתבססו על חישוב נומרי של מאזני מים ומלח, המודל הנוכחי מבוסס על פתרון אנליטי של משוואה דיפרנציאלית (משוואת "מאגר ליניארי"), ובשל אופיו זה ניתן לבחון כיצד משפיע כל משתנה בנפרד על מליחות הכנרת.

2. תאוריה

שטף המלח הנכנס לכנרת הוא צירוף של כל השטפים התורמים למליחות כלשהי, ובהם כניסות מלח ע"י מי מעיינות, נהר הירדן, נגר עילי ישיר, והטיית הירמוך. שטף המלח היוצא מן האגם הוא צירוף של כל הגורמים הגורעים למליחות מן האגם, ובהם שאיבות למוביל הארצי, שאובה ע"י צרכנים מקומיים, ושחרור מים דרך סכר דגניה. שינוי אוגר המלח באגם בזמן תלוי במאזן שבין כניסות ליציאות מלח. אם נניח כי האגם נמצא תחת משטר של ערבוב מלא, כמות המלח היוצאת תלויה ליניארית בספיקת המים הנגרעים ממנו, וניתן לתאר אותה בפשטות ע"י מכפלת המליחות הממוצעת של האגם בכמות המים העוזבת אותו בפרק זמן נתון.

ניתן להראות על סמך נתוני העבר, כי בתנאים של מדיניות תפעול אחידה לאורך מספר שנים, יהיו ספיקות השאיבה השנתיות, נפח האגם, וכניסות המלח השנתיות, קבועים בזמן וניתנים לביטוי כמותי ע"י הערך הממוצע של משתנים אלה. אם מתקיימים התנאים של מדיניות תפעול אחידה, אזי משוואת השינוי באוגר המלח בכנרת מתוארת ע"י המשוואה הדיפרנציאלית הפשוטה הבאה:

$$\frac{dS(t)}{dt} + qS(t) = S_{in}; \quad (1)$$

$$q = \frac{\overline{Q_{out}}}{V}; \quad S_{in} = Q_{in} \overline{C_{in}}$$

במשוואה זו כמות המלח באגם, S , היא ביחידות של טון כלור; S_{in} שטף המלח הנכנס (טון כלור\שנה); t הזמן בשנים; V נפח האגם (מיליון מ"ק, מל"מק); Q_{in} (מלמ"ק\שנה) מציין את כלל ספיקת המים הנכנסת; ו- Q_{out} (מלמ"ק\שנה) כלל ספיקת המים היוצאת את האגם בפרק זמן נתון. המשתנה C_{in} מייצג את המליחות הממוצעת של כלל הספיקות הנכנסות לאגם. הערך של המשתנה q , שמימדיו 1\שנה, מתאר את הממוצע של כלל יציאת המים השנתית מחולק בנפח האגם. זהו למעשה קבוע ההתחדשות של נפח המים באגם (Wetzel 1983) או ההופכי של "זמן השות" (הזמן הממוצע של שהיית טיפת מים באגם).

משוואה 1 זהה למעשה למשוואה דיפרנציאלית המתארת מיכל ליניארי עם כניסה קבועה בזמן. המיכל הליניארי הוא ביטוי מתמטי המתאר את השינוי בזמן של כמות המים במיכל נוזלים, כאשר הספיקה הרגעית היוצאת מן המיכל תלויה ליניארית בכמות המים שהוא מכיל (תרשים 2). במודל הנוכחי קיימת תלות ליניארית בין כמות המלח הנגרעת מן האגם ואוגר המלח שנמצא בו- מקרה אנלוגי להגדרה הקלסית של מיכל ליניארי. הפתרון האנליטי של משוואה 1 הוא תאור אוגר המלח בכנרת כתלות בזמן ובכל הפרמטרים שצוינו לעיל:

$$S(t) = \frac{S_{in}}{q} + \left(S_0 - \frac{S_{in}}{q} \right) \exp(-qt) \quad (2)$$

בפתרון זה S_0 מציין את אוגר המלח באגם (טון) בזמן התחלתי כלשהו; הביטוי בסוגרים הגדולים בסימן שלילי $(S_{in}/q - S_0)$ מציין את התגובה המלאה של המערכת ("המערכת" במקרה זה היא אוגר המלח באגם) לשינוי מדרגה בתנאי התפעול של האגם; הביטוי האקספוננציאלי מתאר את השינוי בתגובת המערכת כפונקציה של הזמן; ואילו ערכו של q קובע את קצב השינוי.

משמעות הפתרון המוצג במשוואה 2 היא כלהלן: במצב התחלתי שבו כמות המלח באגם היא S_0 מתבצע שינוי תפעולי. שינוי זה יכול להתבטא בהפחתה או בהגדלה של כמות המלח ולא בכמות המים המתוקים המגיעים אליו. כתוצאה מהשינוי התפעולי מגיבה "המערכת" למתרחש וחל שינוי במליחות האגם. אם "תגובת המערכת" (כפי שהוגדרה לעיל) שווה ל-0 אזי אין שינוי בכמות המלח הנכנסת לעומת המצב ההתחלתי ולא יהיה כל שינוי במליחות האגם עם הזמן. לעומת זאת אם

$(S_{in}/q - S_0) < 0$ כמות המלח הנכנסת על בסיס שנתי כתוצאה מהשינוי התפעולי קטנה מן הכמות הקיימת, ומליחות האגם תפחת עם הזמן. תוצאה הפוכה תתקבל אם תגובת המערכת תהיה חיובית. כמו כן, אם q גדול יהיה קצב השינוי במליחות מהיר ואילו כאשר q קטן יהיה קצב השינוי איטי. לאחר שחושב אוגר המלח כתלות בזמן $S(t)$, ניתן לחשב את המליחות הממוצעת באגם C_{lake} ע"י חלוקת אוגר המלח המחושב בנפח האגם.

