



27/01/2008

לכבוד: פרופ' אורי שני, מנהל רשות המים

מאת: דר' אלון רימר, המעבדה לחקר הכנרת, חקר ימים ואגמים בע"מ

## **הנדון: חוות דעת בנושא מליחות הכנרת במפלסים נמוכים**

בעבודותיי במקורות (ספטמבר 1995 - מאי 1998), כיועץ עצמאי (1998 - 2001), ובמעבדה לחקר הכנרת (משנת 2001) עסקתי בחישוב מאזני מים ומלח, בחקר מליחות האגם, בקשרים הפיסיקליים שבין מפלס המים למליחות, במנגנון שפיעת המעיינות המלוחים, ובמודלים שמתארים את השתנות המליחות כתוצאה מתנאים משתנים. במענה לפנייתך מה- 20 לינואר 2008 להלן חוות דעתי בנדון.

### **1. השפעת הורדת מפלס הכנרת על המליחות בטווח הקצר**

#### **1.1. מנגנון המלחת הכנרת**

בעבר ייחסו את ההבדלים במשטר המליחות של מעיינות החוף לשני מנגנוני המלחה שונים: מודל "הפוטנציאל העצמי" (self potential) לעומת "מודל השטיפה" (leaching). ניתן לראות הסבר מפורט כולל מראי מקום לנושא מנגנוני ההמלחה השונים אצל Rimmer and Gal 2003 ואצל Gvirtzman et al, 1997.

ההשלכות המעשיות הכרוכות בקבלת מודל אחד ודחייתו של האחר היו מרחיקות לכת. ע"פ מודל "הפוטנציאל העצמי" הנמכת מפלס הכנרת אל מתחת לקו מינימום בלתי ידוע, עלולה הייתה לתרום להגדלת הפרש העומד בין התמלחת לבין האגם עד להגעה ל- "מפל הידראולי קריטי", ופריצת תמלחות מסיבית, שתוצאתה שינויים קיצוניים במליחות האגם. על פי אותו מודל תוצאה שלילית דומה תיגרם גם בגלל שאיבת מי תהום באקוויפרים שבהרי הגליל המזרחי. מודל הפוטנציאל העצמי היה מקובל על מקבלי ההחלטות במשך המים עד אמצע שנות ה-90 וכתוצאה מכך נשללה כל אפשרות להוריד את מפלס האגם, ולנצל מי קידוחים במעלה (איזור כלנית למשל). לעומת זאת ע"פ "מודל השטיפה" להנמכת מפלס הכנרת לבדה אין השפעה ממשית על מליחותה, ושיאיבה בהרי הגליל המזרחי תגרום דווקא להמתקת המעיינות ולכן יש לחייבה.

#### **1.2. מודל "הפוטנציאל העצמי"**

ע"פ מיטב הבנתי, אין הוכחה מדעית לקיום מודל "הפוטנציאל העצמי" כפי שתואר לעיל, ואין הוכחות לאפשרות של פריצת תמלחות מהירה ובלתי נשלטת, שהייתה המוקד לחשש הגדול להוריד את מפלס האגם מתחת לרום נתון. גם בשנים 1999 עד 2003 שבהן היה מפלס האגם נמוך בהרבה מ- 213 מ' לא נמצאו עדויות על הגדלה של שפיעת מלח לאגם. במהלך השנים נאספו עדויות חלקיות ע"י יחידת אגן ההיקוות של מקורות (ברגר ושאו, 2003) כי הורדת המפלס לתקופה ממושכת (שנים ספורות ומעלה) עלולה לגרום להגדלת ריכוז המלח במעיינות, אך עדויות אלה לא עובדו לכלל הוכחות מוצקות על שינויים במליחות הכנרת. מודלים מפורטים (Abbo et al. 2003) של מנגנון ההמלחה הראו כי קיים רכיב תורם מלח עיקרי למעיינות שהכוח המניע שלו איננו ידוע, אך גם במקרה זה לא נמצאה זיקה חד משמעית בין כניסת מלח עודפת לבין מפלס האגם בטווחי זמן קצרים.

