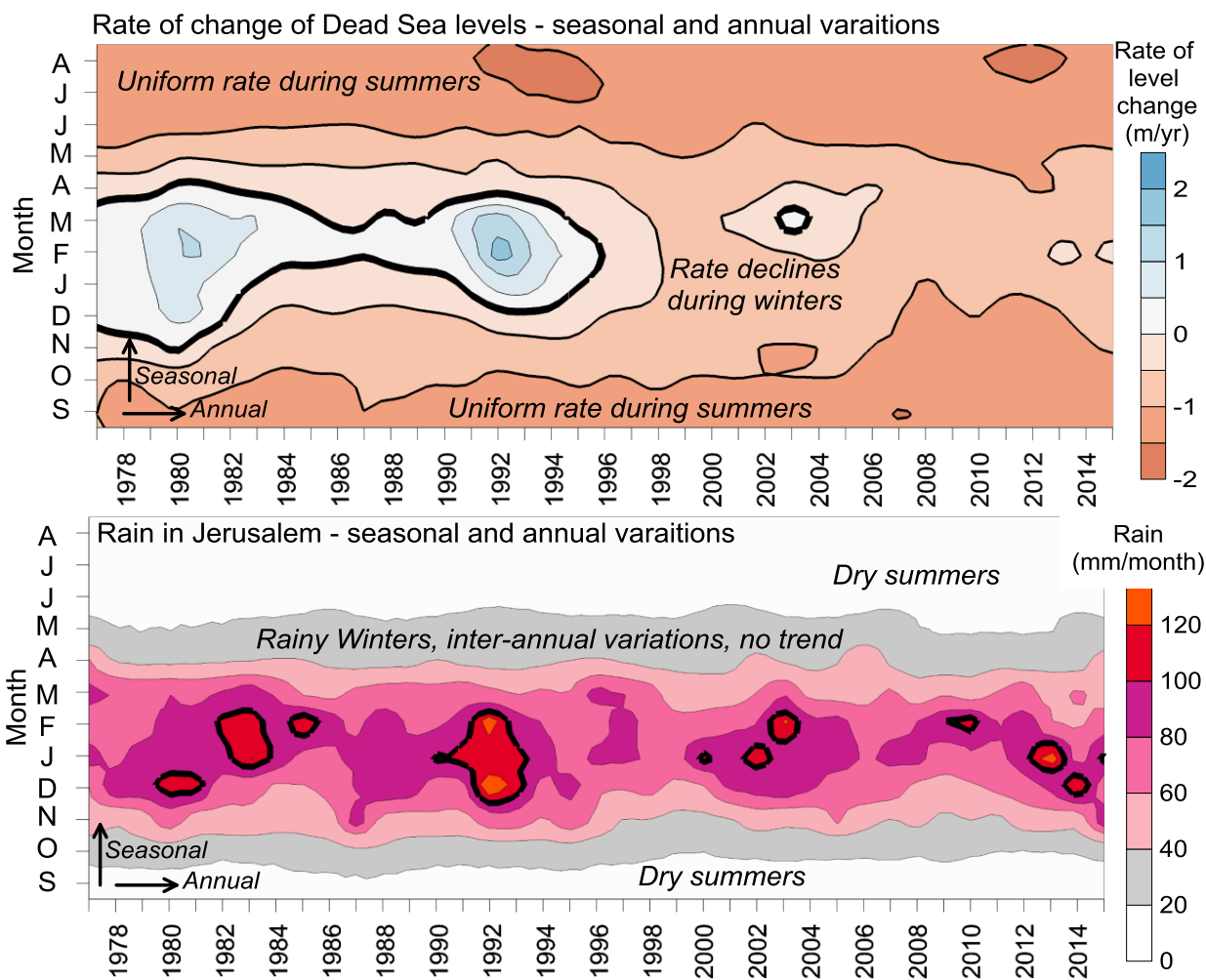




משרד התשתיות הלאומיות  
האנרגיה והמים  
המכון הגיאולוגי

## הגורמים לירידה המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות

נדב לנסקי ואלעד דנטה



## תוכן עניינים

1	תקציר	1
2	מבוא	1
5	נתונים ושיטות	2
5	מפלס	
7	בתימטריה	
8	משקעים, וספיקות בנחלים	
8	מבחנים סטטיסטיים	
9	תוצאות: המגמות העונתיות והרב שנתיות בקצב שינוי המפלס בים המלח	3
9	מגמות עונתיות בספיקות הנכנסות והיציאות בים המלח	
10	המגמות העונתיות והרב שנתיות בשינוי המפלס של ים המלח	
13	דיון: הגורמים למגמות שינוי המפלס	4
13	חודשי הקיץ	
13	חודשי החורף	
13	כמות המשקעים	
14	סכירת אגני הניקוז של ים המלח	
16	סיכום	5
17	תודות	
17	נספח 1- מודל מאזן מסה ותחזית למפלסי ים המלח	
17	מאזן המסה והשטפים	
18	פתרון למצב עמיד – מפלס אגם יציב	
19	פתרון דינמי – שינוי המפלס בזמן	
20	נספח 2: שטחי בריכות האידוי באגן הדרומי	
21	נספח 3: סכרים באגני הניקוז של ים המלח	
23	מקורות	

# הגורמים לירידה המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות

## נדב לנסקי<sup>1</sup> ואלעד דנטה<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> המכון הגיאולוגי, <sup>2</sup> האוניברסיטה העברית בירושלים

### תקציר

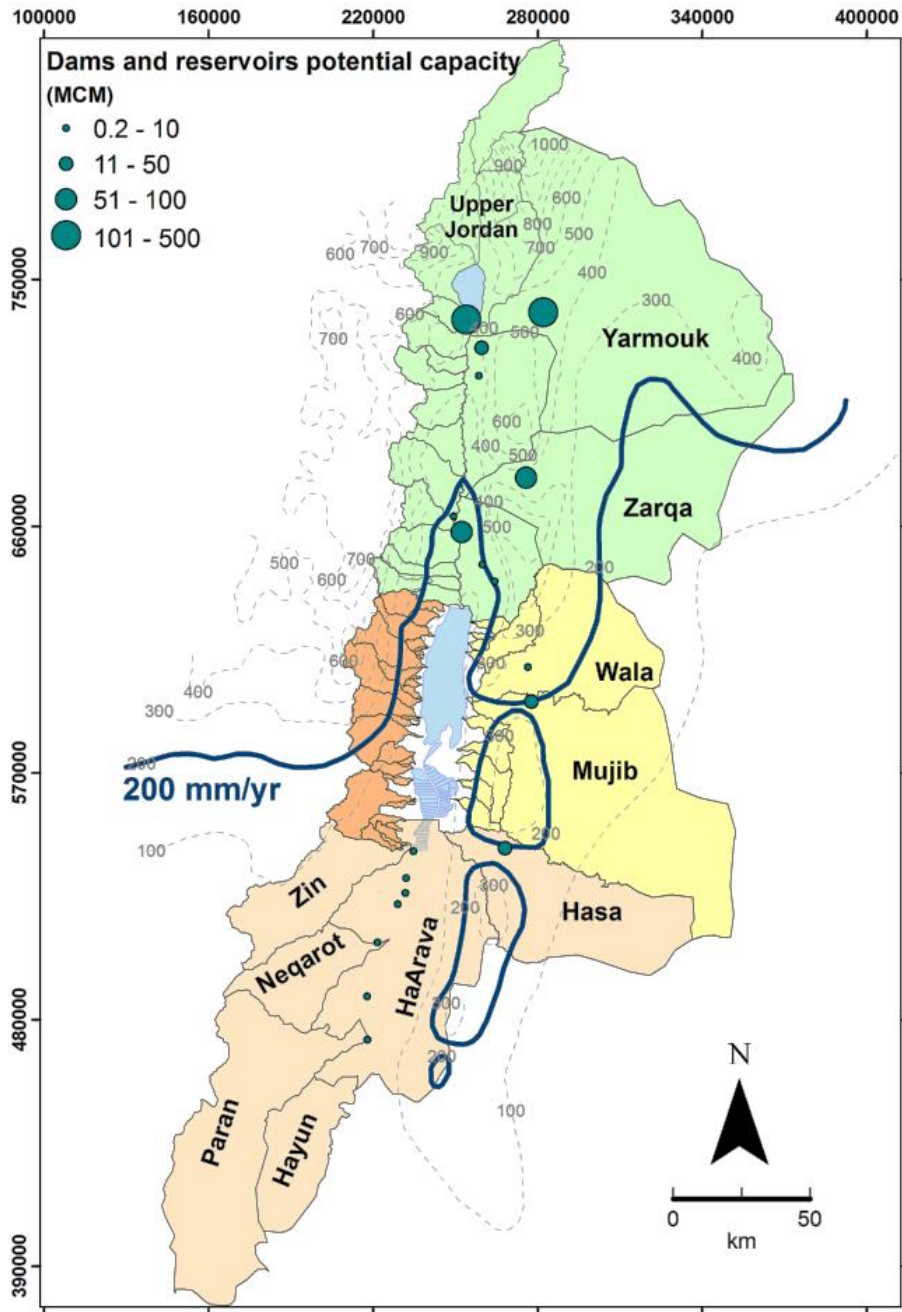
מפלס ים המלח, כאגם טרמינלי, נקבע על ידי מאזן המים באגם, כלומר על ידי ההפרש בין כניסות המים מאגני הניקוז (וכן ממעינות ומשקעים), לבין היציאות באידוי. בעשרות השנים האחרונות מפלס האגם נמצא במגמה כללית של ירידה כתוצאה של מאזן מים שלילי. מגמה זו נובעת מהפרת האיזון ההידרולוגי של אגן הניקוז של ים המלח על ידי סכירת מקורות המים שהגיעו אליו בעבר, בעיקר מאגן הניקוז של נהר הירדן. עם ירידת המפלס, התפצל ים המלח בשנת 1979 לשני אגנים: האגן הצפוני - הוא ה"אגם", והאגן הדרומי - שמתחזק כבריכות אידוי על ידי מפעלי האשלג (הישראליים והירדניים). המשך האידוי מהאגן הדרומי מהווה מרכיב משמעותי במאזן המים השלילי של האגן הצפוני. מאז הפיצול בין האגנים, שטח האגם הצטמצם בכ-20% וריכוז המים עלה בכ-4%. לכן, גרעון המים באידוי מהאגן הצפוני צפוי היה לקטון ביותר מ-20%. לפיכך, ניתן היה לצפות שקצב ירידת המפלס יתמתן. בפועל – קצב ירידת המפלס עולה עם הזמן. האפשרויות להסבר התופעה הן התמעטות מים לאגם או התגברות הניצול על ידי המפעלים (או שילוב של השניים). בעבודה זו, השתמשנו בניתוח האופי העונתי של שני הגורמים הללו: כניסות המים המשמעותיות מרוכזות בחודשי החורף, ואילו הפעילות התעשייתית בבריכות האידוי מרוכזת בחודשי הקיץ וכמעט מושבתת בחודשי החורף. בהתבסס על כך, אנו מציגים ניתוח רב שנתי של המגמות בקצב שינוי המפלס באגם ובפילוח לפי עונות. מצאנו כי במשך חודשי החורף חל שינוי משמעותי בקצב שינוי המפלס בעשרות השנים האחרונות: ממצב של עליית מפלס ברוב החורפים עד אמצע שנות ה-90 של המאה הקודמת, למצב האופייני מאז, בו כמעט שלא חלה עליית מפלס בחודשי החורף, ואף קיימת מגמה של ירידת מפלס שהולכת ומתגברת. ממצא זה יכול להיות מוסבר על-ידי מיעוט גשמים או תפיסת מי הנגר במעלה האגנים. נתוני השירות המטאורולוגי אינם מצביעים על מגמה מובהקת של ירידה בכמות המשקעים השנתית באגן הניקוז של ים המלח בארבעת העשורים האחרונים. לעומת זאת, בתקופה זו הוקמו סכרים על רוב תתי האגן המזרחי של ים המלח בנפח כולל של מעל ל-500 מלמ"ק. ניצול המים במאגרים אלו עומד על 50-75%; נפח כזה של מים שנגרע שנתית מאגן הניקוז של ים המלח, יכול להסביר חלק משמעותי מהגידול בגרעון המים השנתי באוגר של ים המלח, שעלה מכ-400 מלמ"ק בשנות ה-80 של המאה הקודמת לכ-700 מלמ"ק בעשור האחרון. בחודשי הקיץ לעומת זאת, קצב ירידת המפלס בעשרות השנים האחרונות הינו קבוע וקצב אובדן האוגר במגמת התמתנות. על סמך התוצאות, אנו מסיקים שההתגברות בקצב ירידת המפלס בים המלח בעשרות השנים האחרונות נובעת מהתמעטות בכמות מי הנגר המגיעים לים המלח במהלך חודשי החורף, ולא כתוצאה של פעילות מוגברת של מפעלי האשלג בחודשי הקיץ או אידוי ישיר מפני האגם.

