

שימוש באוסף מודלים אקלימיים להערכת ארוכת טווח של כמויות מים ומליחות בכנרת

אלון רימר¹, עמיר גבעתי², רנה סמואלס³, פנחס אלפרט³

בנהרות, ולהגדיל את האידוי ממקורות מים פתוחים. יחד עם העליות הצפויות בצריכת המים בעתיד, גדל הלחץ על מערכות אספקת המים, עקב הידרדרות נוספת של איכות המים העיליים ומי התהום באזורים שונים. החשש העיקרי בישראל הוא תהליך המלחה מוגבר של הכנרת. למרות התחזית הגורסת שלהתפלת מי-ים יהיה תפקיד גדל והולך לגבי אספקת המים, מקורות מים טבעיים באגן הירדן עדיין יישארו מרכיב חשוב באספקת צריכת המים, כמו גם חלק משמעותי מהטבע, החי והצומח בצפון הארץ. לפיכך, שינויים בזמינות ובאיכות המים הטבעיים יישארו נושא קריטי, שיש להשקיע מאמץ בכדי לחזותו מראש ולהשתמש בתחזיות ביעילות.

למרות התחזית הגורסת שלהתפלת מי-ים יהיה תפקיד גדל והולך לגבי אספקת המים, מקורות מים טבעיים באגן הירדן עדיין יישארו מרכיב חשוב באספקת צריכת המים, כמו גם חלק משמעותי מהטבע, החי והצומח בצפון הארץ. לפיכך, שינויים בזמינות ובאיכות המים הטבעיים יישארו נושא קריטי, שיש להשקיע מאמץ בכדי לחזותו מראש ולהשתמש בתחזיות ביעילות

מטרתנו במחקר זה היא להקים מערכת תומכת החלטה למשק המים על ידי תיכול (integration) אוסף (Ensemble) של מודלים אקלימיים עם סוגים שונים של מודלים הידרולוגיים ברמת הפרדה המתאימה. מבנה המודל המוצע מספק פלטפורמה לחיזוי ארוך טווח (עשרות שנים) של השינויים הצפויים בשני המשתנים המשמעותיים ביותר של המים בכנרת: נפח המים הזמינים (AW) ומליחות האגם (C_{lake}). מטרת מאמר זה הן לפיכך, לתאר בקצרה עבודה (Rimmer et al. 2011) שבה שילבנו מודלים אקלימיים ומודלים הידרולוגיים בכדי לחזות דפוסי שינוי ארוכי טווח בזמינות המים ובאיכותם באגן הכנרת.

מודלים אקלימיים

הדמיות ארוכות טווח רבות של אקלים המזרח התיכון בכלל ואזור ישראל

אחד החששות הגדולים במשק המים הישראלי נוגע לתהליך ההמלחה המוגבר המתפתח באגן הכנרת. מטרת המחקר המוצג במאמר זה הינה ליצור מערכת תומכת החלטה, שתסייע למובילי מדיניות במשק המים לחזות דפוסי שינויים ארוכי טווח בזמינות המים ובאיכותם בכנרת. מערכת זו נוצרה באמצעות אינטגרציה של אוסף מודלים אקלימיים והידרולוגיים ומספקת פלטפורמה לחיזוי ארוך טווח של עשרות שנים קדימה

הקדמה

על פי הערכות שונות, השפעות אפשריות של שינויי אקלים במזרח הים התיכון עלולות לשנות את מאזני המים באזור. מודלים אקלימיים עדכניים, הפועלים ברמת הפרדה של 20 ק"מ, חוזים תרחישים של פחיתת כמויות המים באזור במהלך המאה ה-21 (IPCC 2007). האקלים העתידי צפוי להיות מאופיין במגמות ירידה במשקעים, הגדלת הטמפרטורה וההתאדות הפוטנציאלית, עם עלייה בהסתברויות של אירועי מזג אוויר קיצוניים (Krichak et al, 2007; Kunstmann et al, 2007; Samuels et al, 2009). ירידה משמעותית בכמות הגשמים, בשפיעת מעיינות ובזרימה בנחלים תועדה לאחרונה באגן הירדן העליון (Givati and Rosenfeld, 2007), כמו גם באגן הליטני בלבנון (Shaban, 2009). פחיתה במשקעים ועליית טמפרטורות צפויות להפחית את העשרת האקוויפרים ואת הזרימה