3. יישום המודל לפי נתוני מאזנים שנתיים

בשלב ראשון יש לבדוק האם המודל המוצע אכן מתאים לתאור ההשתנות של מליחות הכנרת בזמן כתוצאה משינויים תפעוליים. את הבדיקה ניתן לעשות ע"י השוואת תוצאות המודל לנתוני עבר ידועים בתנאים של מצב יציב ולאורך זמן. הנתונים שבהם נעשה שימוש לצורך זה הם 50 שנים שבהן בוצעו מאזני מים ומלח שנתיים (1951 עד 2000 תרשים 3). סיכום הספיקות הנכנסות (Q_{in}) והיוצאות (Q_{out}) מהכנרת לקוח מתוך נתוני השרות ההידרולוגי (HSI, 2001). מליחות הכנרת בתחילת כל שנה הידרולוגית (1 באוקטובר) בין השנים 1951 ל-1968 חושבה באמצעות עיבוד נתוני מליחות שדווחו ע"י השרות ההידרולוגי, ומ-1968 ואילך מתוך נתוני המעבדה לחקר הכנרת (תרשים 1). כמות המלח השנתית הנכנסת (S_{in}) חושבה מתוך מאזן המלח של האגם (תרשים 4). ערכו של q חושב מתוך היחס בין כמות המים היוצאת השנתית לבין נפח האגם ב-1 באוקטובר של השנה ההידרולוגית.

כפי שצויין בתאור החלק התאורטי, המודל מניח ערכים קבועים של כניסת מלח בזמן S_{in} , ושל "קבוע ההתחדשות" q , השוים לערך הממוצע בתקופת זמן נתונה. הנחה זו הכרחית על מנת ליישם את המודל ולהבחין בקשרים הפיזיקליים שבין המשתנים השונים למליחות הכנרת. מאליו מובן שלגישה זו קיימים חסרונות מסויימים בניתוח לטווחי זמן קצרים כיוון ששני משתנים אלה אינם קבועים בזמן בפועל, ולשניהם סטיות משנה לשנה. למרות זאת יש לזכור כי חיזוי של שינויי מליחות האגם בזמן הוא בעל משמעות רק לטווחי זמן ארוכים משתי סיבות עיקריות: האחת- ההשתנות של מליחות האגם לשנה אחת תלוי בעיקר בכמות הגשם בעונת הגשמים, וזהו משתנה מקרי, שקשה מאד לחזותו לגבי עונת גשם יחידה, או לגבי מספר קטן של עונות; השנייה - ספיקת המלחים השנתית הכוללת היא רק כ-10% מכמות המלח באגם, כך ששינוי משמעותי במליחות יכול להיגרם רק כתוצאה משינוי מדיניות של כניסת מים ומלח לאגם על בסיס רב שנתי. המודל ישמש איפה כ- "כלל אצבע" של מגמות במליחות הכנרת לאורך טווחי זמן ארוכים כתוצאה ממשתני תפעול.

אמינותו של המודל לחישוב שינויי מליחות בזמן נבדקה בעיקר עבור השנים 1968-2000 שבהם מאגר הנתונים שבידינו הוא ברמת אמינות גבוהה יחסית לשנים מוקדמות יותר. יתרה מכך, לגבי תקופה זו בוצעו מאזני מים ומלח חודשיים הן ע"י תה"ל בין השנים 1968-1986, והן ע"י מקורות משנת 1987 (Rimmer and Gal, 2002), ואלה המאפשרים לחזק את אמינות הנתונים הקיימים. מן הראוי לציין כי בכל ההשוואות שתובאנה להלן בין הנתונים המדודים לבין המודל המוצע לא בוצע

תהליך של "התאמת עקומים" או כיוול של המודל, והתוצאות המתקבלות הן כתוצאה מהשמת נתונים מדודים בלבד במשוואה 2.

4. מצב יציב (Steady state)

נבחן את השימוש המעשי בפתרון המוצג במשוואה 2 באמצעות הנתונים המחושבים של מאזני מים ומלח שנתיים על פני 50 שנה (1950-2000). מהנתונים עולה כי כמות המים הזמינים השנתית הממוצעת לתקופה זו 490 מלמ"ק לשנה, וכמות המים היוצאים מן האגם בשאיבה ושחרור דרך סכר דגניה 498 מלמ"ק לשנה. נפח האגם היה בממוצע 4,020 מלמ"ק, ערכו הממוצע של $q = 0.12$, וזמן השהות הממוצע 8.3 שנים ($1/\bar{q}$). מכאן שתגובת המערכת מגיעה לכ- 70% מעצמתה המלאה תוך כ- 10 שנים (מתוך חישוב הביטוי האקספוננציאלי במשוואה 2) ול-91% מעצמתה תוך 20 שנה. מצב יציב יושג אם כן לאחר $3/q$ שנים בקירוב (25~ שנים). במצב זה אוגר המלח באגם יעמוד על:

$$S(t) = \frac{S_{in}}{q} \quad (3)$$

ומליחות האגם תהיה:

$$C_{lake}(t) = \frac{S(t)}{V} \quad (4)$$

מספר דוגמאות של מצב מליחות יציב אפשרי חושבו עבור תנאים שונים של מצב הכנרת (טבלה 1). נלקחו שלושה מצבים אפשריים של כניסת מלח שנתית לאגם. האחד - 145,000 טון\שנה מייצג את שפיעת המלח ללא הטיית המעינות (Simon and Mero 1992; Rimmer 1996); השני 105,000 טון\שנה מייצג בקירוב את שפיעת המעינות השנתית הממוצעת בתנאי ההטייה המופעלים כיום; המצב השלישי - כניסה שנתית בשעור 79,000 טון\שנה מייצג הטייה נוספת של 13 מלמ"ק לשנה במליחות של 2000 מגכ"ל, ולפיכך הפחתה נוספת בשעור 26,000 טון בכמות הנכנסת לאגם. כמו כן הנחנו שלושה מצבים שונים של q : באחד $q=0.12$ לפי הערך הממוצע של 50 השנים האחרונות, בשני $q=0.1$ ובשלישי $q=0.08$ על בסיס ההנחה כי קיימת הפחתה בממוצע כמות המים הנכנסת לאגם בשנים האחרונות (ברגר 2002). כל אלה חושבו עבור שלושה מצבים שונים של מפלס (ונפח) ממוצע.