## 1. מבוא

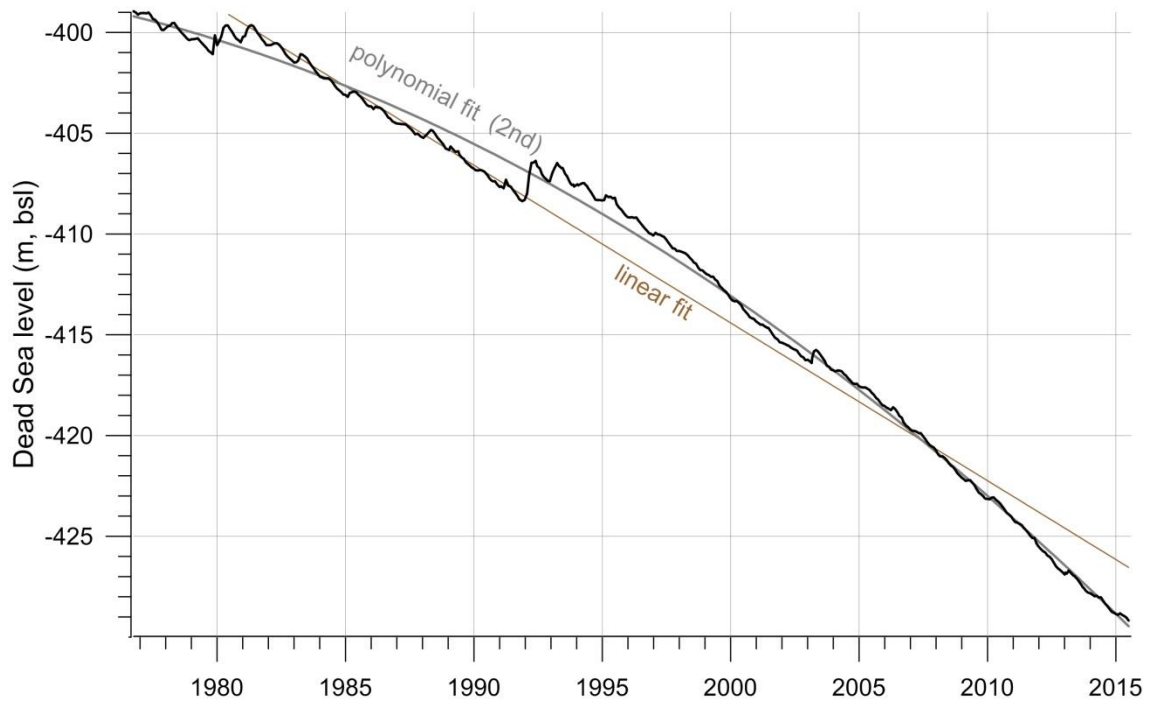
ים המלח הינו אגם טרמינלי (ללא ניקוז, איור 1), ולכן קצב השינוי במפלס הים נקבע על ידי המאזן בין המים הנכנסים לאגם מאגני הניקוז (וכן ממעינות וממשקעים) לקצב האידוי וקצב הצטברות המלח [Lensky et al., 2005]. בעשרות השנים האחרונות מפלס ים המלח נמצא במגמה כללית של ירידה (איור 2) כתוצאה ממאזן מים שלילי [Lensky et al., 2005]. מגמה זו החלה בסוף שנות ה-50 של המאה הקודמת, בעיקר לאחר הגברת השאיבות מהכנרת (וסכירת סכר דגניה ב-1932) והטיית המים מהירמוך לתעלת העיור (עבדאללה). הספיקות השנתיות בירדן הדרומי בקרבת השפך לים המלח ירדו מלמעלה ממיליארד מ"ק בשנה לעשרות מיליוני מ"ק (מלמ"ק) בעשור האחרון [Schattner, 1962; Hassan and Klein, 2002; Holtzman et al., 2005; Gavrieli et al., 2011; IHS, 2015].

שטח אגן הניקוז של הירדן, ויובלו העיקרי הירמוך, מהווים כמחצית (45%) משטח אגן הניקוז הכולל של ים המלח (כ-43,000 קמ"ר, איור 1). ברוב שטח אגן הניקוז של הירדן והירמוך כמויות המשקעים השנתיות הינן בטווח שבין 200-1000 מ"מ בשנה (לעומת פחות מ-200 מ"מ ברוב שאר שטח האגן). מסיבה זו, הירדן מהווה את העורק הראשי של אספקת מים לים המלח, ולכן השינויים האנתרופוגניים שחלו באגן הניקוז שלו באמצע המאה הקודמת גרמו לירידה דרמטית של מפלס ים המלח. אגן הניקוז של הערבה מהווה גם הוא חלק משמעותי משטח אגן הניקוז של ים המלח, אך הוא מאופיין באקלים צחיח-קיצון ברוב שטחו. על-פי ההערכות, שיטפונות באגן נחל הערבה תורמים לים המלח עד 35 מלמ"ק בשנה (יחד עם ואדי חסה, המייצר את מרבית הנגר, והצין [Greenbaum et al., 2006]). אגני ההיקוות המערביים לים המלח מאופיינים בכמויות משקעים גבוהות יותר (600-100 מ"מ בשנה), אך הם מהווים כ-4% בלבד משטח האגן הכולל, ומזרימים לאגם 4-5 מלמ"ש [Greenbaum et al., 2006]. שטח אגני ההיקוות המזרחיים הגדולים, Mujiב-וה Wala, מהווה כ-15% מאגן הניקוז של ים המלח ומאופיין בכמות משקעים של 300-50 מ"מ\שנה. שני האגנים תורמים כ-100 מלמ"ש לים המלח [Hadadin, 2015], מתוכם כמחצית בזרימת בסיס [Greenbaum et al., 2006].

בשנת 1979, מפלס ים המלח ירד מתחת לגובה מיצר לינץ' המפריד בין שני אגניו של ים המלח, ומאז הם מתפקדים כגופי מים נפרדים: האגן הצפוני שמתפקד כאגם טרמינלי, והאגן הדרומי - שמתחזק כבריכות אידוי על ידי מפעלי האשלג הישראליים והירדניים (הקמת הבריכות החלה במפעלים בסוף שנות ה-60 ובסוף שנות ה-70 של המאה הקודמת בצד הישראלי והירדני, בהתאמה). המשך האידוי מהאגן הדרומי מהווה מרכיב משמעותי במאזן המים השלילי של האגן הצפוני, והוא עומד על גרעון שנתי של כ-280 מלמ"ק (250 מלמ"ק לפי [Lensky et al., 2005], 271 מלמ"ק לפי [Zbranek 2012] ו-330 מלמ"ק לפי [Gavrieli et al. 2011]). מאז הפיצול בין האגנים, שטח האגם הצטמצם ביותר מ-20% (איור 2, איור 4) וריכוז המלחים עלה ביותר מ-4% [Gertman and Hecht, 2002; Lensky et al., 2011]. במצב בו שטח האגם מצטמצם ומליחות המים עולה, ניתן לצפות להקטנה בקצב האידוי באופן פרופורציונלי לשטח האידוי (>20%), ואף יותר מכך. לכן, בהנתן מאזן הידרולוגי קבוע, יש לצפות להתמתנות בקצב ירידת המפלס עם הצטמצמות שטחי האידוי, כפי שהראו [Yeichieli et al. 1998] ו-[Gavrieli et al. 2011], וכפי שמוסבר בנספח 1. בפועל, קצב ירידת המפלס של ים המלח מואץ עם הזמן, בשיעור של 1.7-2.2 ס"מ\שנה\שנה (איור 2). בדוח זה נדון בשאלה - מהם הגורמים לכך שים המלח אינו מתכנס לאיזון הידרולוגי כמצופה? נתייחס לאפשרויות של השפעות גורמים אקלימיים (התמעטות גשמים), הגברת שאיבות על ידי תעשיית האשלג, וסכירת מי נגר באגני הניקוז.



איור 1: אגן הניקוז של ים המלח בחלוקה לתתי אגנים, וקווים שווי גשם (מ"מ/שנה), עיבוד מתוך Greenbaum et al. (2006). צבעי האגנים מציינים את שייכותם לארבעת האגנים הגדלים: הירדן (ירוק), הערבה (כתום בהיר), האגנים המזרחיים (צהוב), והמערביים (כתום כהה). העיגולים מציינים מיקום סכרים משמעותיים באגן הניקוז, כאשר גודל העיגול יחסי לנפח האיגום הפוטנציאלי של הסכר (ראה מקרא וטקסט). מהקווים שווי הגשם, משטח האגנים, ומגודל הסכרים ניתן להתרשם מחשיבותם היחסית של אגן הניקוז של הירדן (ירוק) והאגנים המזרחיים למאזן המים של ים המלח.



איור 2: מפלסים מדודים של ים המלח (נתוני השירות ההידרולוגי). רגרסיה לינארית של נתוני המפלס (חום) נותנת הערכת יתר בתחילת התקופה והערכת חסר בסוף התקופה, בשל התגברות בקצב ירידת המפלס ( $R^2=0.97$ ), בעוד שהתאמה של פולינום מסדר שני (אפור) נותנת ביטוי טוב יותר להתגברות בקצב ירידת המפלס ( $R^2=0.996$ ).

## 2. נתונים ושיטות

בדוח זה השתמשנו בנתוני הבאים: גובה מפלס ים המלח, בתימטריה של קרקעית הים, משקעים ונתונים הידרולוגיים. מקורות הנתונים ושיטות הניתוח מפורטים להלן. יודגש שבעבודה זו הניתוח מבוסס בעיקרו על נתוני מפלס ושינויי האוגר של ים המלח, כמייצג את קצה המערכת ההידרולוגית. הניתוח נעשה תוך התייחסות למגמות רב שנתיות בשינויים העונתיים במפלס הים ובאוגר. בחורף המערכת נשלטת על ידי נגר מהנחלים כתגובה למשקעי גשם, ואילו בקיץ בריכות האידוי עובדות בתפוקה מלאה בעוד שהנגר מהנחלים נמצא בשפל. ניתוח זה מאפשר להגיע לתובנות על המערכת ההידרולוגית גם ללא מדידה ישירה של כל מרכיבי המערכת ההידרולוגית, שבחלקם הגדול אינם נמדדים או אינם נגשים.

### מפלס

את נתוני גובה מפלס ים המלח (איור 2) קיבלנו מהשירות ההידרולוגי. הנתונים נמדדים אחת לחודש, מאז שנת 1976. דיוק המדידה הינו כ-2 ס"מ (המפלס הממוצע באגם משתפל ועולה במהלך היממה בשיעור זה, ראה [Arnon et al., 2014; Bodzin et al., 2014]). ההפרש בין המדידות החודשיות עומד על 6-10 ס"מ באופן טיפוסי.

כשמתחילים שינויי מפלס באגם, חשוב להבחין בתופעות השונות המתרחשות בפרקי זמן שונים [Williams and Pelletier, 2015]. בעבודה זו חישבנו את קצב שינוי המפלס ושינוי באוגר בשלושה אופנים, כפי שמוסבר לקמן, ומודגם באיור 3.

א. קצב שינוי שנתי חושב עבור כל נקודות המדידה החודשיות באופן הבא: בכל נקודת מדידה ( $t_i$ ) חושב ההפרש בין ערך המפלס חצי שנה קדימה בזמן וחצי שנה אחורה, חלקי מספר הימים בין שתי המדידות, ביחידות של מטר לשנה (B, קו ירוק):

$$\frac{dL}{dt} = \frac{L_{i+6} - L_{i-6}}{t_{i+6} - t_{i-6}} \cdot 365 \quad 1$$

שינוי האוגר מחושב כמכפלה של קצב שינוי המפלס (משוואה 1) בשטח האגם באותו זמן (C, קו ירוק):

$$\frac{dV}{dt} = A_i \cdot \frac{L_{i+6} - L_{i-6}}{t_{i+6} - t_{i-6}} \cdot 365 \quad 2$$

שטח האגם לכל עומק,  $A_i$ , חושב על פי נתונים בתימטריים (עקומה היפסומטרית באיור 4). סדרות הזמן של השינויים השנתיים מוצגות באיור 7 ו-8 ובאיור 8.

