

על הקשר שבין שכוב תרמי לשכוב כימי עונתי בכנרת

אלון רימר, מים והשקיה 451 עמ' 16-21

המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון, ת.ד. 447 מגזל 14950 .alon@ocean.org.il

1. הקדמה

במהלך חודשי הקיץ, חימום פני הכנרת ע"י קרני השמש גורם להיווצרות שכבת מים חמים וקלים בעובי של מספר מטרים (אפילימניון, epilimnion) המכסה שכבה של מים קרים וכבדים יותר (היפולימניון, hypolimnion). האיזור המפריד בין שתי השכבות (מטאלימניון, metalimnion) מצטיין במפל (gradient) טמפרטורה גדול, והמשטח שבו מפל הטמפרטורה הוא מקסימלי נקרא תרמוקלינה (thermocline). במהלך עונתי רגיל התרמוקלינה נוצרת בגלל גידול הדרגתי של קרינה וחום בחודשי האביב, והיא הולכת ומעמיקה במשך חודשי הקיץ והסתיו. בתחילת החורף משתווה הטמפרטורה בשתי השכבות, וכתוצאה מכך בחודשי החורף חל ערבוב מלא של האגם, וחוזר חלילה.

באגם שבו קיימת תופעת שכוב תרמי עונתי, השכבה העליונה שונה מהשכבה התחתונה גם מבחינת ההרכב ההידרוכימי. לשינויים העונתיים שחלים בכמויות וריכוזים של רכיבים כימיים בשתי השכבות יש חשיבות רבה בקביעת התנהגותה של המערכת הביולוגית של האגם, ובקביעת איכות המים. לפיכך תאור הדינמיקה השולטת על תהליכי הערבוב המתקיימים בגוף המים חיוני להבנת המערכת ככלל.

שכוב תרמי עונתי גורם לכך שהערבוב בין שתי שכבות המים הוא מוגבל, ולכן גם ההרכב ההידרוכימי של השכבה העליונה משתנה בזמן השכוב באופן שונה מזה של השכבה התחתונה. חלוקת גוף המים לשתי שכבות מעלה שתי שאלות עיקריות:

1. **באיזו שכבה מתערבבות הספיקות החיצוניות עם המים באגם?** : לאורך חוף הכנרת, ובקרקעית האגם נובעים מעיינות מלוחים, שתורמים כ-90% ממליחותו, ואילו כניסת המים העיקרית היא מנהר הירדן ומנחלי רמת הגולן והגליל (תרשים 1). על פי המיקום הגיאוגרפי של המעיינות הידועים והנחלים בשולי האגם, בתקופת השכוב הם מעשירים את השכבה העליונה. עם זאת, ידוע (Hurwitz et al. 1999) כי בעומק של מספר מטרים מתחת לקרקעית האגם כלואים מים במליחות גבוהה ביותר המעשירים את מי האגם במלח בתהליך של דיפוזיה. קיימות אמנם הערכות (Nishri et al. 2003) כי מידת העשרה זו זניחה יחסית לשפיעת המעיינות המלוחים בשולי האגם, אך אלה ברובן הערכות שהתבססו על מדידות נקודתיות ולא על שיקולים מאזניים של מים ומלח. נציין גם שצפיפות מי המעיינות המלוחים גבוהה מזו של מי הכנרת, ולפיכך תתכן גם אפשרות שמי המעיינות המלוחים לאחר נביעתם גולשים על קרקעית האגם, ומתערבבים דווקא בשכבה התחתונה של גוף המים.

2. **מה הוא שיעור הערבוב העונתי בין שכבת המים העליונה לתחתונה?** : עם תחילת השכוב התרמי מתחילה עלייה בריכוז האמוניום והפוספט (נוטריאנטים) בהיפולימניון – שניהם כתוצאה מפירוק חומר אורגני, ותרומת סדימנטים מקרקעית האגם (Eckert et al. 2002). באותו זמן ריכוז הנוטריאנטים בשכבת האפילימניון הולך ופוחת. התוצאה היא שני גופי מים בהרכב הידרוכימי שונה, המופרדים ביניהם ע"י מישור התרמוקלינה. במקביל, פעילות ביולוגית של אצות ומיקרואורגניזמים בשכבה העליונה צורכת מחד את אור השמש, ומאידיך נוטריאנטים, שמקורם העיקרי בתהליכי הערבוב המוגבלים עם השכבה התחתונה. מכאן שלתהליך מעבר נוטריאנטים משכבה זו לשכבה העליונה חשיבות רבה בקביעת התנהגותה של המערכת הביולוגית של האגם, ובקביעת איכות המים.

לצורך בירור שתי השאלות ועל מנת להעריך כמותית את תהליכי הערבוב בזמן, מוצע להשתמש במודל שימור מסת המים ושימור מסה של רכיב כימי, שבו יבואו לידי ביטוי כניסות המים מהירדן ומהנחלים, מהמעיינות המלוחים, וכן ישתתף רכיב הערבוב שבין שתי שכבות המים. על מנת שניתן יהיה לבצע שימור מסה מדויק ולאמת את תוצאות המודל בערכים מדודים, יש לבחור ברכיב כימי המצטיין במספר תכונות: א. מדידת הרכיב היא זולה וקלה. ב. כניסות ויציאות לאגם וממנו ("מקורות" ו"בורות") ידועים וניתנים לכימות. ג. הוא איננו משתתף בפעילות הכימית והביולוגית שמתרחשת באגם (אינרטי). ד. ניתן להבחין במדידה בין ריכוזו באפילימניון ובהיפולימניון.

יון הכלור (Cl⁻) עונה על כל הדרישות שצוינו לעיל. ריכוזו נמדד דרך קבע הן בפרופיל גוף המים והן בספיקות הנכנסות לאגם, והוא מייצג את המליחות, ואת התנהגות כלל הרכיבים המשמרים באגם, וההבדלים בין ריכוז ה- Cl בשכבה העליונה והתחתונה של הכנרת ניתנים למדידה מדויקת (תרשים 2). בכנרת, שמליחותה כיום כ- 250 מ"ג Cl לליטר ניתן להבחין כי בדרך כלל ריכוז ה- Cl בשכבה העליונה גבוה יותר מהתחתונה בתקופת השכוב (תרשים 3). הבנת הדינמיקה השולטת על שינוי ריכוז ה- Cl בפרופיל המים, והיכולת לייצג אותה באמצעות מודל, מאפשרים הערכה כמותית הן של תהליכי הערבוב המתקיימים בגוף המים, והן של השפעת השטפים החיצוניים.