מהשוואת דוגמאות אלה למצבים שבהם היה האגם בעבר ניתן לראות כי עבור כניסת מלח ללא הטייה, $S_{in}=145,000$ טון, וכן $q=0.12$ מתקבל אוגר מלח בשעור 1,208 אלף טון, ומליחות שבין 288 ל- 318 מגכ"ל למפלסים שונים כפי שהיתה מליחותו לפני 1960 (תרשים 1). לעומת זאת עבור כניסת מלח שנתית לאחר הטייה, כאשר $S_{in}=105,000$ טון, וכן $q=0.12$ מתקבל אוגר מלח בשעור 875 אלף טון, ומליחות שבין 208 ל- 230 מגכ"ל כפי שהיתה המליחות בסוף שנות ה-80 במפלסים שונים. מן התוצאות עולה אבחנה חשובה נוספת: ככל ש- q קטן יותר יחס השטיפה של האגם ממלחים קטן, והמליחות גדלה. כמו כן הטייה נוספת בשעור 26,000 טון עשויה להוריד את מליחות

האגם במידה רבה, אבל אם במקביל כמות המים המתוקים הנכנסת תקטן (q קטן) אזי מליחות האגם תגיע לכל הפחות לכ- 190 מגכ"ל.

טבלה 1: מליחות מחושבת עבור מצב יציב בתנאים שונים. בשורה העליונה שלושה מצבים אפשריים של כניסת מלח שנתית לאגם (אלף טון כלור לשנה). בטור השמאלי שלושה מצבים שונים של q (1\שנה). טבלה 1. אוגר מלח באגם (אלפי טון כלור). טבלה 2-3-4 מליחות האגם (מגכ"ל) כתלות בשלושה מצבים שונים של מפלס (ונפח) ממוצע.

Sin (טון)

	79	105	145	
0.08	0.988	1.313	1.813	1
0.10	0.790	1.050	1.450	אוגר מלח (S)
0.12	0.658	0.875	1.208	אלפי טון כלור
	מפלוס = -212.14		נפח = 3,800	
0.08	260	345	477	2
0.10	208	276	382	מליחות האגם
0.12	173	230	318	מגכ"ל
	מפלוס = -210.81		נפח = 4,020	
0.08	246	326	451	3
0.10	197	261	361	מליחות האגם
0.12	164	218	301	מגכ"ל
	מפלוס = -209.72		נפח = 4,200	
0.08	235	313	432	4
0.10	188	250	345	מליחות האגם
0.12	157	208	288	מגכ"ל

(שנה/1)
q

5. שינויים בזמן

השימוש במשוואה 2 לצורך הערכת שינויי מליחות בזמן מודגם בצורה הטובה ביותר עבור רצף הזמן שבין שנת 1965 (תחילת שאיבה במוביל והטיית המעיינות המלוחים) ל-1987. משכו של פרק זמן זה קרוב לערך שנקבע כזמן מספיק להגעת המערכת למצב יציב בקירוב (3/q). במודל ניתן לתאר את הטיית המעיינות המלוחים כפונקצייה של כניסת מלח לאגם כנגד הזמן, שבמהלכה, בשנת 1965, משתנה S_{in} ב"קפיצת מדרגה" מ-145,000 ל-95,000 טון\שנה. פונקצית המדרגה גורמת לתגובה ושינוי אקספוננציאלי במערכת הליניארית של מליחות האגם. כתוצאה מההטייה ירד עומס המלח בכנרת מ-1,550 ל-860 אלף טון כלור, ומליחות האגם פחתה מ-367 ל-212 מגכ"ל. הירידה האקספוננציאלית של אוגר המלח החזויה ע"י המודל, והירידה באוגר המלח שחלה בפועל מתוארים בתרשים 5. בולטת לעין הירידה החדה במליחות שחלה בעקבות חורף 1968/69 (ערך q של עונה זו

בלבד היה 0.302, גבוה בהרבה מערך q עבור ממוצע השנים 1965-1967) אך זהו בבחינת היוצא מן הכלל המחזק את הכלל, וההתנהגות האקספוננציאלית הכללית נשמרת לאורך טווח הזמן כולו. דוגמא נוספת היא התקופה שבין השנים 1989 ל-2000 המתוארת בתרשים 6. חישוב ממוצע כמות המלח השנתית הנכנסת בתקופה זו מראה על עלייה מ-95,000 טון לכ-109,000 טון. עלייה זו מוסברת בשתי סיבות עיקריות שתרומת כל אחת מהן לכמות המלח הנכנס מוערכת בכ-7000 טון\שנה בממוצע. הסיבה הראשונה היא הגלשה יזומה של המעיינות המלוחים לכנרת בשתי תקופות יובש בשנים 1989/90 וב-1998/99, ואילו השנייה היא חורף שנת 1991/92 שהביא עמו הרבה מים לאגם אבל גם הרבה מלח דרך המעיינות. בנוסף, נפח האגם במהלך תקופה זו עלה מ-3600 מלמ"ק ב-1991 ל-4200 מלמ"ק ב-1992, וחזרה ל-3600 מלמ"ק בשנת 1999. יישום משוואה 2 לתקופה זו עם ערכים ממוצעים לתקופה ($q=0.115$; $S_{in} \sim 109,000$ ton) מתאר עלייה אקספוננציאלית של אוגר המלח באגם ותאור טוב של השינויים במליחות האגם שחלו במהלך תקופה זו.