#### **1.3. מודל "השטיפה"**

לעומת זאת, קיימות מספר עבודות מחקר וממצאים הידרולוגיים הנותנים תוקף לעיקרי הרעיונות של "מודל השטיפה": א. עיבוד נתוני הניטור החודשי של מליחות האגם על פני למעלה מ- 30 שנה

(Rimmer and Gal 2003) מעיד באופן מובהק כי במפלסי כנרת נמוכים, שפיעת המלח לאגם דווקא נמוכה מהרגיל. ב. מודל ההידרולוגי דו-מימדי אנכי (Gvirtzman et al, 1997a), המבוסס על ניתוח מפורט של ההידרוגיאולוגיה של אגן הכנרת מראה כי קיימת הצדקה גיאואידרולוגית לקבלת מודל השטיפה. ג. ניתוח פיזיקאלי מפורט של מנגנוני השפיעה של מעיינות החוף המערבי מסביר את העקרונות הפיזיקליים של מנגנוני ההמלחה (Rimmer 2000, Rimmer et al, 1999), ומצדד אף הוא בעקרונות הפיזיקליים של מודל השטיפה. ד. מודל פשוט המבוסס על ניתוח שנתי של מאזני מים ומלח באגם (Rimmer 2003) מראה באופן מובהק כי מליחות הכנרת גדלה במפלסים נמוכים בעיקר כתוצאה ממיעוט כניסות של מים מתוקים (כ- 20 עד 40 מ"ג כלור לליטר), ולא כתוצאה מהגדלה בכמות המים המלוחים (מעל 700 מ"ג כלור לליטר).

#### 1.4. מסקנות

לפיכך אני מצדד בטענה שלהנמכת מפלס המינימום לא תהיינה השלכות יוצאות דופן על מליחות הכנרת. לדעתי, הנמכת המפלס מקו המינימום הנוכחי (213- מ' תחת פני הים) ל-214- מ' איננה שונה במהותה מהורדת המפלס מ-212- מ' ל-213- מ' בכל ההיבטים הקשורים למליחות הכנרת. יתר על כן, הורדת מפלס האגם אל מתחת לקו המינימום הנוכחי תביא את האגם למצב תפעולי שהיה כבר כמוהו רק 5 שנים קודם לכן, ואפשר לפיכך להניח במידה רבה של בטחון שאין בכך סכנה למליחות האגם בטווח הקצר.

### 2. שינויים ארוכי טווח במליחות הכנרת

נושא שזוכה להרבה פחות התעניינות והתייחסות, הן בקהילייה המדעית והן בין אנשי המים בארץ הוא שינויים ארוכי טווח במליחות הכנרת. הצלחת מפעל המוביל המלוח בשנות ה-60 יצרה את הרושם כי על מנת לשמור על מליחות הכנרת ברמתה הנוכחית, ואולי אף להפחית אותה, ניתן פשוט להמשיך ולהטות מקורות מלוחים נוספים (לאחרונה מממנת רשות המים מפעל הטיה כזה באמצעות בניית כיפת איסוף מים מלוחים מעל חלק ממעיינות פוליה, בהנחה שהטיה נוספת כזו תפחית את מליחות הכנרת באופן ניכר). בשנים האחרונות מצאתי לנכון לבחון באמצעות מודלים כיצד תשתנה מליחות הכנרת הן כתוצאה משינויים במערכת ההידרולוגית המקומית (למשל הפחתה במים שנכנסים לכנרת, ולאו שינויים בהתאדות), והן כתוצאה ממדיניות תפעול (למשל הפחתת ריכוז המלח במעיינות, או הטיית מעיינות נוספים). ראוי שהטיפול בנושא זה יקבל משנה תוקף כבר עכשיו, כאשר הבעיה, שעליה אני מתכוון להצביע בהמשך היא קטנה, ולא בעתיד הרחוק כאשר היא צוברת תאוצה ואיננה ברת טיפול (לצורך הדוגמה, ירידת מפלס ים המלח נמשכת כבר למעלה מ-40 שנה, ובכל זאת אנו טורחים לעסוק בנושא זה רק בעשור האחרון, כשהמצב הוא בעייתי מאד).