2. המודל

2.1 הנחות

סוג המודל שבו נשתמש ידוע בניתוח מערכות כמודל תאים (Cell Model), השייך למשפחה גדולה יותר של מודלים בשם הכללי קלט – פלט (Input Output Models). מודלים מסוג זה ממירים קלט לפלט באמצעות "מערכת" (System) של משוואות מעבר מתמטיות ומספר מצומצם של פרמטרים (Lumped parameters).

במודל הנוכחי ה"קלט" הוא ספיקות מים ומלח נכנסות ויוצאות מהאגם, שינויי נפח האגם, ושינויי נפח השכבה העליונה והתחתונה, אותם ניתן לחשב דרך מציאת עומק התרמוקלינה. ה"מערכת" היא סדרת משוואות מתמטיות (ראה משוואות 1 עד 4 בהמשך) המתארות את השינוי בזמן של כמות המים וה- Cl בשתי השכבות, וה"פלט" הוא ריכוז ה- Cl בכל שכבה בנפרד.

אחד השימושים במודלים כאלה הוא זיהוי המערכת (System Identification). כלומר, אם הקלט של המודל ידוע ממדידות, וכך גם הפלט הצפוי, אזי הבעיה שנותרה היא זיהוי והצבה של מערכת משוואות המעבר, וכיול הפרמטרים של מערכת זו. במקרה כזה עלינו להניח כי אנו מבינים את מהות התהליך הפיזיקלי שבין הקלט והפלט, ולתאר את המערכת ע"י סדרת משוואות והנחות המתאימות ביותר למטרתנו. המבחן לנכונות המערכת שתוארו הוא מבחן התוצאה: אם המערכת בנויה על בסיס פיזיקלי הגיוני, ההנחות שבבסיסה הן סבירות, והיא מיטיבה לתאר את תהליך המעבר מנתוני הקלט לנתוני הפלט, אזי תהליך הזיהוי הצליח.

המערכת המוצעת במודל הנוכחי מבוססת על הנחות מסוימות שהנחנו מראש:

1. האגם משוכב תרמית במהלך מרבית חודשי השנה (אפריל עד דצמבר), ובמצב של ערבוב מלא בחודשים ינואר-מרץ. לכן, במהלך תקופת השכוב התרמי מתואר האגם במודל כשני מכלים בעלי נפח משתנה, ואילו בתקופת הערבוב המלא הוא מתואר כמיכל יחיד.

2. **כניסות ויציאות המים (כולל התאדות) והמלח לאגם נעשות דרך השכבה העליונה בלבד.** לפיכך, שינוי חודשי בנפח האפילימניון שווה לסכום כל הכניסות (ירדן, נחלים, מעיינות) פחות כל היציאות (שאיבה, ושחרור מים דרך הסכר), פחות התאדות, ובתוספת כמות המים שעוברת מההיפולימניון לאפילימניון במהלך החודש. לעומת זאת, השינוי חודשי בנפח ההיפולימניון הוא רק רכיב המעבר ממנו לשכבה העליונה. משוואות שימור ה-Cl למעשה זהות למשוואות שימור המים, מלבד רכיב התאדות הנשמט מהן, מאחר והמים המתאדים אינם מכילים Cl, ולפיכך אינם משתתפים במאזן המלח.
3. **בכל שכבה קיים ערבוב מלא (Complete Mixing).** לכן כמות ה-Cl שיוצאת מכל שכבה שווה למכפלת ספיקת המים היוצאת, בריכוז של אותה שכבה.
4. **רכיב הערבוב העיקרי בין השכבות הוא כמות המים העוברת מההיפולימניון לאפילימניון בזמן שהתרמוקלינה מעמיקה.** כל שאר מעברי המים והמלח האפשריים בין השכבות כתוצאה מהבדלי צפיפויות מים מקומיים הם זניחים ביחס לרכיב העיקרי.

2.2 משוואות שימור מסה

תקופת השכוב: המכלים מופרדים ביניהם ע"י משטח אופקי (תרשים 4) – התרמוקלינה, שמחלקת את נפח האגם לשתי שכבות. שימור מסת המים בשתי השכבות מתואר ע"י המשוואה:

$$\begin{aligned} \text{a.} \quad & \frac{\Delta V_1}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out} - E + Q_m \\ \text{b.} \quad & \frac{\Delta V_2}{\Delta t} = -Q_m \end{aligned} \quad (1)$$

ואילו שימור מסת ה-Cl נתון ע"י:

$$\begin{aligned} \text{a.} \quad & \frac{\Delta S_1}{\Delta t} = S_{in} - S_{out} + S_m \\ \text{b.} \quad & \frac{\Delta S_2}{\Delta t} = -S_m \end{aligned} \quad (2)$$

כאשר ΔV_1 ו- ΔV_2 הם שינויי נפח האפילימניון (1) וההיפולימניון (2) במיליון מ"ק (מלמ"ק) בפרק הזמן Δt (חודש) בהתאמה; Q_{in} ו- Q_{out} ספיקת המים הנכנסת והיוצאת מן האגם (מלמ"ק/חודש); E התאדות (מלמ"ק/חודש); Q_m כמות המים העוברת מההיפו- לאפילימניון בזמן שהתרמוקלינה מעמיקה (מלמ"ק/חודש); ΔS_1 ו- ΔS_2 שינויי מסת הכלוריד באפילימניון ובהיפולימניון (טון); S_{in} ו- S_{out} ספיקת ה-Cl שנכנסת ויוצאת מן האגם (טון/חודש), בהתאמה; S_m כמות ה-Cl העוברת מההיפולימניון לאפילימניון בזמן שהתרמוקלינה מעמיקה (טון/חודש); $V=V_1+V_2$ ו- $S=S_1+S_2$ נפח המים ומסת ה-Cl באגם כולו, בהתאמה, כסכום של שתי השכבות. הקשר בין משוואות 1 ו-2 הוא שכמות הכלור בכל שכבה היא מכפלה של ריכוז הכלור C בשכבה בכמות המים, כלומר $S_1=C_1 \times V_1$, $S_2=C_2 \times V_2$. מכאן שפתרון סימולטני של ארבעת המשוואות יאפשר את חישוב של ריכוז ה-Cl הממוצע בכל אחת משתי השכבות (C_1 , C_2) והשוואת התוצאה (הפלט) לערכים מדודים, לשם בדיקת איכות המודל והנחותיו.

ערבוב מלא: משוואות 1 ו-2 מתנוונות לשתי משוואות. משוואת מאזן המים:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out} - E \quad (3)$$

ומשוואת מאזן ה-Cl:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = S_{in} - S_{out} \quad (4)$$

משוואות 3 ו-4 אינן אלא מאזני מים ומלח של האגם, ולכן המודל המוצע בתקופת ערבוב מלא הוא פשוט שחזור של מאזנים אלה.