6. השפעת נפח האגם

השפעת מפלס האגם ונפח המים שבו על המליחות באה לידי ביטוי בשני שלבים במודל: בשלב ראשון נפח האגם משפיע על ערכים שנתיים של קבוע השטיפה (q) המחושב, ולפיכך גם על ערכו של q ממוצע במודל. בשלב שני הוא משפיע דרך חישוב מליחות האגם מתוך אוגר המלח המחושב באמצעות המודל. דוגמא לאמור לעיל מופיעה בתרשים 7. השינויים הצפויים באוגר המלח חושבו על פי המודל לשנים 1971 עד 1987 כאשר תנאי ההתחלה S_0 היה עומס המלח באגם בתחילת עונת 1970/71 (982,000 טון כלור). כפרמטרים למודל חושבו ערכים ממוצעים של מקדם השטיפה q לתקופה זו (0.1114 לשנה), וכניסת המלח השנתית הממוצעת S_{in} (94,215 טון כלור). תוצאות החיזוי של שינוי אוגר המלח חולקו בנפח האגם היומי באותה תקופה (משוואה 4). התוצאה היא מליחות אגם דומה מאד לזו שנמדדה בפועל בתקופה זו.

7. תחזיות

מטרת פרק זה להדגים את השימוש במשוואה 2 לצורך חיזוי השפעת מדיניות תפעול הכנרת על מליחותה לאורך טווח זמן ארוך. יבחן השינוי הצפוי כתוצאה מ-א. הפחתה או הגדלה של כמות המלח שנכנסת לאגם, ו-ב. הפחתה בכמויות המים המתוקים שנכנסות לכנרת (מים זמינים), וכתוצאה מכך הפחתה גם בשאיבה על בסיס שנתי.

7.1 השפעת הטיית מלחים

ניתן לשלוט באופן חלקי על כמות המלח הנכנסת לאגם דרך הטיית מעיינות מלוחים למוביל המלוח, ומניעת שפיעתם לאגם. תהליך החיזוי של השפעת הטייה על מליחות האגם נעשה בשלבים הבאים: 1. מוגדר הזמן ההתחלתי, ואוגר המלח ההתחלתי שנמדד באגם S_0 . 2. מחושבת כמות המלח השופעת לאגם S_{in} לאחר שינוי בהטיית מעיינות. 3. מוגדר ערך q החזוי לתקופה הצפויה. 4.

הערכים המתאימים מוצבים במשוואה 2 ונמצא הפתרון לשינוי אוגר המלח באגם כפונקציה של הזמן.
5. אוגר המליחות $S(t)$ מחולק בנפח האגם V לקבלת המליחות הצפויה.

דוגמא לחיזוי כזה מופיעה בתרשים 8. הנחנו לצורך הדוגמא שמליחות האגם 280 מ"ג כלור לליטר, וכמות המים המתחלפת על בסיס שנתי היא 500 מלמ"ק. התוצאות חושבו עבור שני נפחים קבועים של האגם בשעור 3600 ו-4020 מלמ"ק, ולפיכך ערך q יהיה 0.138 ו-0.124, וערך S_0 יהיה 1,008 ו-1,125.6 אלף טון כלור בהתאמה.

בתנאים אלה נוסו חמש רמות של הטיית מלחים כאשר $S_{in}=[70,90,110,130,140]$ אלף טון כלור לשנה. מתוצאות החיזוי לתקופה של 10 שנים עולה כי אם כמות המלח הנכנסת היא 70 אלף טון בלבד, אזי תחול ירידת מליחות עד 180 מגכ"ל. לעומת זאת לא יחול כל שינוי במליחות אם כמות המלח הנכנסת תעמוד על 140 אלף טון לשנה. המודל מראה כי ירידת המליחות בזמן מהירה יותר עבור נפח אגם נמוך שכן ערך שטיפת האגם ממלח, המבוטא ע"י q , גדול יותר במפלס אגם נמוך.

7.2 השפעת כמות המים הזמינים

שינויים במליחות הכנרת צפויים גם כתוצאה מההפחתה המתמשכת בכמויות המים המגיעות לכנרת דרך הירדן והנחלים המקומיים. תרומת מקורות אלה לאוגר המלח היא פחותה מ-10% מכלל המלח השופע לאגם (Rimmer and Gal, 2002), ולפיכך השפעתן על המליחות היא בעיקר דרך שינוי בכמויות המים המתוקים המוהלים את המלח. הקטנת שפיעות מתוקות אלה בזמן גורמת בהכרח להגדלה יחסית בשפיעה המלוחה (הנשארת קבועה בזמן), וכתוצאה מכך להמלחת האגם. במונחי המודל המתואר לעיל, ובהנחה שנרצה לשמור על מפלס אגם קבוע לאורך זמן, הפחתה בכמויות המים המתוקים הנכנסות לכנרת גורמת במקביל להפחתה בכמויות המים הנשאבות ממנה. כתוצאה מכך ייקטן ערך השטיפה q במודל, תגובת המערכת תהיה חיובית $(S_{in}/q - S_0) > 0$, וכתוצאה מכך תהיה המלחה של האגם. כמו כן, תהליך שינוי המליחות בזמן יואט.

דוגמא לחיזוי מצב זה מתוארת בתרשים 9. תנאי ההתחלה הם מליחות 230 מגכ"ל, נפח אגם 4,020 מלמ"ק (ומכאן ש- $S_0=924.6$ אלף טון). שעור שפיעת המלח השנתית עומד על 115 אלף טון כלור. החיזוי בוצע עבור ארבע רמות של כניסת נגר עילי לאגם – 200, 300, 400 ו-500 מלמ"ק לשנה, ומכאן שקבוע השטיפה הוא 0.049, 0.074, 0.099, ו-0.124 בהתאמה. שינוי מובהק במליחות האגם נצפה כתוצאה מהקטנת ערכו של q , והוא מסביר יפה את העלייה במליחות שחלה בדרך כלל בעקבות שנים שחונות, לעומת ההמתקה שחלה בעקבות שנים ברוכות גשמים. תוצאות דומות נמצאו גם במודל הסטטיסטי שפותח ע"י חברת מקורות (ברגר 2000).