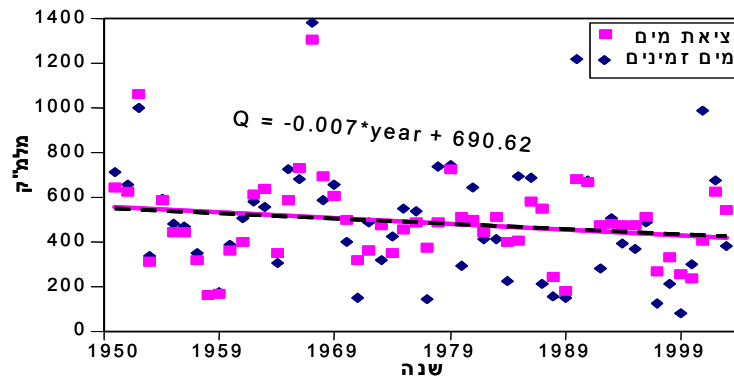
#### 2.1. מודל לבחינת שינויים במליחות הכנרת

מודל שפיתחתי (Rimmer 2003) נועד לבחון את השתנות מליחות הכנרת על בסיס שנתי ורב שנתי, בהינתן הערכות לגבי המשטר ההידרולוגי והתפעולי באגם. בעזרת המודל ניתן למשל לבחון את שינויי המליחות הצפויים כמה שנים קדימה כתוצאה מהתרחישים הבאים: א. מצב המליחות לאורך שנים כאשר מפלס האגם 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 השינוי במליחות כתוצאה מכך. ג. כיצד תשתנה מליחות הכנרת אם תופעל תכנית "עוקף כנרת". ד. כיצד משפיעה ותשפיע הפחתה בכמויות המים הנכנסות לאגם מהירדן ומנחלי רמת הגולן והגליל על מליחות הכנרת. המודל פורסם לראשונה בשנת 2003 כמאמר בעיתונות המקצועית. לאחר מכן עבר שינויים מהותיים, שהפכו אותו ליישומי לטווחי זמן של שנה ויותר, וכיום הוא משמש את השרות ההידרולוגי (רימר ולצי'נסקי 2007) לצורך מתן הערכות על השינויים הצפויים במליחות הכנרת. המודל יושם בהצלחה יתרה גם לאגם Biwa ביפן שם הפעלתו עזרה לזהות את הגורמים לעליית מליחות האגם במהלך 25 השנים האחרונות. עבודה זו בוצעה ופורסמה (Rimmer et al. 2006) בשיתוף פעולה עם פרופ' מישיו קומאגאי, המנהל המדעי של מכון המחקר של אגם BIWA.