ב. קצב שינוי עונתי (רציף) חושב באופן דומה: בכל נקודה חושב ההפרש בין מדידה של חודש לפני למדידה של חודש אחרי, חלקי מספר הימים ביניהן, ביחידות של מטר לשנה (קו כחול):

$$\frac{dL}{dt} = \frac{L_{i+1} - L_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \cdot 365 \quad 3$$

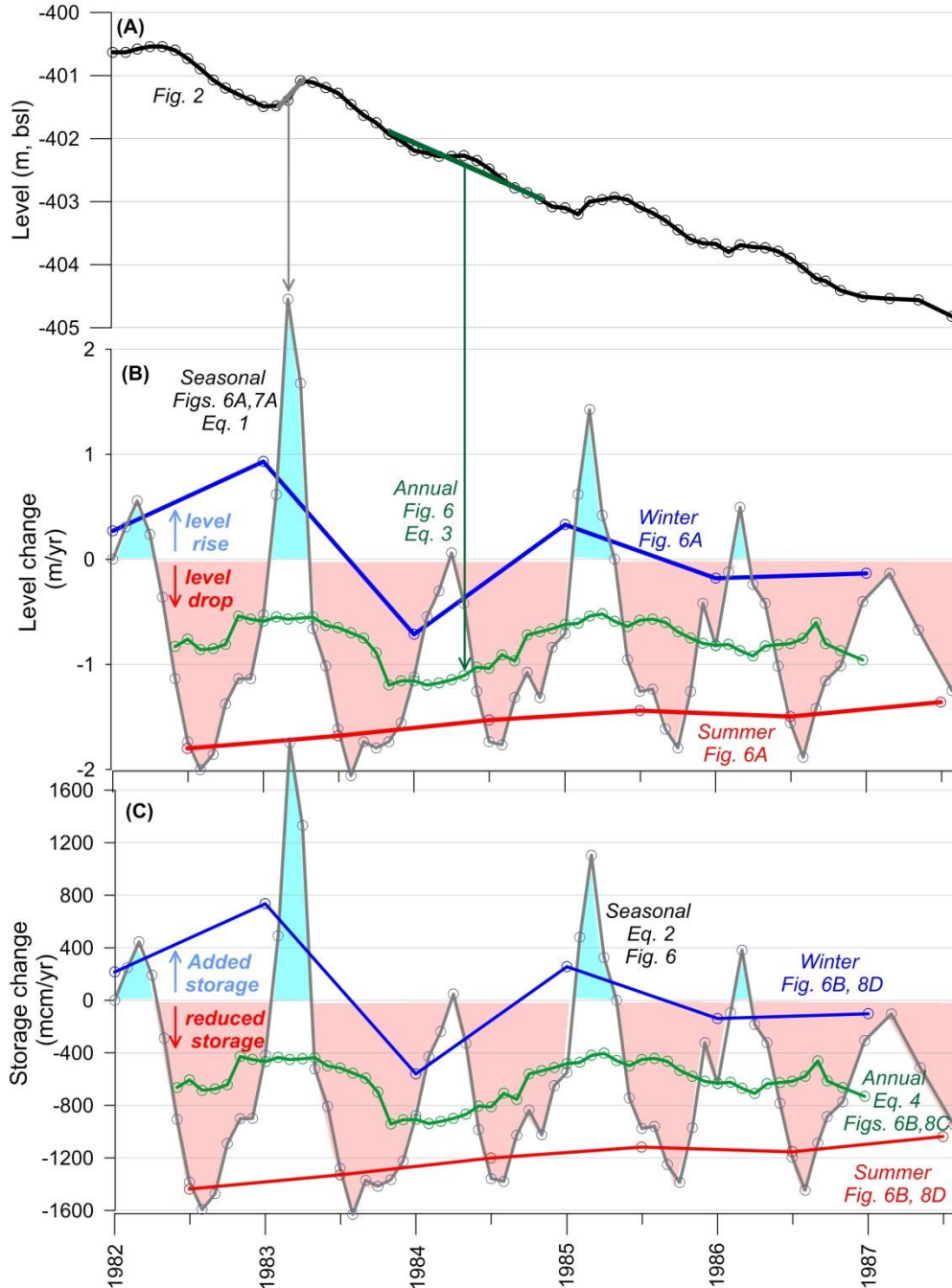
שינוי האוגר חושב באופן דומה:



$$\frac{dV}{dt} = A_i \cdot \frac{L_{i+1} - L_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \cdot 365$$

סדרת הזמן מייצגת את שינויי המפלס העונתיים והרב שנתיים, והיא מוצגת באיור 8, באיור 7 ובאיור 9.

ג. קצב שינוי המפלס בקיץ ובחורף חושב כערך בודד לכל שנה על בסיס השינוי בארבע חודשי הקיץ, מיוני עד ספטמבר, וכן בחודשי החורף, מדצמבר עד פברואר (וכן עד מרץ). השיקול לבחירת חודשים אלו יוסבר בתחילת פרק התוצאות.

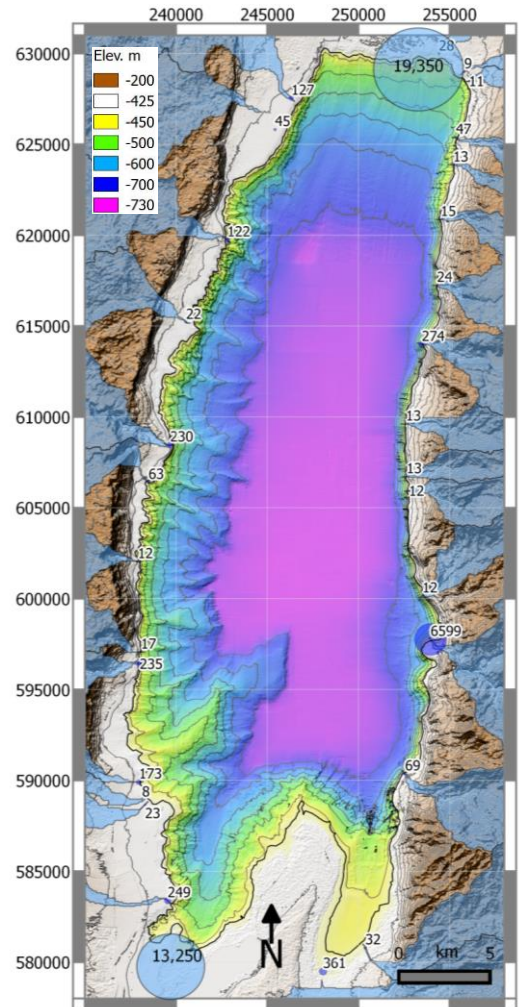
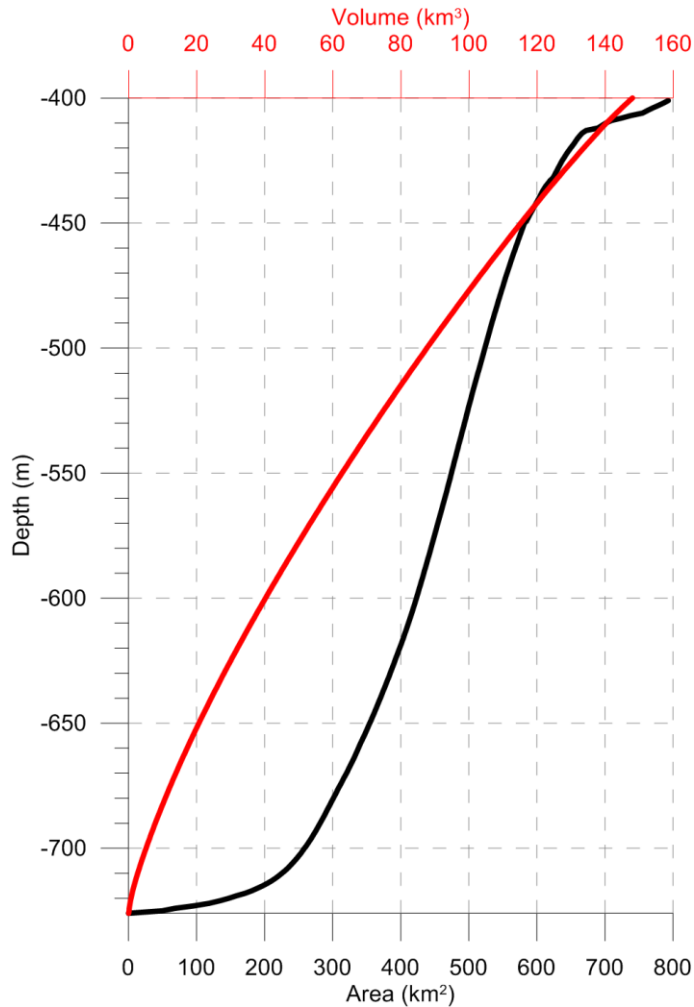


איור 3: דוגמא לחישוב קצב שינוי מפלס ואוגר מתוך נתוני מפלס מדודים, בשנים 1982-7. מצויינות הפניות למשוואות ולאיוורים. (A) מפלסים מדודים חודשית, (B) חישוב קצב שינוי מפלס בשלוש גישות (ראה טקסט ומשוואות), (C) חישוב שינוי האוגר (ראה טקסט ומשוואות).



## בתימטריה

במאמר זה התבססנו על נתונים בתימטריים ברזולוציה גבוהה שהופקו בשנת 2007 בעזרת Multi-beam, גודל תא 5 מ' [Sade et al., 2014]. המפה הבתימטרית מוצגת באיור 4 יחד עם העקומה ההיפסומטרית שחושבה על סמך נתונים אלו. כיוון שמפלס הים בעת הסקר היה ברום -420 מ', יש להתייחס לנתונים בסביבות רום זה כנתונים שהגיעו מאקסטרפולציה בין מדידות בים למדידות ביבשה (בשיטות לידאר ועוד).



איור 4: מפה בתימטרית של ים המלח (ימין) על בסיס נתונים בתימטריים של [Sade et al., 2014]. על המפה מצויינים פתחי הנחלים של האגנים השונים (כחול) עם ציון שטח אגן הניקוז בקמ"ר (פרופורציוני לגודל העיגולים). קו החוף של ים המלח (נכון לאוגוסט 2015) מצויין בשחור, קו הגובה באפור במרווח של 50 מ', והרום הטופוגרפי מצויין בצבעים כמובא במקרא משמאל למעלה. בצד שמאל, עקומה ההיפסומטרית של ים המלח על בסיס הנתונים הבתימטריים, יחס נפח-רום באדום, שטח-רום בשחור.

## משקעים, וספיקות בנחלים

**נתוני משקעים** (גשם) התקבלו מהשירות המטאורולוגי שימשו לצורך ניתוח מגמות רב שנתיות ועונתיות בכמויות המשקעים והשפעתם על מפלסי ים המלח. השתמשנו בנתונים חודשיים מארבעת העשורים האחרונים; התחנה של ירושלים (ירושלים מרכז 244730) נבחרה כמייצגת את האגן, כיוון שנמצאה במתאם גבוה למדידות ממדי גשם אחרים באזור אגן הניקוז של ים המלח [Enzel et al., 2003]. הניתוחים שביצענו כוללים אפיון השונות העונתית של עוצמת המשקעים (איור 5), וניתוח מגמות הרב שנתיות תוך התייחסות לדוח השירות המטאורולוגי "שינויים אקלימיים בישראל" [IMS, 2015], ולעבודות נוספות בתחום [לדוגמה: Morin, 2011].

**נתוני ספיקות** באגני הניקוז הינם חלקיים: מספר התחנות ההידרומטריות מוגבל, בפרט חסרים נתונים מדודים מהאגנים המזרחיים שתורמים את מרבית הנגר, והתחנות הקיימות בדרך כלל מכסות טווח שנים מוגבל. מדידות ממורד נהר הירדן קיימות מאז 2012, אז הוקמה תחנה הידרומטרית באתר הטבילה על הירדן, סמוך למוצא לים המלח (השירות ההידרולוגי). ניתוח הידרומטרי מלא של הספיקות הנכנסות לים המלח בארבעת העשורים האחרונים על בסיס הנתונים ההידרומטריים הקיימים בשילוב עם ניתוח בעזרת מודלים של משקעים ביחס לנגר יהווה השלמה לעבודה הנוכחית.

**פעילות מפעלי האשלג** (הישראליים והירדניים) גורעת בכל שנה נפח תמיסה מים המלח בשיעור של כ-250 מלמ"ק [Lensky et al., 2005] עד 330 מלמ"ק [Gavrieli et al., 2011]. ישנו קושי למדוד במדויק את הגרעון, כיוון שישנם גורמים שאינם מנוטרים, כגון השאיבות וההשבות של המפעל הירדני וכן כמות גדולה של תמלחת שמחלחת מדופן הבריכות חזרה לים המלח. בדוח זה אפיינו את השונות העונתית של גרעון המים כתוצאה של פעילות המפעלים (איור 5), אותה הערכנו בעזרת נתוני שאיבות והשבות של מפעלי ים המלח הישראליים – ממוצעים חודשיים לשנים 2012-2014, כפי שמדווח לרשויות (מועצה אזורית תמר, המשרד להגנת הסביבה; על סמך ההנחה שהמאפיינים העונתיים של שני המפעלים דומים).