ניתן לפתור את המודל אחרי הצבת תנאי התחלה, המציינים כי בזמן כלשהו שהוגדר כזמן התחלתי $(t=0)$, נפח האגם הוא V_0 ומסת ה-Cl שבו היא S_0 .

2.3 יישום המודל-הצבה ופתרון

בחינת רכיבי המודל (צד ימין במשוואות 1 ו-2) מגלה כי כולם, למעט Q_m ו- S_m , מציינים כמויות חודשיות של מים ו-Cl שמתקבלות באופן שגרתי בתהליך החישוב של מאזני המים והמלח של הכנרת (Rimmer, and Gal, 2003 ; Mekorot, 1987-2003). במלים אחרות, השינוי החודשי בכמות המלח באגם, ההתאדות החודשית, וכן כניסות ויציאות המים והמלח הם ערכים מדודים וידועים בכל שנה הידרולוגית. על מנת להשלים את נתוני הקלט למודל נותר לנו למצוא את ערכם של הערכים החסרים, וכן את חלוקת האגם לשני נפחים בכל צעד זמן.

כפי שהוגדר לעיל, האופק המפריד בין השכבה העליונה לתחתונה נקבע ע"י הגדרה שיטתית של מיקום התרמוקלינה כמשטח אופקי שבו מפל הטמפרטורה מקסימלי. בפונקציה שפותחה לצורך המודל מקרבים ביטוי מתמטי אמפירי למדידות הטמפרטורה כנגד עומק. הנקודה שבה הנגזרת השנייה של פונקציית הטמפרטורה כנגד העומק מתאפסת ("נקודת הפיתול") הוא מיקום התרמוקלינה Z_t (תרשים 5). ערך זה, יחד עם עקום רום-שטח $A(z)$ של הכנרת מאפשר את חלוקת האגם לשני גופי מים בנפח V_1 ו- V_2 בצורה הטובה ביותר. חישוב של מיקום התרמוקלינה בשני חודשים עוקבים (Z_{t1}, Z_{t2}) מאפשר לחשב את הנפח Q_m שעבר מההיפולימיניון לאפילימיניון במהלך החודש לפי הביטוי (תרשים 6),

והמכפלה $S_m = C_2 \times Q_m$ מתארת את כמות הכלור שעוברת עם כמות המים משכבה לשכבה.

המהלך העונתי המחושב של התרמוקלינה עבור השנים 1991-93 מוצג בתרשים 7. ניתן להבחין כי בחודשי האביב אפריל-מאי עומק התרמוקלינה כ-10 מ' והמיקום איננו יציב כתוצאה מגרדיאנט טמפרטורה קטן יחסית, המושפע ממשבי הרוח על פני האגם. בחודשים יוני-יולי-אוגוסט התרמוקלינה נעה כ-1 מ' לחודש מעומק ~14 מ' עד ~17 מ', ואילו בין ספטמבר לדצמבר מהירות התנועה עולה בהדרגה מ-2 מ' לחודש ל-7 מ' לחודש. ערבוב מלא של האגם מתרחש בדרך כלל כשהתרמוקלינה נמצאת בעומק כ-30 מ'. בדיקת המהלך העונתי של התרמוקלינה בכנרת ע"פ כשלושים וארבע שנים (1969-2003) הוכיחה כי מהלך זה מושפע אך במעט משינויים הידרולוגיים ומשינויי המפלסים הגדולים שעברו על האגם בשנים אלה. (עם זאת, הורדה נוספת ברמות המפלסים של הכנרת עלולה לגרום לשינוי דרסטי בשגרת השיכוב והערבוב באגם, אך נושא זה נמצא מחוץ לתחום המאמר הנוכחי).

לאחר הצבת תנאי התחלה V_0 ו- S_0 והצבת ערכי הקלט המדודים במודל (כניסות ויציאות מים ומלח, שינויי נפח כל שכבה באגם) ניתן לפתור את המודל בדרך נומרית, ולבחון את הפתרונות המתקבלים. אם התוצאה שמתקבלת דומה לערכים שנמדדו בפועל באגם (במקרה הנוכחי ריכוז ה-Cl בשתי השכבות),

אזי ההנחות שלפיהן נבנה המודל הן קבילות ותהליך זיהוי המערכת הצלית. לעומת זאת, חוסר התאמה בין תוצאות המודל לתוצאות המדודות מעיד כי לפחות חלק מהשיקולים בבניית המודל היו שגויים.

3. תוצאות

המודל יושם לאוגר המלח החודשי של הכנרת משנת 1987 עד 2001. נדגים את השימוש בו דרך תאור שינויי ריכוז CI בשתי השכבות בחודשים ינואר עד דצמבר, 1988 (תרשים 8). מסת ה- CI באגם ב-1.1.1988 היתה $S_0=839,000$ טון, כפי שחושבה בתאריך זה מתוך נפח האגם ($V_0=4048.84$ מלמ"ק) ומריכוז ה-CI הממוצע (207.4 מיליגרם כלור לליטר, מגכ"ל). מתאריך זה ועד ל-1 במרץ 1988 חושבה כמות המלח באגם וריכוזו החודשי הממוצע באמצעות משוואות 3 ו-4, ע"י הצבת ערכים ידועים של כניסות ויציאות מים ומלח לאגם וממנו. צעד הזמן הבא, ב-1 לאפריל 1988, מחושב כבר תוך התייחסות לאגם משוכב, לפיכך, על סמך פרופיל הטמפרטורה באגם נקבע מיקום התרמוקלינה ($Z_t=39.18$ מ') וחושב נפח האפילימניון ($V_1=1412.94$ מלמ"ק) וההיפולימניון ($V_2=2898.82$ מלמ"ק) מתוך עקום רום-נפח המאפיין של הכנרת. לשתי השכבות הוצבה מליחות זהה כפי שהתקבלה מהמודל לחודש זה (199.07 מגכ"ל); מסת המלח בכל שכבה ($S_1=281,273$; $S_2=577,068$ טון) נקבעה בתחילת תקופת השכוב ומשוואות 1 ו-2 נפתרו סימולטנית. סדרת חישובים כאלה בוצעה עבור 9 צעדי זמן נוספים (עד דצמבר 1988). בכל צעד זמן חושב מחדש מיקום התרמוקלינה, ונפח השכבה העליונה והתחתונה חושב בהתאם, וכן חושבו רכיב המים ורכיב המלח העוברים משכבה לשכבה בכל צעד זמן. האגם עבר ממצב של שכוב לערבוב מלא בחודש דצמבר 1988, כך שריכוז ה- CI בינואר 1989 (204.0 מגכ"ל) התקבל לאחר ערבוב שתי שכבות המים. תהליך חישוב זה חזר על עצמו בכל עונה.