1. חקר ימים ואגמים המעבדה לחקר הכנרת

2. השרות ההידרולוגי

3. אוניברסיטת תל אביב

האנרגיה של האגם (Rimmer et al. 2009). ארגון המשוואה מחדש, הזנחת איברים שתרומתם למאזן החום קטנה מאוד, הגדרת Δ , המציין את שיפוע עקום היחס בין לחץ אדים ברוויה לבין הטמפרטורה באוויר, ו- γ , הידוע בשם "הקבוע הפסיכרומטרי" מאפשר להגיע לבסוף לנוסחת ההתאדות:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - \Delta G)}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{f(u)(e_{as} - e_a)}{L} \quad (1)$$

בנוסחה זו ניתן לזהות שני חלקים עיקריים: מקורו של הביטוי הראשון בצד ימין הוא במאזן האנרגיה, והוא מתאר את תרומת הקרינה נטו R_n (וואט/מ"ר), בהפחתת כמות האנרגיה לחימום גוף המים, ΔG (וואט/מ"ר), לשיעור ההתאדות. הביטוי השני מימין הוא חלק אמפירי, המתאר את ההשפעה המשולבת של פונקציית עצמת הרוח u (מטר/שניה) ופוטנציאל הקליטה של האוויר לאדי מים $e_{as} - e_a$ (מיליבר). המקדם L מציין את חום האידי (ג'אול/ק"ג). סיכום ההתאדות היומית E על פני שנה הידרולוגית נותן את ההתאדות השנתית EY .

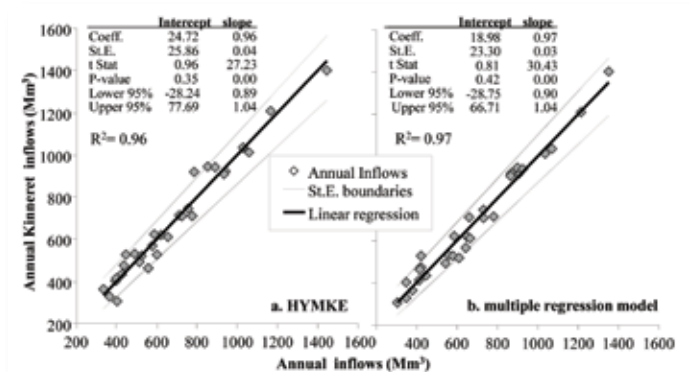
מודל ההתאדות כויל על ידי השוואת תוצאותיו להתאדות החודשית המחושבת מתוך מאזני המים של הכנרת (מקורות, 1987-2009). חישוב ההתאדות מתוך מאזני המים נחשב לשיטה מדויקת יחסית לשיטות אחרות, בעיקר כאשר הוא מתבצע על פני מרווחי זמן של חודשיים ומעלה. תוצאות השוואה של ההתאדות השנתית מוצגות באיור 1. כדי לחשב את ההתאדות מהאגם על פי מודל ההתאדות המוצע (משוואה 1), הוזנו הנתונים היומיים של טמפרטורת אויר, טמפרטורת פני המים, לחות יחסית, מהירות רוח, קרינה ארוכת גל (5-25 μm), וקרינה קצרת גל (305-2800 nm) למודל ישירות מתוך נתוני הפלט של המודלים האקלימיים. נתוני ΔG הוזנו בהנחה כי ממוצעי העבר יהיו תקפים גם בעתיד.

מודל חיזוי כניסות מים שנתיות לכנרת

שיטה פשוטה לחזות את כמות המים השנתית הנכנסת לאגם היא באמצעות "רגרסיה מרובת משתנים" (Multiple Regression Model, MRM). בשיטה זו, המשתנה התלוי הוא כמויות המים הנכנסות לכנרת Q_{in} (מיליון מ"ק, מל"ק) המחושבות עבור כל שנה הידרולוגית i . השיטה מבוססת באמצעות המשוואה:

$$Q_{in}(i) = a \times P_{GH}(i) + b \times P_{GH}(i-1) + c \quad (2)$$

איור 2: כניסות מים שנתיות לכנרת מחושבות (ציר אנכי) כנגד כניסות המים בפועל (ציר אופקי): a. לפי מודל הידרולוגי יומי HYMKE; b. לפי מודל רגרסיה רבת משתנים (MRM) כפי שתואר לעיל