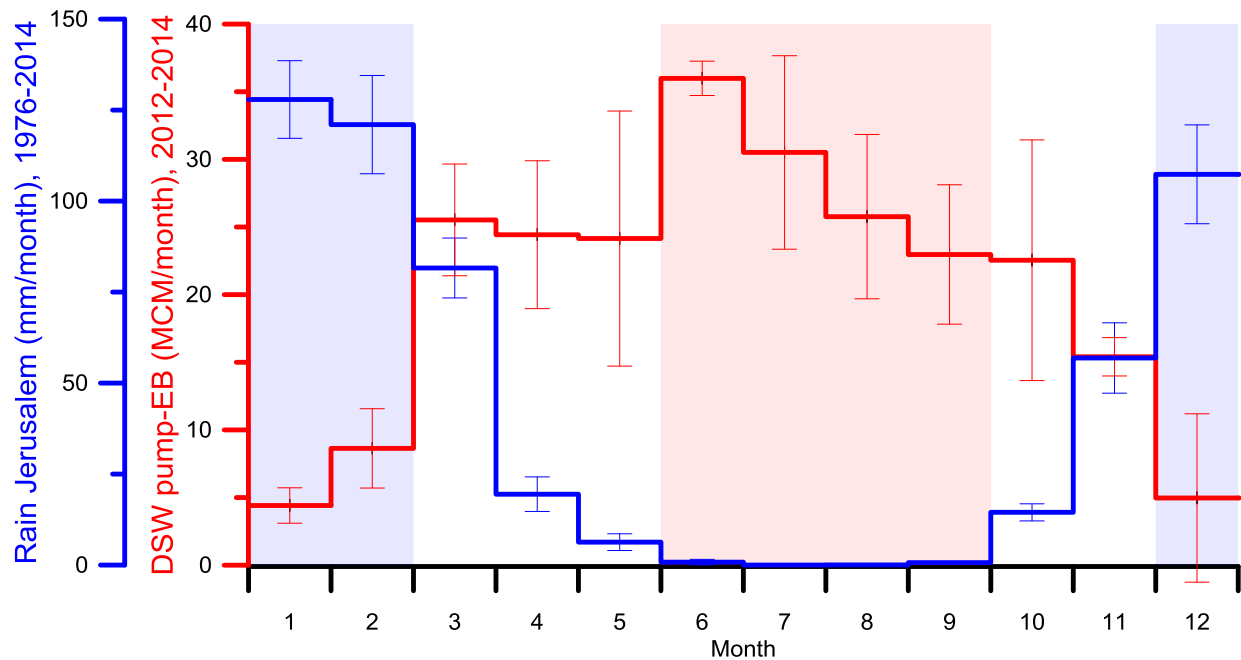
## מבחנים סטטיסטיים

בנוסף לרגרסיה לינארית, לניתוח סטטיסטי של מובהקות המגמות בנתונים השונים, השתמשנו במבחן הא-פרמטרי של Mann-Kendall (MK); השערת האפס הינה שאין מגמה בנתונים). מבחן זה מתאים במיוחד לנתונים המאופיינים בערכי קיצון (כמו לדוגמה אלה של חורף 1991-2 סדרות הזמן), התפלגות נתונים שאינה נורמאלית. בשל כך, המבחן נפוץ בשימוש לניתוח מגמות בתחומי המטאורולוגיה וההידרולוגיה (לדוגמה: [Yue et al., 2002; Morin, 2011]). שיפוע המגמה במבחן זה מחושב על סמך חישוב הציון השיפועים המתקבלים מכל הזוגות כאשר הנתון השני מאוחר לנתון הראשון (Sen's slope [Sen, 1968]).

### 3. תוצאות: המגמות העונתיות והרב שנתיות בקצב שינוי המפלס בים המלח

#### מגמות עונתיות בספיקות הנכנסות והיציאות בים המלח

המגמה של ירידה מואצת של מפלס ים המלח מצביעה על מאזן שלילי הולך ומתגבר, כלומר - הקטנת כניסות מים (משקעי גשם ישיר ונגר) ו/או הגדלת הצריכה על ידי שאיבות מפעלי האשלג (האבדן באידוי רק קטן כפי שהוסבר במבוא). על מנת להתגבר על ריבוי המשתנים הנעלמים בניסיון להעריך את סך הכניסות והיציאות, ניתחנו את המאפיין העונתי של המערכת ההידרולוגית של ים המלח. באיור 5 מוצגת הפריסה העונתית של כמות משקעים (כחול), כמייצג את העיתוי של כניסות מרבית הנגר לאגם (לא כולל זרימות בסיס קבועות), ונתוני שאיבות ממפעלי האשלג הישראליים (אדום), כמייצגים את העיתוי של צריכת המים של המפעל הישראלי והירדני. הנתונים מוצגים כממוצעים חודשיים של מספר שנים, כולל הערכת סטיות התקן. הפעילות התעשייתית מגיעה לשיאה בחודשי הקיץ, ואילו הגשמים מרוכזים בחודשי החורף. לשם הניתוח העונתי הגדרנו את עונת ה"ק"ץ" (רקע אדום באיור) כחודשים יוני-ספטמבר, במהלכם השאיבות בשיא וכמות משקעי הגשם זניחה וכן הזרימות בנחלים בשפל. עונת ה"חורף" (רקע כחול באיור) היא העונה הגשומה, דצמבר-פברואר, בה הספיקות בנחלים בשיא ובמהלכם השאיבות למפעלי האשלג בשפל. על סמך ניתוח נתונים אלו, אנו מציעים בחינה עונתית של ירידת מפלס ים המלח הרב שנתית. כיוון שבשנים מסוימות הגשמים והזרימות היו חזקים במיוחד במרץ, הוספנו ניתוח של 4 חודשי "חורף" דצמבר-מרץ.

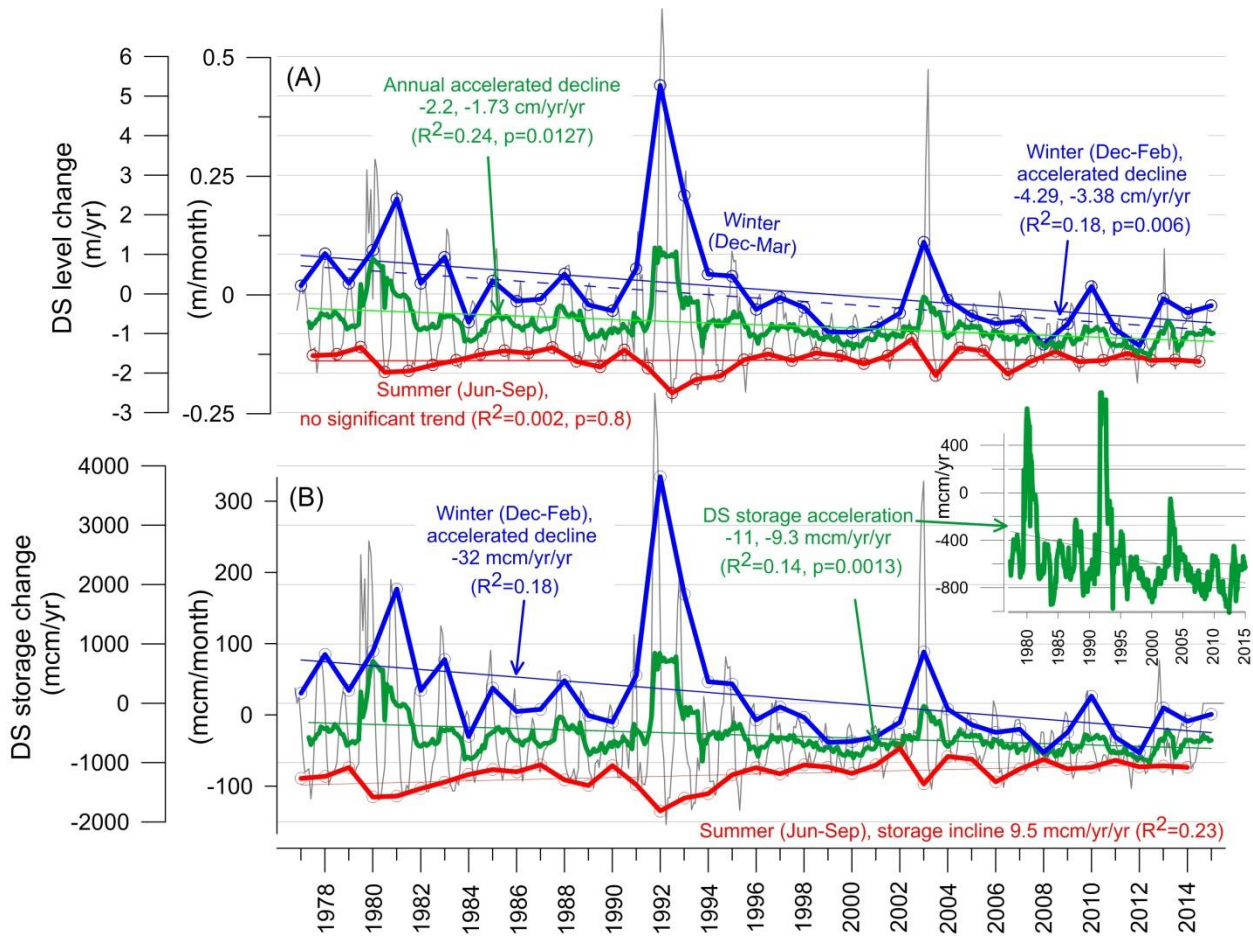


איור 5: שינויים עונתיים במאזן ההידרולוגי של ים המלח. ממוצעים חודשיים של כמות משקעים בתחנת ירושלים לשנים 1976-2015 (כחול), וגרעון המים של המפעלים (אדום). גרעון המים חושב כהפרש בין השאיבות והשבת התמלחת הסופית - נתונים ממפעלי האשלג הישראליים לשנים 2012-2014, לא כולל חילחולים מהבריכות ולא כולל את הגרעון מהמפעל הירדני. החלוקה העונתית בין כניסות מים בחורף לשאיבות בקיץ מהווה בסיס לניתוח העונתי בהמשך הדוח ובאיורים הבאים; רקע אדום וכחול מציינים את חודשי הקיץ והחורף, בהתאמה (ראה טקסט). חודש מרץ הוא גבולי, כיוון שחודש זה מאופיין גם בשאיבות וגם בכניסות מים משמעותיות, ולכן את ניתוחי החורף ביצענו עבור חודשים דצמבר-פברואר, ודצמבר-מרץ לקביעת השפעת חודש מרץ.

## המגמות העונתיות והרב שנתיות בשינוי המפלס של ים המלח

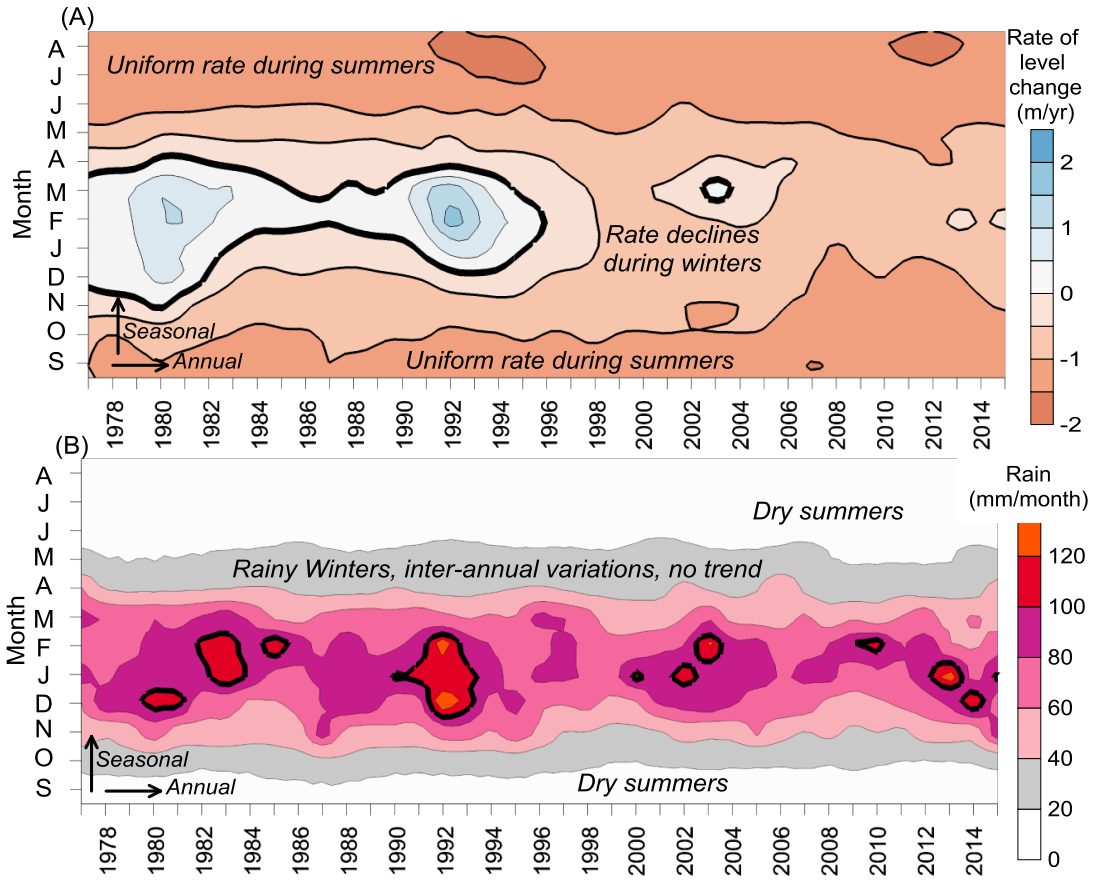
השינויים העונתיים והרב שנתיים של מפלס ים המלח ושינויי האוגר של האגם מופיעים באיור 6, על בסיס נתונים משנת 1976 עד 2015 (אופן החישובים מוצג בפרק השיטות ובפרט באיור 3). ישנה תנודתיות עונתית ברורה: בקיץ קצב ירידת מפלס גבוה (כ- 2 מ'שנה או 0.17 מ'חודש), ואילו בחורף, אם לא נרשמת עליית מפלס, קצב הירידה נמוך. בכל שנה מוצג ערך ממוצע של קצב שינוי המפלס והאוגר בחודשי הקיץ (אדום) ובחודשי החורף (כחול), על פי החלוקה העונתית (כמפורט לעיל) וקצב שינוי המפלס והאוגר השנתי (ירוק). להלן מגמת השינוי הרב שנתית:

