

הגורמים לירידה המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות

נדב לנסקי^[1]* ואלעד דנטה^[1, 2]

^[1]המכון הגיאולוגי לישראל

^[2]המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

* nadavL@gsi.gov.il



המזח בחוף עין גדי. אם לפני שני עשורים יכלו ספינות לעגון במזח (שמימין), הרי כיום נאלצת ספינת המחקר 'תגלית' (המשמשת בסיס למחקרים בים המלח) לעגון כ־20 מטר מתחת לו | צילום: אלעד דנטה



סקירות

תקציר

מפלס ים המלח נקבע על-ידי ההפרש בין כניסות המים לאגם לבין היציאות ממנו באידוי. לאחר סכירת הכינרת והירמוך במחצית הראשונה של המאה ה־20 הופר מאזן המים של ים המלח, ומאז הוא מצוי בגירעון הידרולוגי. משנות ה־60 של המאה ה־20 החלו לפעול ברכות האידוי של מפעלי האשלג בדרום ים המלח, והגדילו את גירעון המים. על פי מודלים הידרולוגיים, המניחים שהתנאים באגן הניקוז של ים המלח לא השתנו לאחר הקמת המפעלים, ירידת מפלס ים המלח הייתה צפויה להתמתן לנוכח פיחות בלמעלה מ־20% באידוי מפני האגם בעשרות השנים האחרונות, בשל שילוב של הצטמצמות בשטח האגם ועלייה במליחות מי האגם. בפועל, ירידת מפלס ים המלח מואצת בעשורים האחרונים. במאמר זה נבחן את הגורמים להאצה בירידת מפלס ים המלח, בהתבסס על ניתוח עונתי של הגורמים והמשתנים ההידרולוגיים באגן הניקוז. מניתוח המגמות העונתיות עולה כי גירעון המים בים המלח גדל בחודשי החורף בעשורים האחרונים, שבמהלכם הוקמו סכרים ברחבי אגן הניקוז שלו.

מילות מפתח: אגן הניקוז של ים המלח · ברכות אידוי · מאגרי מים · מאזן מים · ניתוח מגמות · תעשיות האשלג

מבוא

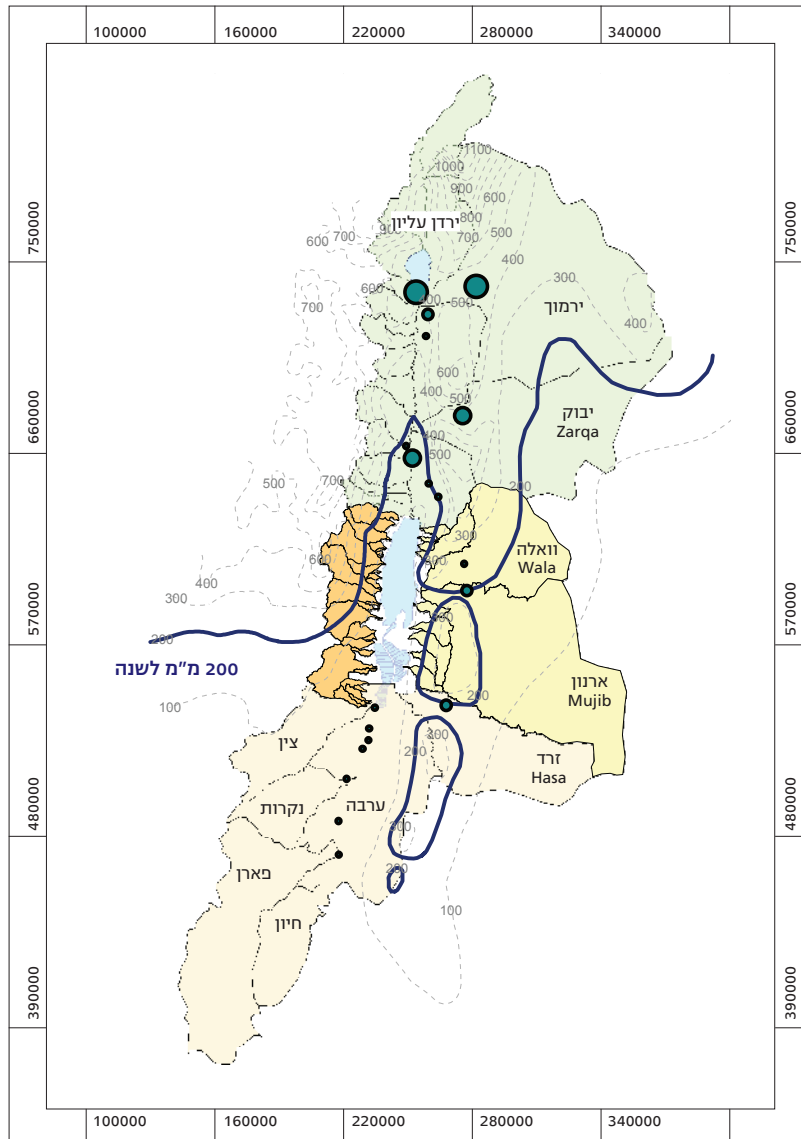
המאה ה־20 לעשרות מלמ"ק בעשור האחרון [6]. שטח אגן הניקוז של הירדן, ויובלו העיקרי הירמוך, הם כמחצית (45%) משטח אגן הניקוז הכולל של ים המלח (כ־43,000 קמ"ר, איור 1). ברוב שטח אגן הניקוז של הירדן והירמוך כמויות המשקעים השנתיות הן 200–1,000 מ"מ בשנה (לעומת פחות מ־200 מ"מ ברוב שאר שטח האגן). מסיבה זו, הירדן הוא העורק הראשי של אספקת מים לים המלח.