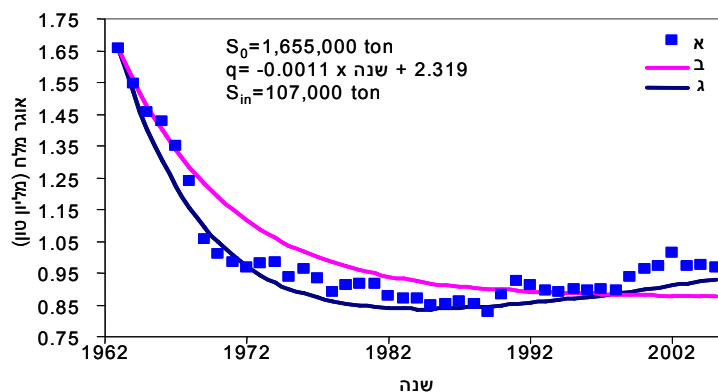
## 2.2. תוצאות נתוני מליחות הכנרת בעבר

על מנת להסביר את התופעות העתידיות שאותן אני צופה לגבי מליחות הכנרת בשנים הבאות, נבחן להלן את השינויים שחלו במליחות הכנרת עבור רצף הזמן שעבר בין שנת 1965 ל-2004. מחד, הוכנס למודל השינוי בכניסת המלח לאגם כפונקציה מדרגה שחלה בשנת 1965, כאשר בתוך פרק זמן קצר הופחתה כמות המלח הנכנסת הממוצעת מ-160,000 טון כלוריד לשנה לכ-107,000 טון בממוצע רב שנתי בשנים 1965-2004 כתוצאה מהפעלת המוביל המלוח. מאידך הוזן המודל בנתונים המתארים את הירידה ההדרגתית בכמויות המים ששטפו את הכנרת בממוצע רב שנתי. עיון בנתוני מים זמינים וצריכה שנתיים מהכנרת (תרשים 1) מעלה כי קיימת הפחתה ממוצעת של למעלה מ-2 מלמ"ק בשנה, מ-550 מלמ"ק בשנות החמישים של המאה הקודמת, לכ-400 מלמ"ק כיום. הפחתה זו מאפשרת לנו לבחון במקביל את שני האפקטים: הפחתה של כניסת המלח כפונקציה מדרגה בשנת 1965, ובמקביל הפחתה ליניארית בזמן כמות המים השנתית ששוטפת את הכנרת.

בתרשים 2 מוצגות שתי תוצאות שמתארות את השינוי בכמות המלח באגם בשנים אלה. האחת היא הפחתה האקספוננציאלית באוגר המלח (עקום ב') שנגרמת בגלל הפחתת מדרגה בכניסת המלח, כאשר הנחנו שכניסות המים לאגם הן קבועות בזמן. השנייה, והחשובה יותר לעניינינו (עקום ג') היא השינוי באוגר המלח שנגרם במשותף הן ע"י הפחתת מדרגה בכמות המלח הנכנסת, והן ע"י השינוי הליניארי של הספיקות הנכנסות בזמן. ניתן להבחין כי במקרה השני החל מאמצע שנות ה-80 החלה למעשה עלייה מתונה במליחות הכנרת כתוצאה מההפחתה המתמשכת של כמות המים השנתית ששוטפת את האגם. למעשה ניתן לומר שבשנים אלה גוברת ההפחתה ההדרגתית של כמויות המים הנכנסות לאגם על השפעת הטיית המעיינות משנות הששים, ולמעשה האגם החל בתהליך איטי של המלחה שסיבתו העיקרית – ההפחתה הנמשכת בכמויות המים שמגיעות לכנרת.



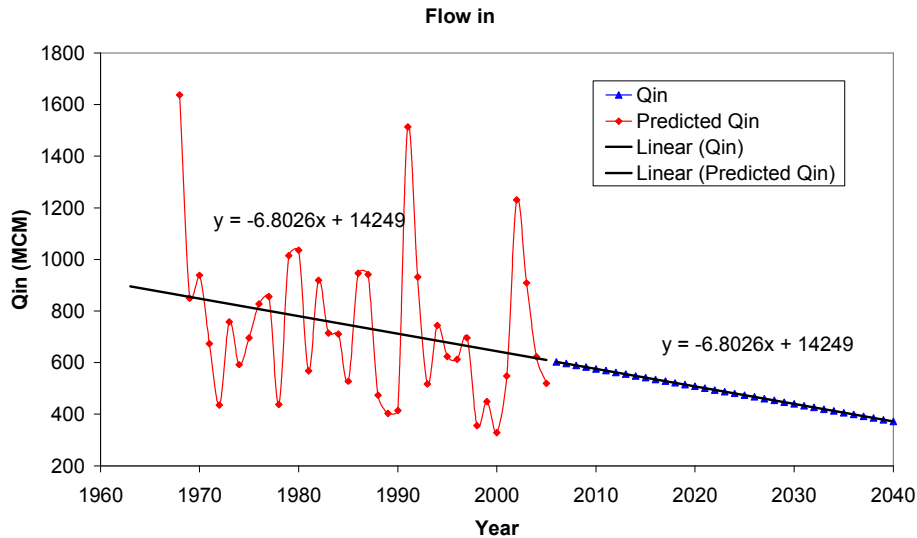
תרשים 1. הפחתה במים זמינים ומים יוצאים מהכנרת במהלך 55 השנים האחרונות. נתונים ע"פ השרות ההידרולוגי, ומאזני המים השנתיים של יחידת אגן ההיקוות של מקורות.