8. סיכום

מאמר זה מציג מודל כללי למנגנון ההמלחה של הכנרת. פיתוח המודל מבוסס על רכיביו העיקריים של המאזן השנתי של מים ומלח, ולפיכך הוא מאפשר מתן פירוש פיזיקלי לגורמים העיקריים המשפיעים על מליחות האגם. השינוי בזמן של מסת המלח בכנרת מתואר ע"י משוואה

דיפרנציאלית דומה לזו של מיכל ליניארי עם ספיקת כניסה קבועה. על פי הנחת המודל, תחת משטר תפעול קבוע של האגם ניתן לתאר את רכיבי המאזן השנתי של מים ומלח כערכים ממוצעים וקבועים בזמן. נמצא שלמרות השינויים הקיצוניים בתנאים ההידרולוגיים שבין עונת גשם אחת לשנייה, המודל מתאר היטב את שינויי המליחות העיקריים שחלו בזמן, ואת מליחות האגם בתנאים של מצב יציב. באמצעות המודל ניתן לבצע תחזיות של מליחות האגם הצפויה בעתיד עבור תסריטים שונים ובהם: א. שינויים בכמות המלח הנכנסת דרך מערכת המעיינות המלוחים לאגם; ב. שינויים בכמות המים ממקורות נגר עילי המגיעים לכנרת.

9. ספרות

- Annandale, N., 1913. Introduction to a report on the Biology of the Lake of Tiberias-. J. As. Soc. Bengal.
- Assouline, S., 1993. Estimation of lake hydrologic budget terms using the simultaneous solution of water, heat, and salt balances and a Kalman filtering approach - application to Lake Kinneret. *Water Resources Research*, 29(9): 3041-3048
- Assouline, S., Shaw, M. and Rom, M., 1994. Simulation model for the water and solute components in the Lake Kinneret System, Watershed Unit, Mekorot, Israel., Tiberias. (in Hebrew).
- Berger, D., 2000. Operational model for the Lake Kinneret System. WaterShed Unit, Mekorot, Israel., Tiberias. (in Hebrew).
- Dalinsky, P., 1969. The Salinization mechanism of Lake Kinneret- A research for the period 1912-1968. No. 746, Water Planning for Israel (Tahal), Tel-Aviv. (In Hebrew).
- Mero, F. and Simon, E., 1992. The simulation of chloride inflows into Lake Kinneret. *J. Hydrol.*, 138: 345-360.
- Oren, O.H., 1957. Physical and chemical characteristics of Lake Tiberias. P.N.9., Sea Fisheries Research Station and Water Planning for Israel Ltd.
- Rimmer, A., 1996. The Salinity of Lake Kinneret: Estimation of the Un-Measured Saline Springs Inflow Characteristics. WaterShed Unit, Mekorot, Israel., Tiberias. (in Hebrew).
- Rimmer, A. and Gal, G., 2002. Estimating the Ungauged Saline Springs Component in a Solute and Water Balance: Sea of Galilee, Israel. Groundwater. (Submitted).
- Serruya, C., 1978. Lake Kinneret. *Monographiae Biologicae*, 32. Dr. W. Junk, The Hague, 501 pp.
- Israeli Hydrological Service (HSI), Annual Report, 2001. The Development, usage, and situation of water resources in Israel until 2001, Israeli Hydrological Service, Jerusalem. (in Hebrew).
- Simon, E. and Mero, F., 1992. The salinization mechanism of Lake Kinneret. *Journal of Hydrology*, 138: 327-343.
- Wetzel, R.G., 1983. *Limnology*. Saunders College Publishing, Fort-Worth, 767 pp.

10. תרשימים

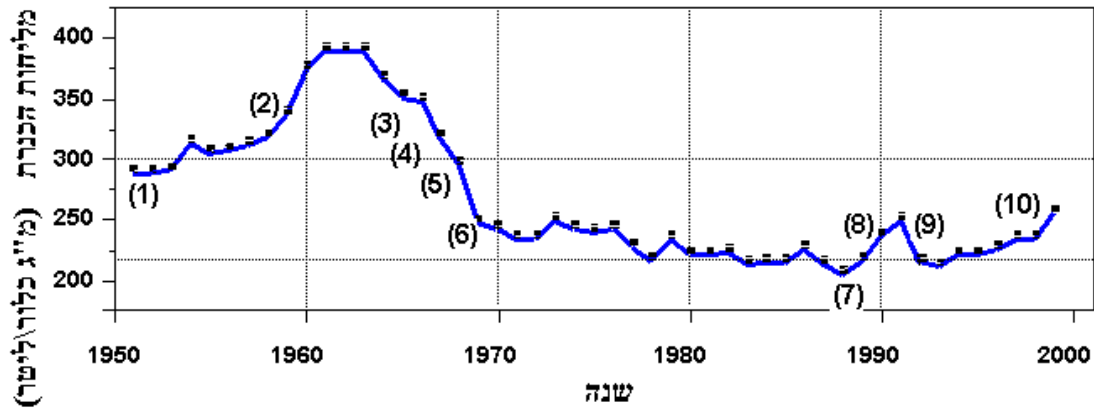


Figure # 1

תרשים 1. 10 תחנות עיקריות בזמן במליחות הכנרת 1950-2000.

1. מליחות בין 250 ל- 300 מג"ל. 2. עליה במליחות ל - 390 מג"ל. 3. הפעלת המוביל הארצי 4. החלה הפעלתו של המוביל המלוח. 5. המליחות פוחתת באופן משמעותי. 6. חורף גשום במיוחד בעונת 1968-69. 7. מליחות מינימלית (192 מג"ל) בחודש מאי 1988. 8. מליחות עולה ל - 250 מג"ל כתוצאה משלוש עונות שחונות ברצף. 9. ירידת מליחות ל- 210 מג"ל כתוצאה מחורף שנת 1992. 10. עלייה קבועה במליחות.