בפרט נוצרו במסגרת פרויקט GLOWA נהר הירדן (<http://www.glowa-jordan-river.de>) באמצעות מודלים אקלימיים כלל עולמיים (global) ואזוריים (regional). בעבודה זו השתמשנו בתוצאות ארבעה מודלים ברמת הפרדה של כ-20 ק"מ, שיצרו תרחישים אקלימיים משנת 1960 ועד שנת המודלים במאמר המקורי). ECHAM-RegCM, Hadley-MM5, ECHAM-MM5, JMA) 2060; פירוט המודלים במאמר המקורי).

תקופות העבר (1960-2010) שימשו לכויל ולהתאמה של התרחישים האקלימיים, כך שיתאימו לתנאים האקלימיים המאפיינים תקופה זו. תקופות העתיד במודל מהוות תחזית המבוססת על ההנחה ש"מה שהיה הוא שיהיה", למעט הנתון של הגדלה בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה, כפי שמקובל מתחזיות אקלים עולמיות. כל ההרצות היו מבוססות על תרחיש A1B (IPCC 2007), המניח פליטות CO_2 לאטמוספירה של כל מקורות האנרגיה.

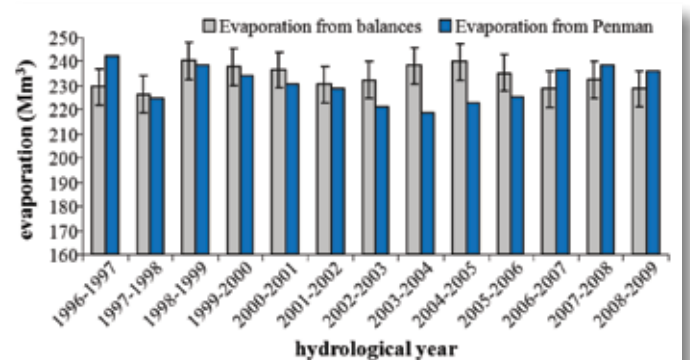
לפי מיטב הידע העומד כיום לרשותנו, השינויים ההידרולוגיים הצפויים באזור אגן הכנרת בעקבות מגמת ההתחממות הגלובלית, קטנים במידה ניכרת מהשינויים האנתרופוגניים הישירים המשפיעים על כמות המים באגן (הגברת השאיבה והאיגום, הנמכת מפלסי הכנרת ועוד)

מתוך תוצאות המודלים האקלימיים חילצנו את המשתנים היומיים הבאים, לאזור אגן הירדן העליון: 1. גשם; 2. טמפרטורת מקסימום ומינימום; 3. לחות יחסית; 4. קרינה קצרת גל וארוכת גל; 5. מהירות רוח בגובה 10 מטר מעל פני הקרקע. משתנים אלה הוכנסו כקלט למודלים ההידרולוגיים (ראה פרק "המודל המשולב"), ובעזרתם הערכנו את השתנות כמות המים הזמינים בכנרת ומליחותה לאורך זמן.