- **מגמה כללית רב שנתית:** מפלס האגם יורד בקצב מוגבר כאשר שיעור ההגברה הוא 2.2 ס"מ/שנה/שנה מאז 1976, ובקצב של כ-2.3 ס"מ/שנה/שנה מאז 1979, כשהאגן הדרומי התנתק (בירוק). על-פי מבחן MK, ההאצה בירידת המפלס מאז 1979 הינה בשיעור של 1.8 ס"מ/שנה/שנה, והוא מובהק ברמת מובהקות של 5% ( $p < 0.014$ ). הגרעון השנתי באוגר ים המלח עלה מכ-400 מלמ"ק לשנה בתחילת שנות השמונים של המאה הקודמת, לכ-700 מלמ"ק לשנה בעשור האחרון. קצב שינוי האוגר גדל עם הזמן בשיעור של כ-10 מלמ"ק/שנה/שנה (11 ע"פ רגרסיה ליניארית ו-9.3 על פי מבחן MK במובהקות של 1%;  $p\text{-value}=0.0013$ ). כפי שהראו *Lensky et al.* [2005], בשל גיבוש המלח בקרקעית, שינוי האוגר למעשה גדול בכ-10% מחישוב הנפח על סמך שינוי מפלס ושטח, כיוון שהאוגר קטן גם בשל מלח שמצטבר בקרקעית.
- **בחודשי הקיץ** (יוני-ספטמבר, אדום) נמדדו ערכים יציבים של קצב ירידת המפלס במהלך 39 שנות המדידה. המגמה היא של האטה בקצב ירידת המפלס בשיעור של 0.2 ס"מ/שנה/שנה. על פי מבחן MK, לא נמצאה מגמה מובהקת להגברה או מיתון בקצב ירידת מפלס ים המלח בקיץ ( $p\text{-value}=0.8$ ), כלומר שינוי המפלס בחודשי הקיץ קבועה בזמן. שינוי האוגר מראה מגמה יותר מובהקת של האטה בקצב גרעון האוגר בחודשי הקיץ, בשיעור של 9.5 מלמ"ק/שנה/שנה ( $R^2=0.23$ ). קצבים גבוהים של ירידת מפלס ואבדן אוגר נמצאו בתקופות הקיץ שלאחר השנים הגשומות 1981-2, 1991-2, 2003, [Beyth et al., 1993] בהן היתה עליית מפלס ומיהול השכבה העליונה של עמודת המים. זו כנראה עדות לאידיוי מוגבר בזמן שהמליחות (אקטיביות) של פני המים נמוכה.
- **בחודשי החורף** (דצמבר-פברואר/מרץ, כחול) נמדדה עליה משמעותית בקצב ירידת המפלס. במהלך החורפים בשנות ה-70 ותחילת ה-80 של המאה הקודמת מפלס הים היה עולה בחודשי החורף, ואילו בשני העשורים האחרונים כמעט לא נרשמת עליית מפלס, אלא המשך ירידת מפלס גם בחודשי החורף. המגמה הכללית היא התגברות בקצב ירידת המפלס בשיעור של 4.29 ס"מ/שנה/שנה (4.7 ס"מ/שנה/שנה כאשר מכלילים את חודש מרץ בחודשי החורף). על פי מבחן MK מגמה זו מובהקת ברמה של 1% ( $p\text{-value}=0.0061$ ) והמגמה השלילית עומדת על 3.38 ס"מ/שנה/שנה (3.98 ס"מ/שנה/שנה עבור חורף הכולל את חודש מרץ; מובהקות 5%). לגבי חודשי החורף, בדקנו את חודשי דצמבר-פברואר וכן דצמבר-מרץ, ההתלבטות לגבי מרץ היתה שמצד אחד אלו חודשים של נגר של סוף עונת הגשמים, אך מצד שני בחודש זה מתחילות השאיבות של המפעלים (איור 5). קו הרגרסיה של שני האינטרוולים בעל שיפוע דומה מאוד, כפי שמוצג באיור A6 (קו כחול רציף ומרוסק, בהתאמה).



איור 6: שינויים עונתיים ורב שנתיים במפלס (A) ובאוגר (B) של ים המלח. ההסבר לאופן החישוב מופיע באיור 3 ובטקסט הנלווה.

תמיכה לממצאים אלה, ניתן לראות באיור A7, המציג את שינוי המפלס בים המלח לאורך השנים בפילוח חודשי. באיור זה ניתן לראות בברור שבחודשי הקיץ קצב ירידת המפלס גבוה לאורך כל התקופה והוא יציב באופן יחסי. מאידך, בחודשי החורף ישנה מגמה רב שנתית של מעבר מעליות מפלס למצב של ירידות מפלס מאמצע שנות ה-90 של המאה הקודמת. כמות המשקעים מוצגות באיור A8 ובאיור B7 וידונו בפרק הבא.



איור 7: שינויים עונתיים ורב שנתיים בקצב שינוי המפלס של ים המלח (A), ובכמות משקעי גשם חודשית בירושלים (B); ראה טקסט.



## 4. דיון: הגורמים למגמות שינוי המפלס

### חודשי הקיץ

המשמעות של הקצב הקבוע יחסית בירידת המפלס בחודשי הקיץ בארבעת העשורים האחרונים היא שאת המגמה הרב שנתית של התגברות בקצב ירידת המפלס לא ניתן לייחס לחודשים אלו. לפיכך, המגמה הרב שנתית של התגברות בקצב ירידת המפלס לא יכולה להיות מוסברת על ידי פעילות הידרולוגית בקיץ, כיוון שהיא נמצאה קבועה בזמן. כפי שצוין לעיל, בחודשי הקיץ (יוני-ספטמבר), זרימות הנחלים בשפל (זרימות בסיס בלבד) והשאיבות של המפעלים בשיא. לפיכך, גם אם היו שינויים רב שנתיים בפעילות המפעלים ובתנאים האקלימיים בקיץ, אין לכך ביטוי בקצב ירידת המפלס. השינויים העיקריים שהתרחשו באגן הדרומי בארבעת העשורים האחרונים שיכולים היו להגדיל את צריכת המים מהאגן הצפוני כוללים גידול בשטחי האידוי בבריכות המפעלים, בעיקר במפעל הירדני (נספח 2), וכן הגברה בקצב האידוי כפי שנמדד בסדום בגיגית (נתוני השירות המטאורולוגי, [Alpert et al., 1997]). בתחילת שנות ה-80 הוקמו בריכות האידוי הירדניות. ניתן להעריך שבשנים אלו, על מנת למלא את הבריכות, נשאבו מהאגן הצפוני 100-250 מלמ"ק (לכל התקופה, כ-4 שנים). ייתכן ושאיבות אלו בוצעו גם בחורף, והיתה להן השפעה קצרת טווח על ירידת מפלס האגן הצפוני (שווה ערך לירידת מפלס של 15-35 ס"מ). בשל הצטמצמות בשטח האידוי באגן הצפוני (כ-20% ב-39 שנות המדידה), קצב ירידת המפלס צפוי היה להתמתן בשיעור של כ-1 מ"מ/שנה (בהנחה ששאר הכניסות והיציאות קבועות בזמן, ראה נספח 1). שיעור זה דומה למגמה הרב שנתית בחודשי הקיץ (מיתון של כ-2 מ"מ/שנה, איור 8).

לסיכום, למרות שתתכן התגברות מסויימת בפעילות המפעלים בעשורים האחרונים, אין זה בא לידי ביטוי במדידות המפלס.

### חודשי החורף

המגמה הרב שנתית של שינוי המפלס בחודשי החורף (איור 8) נובעת מכך שפחות מים מגיעים לאגם בחורף, כתוצאה משני גורמים אפשריים: 1) מגמה רב שנתית של התמעטות משקעים על האגן וכתוצאה מכך פחות נגר, 2) מגמה של תפיסה של מי נגר במעלה האגנים.

### כמות המשקעים

דוח עדכני של השירות המטאורולוגי על "שינויים אקלימיים בישראל" [2015], קובע שלא נמצאה מגמה של שינוי בכמות המשקעים בישראל, ומעל אגן הניקוז של ים המלח בפרט. לדוגמה, באיור A8 מוצגים ערכים של משקעים שנתיים מאז 1976 בתחנה של ירושלים, כמייצגת את האגן (ראה לעיל). בנתונים אלו, לא נמצאה מגמה רב שנתית מובהקת בעשורים האחרונים ( $p\text{-value}=0.24$  ע"פ MK). איור B7, מוצגים נתוני כמות משקעים חודשיים מתחנה זו, לאורך העשורים האחרונים ובפילוח חודשי. ניתן לזהות שינויים בין חורפים סמוכים, אך לא נראית מגמה רב שנתית של ירידה בכמות המשקעים. עם זאת, בשל השונות הגבוהה של סדרת הזמן, יתכן שיש מגמה שאינה מובהקת ברמה של עד 25 מ"מ לעשור [Morin, 2011; Shohami et al., 2011].

מתוך השוואה בין שני חלקי איור 7 (קצב שינוי מפלס וכמות משקעים), נראה שישנה תאימות בין השינויים העונתיים (שינויים בציר האנכי) בכמות המשקעים ובקצב שינוי המפלס, כשבעונה הגשומה ישנה עליית מפלס או מיתון בקצב הירידה, ובעונת הקיץ ישנה ירידת מפלס בקצב גבוה (~2 מ' לשנה). לעומת זאת במגמה הרב שנתית בחודשי החורף, ישנה חוסר תאימות בין קצב שינוי המפלס לכמויות המשקעים לאורך השנים; קצב ירידת המפלס הולך ומתגבר בחודשי החורף, בעוד שהמגמה של שינוי בכמות המשקעים, גם אם קיימת, אינה מובהקת.