תוצאות המודל נבחנו כנגד מדידות ריכוז CI בכנרת, בעומקים מייצגים 5 מטר (אפילימניון) ו-30 מטר (היפולימניון) בתחנה A במרכז הכנרת - נקודה שבה העומק המקסימלי כ-45 מטר. מהשוואת תוצאות המודל לנתונים המדודים (תרשים 9) ניתן לראות כי קיימת התאמה טובה ביניהם. בין החודשים ינואר למרץ האגם מעורבב היטב ולפיכך אין הבדלי ריכוז CI בין שתי השכבות. מאפיין עיקרי של ריכוז ה-CI במהלך תקופת השכוב התרמי הוא התהליך המחזורי הבא: בחודש אפריל, שבו מתחיל השכוב, מתחילה הפרדה בין ריכוזי ה- CI בשכבות האפילימניון וההיפולימניון. המליחות בשכבה העליונה באגם משתנה כתוצאה מערבוב עם שטפים חיצוניים המעשירים אותה, וכתוצאה משינוי נפח הנגרם ע"י כניסות, יציאות והתאדות. באותו זמן השכבה התחתונה שומרת על ריכוז CI קבוע השווה לריכוז שנקבע בה בסוף תקופת הערבוב בחודש מרץ בקירוב. תהליכים אלה מתקיימים עבור שנים שחונות ושנים גשומות כאחד. לעומת זאת קיימים הבדלים ברורים אחרים בין שנים שחונות לגשומות. באביב של שנים שחונות (1989 עד 1991 למשל, טבלה 1) כניסת המים המתוקים לאגם קטנה יחסית, ולכן המליחות בשכבה העליונה הולכת וגדלה כתוצאה מנביעה קבועה בקירוב של מעיינות מלוחים בשולי האגם מעל לתרמוקלינה. התוצאה היא שהפרש ריכוזי ה- CI בין החלק העליון לחלק התחתון גדלים בהדרגה עד חודש דצמבר, ואז חל ערבוב מלא של האגם, שגורם לקפיצת מדרגה בריכוז בהיפולימניון. בשנים ברוכות גשמים (1992 ו-1993 למשל, טבלה 1) חלה התהפכות של המגמה: שפיעת כמויות גדולות של מים מתוקים בחודשי האביב גורמת להמתקת שכבת המים העליונה בהשוואה לשכבה התחתונה שריכוזה כאמור נשאר יציב. במהלך חודשי הקיץ מגמה זו מתהפכת שוב, משום שכמויות המים המתוקים הנכנסות פוחות במהירות, ולעומתן פוחתת שפיעת המלח בקצב איטי יותר. יחד עם זאת נפחו של האפילימניון הולך וגדל, ולכן המיהול של נפח

המים שבו איטי יותר. תופעות דומות נצפו גם בחורף הגשום של 2002-2003, אך שנה זו אינה כלולה עדיין במודל בשל הצורך להשלים את מאזני המים והמלח.

לאור תוצאות אלה נבחן מחדש את הנחות המודל:

1. תקופת השיכוב התרמי העונתי: בשל רמת ההפרדה של נתוני הקלט, המודל מוגבל לצעדי זמן של חודש, בהם קיימים נתוני קלט מהימנים. המודל נבחן לפיכך עבור יחס 2/10 (שני חודשי ערבוב מלא ועשרה חודשי שיכוב תרמי) ויחס 4/8. בשני המקרים נמצא כי התוצאות פחות טובות. היחס 3/9 מייצג לפיכך בצורה הטובה ביותר את החלוקה השנתית לאגם משוכב מעורבב.

2. כניסות ויציאות המים והמלח לאגם: המודל מראה כי כניסה והעשרה של מים מתוקים או מלוחים דרך ההיפולימניון, מחייבת שינויים בריכוז שכבה זו בזמן השכוב. מאחר ולא נצפו שינויים כאלה, הרי שהעשרת ההיפולימניון ב-CI או המתקה בתקופת השכוב זניחה, או אינה קיימת. תוצאה זו מאשרת מחדש ממצאים ממחקרים אחרים (Hurwitz et al., 1999; Stiller, 1994; Nishri et al., 2003) שהוכיחו זאת בדרכים שונות. זו גם הוכחה שעיקר ערבוב הספיקות החיצוניות עם המים באגם מתבצע בשכבה העליונה.

3. בכל שכבה קיים ערבוב מלא. המודל נבחן גם בהשוואה לריכוזי CI ממוצעים באפילימניון ובהיפולימניון, ונמצא כי אין הבדל עקרוני בין התוצאות והמסקנות בהשוואה לריכוזים בעומק 5 מ' ו-30 מ' המדווחים בעבודה זו.

4. רכיב הערבוב בין השכבות: המודל מוכיח כי רכיב הערבוב העיקרי בין השכבות במהלך עונת השיכוב הוא אותה כמות מים Q_m העוברת מההיפולימניון לאפילימניון בזמן שהתרמוקלינה מעמיקה. ניתן כאמור לכמת רכיב זה בפרק זמן נתון ע"י מדידת פרופיל הטמפרטורה באגם בשני מועדים עוקבים, חישוב מיקום התרמוקלינה בכל פרק זמן, ואינטגרציה של עקום רום-נפח האגם (טבלה 2). חשוב לציין כי צורת הערכה כמותית זו תקפה בעיקר לפרקי זמן של למעלה משבוע. השימוש בשיטה לתקופות קצרות (שעות, או אפילו ימים ספורים) כרוך בשגיאה קונספטואלית. בטווחי זמן קצרים פרופיל הטמפרטורה משתנה בעיקר כתוצאה מנוכחות גלי חום פנימיים באגם (Antenucci, et al.2000) ומדידת מיקום התרמוקלינה אינה מאפשרת הערכה כמותית הגיונית.

המודל מספק אם כן הסבר כמותי לתופעות חילופי המליחות בין השכבה התחתונה לשכבה העליונה בכנרת במהלך חודשי השנה. כמו כן הוא מצליח להראות את הקשר הכמותי שבין הספיקה הנכנסת לאגם, לבין הבדלי המליחות בשתי השכבות. הנחות המודל ותוצאותיו נבחנו והוכחו גם עבור תנאים הידרולוגיים באגם אחר - אגם Biwa ביפן. התוצאות מאשרות מספר הנחות פשוטות לגבי מנגנון הערבוב של יונים משמרים באגם, ולפיכך ניתן להוסיף למודל נדבכים נוספים שיוכלו לסייע בהסברת שינויי ריכוזים של יונים שאינם משמרים.