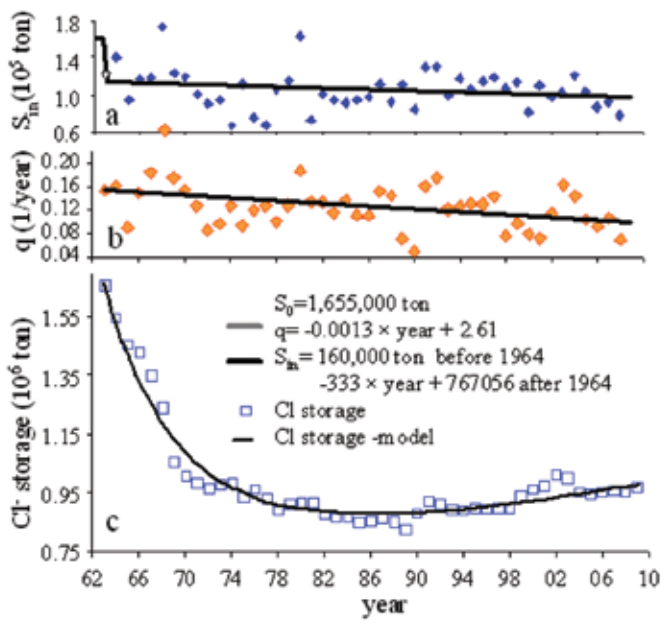
מודלים הידרולוגיים מודל התאדות מהאגם

מודל ההתאדות E (mm day⁻¹) מתוך אגם הכנרת (Lake Evaporation Model, LEM) מבוסס על נוסחת Penman. מקורו בפיתוח משוואת מאזן

איור 1. השוואה בין תוצאות מודל ההתאדות ע"פ Penman להתאדות המחושבת מתוך מאזני המים של הכנרת (1996-2009)



איור 3: (a) הפחתת מדרגה בכמות המלח הנכנסת לאגם, מ-160,000 טון לכ-107,000 טון כלוריד בממוצע רב שנתי. (b) השינוי הליניארי של כניסות המים לכנרת לאורך זמן. (c) הפחתה אקספוננציאלית בכמות הכלוריד באגם עד אמצע שנות ה-80 ועלייה מתונה בכלוריד בין אמצע שנות ה-80 ל-2010



2. שינוי ליניארי של כניסות המים לכנרת לאורך זמן (איור 3b). שינוי זה גורם לעלייה הדרגתית ומתונה בכמות הכלוריד באגם. ניתן להבחין (איור 3c) כי באמצע שנות ה-80 החלה עלייה מתונה באוגר הכלוריד בכנרת. בשנים אלה גוברת הפחתה ההדרגתית של כמויות המים הנכנסות לאגם על השפעת הטיית המעיינות משנות הששים, ולמעשה האגם החל בתהליך איטי של המלחה, שסיבתו העיקרית - הפחתה הנמשכת בכמויות המים שמגיעות לכנרת דרך נהר הירדן ונחלי הגולן והגליל

האצת המגמה של בניית מתקני התפלה בשנות ה-2000 במשק המים הישראלי, תאפשר בעתיד להוריד בהדרגה את הלחץ על מקורות המים הטבעיים. בכך יתאפשר לנו להשתמש בהם במידה, תוך שמירה על מאזני מים יציבים, ואף להשאיר מעט מים לטבע ולנוף

חבנה ואימות המודל המשולב

פרק זה מתאר את מהלך המודל המשולב (איור 4), עם נתוני עבר המדודים על פני 30 שנה (1979-2009). נתוני משקעים יומיים מדודים בתחנת הניסיונות בגולן נסכמו על פני כל שנה הידרולוגית (מ"מ גשם), והוכנסו כקלט למודל ה-MRM, לצורך קבלת ספיקות שנתיות נכנסות - Q_{in} . תוצאת המודל מוצגת באיור 5a, בהשוואה לספיקות הנכנסות המדודות. במקביל, הנתונים המטאורולוגיים המדודים בכנרת הוכנסו כקלט ל-LEM, והכמות המתאדה היומית המחושבת סוכמה על פני כל שנה הידרולוגית (EY באיור 5b).

המשתנים הבלתי תלויים הם $P_{GH}(i)$ - הגשם העונתי בתחנת הניסיונות ברמת הגולן באותה שנה הידרולוגית; $P_{GH}(i-1)$ - הגשם העונתי באותה תחנה משנה קודמת; והפרמטרים a, b, c מקבלים את ערכיהם ואת סטיית התקן שלהם בתהליך של רגרסיה והשוואת הספיקה, המחושבת לספיקה המדודה. השיטה נבדקה ע"י Givati and Rosenfeld (2007), ונמצאה מתאימה לחיזוי הספיקות השנתיות לכנרת. התלות של הספיקות בגשמי השנה שעברה הוא מובהק, ומבטא בעיקר את תרומתו של מעיין הדן, שעבורו הוכח כי יש לו "זכרון הידרולוגי" של כ-2.5 שנים.