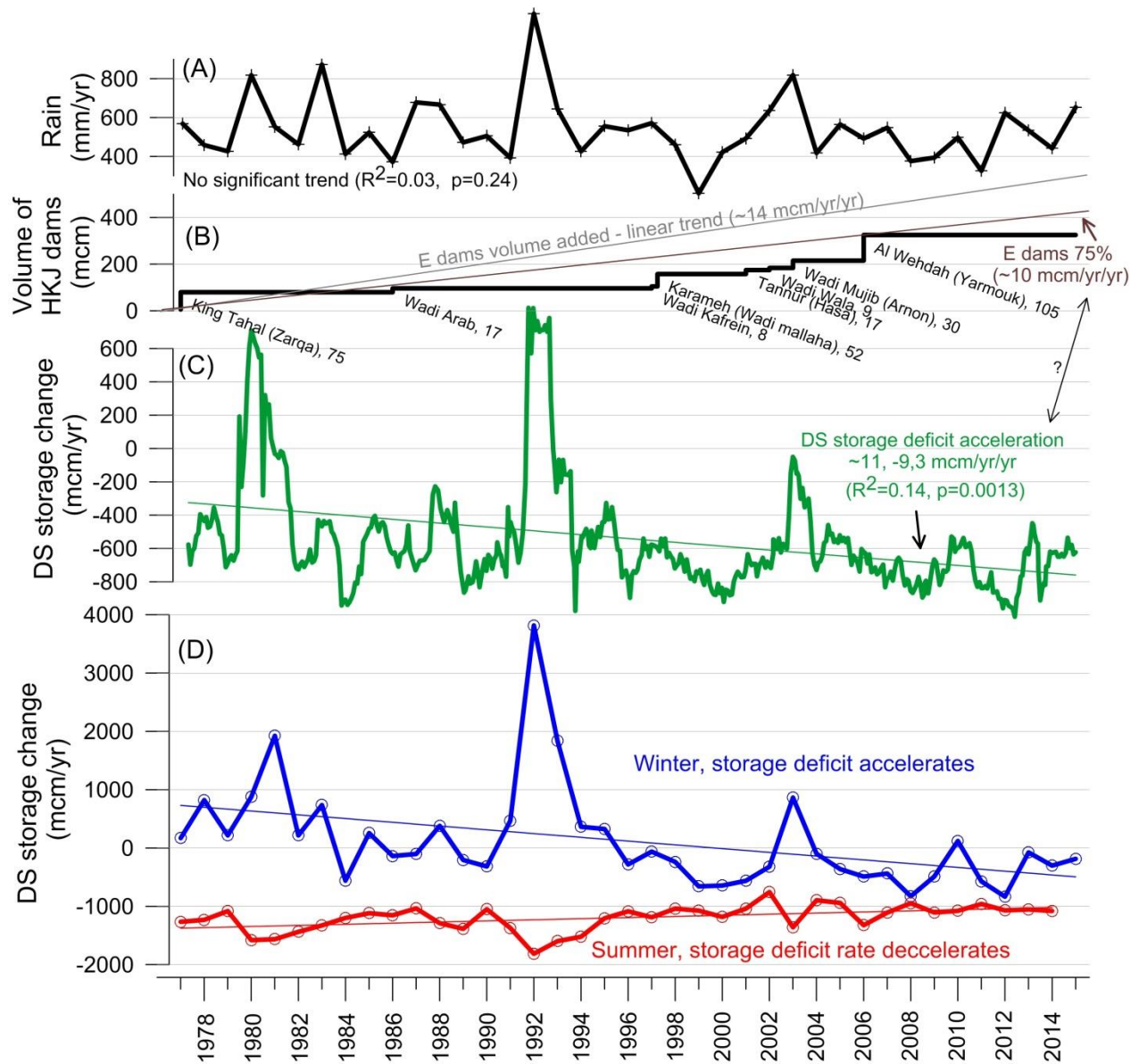
## סכירת אגני הניקוז של ים המלח

הקמת סכר דגניה לצרכי הפקת חשמל הידרואלקטרי ומאוחר יותר סכירתו המוחלטת לצורכי שאיבה למוביל הארצי (1964), והטיית חלק ממי הירמוך בסוף שנות ה-50 גרמו להקטנה משמעותית של המים שזורמים לים המלח באמצע המאה הקודמת (גרעון של כ-500 מלמ"ק לשנה), ובכך החל תהליך ירידת המפלס של האגם, שהגיע לשיעור של כ-0.7 מ' לשנה, עם תחילת המדידות החודשיות של מפלס ים המלח (איור 2). בעבודה זו נבחנו השפעתם האפשרית של הסכרים והמאגרים שנבנו מאוחר יותר, על המאזן ההידרולוגי של ים המלח. מאז 1977, נבנו שמונה סכרים גדולים בממלכת ירדן בחלקו המזרחי של אגן הניקוז של הירדן ובאגנים המזרחיים לים המלח, בעלי נפח איגום כולל של יותר מ-300 מלמ"ק בשטח ממלכת ירדן (איור 1 ואיור 8, נספח 3, [MWI, 2004; Hadadin, 2015]). ככלל, נבנו הסכרים במורד אגני ההיקוות, והם סוכרים כ-18,500 קמ"ר (כ-43% משטח אגן ההיקוות של ים המלח) רובם ממוקמים באזורים המאופיניים באקלים צחיח למחצה עד ים תיכוני (>200 מ"מ/שנה). מעל 42 סכרים נוספים נבנו בסוריה במעלה אגן הניקוז של הירמוך-רוקד, בנפח של 245 מלמ"ק [FAO, 2008]; הסכרים נבנו בעיקר בשנות ה-80-90 של המאה הקודמת [Soffer et al., 1999], וכן נבנו עוד סכרים בעשור האחרון [Namrouqa, 2012]. כלומר, נפח המאגרים על האגנים המזרחיים עומד על מעל 550 מלמ"ק. במערב אגן הניקוז של הירדן, המאגר הגדול הינו מאגר תרצה שהוקם במהלך סוף שנות ה-90 של המאה הקודמת; מאגר זה בעל נפח איגום של כ-5 מלמ"ק. לאורך אגן הניקוז של הערבה (איור 1) הוקמו בעשורים האחרונים מספר מאגרים לתפיסת מי שיטפונות, בנפח כולל של מעט מעל 10 מלמ"ק.

בהעדר נתונים הידרולוגיים רציפים ומפורטים במרחב אודות האגנים המזרחיים של ים המלח וממורד נהר הירדן, קשה להעריך במדויק את הגרעון שיוצרים הסכרים במאזן המים של ים המלח. על סמך דיווחים חלקיים על הפקה שנתית של מי הסכרים, וכן נתונים הידרולוגיים כלליים, ניתן לחשב טווח נפחים כולל הנגרע מהמאזן עם השנים. חלק מהמים במאגרים אלו נשמרים עד סוף הקיץ (כפי שניתן להבחין בתצלומי לוויין). מדד מינימום להערכת נפח המים שנגרע ע"י הסכרים מהנגר העילי באגן הינו מידת ההפקה מהם (מים הנשאבים מהמאגרים לשימושים שונים), שעומד על 50-75% מנפח האיגום (ראה נספח 2, ו- [Hadadin, 2015]). כלומר, לאחר 2006 (הקמת סכר El Wehdah על הירמוך), נפח המים המנוצל מהסכרים במזרח אגן ים המלח (שהוקמו מאז 1977) עולה על 275-415 מלמ"ק [Kaisi et al., 2005; FAO, 2008], (באיור B8 מוצג קו מגמה אפור המתייחס להתגברות סכירת מים בשיעור של 13 מלמ"ק/שנה עד למצב הנוכחי שמוערך ב-500 מלמ"ק כגבול עליון).

לפיכך, מגמת העליה בגרעון השנתי באוגר המים בים המלח, מכ-400 מלמ"ק בשנות ה-80 של המאה הקודמת לכ-700 מלמ"ק בעשור האחרון, יכולה להיות מוסברת בניצול של כ-75% מנפח הסכרים שנבנו בתקופה זו באגנים המזרחיים של אגן הניקוז של ים המלח, בהתאם לדיווח על ניצול המים מהמאגרים (איור B8, קו מגמה חום). נפחי מים המשמשים את משק המים [Namrouqa, 2012; Al-Taani, 2013] נגרעים בסופו של דבר מאגן הניקוז של ים המלח ומהווים גורם מרכזי להאצה בקצב ירידת המפלס.

מרכיבים נוספים שיכולים להצטרף למגמה של הצטמצמות מקורות המים שמגיעים לים המלח כוללים פוטנציאל לשינוי אקלימי (המתמטות בכמות המשקעים אינה מובהקת, כמצויין לעיל), והצטמצמות שפיעות מי תהום לים המלח ולנחלים המתנקזים אליו כתוצאה משאיבות. לגורמים אלו יכולה להיות השפעה רב שנתית (לא עונתית) על מפלסי ים המלח, אך משנית ביחס להשפעת המאגרים.



איור 8: סדרת זמן של (A) כמות משקעי גשם שנתית (תחנה בירושלים), (B) גרף מדרגות - נפח מצטבר של סכרים שנבנו באגנים המזרחיים של ים המלח מדרום לירמוך, כולל את סכר Al Wehdah [Hadadin, 2015], גרף אפור - מגמה של כלל הסכרים שנבנו כולל באגן הירמוך בתקופה זו (בנפח כולל של כ-550 מלמ"ק) עם שיפוע של כ-14 מלמ"ק/שנה\שנה, בחום - הערכת הניצולת מהמאגרים (75%) שגדלה עם הזמן בקצב של כ-10 מלמ"ק/שנה\שנה, (C) קצב שינוי האוגר של ים המלח - ישנה מגמה של חוסר בקצב מתגבר בשיעור של כ-10 מלמ"ק/שנה\שנה, ו- (D) מגמות רב שנתיות של שינוי האוגר בים המלח בפילוח לפי עונות חורף וקיץ (כחול ואדום בהתאמה). נפח המים שמופק מהסכרים (B) נאגר בחודשי החורף, והוא יכול להסביר את מגמת הגרעון הרב שנתי באוגר בים המלח (10~ מלמ"ק/שנה\שנה). שיפועי המגמות המצויינים בגרף מתייחסים לרגרסיה ליניארית (ערך ימני) ושיפוע ע"פ MK (שמאלי). הערך P מתייחס לרמת המובהקות של מבחן MK עבור סדרות הזמן השונות.

## 5. סיכום

- מפלס ים המלח ירד בארבעת העשורים האחרונים בשיעור כולל של למעלה מ-30 מ'.
- קצב ירידת המפלס מתגבר עם הזמן בשיעור של 2.2 ס"מ/שנה/שנה; בשנות ה-80-70 של המאה הקודמת עמד על 0.7 מ'שנה, וכיום 1.2 מ'שנה.
- קצב האידיוי מעל האגם אמור היה לקטון ביותר מ-20% בעקבות שילוב של צמצום שטח האגם ועליה בריכוז התמלחת שבפני השטח שלו. לפיכך, קצב ירידת המפלס היה צפוי להתמתן, אך המדידות מראות שהינו במגמת עליה.
- משיקולי מאזן הידרולוגי, הסיבה לעליה בקצב ירידת המפלס יכולה להיות מוסברת בהתמעטות מתמשכת של הכניסות נטו לים המלח, כלומר בהפרש בין כניסות מים לאגם (נחלים, מעיינות, משקעים) לבין הגרעון כתוצאה של פעילות מפעלי האשלג.
- כדי להבחין בין מרכיב הזרימות לאגן לבין השאיבות של המפעלים, ביצענו ניתוח עונתי הניתוח מבוסס על הזרימות שהינן פועל יוצא של משקעי הגשם בחודשי החורף, ואילו הגרעון של המפעלים מבוסס על האידיוי שמתרחש בעיקר בחודשי הקיץ.
  - במהלך עונת הקיץ (יוני-ספטמבר) – לא נמצא שינוי במגמת ירידת קצב המפלס. לפיכך הגרעון כתוצאה של פעילות המפעלים קבוע בזמן ומרכיב זה בגרעון המים לא יכול להסביר את המגמה הכללית של ההתגברות בקצב ירידת המפלס.
  - במהלך עונת החורף (דצמבר-מרץ/פברואר) – קיימת מגמה ברורה של עלייה בשינוי קצב ירידת המפלס שמסביר את ההתגברות הכללית בקצב ירידת המפלס.
- נבחנו הגורמים האפשריים לעליה בקצב ירידת המפלס בחורף: (1) התמעטות משקעי חורף, (2) איגום מים בסכרים במעלה אגני הניקוז.
  - משקעים: מנתוני השירות המטאורולוגי עולה כי בארבעת העשורים האחרונים לא חל שינוי מובהק בכמות משקעי הגשם מעל אגן הניקוז של ים המלח.
  - מאגרים:
    - עם הקמת סכר דגניה (1964) נחסמו מרבית המים המגיעים לים המלח מאגן ההיקוות של הכנרת.
    - בארבעת העשורים האחרונים הוקמו סכרים על כל האגנים המזרחיים הגדולים לצורך תפיסת מים לשתיה והשקיה, בנפח של מעל 550 מלמ"ק. ניצול המים השנתי מהמאגרים מוערך בכ-75%-50 מנפח המאגרים. כלומר הערכת חסר של גרעון המים מהאגנים המזרחיים עומד על 415-275 מלמ"ק לשנה. קצב ההתגברות של תפיסות המים בארבעת העשורים האחרונים מוערך לפיכך בכ-10 מלמ"ק/שנה/שנה.
    - מאגרים באגנים ממערב לנהר הירדן וים המלח מסתכמים בכ-10 מלמ"ק, כולל האגנים בערבה באזור הצחיח.
- מסקנות: גרעון המים השנתי באוגר המים בים המלח עלה מכ-400 מלמ"ק בשנות ה-80 של המאה הקודמת לכ-700 מלמ"ק בעשור האחרון; קצב ההתגברות של גרעון האוגר גדל בממוצע בכ-10 מלמ"ק/שנה/שנה. הגורם העיקרי להתגברות בגרעון האוגר קשור בניצול המתגבר של מי נגר לצורך שתיה והשקיה על ידי סכרים שנבנו בתקופה זו באגנים המזרחיים של אגן ים המלח. נבחנה השפעתם של גורמים עיקריים נוספים על המגמה בקצב שינוי המפלס; השפעת האידיוי ופעילות המפעלים בקיץ מצביעים על מגמת התמתנות, ומשקעי הגשם אינם מצביעים על מגמה מובהקת של שינוי - על כן להערכתנו השפעת הגורמים האחרים קטנה מאוד ביחס לנפחי המים הנסכרים במעלה האגן.