שינויים אנתרופוגניים שחלו באגן הניקוז של הירדן באמצע המאה ה־20 גרמו לירידה דרמטית במפלס ים המלח. אגן הניקוז של הערבה גם הוא חלק משמעותי משטח אגן הניקוז של ים

ים המלח הוא אגם סופי (ללא ניקוז, terminal lake) (איור 1), ולכן קצב השינוי במפלסו נקבע על־ידי המאזן בין המים הנכנסים אליו מאגני הניקוז, ממעיינות וממשקעים, לבין קצב האידוי וקצב הצטברות המלח בקרקעיתו [11]. בעשרות השנים האחרונות נמצא מפלס ים המלח במגמה כללית של ירידה (איור 2) כתוצאה ממאזן מים שלילי [11]. מגמה זו החלה עם הקמת סכר דגניה ב־1932, והתגברה משמעותית מסוף שנות ה־50 של המאה ה־20, בעיקר עם הגדלת השאיבות מהכינרת והטיית המים מהירמוך לתעלת הע'ור (עבדאללה). הספיקות השנתיות בירדן הדרומי בקרבת השפך לים המלח פחתו מלמעלה ממיליארד מ"ק בשנה בתחילת

איור 1. אגן הניקוז של ים המלח בחלוקה

לחתי־אגנים וקווים שווי גשם (מ"מ לשנה) צבעי האגנים מציינים את שייכותם לארבעת האגנים הגדולים: הירדן (ירוק), הערבה (קרם), האגנים המזרחיים (צהוב) והמערביים (כתום כהה). העיגולים מציינים סכרים משמעותיים באגן הניקוז. גודל העיגול יחסי לנפח האיגום הפוטנציאלי של הסכר. לנוכח הקווים שווי הגשם, שטח האגנים וגודל הסכרים ניתן להחרשם מחשיבותם היחסית של אגן הניקוז של הירדן והאגנים המזרחיים למאזן המים של ים המלח. מעובד מתוך [8] Greenbaum et al, 2006.

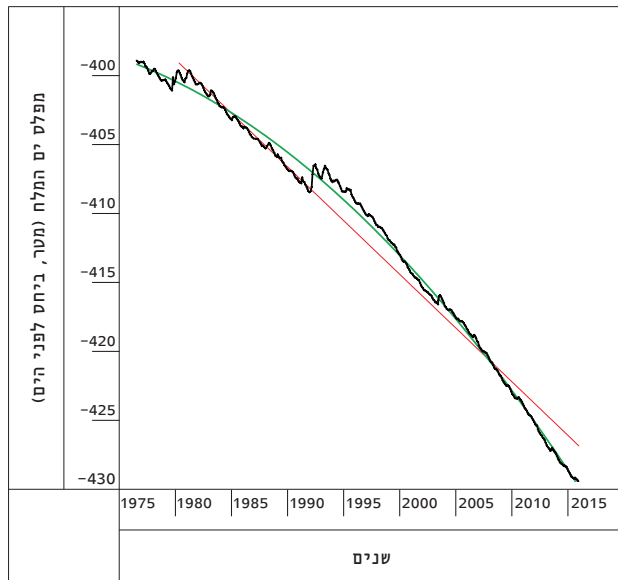


המלח, אך הוא מאופיין באקלים צחיח עד צחיח קיצון ברוב שטחו, ותרומתו למאזן המים של האגם שולית. אגני ההיקוות המערביים לים המלח מאופיינים בכמויות משקעים גבוהות יותר (100–600 מ"מ בשנה), אך הם משתרעים על כ-4% בלבד משטח האגן הכולל, ומזרימים לאגם 4–5 מלמ"ש [8]. שטח אגני ההיקוות המזרחיים הגדולים, וואלה (Wala) והארנון, הוא כ-15% משטח אגן הניקוז