איור 2 מציג את כמות כניסות המים המחושבת לכנרת בשתי שיטות: a. מודל הידרולוגי יומי מפורט ומסובך יחסית לתפעול Rimmer (HYMKE) and Salingar, 2006; b. מודל MRM כפי שתואר לעיל. המודל השני נמצא מדויק ופשוט להפעלה, ולכן השתמשנו בו בסדרת המודלים ההידרולוגיים שנמצאים ב"מודל המשולב".

מודל מליחות הכנרת

שטף המלח הנכנס לכנרת הוא צירוף של כל השטפים התורמים מליחות כלשהי, ובהם כניסות מלח על ידי מי מעיינות, נהר הירדן, נגר עילי ישיר, והטיית הירמוך. שטף המלח היוצא מן האגם הוא צירוף של כל הגורמים הגורעים מליחות מן האגם, ובהם שאיבות למוביל הארצי, שאיבה על ידי 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 על ידי מכפלת המליחות הממוצעת של האגם בכמות המים העוזבת אותו בפרק זמן נתון. ניתן להראות על סמך נתוני השתנות מליחות הכנרת בעבר (Rimmer 2003; Rimmer et al. 2006), כי משוואת השינוי באוגר המלח בכנרת מתוארת על ידי המשוואה הדיפרנציאלית הפשוטה הבאה:

$$\frac{dS(t)}{dt} + q(t)S(t) = S_{in}(t); \quad (3)$$

$$q(t) = \frac{Q_{out}(t)}{V(t)}; \quad S_{in}(t) = Q_{in}(t)\bar{C}_{in}(t);$$

במשוואה זו, S - כמות המלח באגם (טון כלוריד); S_{in} - שטף המלח הנכנס (טון כלוריד/שנה); t - הזמן (שנה); V - נפח האגם (מל"מק); Q_{in} - מציין כאמור את כלל ספיקת המים הנכנסת (מל"מק/שנה); ו- Q_{out} מתאר את כלל ספיקת המים היוצאת את האגם (מל"מק/שנה). המשתנה Q_{in} מייצג את המליחות הממוצעת של כלל הספיקות הנכנסות לאגם דרך מעטפת שוליו וקרקעיתו. הערך של המשתנה q (1/שנה), מתאר את הממוצע של כלל יציאת המים השנתית, מחולק בנפח האגם. זהו למעשה קבוע ההתחדשות של נפח המים באגם, או ההופכי של "זמן ההות" (הזמן הממוצע של שהיית טיפת מים באגם).

מודל מליחות הכנרת (Lake Salinity Model, LSM), המכיל לפי נתוני העבר, הצביע על שני תהליכים ארוכי טווח עיקריים שקובעים את מליחות הכנרת (איור 3):

1. ירידה בשיעור כניסות הכלוריד, שחלה בשנת 1965, כתוצאה מהפעלת המוביל המלוח. בתוך פרק זמן קצר הופחתה הכמות הנכנסת הממוצעת מ-160,000 טון כלוריד לשנה לכ-107,000 טון בממוצע רב שנתי (איור 3a). כתוצאה מכך, החלה הפחתה אקספוננציאלית בכמות הכלוריד באגם (איור 3c).

לבסוף, מודל המליחות מחשב את השתנות כמות הכלוריד באגם על פני השנים, בהשוואה לכמות המדודה (איור 5e), ואת מליחות הכנרת על ידי חלוקת כמות הכלוריד בנפח האגם (איור 5f).