## תודות

לרבקה אמית, איל שלו, רביד רוזנצוויג, יהודה אנזל, אפרת מורין, יוסי יחיאל, שמואל אסולין, יוסי טנאי ומיכאל בייט על הערות מועילות.

לחגי אטינגר, אורי שמחאי, אפרת פרבר, אהוד סימון, אבי בורג, והילל גלזמן באיתור חומר על מאגרים.

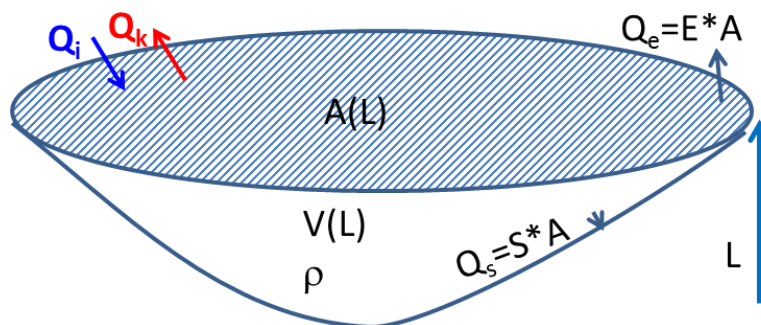
לעמיר גבעתי, אודי גילי וריטה צ'ודינוב על נתוני מפלס ים המלח.

המחקר נעשה במימון פרויקט המכון הגיאולוגי: "תגובת התשתית באגן ים המלח לשינויים הטבעיים ומעשה ידי אדם: מסגרת רב שנתית לניטור ומחקר, 2013-2016", מימון על ידי ממשלת ישראל (החלטת ממשלה 4254, 12/2/2012).

## נספח 1- מודל מאזן מסה ותחזית למפלסי ים המלח

### מאזן המסה והשטפים

כדי להדגים את המגמות הצפויות של שינוי המפלס עם הצטמצמות שטח האגם, אנו מציגים מודל מאזן מסה לאגן הצפוני של ים המלח, ומציגים פתרונות אנליטיים מקורבים. חלקים גדולים ממרכיבי מאזן המים והמלח עוקבים אחרי הגישה של (Lensky et al. (2005. איור 9 מציג את מרכיבי המאזן העיקריים שנלקחו בחשבון.



איור 9: איור סכימטי של הגיאומטריה של האגם עם מרכיבי המאזן העיקריים. L הינו עומק המים מעל קרקעית האגם בנקודה העמוקה ביותר. ראה טקסט לפירוט הפרמטרים האחרים.

במשוואה 5 מנוסח המאזן הכולל את השינוי באוגר האגם (אגף שמאל), כתוצאה מהשטפים פנימה לאגם וחוצה לו (אגף ימין):

$$\frac{dM}{dt} = Q_i - Q_k - Q_e - Q_s \quad 5$$

כאשר M היא המסה הכוללת של הים  $M = \rho V$ ,  $\rho$  צפיפות המים, V נפח האגם, והשטפים הינם  $Q_i$  כניסות מים (נחלים, מעיינות ומשקעי גשם ישיר),  $Q_k$  גרעון מפעלי האשלג,  $Q_e$  אידוי, ו- $Q_s$  גיבוש מלח. האידוי וגיבוש המלח נלקחים כשטף ליחידת שטח כפול השטח A:  $Q_e = E * A$ ,  $Q_s = S * A$ : קצב אידוי ליחידת שטח ו-S קצב גיבוש מלח ליחידת שטח; ההפרש בין שטח פני האגם לשטח הקרקעית זניח בהקשר זה). נציין שמבחינת יכולת המדידה, צד שמאל של המשוואה בר

מדידה בדיוק גבוה (מפלס בדיוק של 1-2 ס"מ, נפח מבתמטריה, צפיפות בדיוק טוב מאלפית), בעוד ששאר המרכיבים של המערכת ההידרולוגית קשים למדידה ובהם אי וודאות ביחס לפרמטרים רבים כגון אידוי, זרימות, גרעון המפעלים.

כדי פתור פתרון אנליטי של הקשר בין מפלס הים למערכת ההידרולוגית, נפשט את הבעיה בכך שניחש  $\rho, S, E, Q_k, Q_i$  קבועים בזמן ונגדיר  $Q_i - Q_k = b$ , ו-  $E + S = c$ . הנחות אלו יתנו פתרון שלא לוקח בחשבון את ההאטה בקצב האידוי וגיבוש המלח בגלל התרכוזות התמלחת. ההנחה ש-  $Q_k, Q_i$  קבועים תבחן בפרקים הבאים, בשלב זה ההנחה משרתת את התרגיל של בחינת השפעת הצטמצמות שטח האגם עם ירידת המפלס. לאחר הצבה במשוואה 5 מקבלים:

$$\rho \frac{dV}{dt} = -cA + b \quad 6$$

ההצדקה להזנחת שינוי הצפיפות נובעת מכך שהשינוי היחסי בנפח האגם גדול בשני סדרי גודל מהשינוי היחסי בצפיפות  $(dV/V \gg dp/\rho)$ . את הנגזרת באגף שמאל נכתוב כך:  $\rho A \frac{dL}{dt} = \rho \frac{dV}{dL} \frac{dL}{dt} = \rho \frac{dV[L(t)]}{dt}$ . נציב חזרה ב-6 ונקבל את משוואת שינוי המפלס:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{-cA + b}{\rho A} \quad 7$$

### פתרון למצב עמיד – מפלס אגם יציב

במצב של מפלס אגם יציב, האגף השמאלי של משוואה 7 מתאפס ( $dL/dt=0$ ). מכך נובעות שתי תובנות חשובות:

- מצב זה אפשרי רק אם  $b > 0$ , כלומר הספיקה הנכנסת (נחלים וכו') גדולה מהספיקה היוצאת למפעלים  $Q_i > Q_k$ , אחרת הפתרון לא מתייצב והמשמעות היא שהאגם המחושב יתייבש לגמרי.
- שטח האגם (A) במצב יציב נקבע על ידי היחס בין הספיקות הנכנסות והיוצאות (b), לבין היציאות באידוי וגיבוש ליחידת שטח (c) (משוואה 8); ככל שהכניסות יהיו גדולות יותר כך שטח האגם יתייצב על שטח גדול יותר (ובמפלס גבוה יותר), וכן ככל שריכוז התמיסה יעלה וקצב האידוי והגיבוש ירד – המפלס יתייצב על שטח גדול יותר:

$$A = \frac{b}{c} = \frac{Q_i - Q_k}{E + S} \quad 8$$

כיוון שקצב האידוי והגיבוש קטן עם התרכוזות התמלחת (בשל עליה בריכוז היונים המסיסים), יש לקחת זאת בחשבון. כלומר הפתרון המוצג במשוואה 8 מתייחס לערכי E ו-S קבועים. אם לוקחים את הערכים הנתונים של היום, נקבל פתרון עמיד בו שטח האגם המחושב קטן מהמצופה והמפלס נמוך. ניתן לקבל הערכה לגבי מגמות S ו-E עם ירידת המפלס מתוך הרצות מודל [Gavrieli et al., 2011], בהן ירידת מפלס של 60 מ' (-425 עד -485 מ', איור 5.73 שם) היתה כרוכה בהתרכוזות התמלחת והקטנת קצב האידוי מ-1.15 ל-1.0 מ' לשנה וקצב הגיבוש ירד מ-0.09 ל-0.05 מ' לשנה. כלומר בתרחיש כזה, השטח המחושב של האגם, A, יהיה גדול יותר בכ-15%, בהשוואה לשימוש בערכי S+E של היום.

## פתרון דינמי – שינוי המפלס בזמן

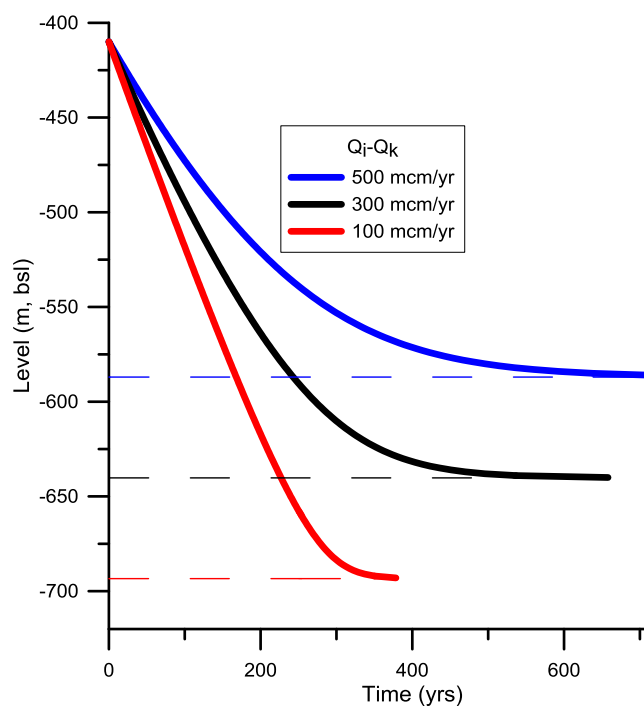
כדי לעקוב אחר התפתחות המפלס בזמן, יש לפתור את משוואה 7, בהנתן קשר בין השטח (A) לעומק המים (L). כדי להגיע לפתרון אנליטי, יש למצוא משוואה שקושרת בין השטח למפלס (איור 4); לשם פשטות נניח קשר ליניארי:  $A=a \cdot L$ , כאשר  $a$  הוא שינוי השטח עם העומק (2.5 קמ"ר/מ'). אחרי שנציב את A במשוואה 7 נקבל:

$$\frac{\rho}{c} \cdot \frac{L}{\frac{b}{ca} - L} dL = dt \quad 9$$

אחרי אינטגרציה של משוואה 9, מתקבל הקשר המבוקש בין המפלס (L) לזמן (t):

$$-\frac{\rho}{c} \left( \frac{b}{ca} \ln \left( L - \frac{b}{ca} \right) + L \right) + const. = t \quad 10$$

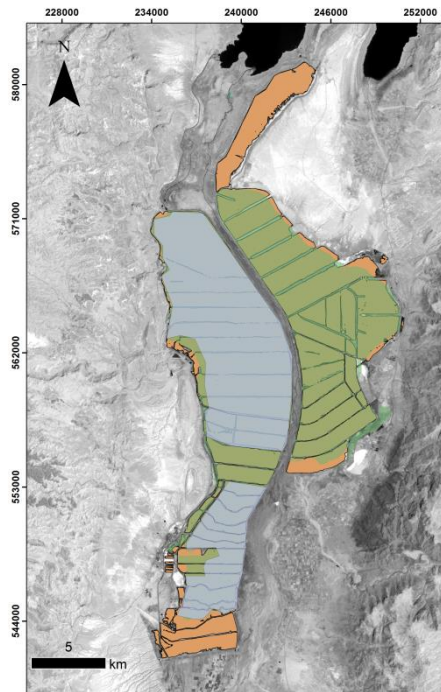
הפתרון מוצג באופן גרפי באיור 10. בחרנו 3 ערכי ספיקות (פרמטר b) בסביבות הערך הנוכחי [Lensky et al., 2005; Gavrieli et al., 2011] (100, 300 ו-500 מלמ"ש). הפתרונות מראים התמתנות בקצב ירידת המפלס עד הגעה להתייצבות בערך האסימפטוטה (מקווקו, משוואה 8). הפתרונות אינם כוללים התייחסות לעליה הצפויה במליחות התמיסה, ולכן הפתרונות המוצגים הם מקרה מחמיר של קצבי ירידת מפלס (ראה לעיל).



איור 10: מפלסי ים המלח מחושבים משיקולי מאזן מסה (משוואה 10). במקווקו מופיעים הערכים של התייצבות המפלס בכל תרחיש על בסיס מאזן המסה במצב עמיד (משוואה 8).