1. Antenucci, J. Imberger, J., Saggio, A. 2000. Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* 45(7),1621-1638.
2. Eckert W., J. Imberger and A. Saggio 2002. Biogeochemical evolution in response to physical forcing in the water column of a warm monomictic lake. *Biogeochemistry* 61: 291 - 307.
3. Hurwitz, S., Goldman, M., Ezersky, M. and Gvirtzman, H. 1999. Geophysical (TDEM) delineation of a shallow brine beneath of a fresh water lake, the Sea of Galilee, Israel, *Water Resources Research* 35(12), 3631-3638.
4. Mekorot, 1987-2000. The annual water-solute-energy balances of Lake Kinneret. WaterShed Unit, Mekorot, Sapir Site, Israel. (in Hebrew).
5. Nishri, A., Boyle, D.R., Koren, N. and Stiller, M. 2003. The contribution of water and chloride to Lake Kinneret through unfocused seepage, based on in-situ seepage measurements, *Israel Journal of Earth Sciences* (in press).
6. Rimmer, A. and G. Gal, 2003. The saline springs in the Solute and Water Balance of Lake Kinneret, Israel. (*Journal of Hydrology*, in press).
7. Simon, E. and F. Mero. 1992. The salinization mechanism of Lake Kinneret, *Journal of Hydrology* 138: 327-343.
8. Stiller, M. 1994. The chloride content in pore water of Lake Kinneret sediments, *Israel Journal of Earth Sciences* 43, 179-185.

5. תרשימים

- תרשים 1: מפה בתימטרית של הכנרת עם אזורי הנביעות המלוחות (על פי Simon and Mero 1992). והנחלים הראשיים.
- תרשים 2: ריכוז ה-Cl (נקודות) והטמפרטורה (קו רציף) כפי שנמדדו בשני תאריכים בפרופיל המים בתחנה A במרכז הכנרת.
- תרשים 3: ימין: ריכוז ה-Cl המדוד בין שנת 1989 ל-1994 באפילימניון (עומק מדידה 5 מ') ובהיפולימניון (עומק מדידה 30 מ') של הכנרת.
- תרשים 4: האגם בתקופת השכוב, כפי שהוא מתואר במודל כשני מכלים בעלי נפח (V_1, V_2), ומסה של Cl (S_1, S_2). המכלים מופרדים ביניהם ע"י משטח אופקי- התרמוקלינה שמעמיקה בזמן (t) וגורמת לשינוי נפח המכלים ומסת ה-Cl בהם. כניסה ויציאת מים ו-Cl לאגם מסומנת ב- Q_{in} ו- Q_{out} וב- S_{in} ו- S_{out} בהתאמה, ומעבר מים ו-Cl משכבה לשכבה מסומן ב- Q_m ו- S_m בהתאמה. E- התאדות.
- תרשים 5: פרופיל הטמפרטורה המדוד (נקודות) והמחושב (קו רציף) באמצעות פונקציה מקורבת לצורך חישוב מיקום התרמוקלינה. T_h, T_e : טמפ. מקסימלית בפני המים ומינימלית בעומק האגם בהתאמה; H_L : רום פני האגם; d : ציר העומק; D : עומק התרמוקלינה; α, n : פרמטרים; Z_{th} : מיקום התרמוקלינה מנקודת ייחוס בקרקעית האגם.
- תרשים 6: הדגמה גרפית של הנפח העובר מההיפולימניון לאפילימניון בזמן העמקת התרמוקלינה. הנפח הוא אינטגרציה בזמן של השטף Q_m , השווה למכפלת מהירות התקדמות התרמוקלינה v_{th} בשטח האופק שבו היא נמצאת A.
- תרשים 7: המהלך העונתי המחושב של התרמוקלינה בחודשי השכוב בשנים 1991-93.
- תרשים 8: שינויי מסת הכלור באפילימניון (S_1), בהיפולימניון (S_2) ובאגם כולו (S) כפי שחושבו ע"י המודל עבור השנים 1993-1988.
- תרשים 9: תוצאות המודל בהשוואה לערכים מדודים של ריכוז ה-Cl לשנים 1994-1989. למעלה: באפילימניון (E), עומק מדידה 5 מ'. למטה: בהיפולימניון (H), עומק מדידה 30 מ'.

6. טבלאות

טבלה 1: סיכום שנתי של כניסות מים ומלח, התאדות, ומליחות ממוצעת בשנים 1993-1988.

שנה הידרולוגית	כניסות מים	התאדות	כניסות מלח	מליחות ממוצעת
1/10-1/10	מלמ"ק	מלמ"ק	טון	מיליגרם/ליטר
1988-1989	475	264	91,524	435
1989-1990	404	249	107,092	693
1990-1991	414	266	83,106	562
1991-1992	1,523	306	145,360	119
1992-1993	922	245	128,941	191

טבלה 2: ממוצע חודשי וסטיית תקן של נפח הערבוב Q_m בשנים 2003-1988.

חודש	יוני	יולי	אוגוסט	ספטמבר	אוקטובר	נובמבר	דצמבר
כמות (מלמ"ק)	406	208	119	133	173	317	591
סטיית תקן (מלמ"ק)	152	106	97	87	102	211	170