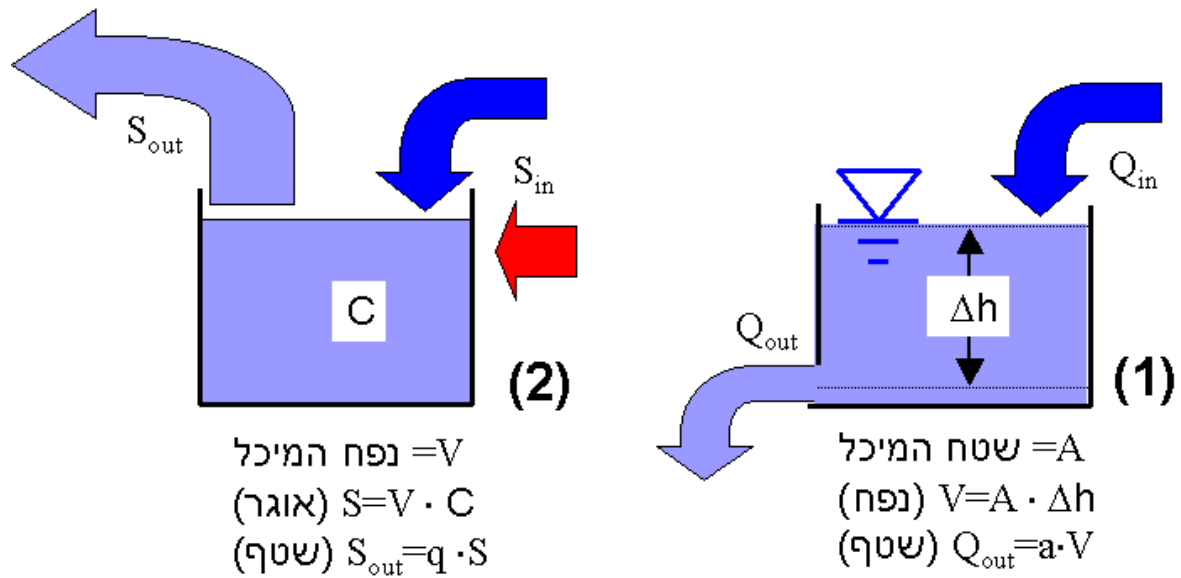


Figure # 2

תרשים 2. תרשים סכמטי של מיכל ליניארי: 1. מיכל נוזלים עם שטף כניסה קבוע ושטף יציאה התלוי בנפח המים. 2. מיכל עם מלחים בריכוז C , עם שטף כניסת מלח קבוע, ושטף יציאה התלוי בכמות המלח במיכל.

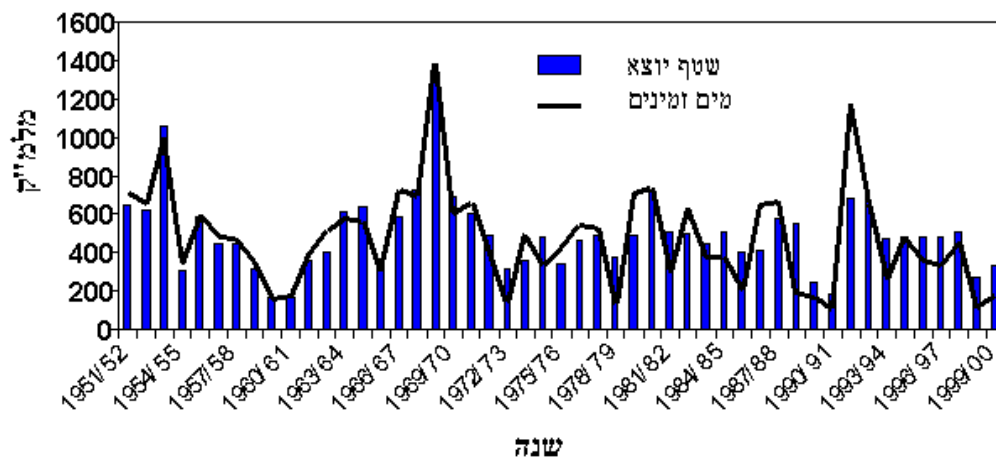


Figure # 3

תרשים 3. 50 שנות מאזני מים בכנרת משנת 1951, מיוצגים ע"י מים זמינים (כלל כניסות פחות התאדות) וע"י כלל המים היוצאים (שאיבות ושחרור בסכר דגניה). נתונים ע"פ השרות ההידרולוגי.

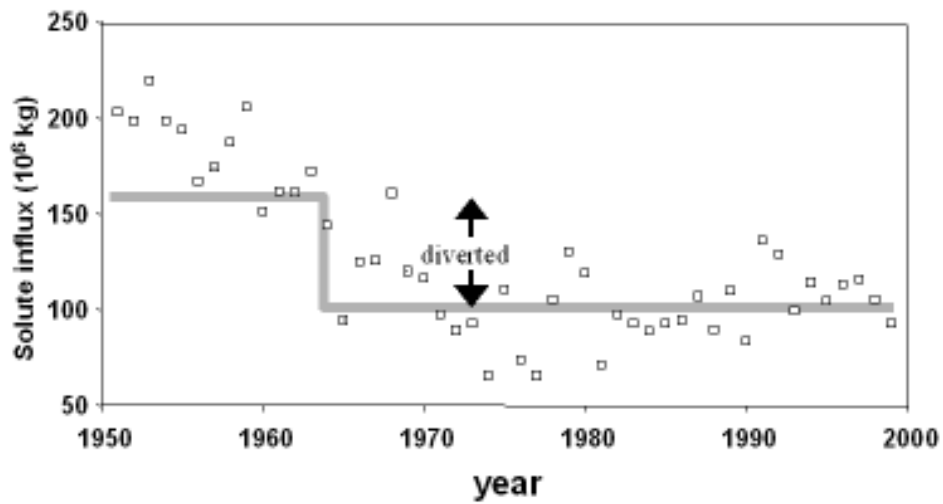


Figure # 3

תרשים 4. כניסת מלחים שנתית כוללת לכנרת (טון כלור) כפי שחושבה מתוך מאזני מים ומלח שנתיים. קו רציף: פונקציית מדרגה של כניסת מלח לאגם. הקו ב- 0.15 מליון טון מייצג את כמות המלח השנתית הממוצעת ללא הטייה.