## נספח 2: שטחי בריכות האידוי באגן הדרומי

בתחילת שנות ה-80 של המאה הקודמת נבנו בריכות האידוי הירדניות לצד הישראליות ובכך גדל שטח הבריכות בכ-196%; מאז ועד היום, גדל שטח בריכות האידוי בכ-8% נוספים. בנוסף לכך, במדידות בסביבת מפעלי ים המלח הישראליים נמצאה עליה מקומית בקצב אידוי מגיגית (נתוני השירות המטאורולוגי). יחד עם זאת, כאמור, על-פי הניתוח שהוצג לעיל, אין לעליה זו ביטוי משמעותי בקצב ירידת המפלס בחודשי הקיץ (לא נמצאה מגמת שינוי בקצב ירידת המפלס בחודשי הקיץ, איור 8, איור 7).



איור 11: שטחי בריכות האידוי באגן הדרומי של ים המלח בשנים 1978 (כחול; כ-115 קמ"ר), 1984 (ירוק; 226 קמ"ר), ו-2014 (כתום; 244 קמ"ר), על גבי הדמאת לויין לאנדסאט מתחום ה-NIR (4/5/2014).



### נספח 3: סכרים באגני הניקוז של ים המלח

הסכרים שנבנו בממלכת ירדן באגן הניקוז של נהר הירדן והנחלים המתנקזים ישירות לים המלח. מיקום הסכרים מופיע באיור 1 לפי הקוד בטבלה. הטבלה מתוך *Hadadin* [2015].

S. No.		Location	River / Wadi	Catchment Area Km <sup>2</sup>	Start of Operation	Construction Cost Million J.D	Dam Type	Purpose
1	King Talal Dam	Eastern Heights	Zarqa	3,700	1977 and raised in 1987	34	Earth Fill	Irrigation & Electricity
2	Wadi Arab Dam	Jordan Valley	Wadi Arab	262	1986	20	Earth Fill	Irrigation, Municipal, Industrial and Electricity
3	Kafrein Dam	Jordan Valley	Wadi Al-Kafrein	163	1967 Raised in Year 1997	9.3	Earth Fill	Irrigation and Recharge
4	Shuaib Dam	Jordan Valley	Wadi Shuaib	178	1969	0.56	Earth Fill	Irrigation and Recharge
5	Ziglab Dam	Jordan Valley	Wadi Ziglab	106	1967	0.9	Earth Fill	Irrigation, Municipal, and Industrial
6	Karameh Dam	Jordan Valley	Wadi Al-Mallahah	61.2	1997	55	Earth Fill	Irrigation, Desalination and Recreation
7	Tannur Dam	Taffaila	Wadi Al-Hassa	2160	2001	23.3	Roller Compacted Concrete (RCC)	Irrigation, and Industrial
8	Mujib Dam	Karak Governate	Wadi Mujib	4380	2003	50	RCC & Earth Fill	Irrigation, Municipal, and Industrial
9	Wala Dam	Madaba Governate	Wadi Wala	1770	2003	25	RCC & Earth Fill	Irrigation, Municipal, Industrial and Recharge
10	Al Wehdah Dam	Yarmouk District/ Irbid Governate	Yarmouk River	5000 Km <sup>2</sup> Jordan 1200Km <sup>2</sup>	2006	80	RCC	Irrigation, Municipal, and Industrial

Dam	DIMENSIONS				CAPACITY: (MCM)					
	Height (m)	Length at Crest (m)	Width at Crest (m)	Body Volume (MCM)	Total (MCM)	Dead (MCM)	Life (MCM)	Res. Area (Km <sup>2</sup> )	Annual Evaporation MCM/yr	
1 King Talal	108	350	11.5	5.7	86	11	75	2.8	4.3	
2 Wadi Arab	83.5	434	8.5	3.1	20	3.2	16.8	0.8	1.5	
3 Kafrein	37	552	6	2.1	8.2	0	8.2	0.8	1.5	
4 Shuaib	32	730	5	0.9	2.3	0.9	1.4	0.3	0.6	
5 Ziglab	48	745	6	1.35	4.3	0.4	3.9	0.3	0.56	
6 Karameh	44.5	2150	10	11	52	0	52	5	N.A	
7 Tannur	60	270	8	0.215	16.8	0	16.8	0.84	N.A	
8 Mujib	62	720	9	0.72 RCC and 1.0 Fill	31.2	1.4	29.8	1.98	N.A	
9 Wala	45	480	9	0.205 RCC and 7.0 Fill	9.3	1.4	7.9	0.86	N.A	
10 Al Wehdah	86	485	7.2	1.43	110	5	105	3.75	N.A	

1.1.1. Inland Surface and Groundwater

The studies showed that average total surface water is 10635 million m<sup>3</sup>/year, and average total groundwater including springs is 5256 million m<sup>3</sup>/year. Table 1 presents the average surface and groundwater distributed to the seven water basins as well as total available regulated water.

Table 1. WRs (surface and groundwater) in Syria

WRsbasins	Hydrological basins							Total m.m <sup>3</sup>
	Barada & Awaj	Yarmouk	Badia	Orontes	Coastal	Tigris & Khabour	Euphrates & Aleppo	
Surface (m.m <sup>3</sup> )	19	168	152	1036	1453	735	7073	10635
Ground (m.m <sup>3</sup> )	774	249	168	1499	726	1493	346	5256
Total (m.m <sup>3</sup> )	793	417	320	2535	2179	2228	7419	15891
Regulation degree (%)	90	85	60	85	65	95	98	
Available regulated WRs (m.m <sup>3</sup> )	714	354	192	2155	1416	2117	7271	14218

1.2. Water Uses

Considering Table 2, we see that the total (surface and groundwater) water used in irrigated agriculture was 14 billion m<sup>3</sup> in 2002, while the water amount used for drinking and domestic purposes is more than 1 billion m<sup>3</sup>, and 561 million m<sup>3</sup> for industry in the same year. Evaporation losses from free water bodies (natural lakes and storage dams) amounted 1962 million m<sup>3</sup>/year.

Table 2. Evaporation and uses of available WRs in the different sectors

Water use/basin		Hydrological basins							Total m.m <sup>3</sup>
		Barada & Awaj	Yarmouk	Badia	Orontes	Coastal	Tigris & Khabour	Euphrates & Aleppo	
Agricultural irrigation	Ground	785.8	211.8	68	1137.2	99.5	4305	1440.7	8048
	Surface	-	188.6	-	954.9	466.8	-	4314	5925.1
Drinking and domestic use		269	76	44	240	81	38	322	1070
Industry		76	38	2	229	85	45	86	561
Evaporation losses		6	31	15	148	16	132	1614	1962
Total use		1136.8	545.4	129	2709.1	748.3	4520	7777.5	17566.1

ומתוך [FAO, 2008]:

TABLE 3  
Main dams in Syria (MLAE, 2007)

Basin	Number of dams	Total storage capacity (million m <sup>3</sup> )
Yarmouk	42	245

מאז פרסום נתונים אלו נוספו עוד מאגרים ושאיבות מים מאגן הירמוך בשטח סוריה, מה שגרם למתיחות בין ירדן לסוריה, בעקבות טענת הירדנים על הפרת הסכם המים בין המדינות וגריעת מים מהסכר המשותף על הירמוך.  
[Namrouqa, 2012].

- Alpert, P., H. Shafir, and D. Issahary (1997), Recent changes in the climate at the Dead Sea - a preliminary study, *Clim. Change*, 37, 513–537.
- Al-Taani, A. A. (2013), Seasonal variations in water quality of Al-Wehda Dam north of Jordan and water suitability for irrigation in summer, *Arab. J. Geosci.*, 6(4), 1131–1140.
- Arnon, A., N. G. Lensky, and J. S. Selker (2014), High-resolution temperature sensing in the Dead Sea using fiber optics, *Water Resour. Res.*, 50(2), 1756–1772.
- Beyth, M., I. Gavrieli, D. A. Anati, and O. Katz (1993), Effects of the December 1991 - May 1992 floods on the Dead Sea vertical structure, *Isr. J. Earth Sci.*, 42, 45–47.
- Bodzin, R., N. Lensky, L. Hallel, and A. Arnon (2014), Dead Sea level: high resolution observations and their significance, in *Geological Society of Israel, Ann. Meet.*
- Enzel, Y., R. Bookman, D. Sharon, H. Gvirtzman, U. Dayan, B. Ziv, and M. Stein (2003), Late Holocene climates of the Near East deduced from Dead Sea level variations and modern regional winter rainfall, *Quat. Res.*, 60(3), 263–273, doi:10.1016/j.yqres.2003.07.011.
- FAO (2008), *Syrian Arab Republic, Irrigation in the Middle East region in figures - AQUASTAT Survey 2008.*
- Gavrieli, I. et al. (2011), *Red Sea to Dead Sea water conveyance (RSDSC) study: Dead Sea Research Team*, Geological Survey of Israel and Tahal Group, Jerusalem.
- Gertman, I., and A. Hecht (2002), The Dead Sea hydrography from 1992 to 2000, *J. Mar. Syst.*, 35(3-4), 169–181, doi:10.1016/S0924-7963(02)00079-9.
- Greenbaum, N., A. Ben-Zvi, I. Haviv, and Y. Enzel (2006), The hydrology and paleohydrology of the Dead Sea tributaries, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 401(August 2015), 63–93, doi:10.1130/2006.2401(05).
- Hadadin, N. (2015), DAMS IN JORDAN CURRENT AND FUTURE PERSPECTIVE, *Can. J. Pure Appl. Sci.*, 9, 3279–3290.
- Hassan, M. A., and M. Klein (2002), Fluvial adjustment of the Lower Jordan River to a drop in the Dead Sea level, *Geomorphology*, 45(1-2), 21–33, doi:10.1016/S0169-555X(01)00187-8.
- Holtzman, R., U. Shavit, M. Segal-Rozenhaimer, I. Gavrieli, A. Marei, E. Farber, and A. Vengosh (2005), Quantifying ground water inputs along the Lower Jordan River, *J. Environ. Qual.*, 34(3), 897–906.
- IHS (2015), *Dead Sea Levels 1976-2015*, Israel Hydrological Service,
- IMS (2015), “שינויים אקלימיים בישראל” ממצאי השירות המטאורולוגי, מרץ 2015.
- Kaisi, A., M. Yasser, and Y. Mahrouseh (2005), Syrian Arab Republic country report, in *Non-conventional water use: WASAMED project*, edited by A. Hamdy, F. El Gamal, N. Lamaddalena, C. Bogliotti, and G. R., pp. 251–264, Bari : CIHEAM / EU DG Research (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 53).
- Lensky, N. G., Y. Dvorkin, V. Lyakhovsky, I. Gertman, and I. Gavrieli (2005), Water, salt, and energy balances of the Dead Sea, *Water Resour. Res.*, 41(12), 1–13, doi:10.1029/2005WR004084.
- Lensky, N. G., I. Gertman, I. Gavrieli, R. Bodzin, T. Ozer, B. Katsenelson, and A. Arnon (2011), *The expected quality of the Dead Sea brine expected to be pumped in the planned pumping station P9: Report A - Hydrography and the path of the industrial end brines in the Dead Sea*, Geol. Surv. Isr., Jerusalem, Israel.
- Morin, E. (2011), To know what we cannot know: Global mapping of minimal detectable absolute trends

- in annual precipitation, *Water Resour. Res.*, 47(7).
- MWI (2004), MWI (Ministry of Water and Irrigation), The Hashemite Kingdom of Jordan. National Water Master Plan.,
- Namrouqa, H. (2012), Yarmouk water sharing violations require political solution, *The Jordan Times*.
- Sade, A. ., J. K. Hall, G. Amit, G. Tibor, B. Schulze, I. Gur-Arieh, U. ten Brink, and Z. Ben Avraham (2014), Multibeam Bathymetric Map of the Dead Sea, in *Israel Geological Society, annual meeting*.
- Schattner, I. (1962), *The Lower Jordan Valley. Scr. Hierosolymitana XI*.
- Sen, P. K. (1968), Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *J. Am. Stat. Assoc.*, 63, 1379–1389.
- Shohami, D., U. Dayan, and E. Morin (2011), Warming and drying of the eastern Mediterranean : Additional evidence from trend analysis, , 116(November), 1–12, doi:10.1029/2011JD016004.
- Soffer, A., M. Rosovsky, and N. Copaken (1999), *Rivers of fire: the conflict over water in the Middle East*, Rowman & Littlefield Publishers.
- Williams, Z. C., and J. D. Pelletier (2015), Self-affinity and surface-area-dependent fluctuations of lake-level time series, *Water Resour. Res.*, n/a–n/a, doi:10.1002/2015WR017254.
- Yechieli, Y., I. Gavrieli, B. Berkowitz, and D. Ronen (1998), Will the Dead Sea die?, *Geology*, 26(8), 755–758.
- Yue, S., P. Pilon, and G. Cavadias (2002), Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series, *J. Hydrol.*, 259(1-4), 254–271, doi:10.1016/S0022-1694(01)00594-7.
- Zbranek, V. (2012), *Red Sea – Dead Sea Water Conveyance Study Program, Chemical Industry Analysis Study*.