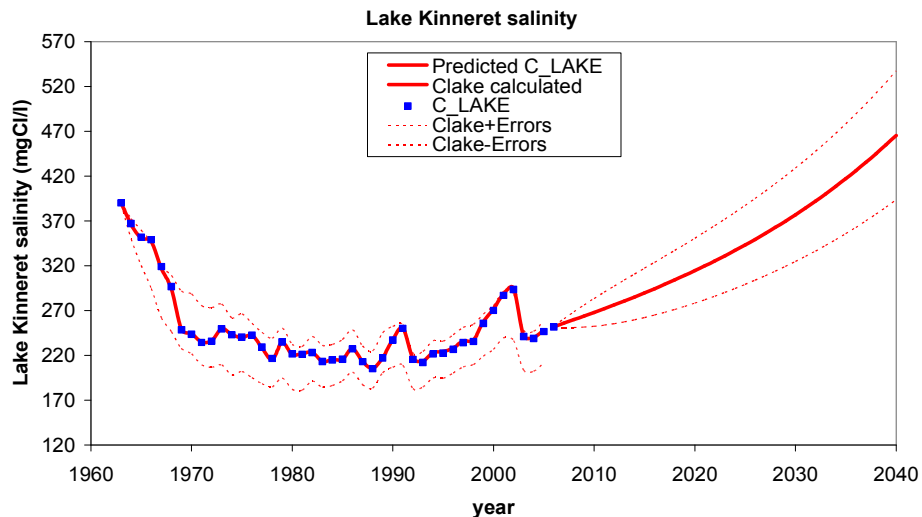
תרשים 2. שינוי כמות המלח בכנרת בין השנים 1963 ל-2005. א. תוצאות מדודות. ב. אם נלקחת בחשבון רק הפחתת מדרגה בכניסת המלח. ג. אם נלקחת בחשבון הפחתת מדרגה בכניסת המלח והפחתה ליניארית בכמות המים הנכנסים.

### 2.3. חיזוי מליחות הכנרת בעתיד

בהמשך להשוואה לנתוני העבר שהוצגה לעיל בדקנו כיצד תשתנה המליחות באגם אם תימשך הירידה בכמות המים הממוצעת שנכנסת לאגם, בהנחה שכל שאר המשתנים נשארים קבועים כמקודם. אנו מניחים לפיכך שסדרת המים השנתית הנכנסת לאגם ממשיכה ופוחתת ליניארית עם השנים כהמשך לירידה שנמדדה בין השנים 1969 עד 2006. כמות המים השנתית הנכנסת מופיעה כעת בתרשים 3, והיא המשך לירידה בכמות המים הנכנסת ב-40 השנים האחרונות. תוצאת חיזוי מליחות הכנרת במקרה זה מופיעה בתרשים 4. ניתן לראות כי בתנאים שהכנסנו למודל, צפויה עלייה ניכרת של מליחות הכנרת עד לערך של כ- 470 מג"ל עד שנת 2040 אם כמות המים הנכנסת תמשיך לפחות בקצב הנוכחי.



תרשים 3. סדרת מים נכנסים לאגם, שבממוצע הולכת ופוחתת ליניארית עם השנים. קצב הירידה נקבע כהמשך לירידה שנמדדה בין השנים 1969 עד 2006.