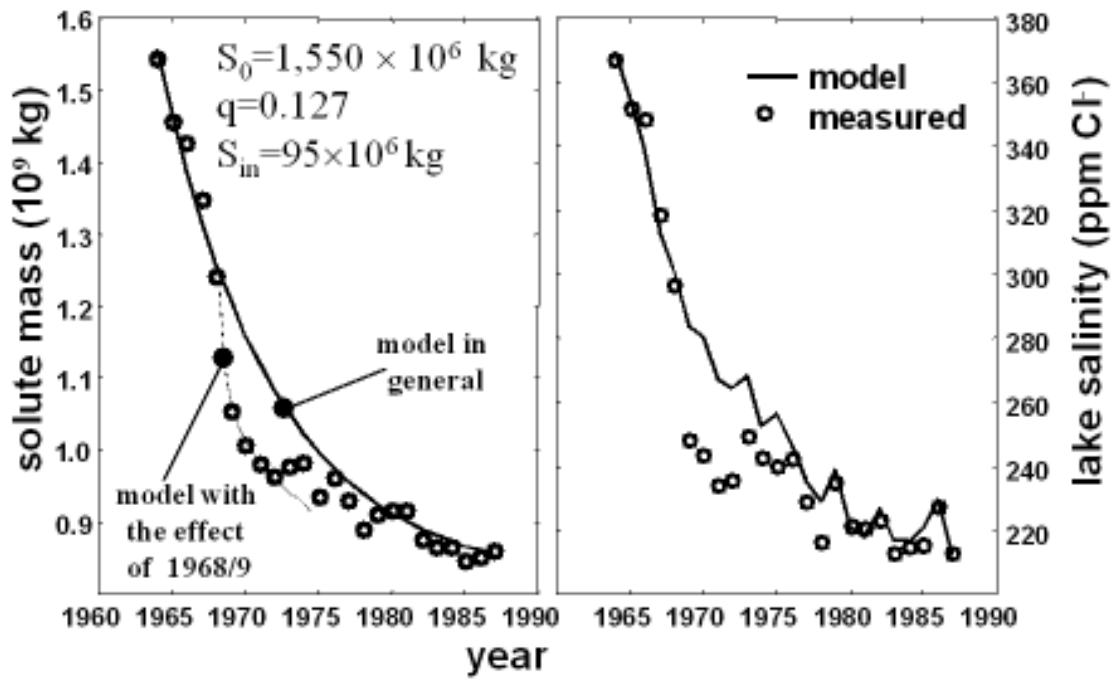


Figure # 5

תרשים 5. דעיכה אקספוננציאלית של אוגר המלח באגם (שמאל) והשינוי במליחותו (ימין) בין השנים 1964 ל-1987 כתוצאה מהקטנת שטף המלחים הנכנס מ-145,000 ל-95,000 טון/שנה.

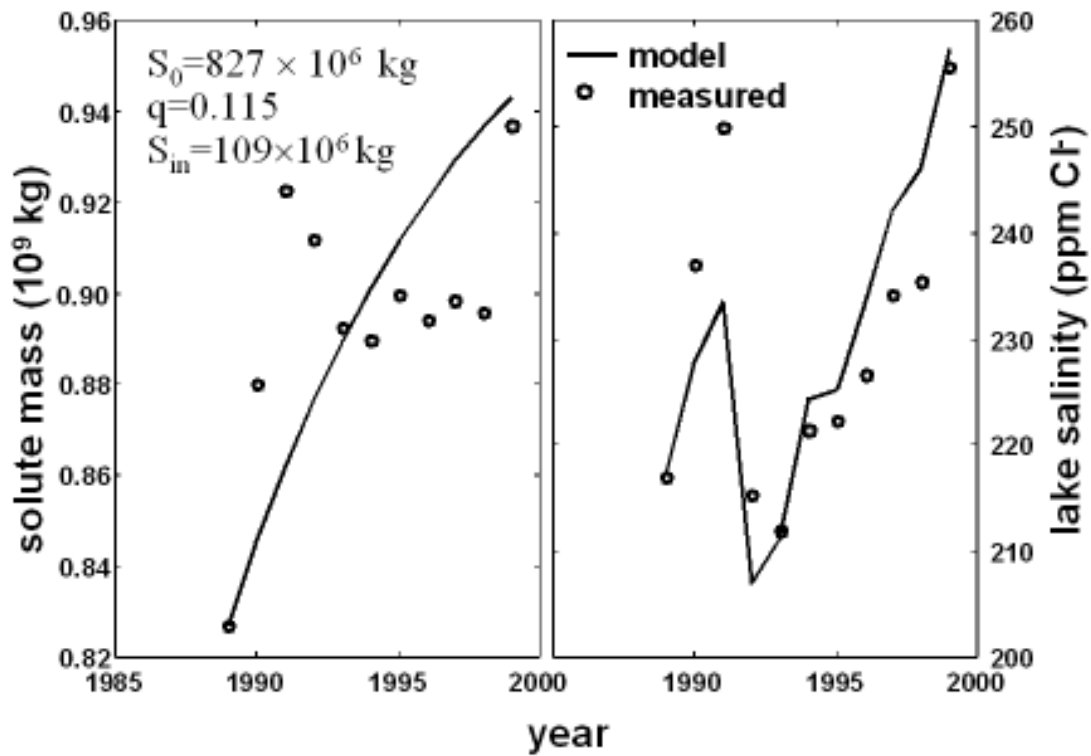


Figure # 6

תרשים 6. עליית אוגר המלח באגם (שמאל) והעלייה במליחות (ימין) בין השנים 1987 ל- 1999 כתוצאה מגידול בשטף המלחים הנכנס מ- 95,000 ל- 109,000 טון/שנה.