תוצאות חיזוי

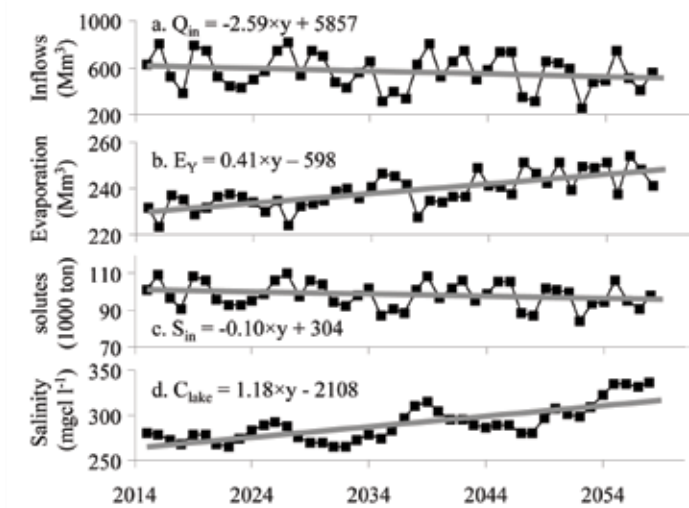
בחלק זה של העבודה, שהתייחס לנתוני קלט מחושבים בלבד (2015-2060), נתוני משקעים יומיים שהתקבלו מהמודלים האקלימיים באזור אגן הירדן עברו התאמה (downscaling) וסיכום שנתי, והוכנסו כקלט למודל ה-MRM, לקבלת ספיקות שנתיות נכנסות - Q_{in} (משוואה 2). במקביל, הנתונים המטאורולוגיים מהמודלים האקלימיים הוכנסו כקלט ל-LEM, והכמות המתאדה היומית מן האגם סוכמה על פני השנה ההידרולוגית (EY, משוואה 1). שיעור כניסת המלח השנתי לאגם חושב באופן זה לזה שמתואר בפרק אימות המודל ($S_{in} = \alpha \times AW + \beta$), כאשר $(AW = Q_{in} - EY)$.

במהלך הרצות החיזוי, שיעור שאיבת המים העתידי מן האגם נקבע על סמך הכלל, כי כל עוד שיעור המים הזמינים השנתי הוא חיובי - כמות השאיבה תשתווה לכמות המים הזמינים, ולפיכך מפלס האגם יישאר קבוע. בשנים יוצאות דופן, בהן חושבה כמות מים זמינים שלילית (התאדות גדולה משיעור המים הנכנסים), קבענו כי מפלס האגם ירד בשיעור זהה.

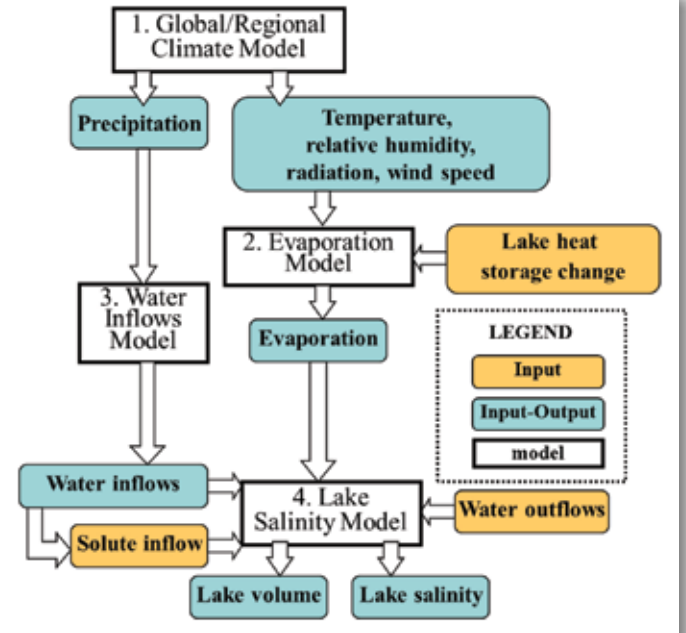
לאורך רצף ארוך של שנים, לכל מודל אקלימי יש תחזית שונה של גשם ומטאורולוגיה. על אחת כמה וכמה התחזית מתבדרת משנה לשנה. לפיכך, מהות הניתוח הרב שנתי שעשינו, הנה לזהות מגמות רב שנתיות על סמך ערכים ממוצעים של אוסף תוצאות כל המודלים גם יחד. "תחזית האוסף" - Ensemble prediction - לשנים (2015-2060), כאשר רק שינויי אקלים נלקחים בחשבון, היא:

1. ירידה ממוצעת בכניסת המים לאגם בשיעור של כ-2.6 מלמ"ק/שנה;
2. עלייה ממוצעת של האידוי בשיעור של כ-0.41 מלמ"ק/שנה;
3. הפחתה בכמות הכלוריד הנכנסת לאגם בשיעור של כ-100 טון כלוריד/שנה;
4. עלייה במליחות האגם בשיעור של 1.18 מ"ג כלוריד/ליטר/שנה.