תרשים 4. תוצאת חיזוי מליחות הכנרת עבור תרחיש הפחתת כניסות המים לאגם. אם כמות המים הנכנסת תמשיך לפחות בקצב הנוכחי, צפויה עלייה ניכרת של מליחות הכנרת עד לערך של כ- 470 מג"ל עד שנת 2040.

## 2.4. מסקנות

מליחות הכנרת נקבעת ע"י המאזן שבין כניסות מים מתוקים מהירדן ומנחלי רמת הגולן והגליל המזרחי, לבין כניסות המים המלוחים מן המעינות. לצורך שמירת מליחות קבועה, או הפחתתה יש צורך מחד למנוע כניסת מים מלוחים (דפוס פעולה שהוקדשו לו עד כה משאבים רבים), ומאידך למנוע את ההפחתה המתמשכת בכניסות המים "המתוקים" לכנרת (**פעולות שעד כה זכו לסדר עדיפויות נמוך ביותר**). מספר המלצות אופרטיביות מוצגות להלן.

## 3. מה לעשות?

לאחרונה נשמעות דעות שלפיהן במצב הנוכחי שבו התפלה הולכת ותופסת מקום מרכזי במשק המים הישראלי, חשיבות שמירת מליחות הכנרת פוחתת. בשלב ראשון יש לפיכך לקבוע **האם מדיניות שמירת המליחות והפחתתה עדיין רלוונטית למשק המים הישראלי בעתיד**. אם התשובה לשאלה זו חיובית אזי הסעיפים הבאים רלוונטיים אף הם. לפי מיטב הבנתי תהליך ארוך טווח של המלחת הכנרת במשטר התפעול הנוכחי הוא ודאי. כדאי לשים נושא זה על סדר היום כבר עכשיו, ולנקוט בפעולות שתוכלנה לצמצם את הנזקים העתידיים. להלן מספר נושאים שיש לטפל בהם בהקשר לכך.

1. כבר שנים רבות יעילות המוביל המלוח (ה.מ.מ.) להטיית מים מלוחים הולכת ופוחתת. אפשר לראות זאת כאשר משווים את כמויות המלח שנכנסות לכנרת מאזור הטיית מעיינות נור. כאשר ישנה תקלה בהטיית מי המעינות מוזרמות כמויות אדירות של מים מלוחים לכנרת (דוגמה לכך ראינו בסיוור שערכנו במעינות נור ב-20 לינואר). הזרמה כזו מייטרת את המאמצים להמשיך ולהטות מעיינות מלוחים נוספים. למעשה הצעד הראשון שיש לבצע הוא פשוט **לדאוג לתפעול רציף של ה.מ.מ. ללא תקלות**. ניתן להוכיח כי פעולה זו יעילה ועדיפה בהרבה על כל שאר הפעולות המבוצעות כיום, שמטרתן הורדת מליחות הכנרת.

2. הפחתת כמות המים שנכנסת לכנרת בעשורים האחרונים איננה תוצאת כוח עליון. זהו תהליך הכולל בתוכו את הרכיבים הבאים: א. הגדלת צריכת מים ופיתוח מערכות אגירה ברמת הגולן; ב. המשך פיתוח מערכות ניצול מים בעמק החולה ובגליל המזרחי; ג. הפחתה כלשהי בכמות הגשם בעיקר ברמת הגולן (Givati and Rozenfeld 2007). לאור האמור לעיל יש לזכור כי המשמעות של המשך פיתוח מקורות המים באגן הירדן העליון איננה רק הפחתה בכמות המים בכנרת, אלא גם הגדלה במליחות האגם. מוצע לפיכך לבחון את כדאיות כל ההיבטים הקשורים לכך, למשל – האם לאשר הפקה נוספת ע"י חברת מקורות באזור החולה (עינן), האם יש אפשרות להתערב בהחלטות החקלאים והעדפתם לטפח גידולים שהם צרכני מים גדולים (מטעים) בעמק החולה, ועוד.