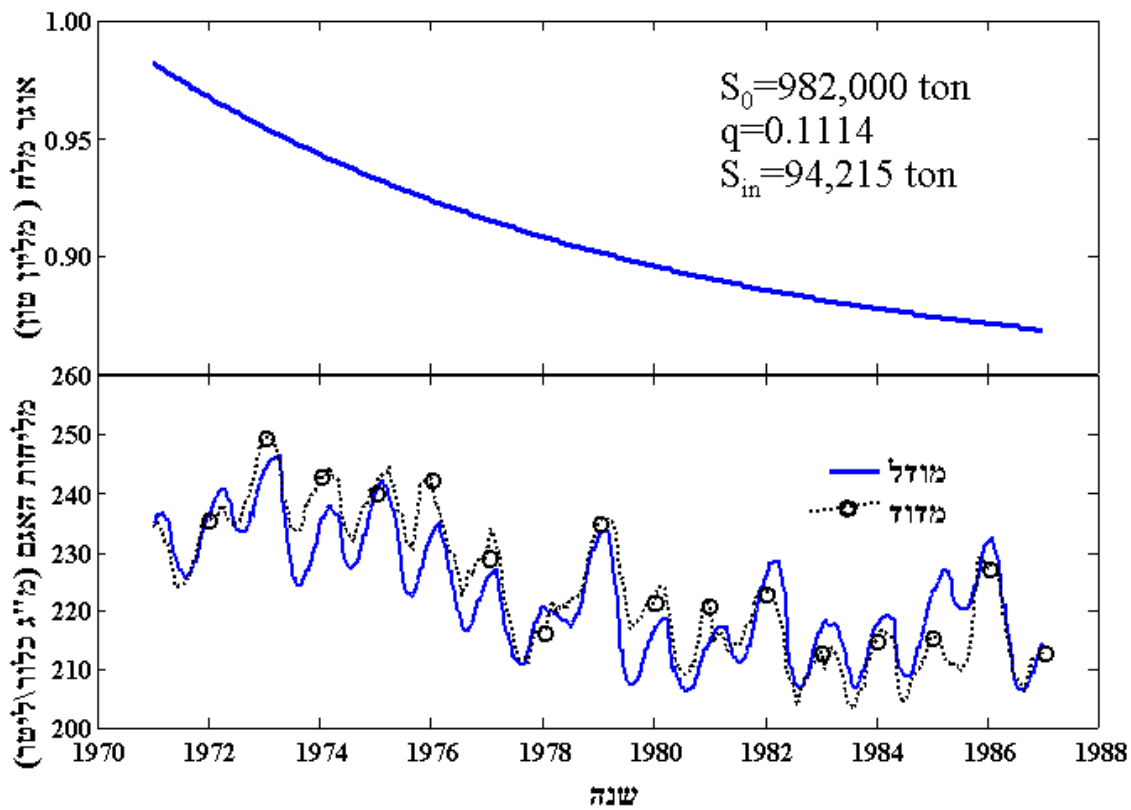


Figure # 7

תרשים 7. למעלה-השינויים הצפויים באוגר המלח כפי שחושבו על פי המודל לשנים 1971 עד 1987 . למטה-השינויים במליחות כפי שחושבו ע"י חלוקת אוגר המלח בנפח האגם בכל חודש, לעומת המליחות שנמדדה בפועל.

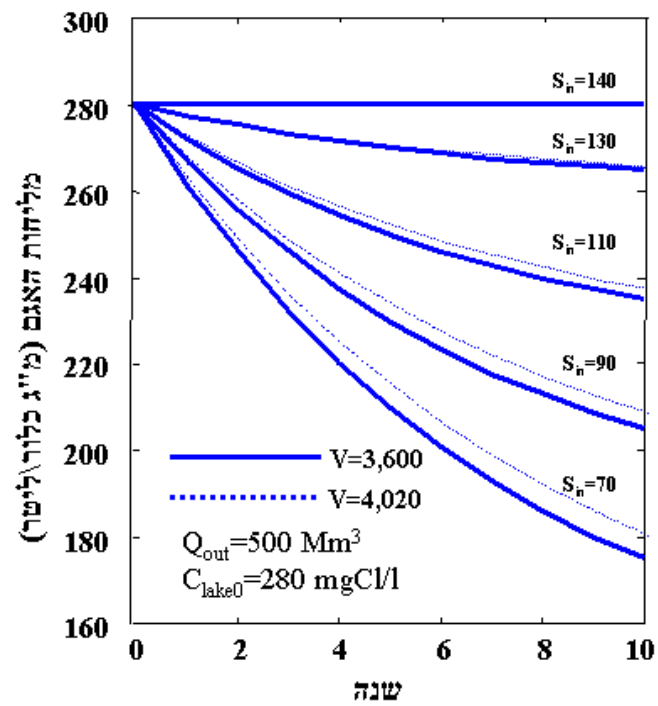


Figure # 8

תרשים 8. תחזית שינוי במליחות הכנרת ל-10 שנים כתוצאה משינוי בכמות המלחים הנכנסת לאגם.

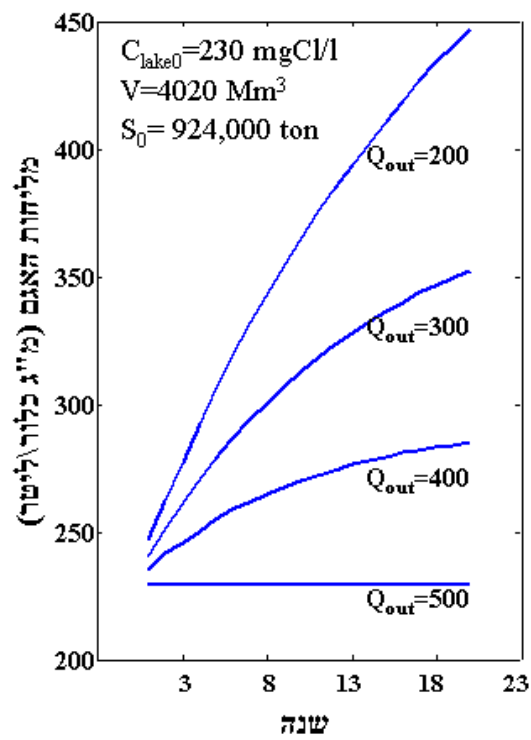


Figure # 9

תרשים 9. תחזית שינוי במליחות הכנרת ל-20 שנים כתוצאה משינוי בספיקת המים העוברת באגם.