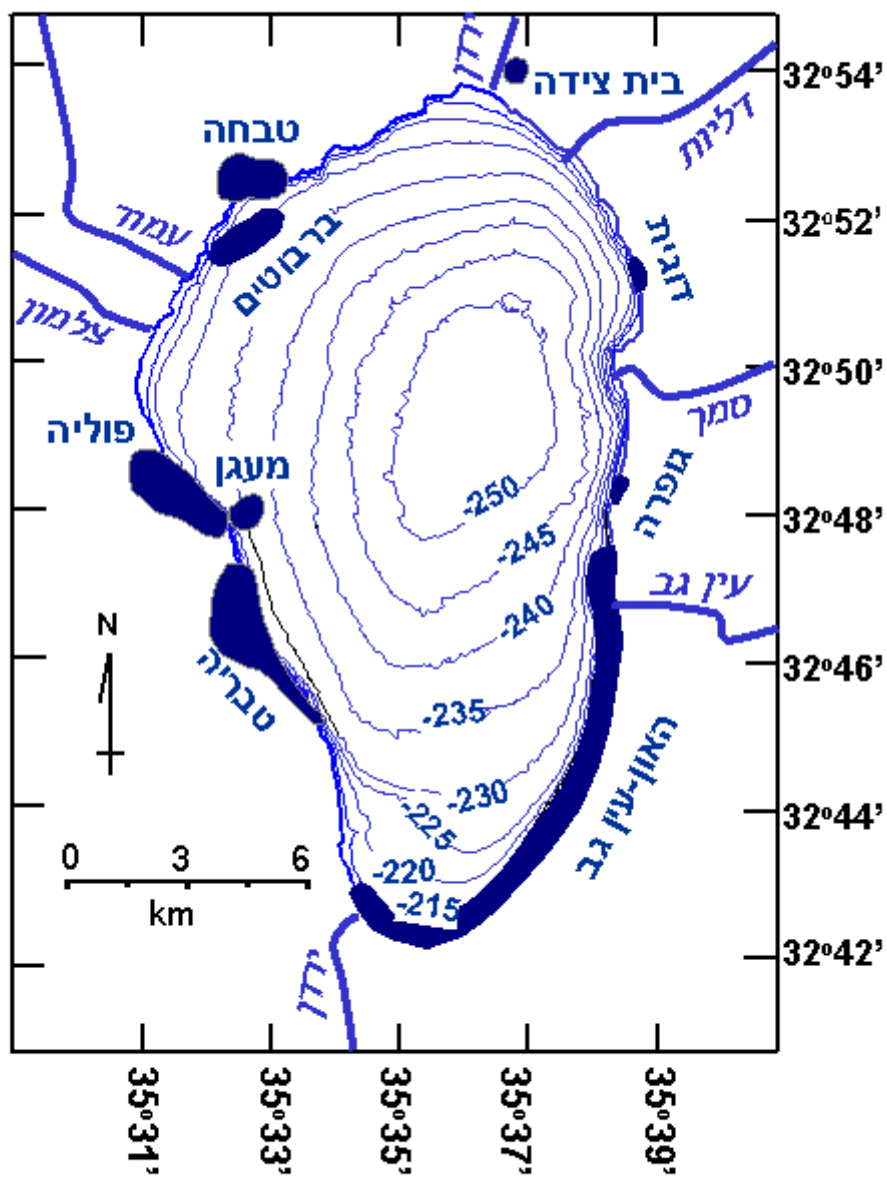


Figure 1

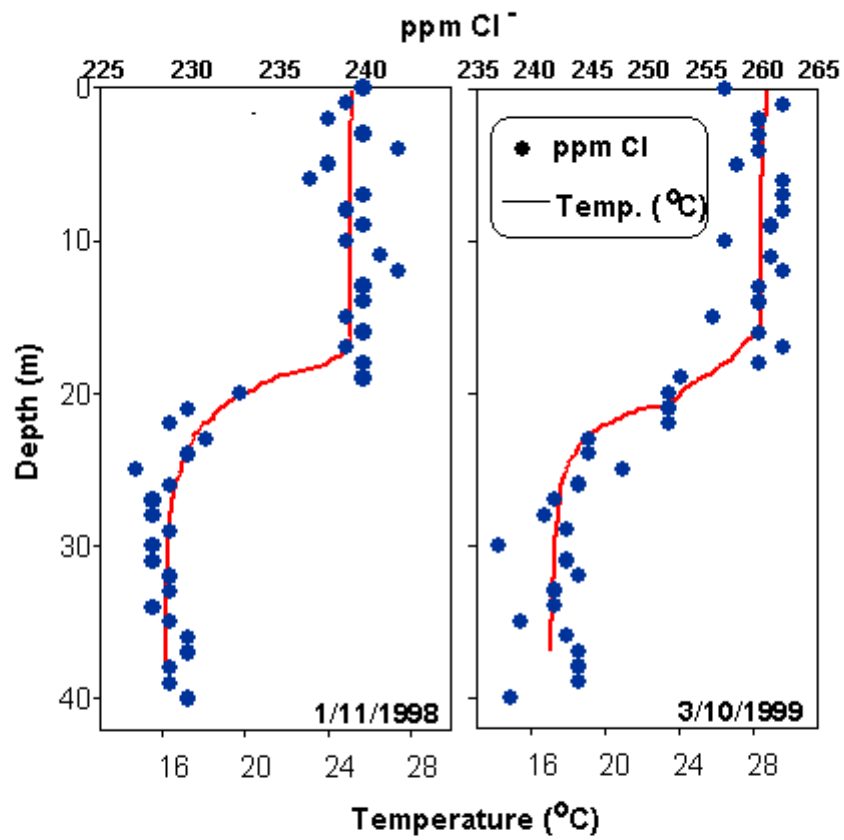


Figure 2

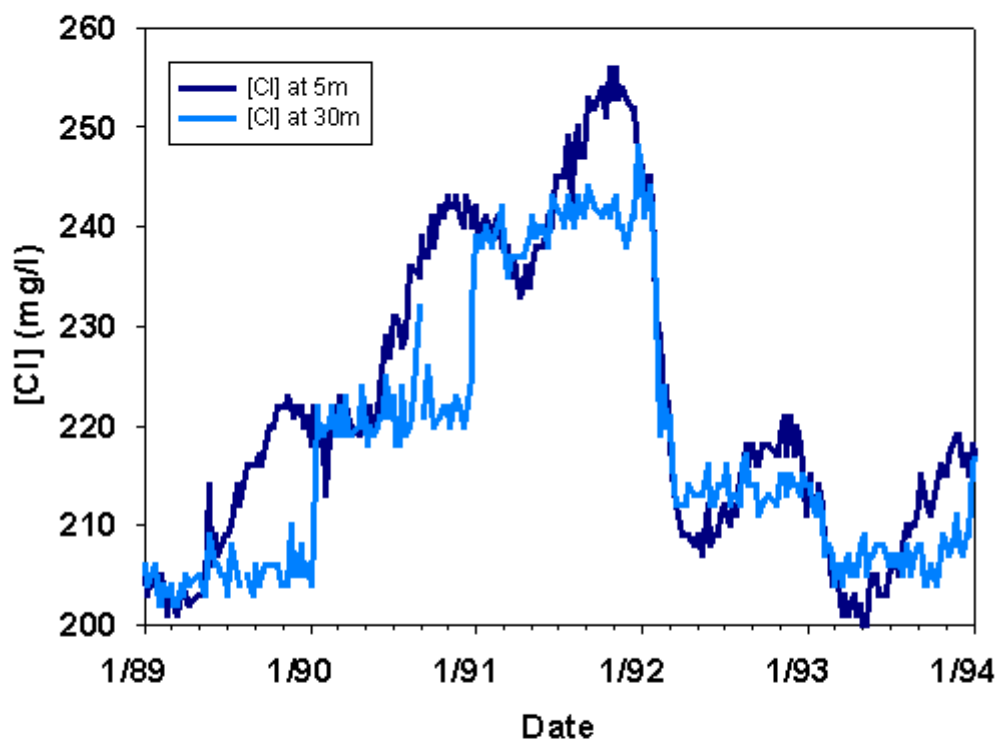