3. כבר שנים רבות מדובר על כך שיש אי ודאות רבה לגבי כמויות המים הטבעיות באגן הירדן. בנייתו נתוני מים מקיף שנעשה בעבודות מהזמן האחרון (למשל Rimmer and Salinger. 2006) ניתן להראות כי כאשר משלבים את נתוני הזרימה המדודים במקורות הירדן (השרות ההידרולוגי) עם נתוני הצריכות הרשומות (אגף הצריכה של רשות המים) קיימים פערים בלתי מוסברים במאזני המים. חוסר הודאות יוצר אי סדר ומאפשר ניצול בלתי מבוקר של משאבי מים. במצב משק המים הישראלי, כאשר כל מלמ"ק נספר, יש להשתמש בכלים ייעודיים ואו לייצר כלים חישוביים סטנדרטיים, כך שניתן יהיה לפקח ולבחון את מאזני המים באופן מדויק.

4. יש צורך להמשיך ולשאוב מים באקוויפרים של הגליל המזרחי, ובמקביל להמשיך ולנטר את שפיעת המעינות המלוחים. פעולת הניטור מבוצעת כבר שנים רבות, תחילה ע"י תה"ל וב-20 השנים האחרונות ע"י יחידת אגן ההיקוות של מקורות.

5. לסיום – לעתים קרובות קבלת החלטות בנושא מליחות הכנרת ממודרת, והחלטות תפעוליות מתקבלות ללא מעורבות גורמים שזהו תחום התמחותם. נראה לי שהגיע הזמן להתחיל לפעול בנושא זה מתוך ראייה ממלכתית, תוך שיתוף הדדי של כל הגורמים שביכולתם לתרום לנושא חשוב זה.

**4. ספרות**

- ברגר ד. ומ. שאו, 2003. מאזני המים, המלח והאנרגיה של הכינרת לשנת 2001/02. דו"ח שנתי של יחידת אגן ההיקוות, מקורות, חבל ירדן.
- רימר א. וי. לצ'ינסקי, 2007. מודל לתפוקה וריכוז מלח באגם הכנרת חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ, המעבדה לחקר הכנרת. דו"ח סופי מוגש לרשות הממשלתית למים וביוב T13/2007
- Givati A. and Rosenfeld D. 2007. Possible impacts of anthropogenic aerosols on water resources of the Jordan River and the Sea of Galilee. *Water Resources Research* 43(10): W10419.
- Gvirtzman, H., G. Garven, and G. Gvirtzman. 1997: Hydrogeological modeling of the saline hot springs at the Sea of Galilee, Israel. *Water Resour. Res.* 33, no. 5:913-926.
- Rimmer, A., S. Hurwitz and H. Gvirtzman, 1999. Spatial and Temporal Characteristics of Saline Springs: Sea of Galilee, Israel. *GroundWater* Vol. 37, No. 5 : 663-673.
- Rimmer, A., 2000. The Influence of lake level on the discharge of the Kinneret saline springs. *Advances in Limnology*. 55 : 55-67.
- Rimmer, A. 2003. The Mechanism of Lake Kinneret Salinization as a Linear Reservoir. *Journal of Hydrology*, 281/3 pp. 177-190.
- Abbo, H., U. Shavit, D. Markel, and A. Rimmer, 2003. A Numerical Study on the Influence of Fractured Regions on Lake/Groundwater Interaction; the Lake Kinneret Case. *Journal of Hydrology*, 283/1-4 pp. 225-243.
- Rimmer, A. and G. Gal, 2003. The saline springs in the Solute and Water Balance of Lake Kinneret, Israel. *Journal of Hydrology*, 284/1-4 pp. 228-243.
- Rimmer A., M. Boger, Y. Aota and M. Kumagai, 2006. A Lake as a Natural Integrator of Linear Processes: Application to Lake Kinneret (Israel) and Lake Biwa (Japan). *Journal of Hydrology*, 319/1-4 pp. 163-175.
- Rimmer A., Y. Salingar. 2006. Modelling precipitation-streamflow processes in Karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel. *Journal of Hydrology* 331/3-4 pp 524-542.