איור 6: "תחזית האוסף" - Ensemble prediction - לשנים (2015-2060) כאשר רק שינויי אקלים נלקחים בחשבון היא: a. כניסת המים לאגם; b. אידוי מהאגם; c. כמות כלוריד נכנסת; d. מליחות האגם.



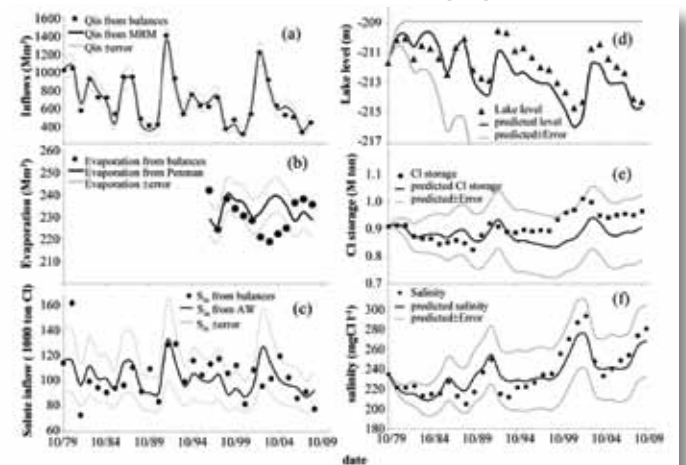
איור 4: מבנה המודל המשולב. המבנה מפריד בין שלוש קטגוריות: 1. נתוני קלט עצמאיים; 2. נתוני פלט - קלט שעוברים ממודל אחד לאחר; 3. המודלים המעבירים ומעבדים את הנתונים.




על פי הגדרת מים זמינים ($AW = Q_{in} - EY$), תוצאות שני המודלים (MRM, LEM) מאפשרים את חישוב כמות המים הזמינים השנתי באגם. שיעור כניסת המלח השנתי לאגם, שנקבע כפונקציה ליניארית של מים זמינים ($S_{in} = \alpha \times AW + \beta$), איור 5c), עולה בקנה אחד עם מספר הערכות קודמות (Ben-Moshe, 1978; Zvi and Benoualid, 1981; Rimmer and Gal, 2003).

על מנת להריץ את מודל המליחות (LSM) כאשר נתוני כניסות מים, כניסות כלוריד והתאדות ידועים, נותר רק לקבוע את שיעור שאיבת המים מן האגם. במהלך הרצות האימות, הוכנסו כאן השאיבות השנתיות האמיתיות, ולפיכך סטיות מפלס האגם ה"חזוי" לעומת המדוד (איור 5d), משקפות את שגיאות המודל המשולב בחישוב ההתאדות וכניסות המים.

איור 5: תוצאות אימות המודל המשולב משוות בין הערך המחושב לערך המדוד. הקלט הוא גשם שנתי בגולן ונתוני תחנה מטאורולוגית בכנרת. התוצאות הן (a) כניסות מים שנתיות (מלמ"ק); (b) התאדות שנתית (מלמ"ק); (c) כניסת כלוריד שנתית (1000 טון); (d) מפלס האגם (מטר ביחס לפני הים); (e) כמות כלוריד באגם (מליון טון); (f) מליחות האגם (ppm Cl).



הטבעיים. אם תימשך מגמה חיובית זו, ייתכן שכבר בשנים הקרובות יתפסו הכנרת ומקורות המים הטבעיים בכלל את מקומם הראוי כמקור מים חשוב, אך לא בלעדי, של מדינת ישראל. בכך יתאפשר לנו להשתמש בהם במידה, תוך שמירה על מאזני מים יציבים, ואף להשאיר מעט מים לטבע ולנוף. 

*רשימת מקורות בבליוגרפיים ניתן למצוא במערכת ו/או אצל המחברים.

לפי מיטב הידע העומד כיום לרשותנו, השינויים ההידרולוגיים הצפויים באזור אגן הכנרת בעקבות מגמת ההתחממות הגלובלית, קטנים במידה ניכרת מהשינויים האנתרופוגניים הישירים המשפיעים על כמות המים באגן (הגברת השאיבה והאיגום, הנמכת מפלסי הכנרת, ועוד).

האצת המגמה של בניית מתקני התפלה בשנות ה-2000 במשק המים הישראלי, תאפשר בעתיד להוריד בהדרגה את הלחץ על מקורות המים