Figure 3

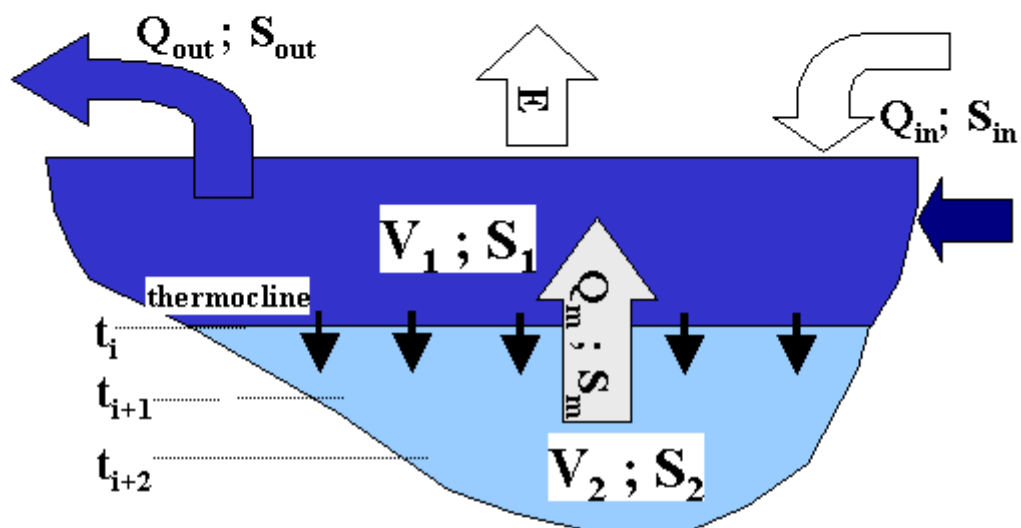


Figure 4

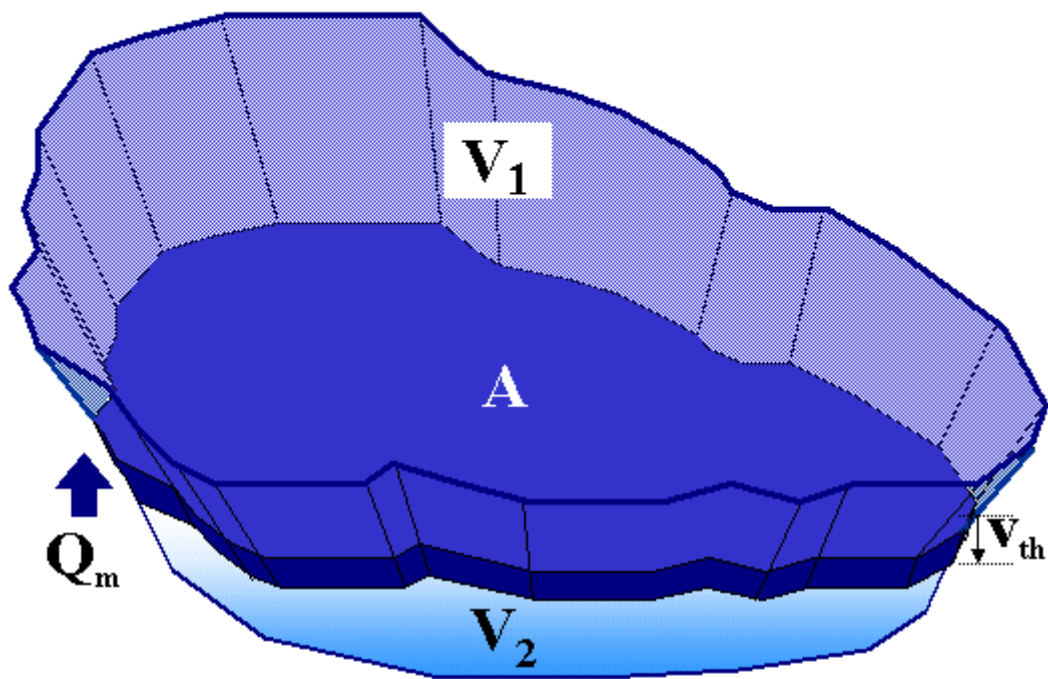


Figure 6

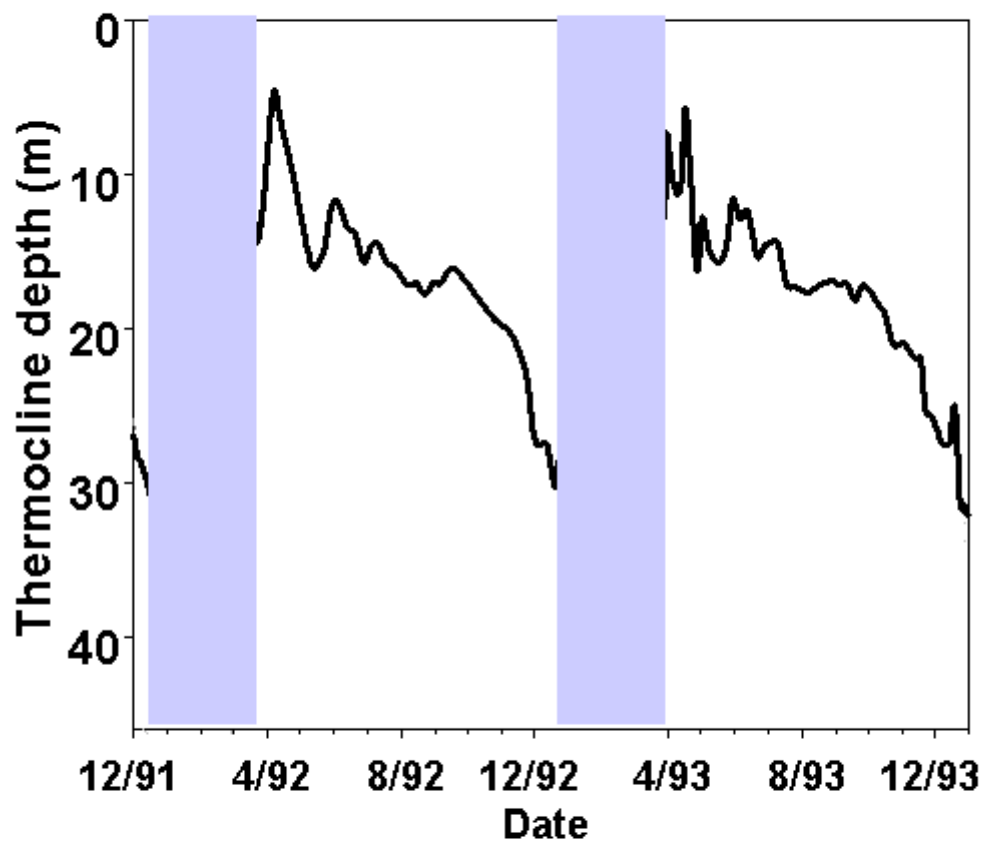


Figure 7

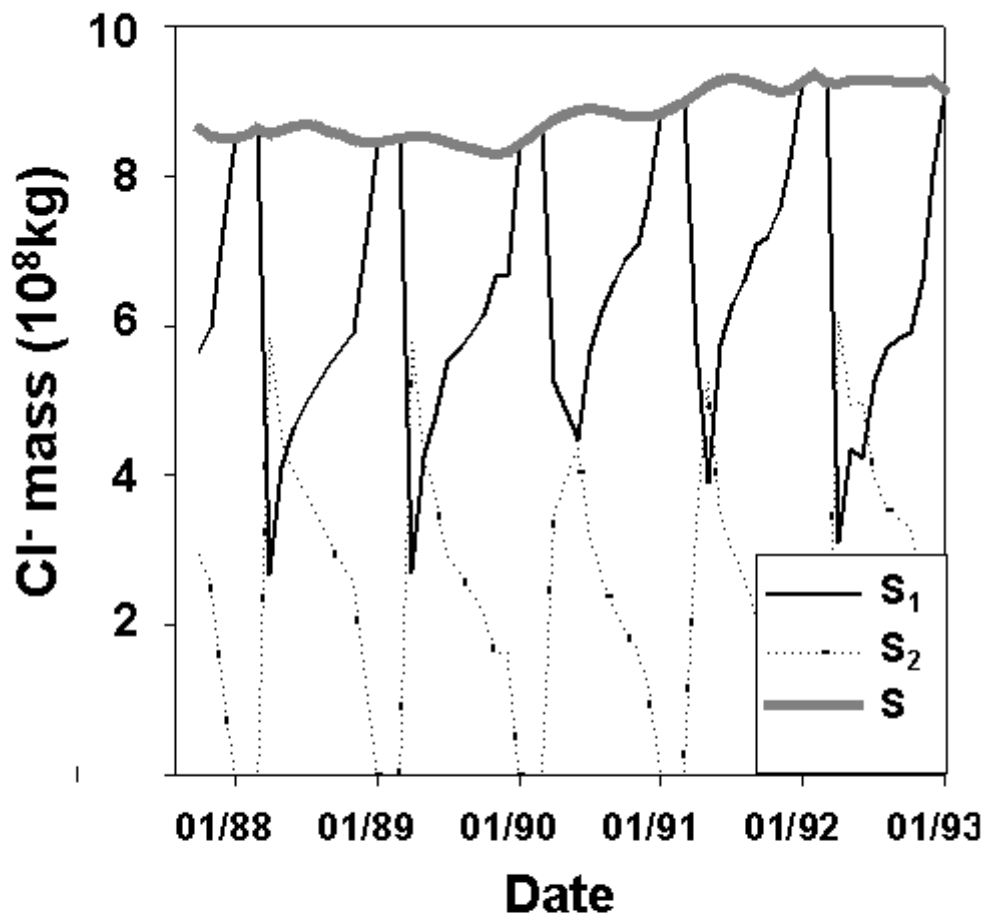


Figure 8

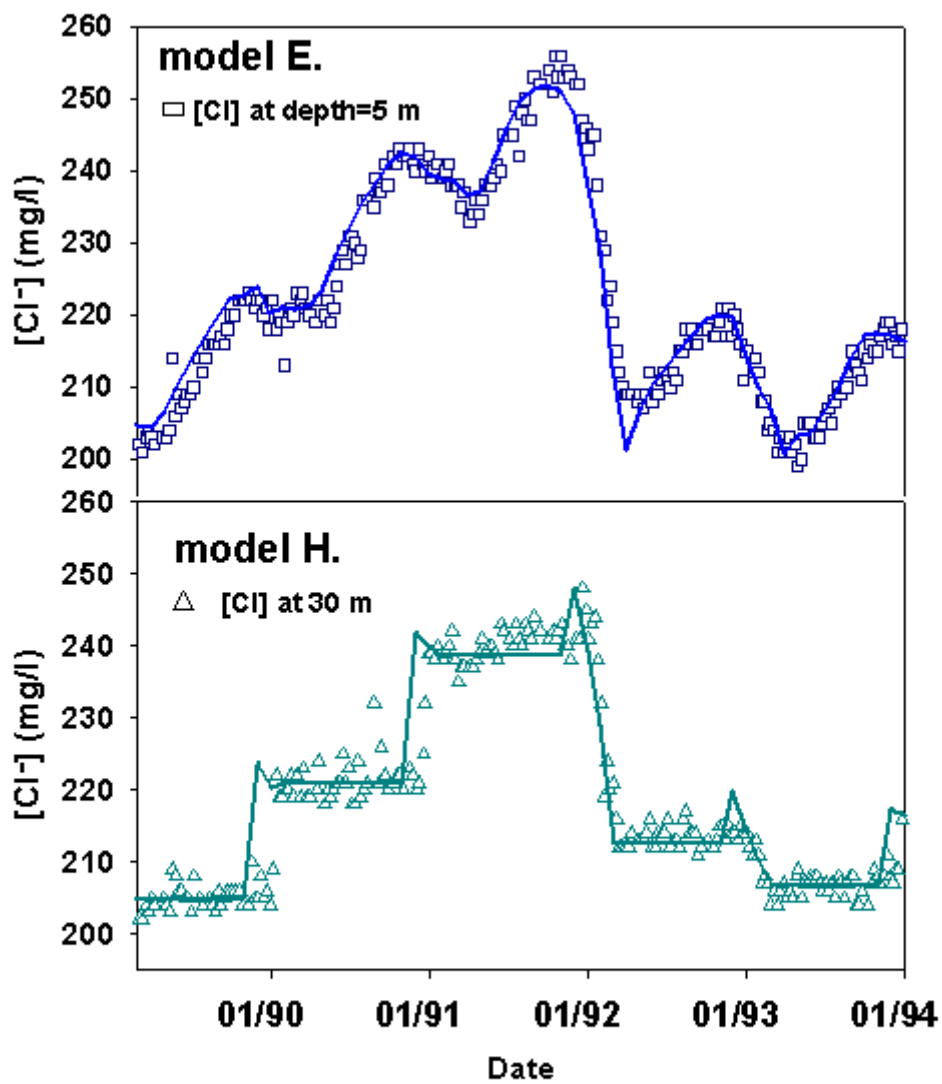


Figure 9