בסוף שנות ה-60 של המאה ה-20, ובירדן בסוף שנות ה-70. המשך האידוי מהאגן הדרומי הוא גורם משמעותי במאזן המים השלילי של האגן הצפוני, והוא עומד על גירעון שנתי של כ-280 מלמ"ק (הערכות החוקרים נעות בין 250 מלמ"ק [11], 271 מלמ"ק [19] ו-330 מלמ"ק [6]), שמתורגמים לירידת מפלס של כ-45 ס"מ לשנה. מאז הפיצול בין האגנים הצטמצם שטח האגן הצפוני ביותר מ-20% (איור 1), וריכוז המלחים עלה ביותר מ-4% [7, 12]. כאשר שטח האגם מצטמצם ומליחות המים עולה, ניתן לצפות להקטנה בקצב האידוי באופן פרופורציוני לשטח האידוי (יותר מ-20%). לכן, בהינתן מאזן הידרולוגי קבוע, יש לצפות להתמתנות בקצב ירידת המפלס עם הצטמצמות שטחי האידוי. בפועל, קצב ירידת המפלס של ים המלח מואץ עם הזמן (איור 2).

במאמר זה נדון בשאלה: מה הם 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. המאמר מבוסס על דו"ח המכון הגיאולוגי [2].

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



— המפלס המדוד — התאמה לינארית — התאמה פולינומית

על קצה המזלג

- * ים המלח מצוי בגירעון הידרולוגי מזה כ-60 שנה, עקב שימוש האדם במקורות מים שפירים באגן הניקוז שלו ואידוי מי הים למטרות תעשייתיות.
- * בעקבות צמצום שטח האידוי והעלייה בריכוז התמלחת, היה צפוי שקצב ירידת המפלס יתמתן. בפועל הקצב גדל, וב-30 השנים האחרונות המפלס יורד גם ברוב חודשי החורף הגשומים.
- * הגירעון ההידרולוגי של ים המלח הולך ומחריף - גירעון של כ-400 מלמ"ק לשנה בתחילת שנות ה-80 גדל לכ-700 מלמ"ק לשנה בעשור האחרון.
- * החרפת קצב הירידה נגרמת, ככל הנראה, מסכירה מוגברת של מים שפירים באגן הניקוז, ולא מהגדלת הפעילות התעשייתית במפעלים.

המערכת

של ים המלח, והוא מאופיין בכמות משקעים של 50–300 מ"מ לשנה. שני האגנים תורמים יחד כ-100 מלמ"ש לים המלח [9], מתוכם כמחצית בזרימת בסיס [8].

בשנת 1979 ירד מפלס ים המלח מתחת לגובה מצר לינץ' המפריד בין שני אגניו של ים המלח, ומאז הם מתפקדים כגופי מים נפרדים: האגן הצפוני שהוא אגם ללא ניקוז, והאגן הדרומי, שמתוחזק כברכות אידוי על-ידי מפעלי האשלג הישראליים והירדניים. המפעלים שואבים תמלחת מהאגן הצפוני, ולאחר אידוי וגיבוש מלחים כברכות, מוחזרת התמלחת הסופית לאגן הצפוני דרך נחל הערבה. הקמת הברכות החלה במפעלים בישראל



תחנת מדידה של אידי מים המלח בשיטת eddy covariance, ממוקמת בחוף ים המלח (המכון הגיאולוגי) | צילום: אוהד מילשטיין

תוצאות: המגמות העונתיות והרב-שנתיות בקצב שינוי המפלס בים המלח

השינויים העונתיים והרב-שנתיים של מפלס ים המלח ושינויי האוגר של האגם מופיעים באיור 3, על בסיס נתונים משנת 1976 עד 2015. ישנה תנודתיות עונתית ברורה: בקיץ קצב ירידת מפלס גבוה (כ-2 מטרים לשנה או 0.17 מטר לחודש), ואילו בחורף, אם לא נרשמת עליית מפלס, קצב הירידה נמוך. להלן מגמת השינוי הרב-שנתית:

א. **מגמה כללית רב-שנתית:** מפלס האגם יורד בקצב מוגבר, ושיעור ההגברה (תאוצה) הוא כ-2.2 ס"מ לשנה מאז 1976. הגירעון השנתי באוגר ים המלח עלה מכ-400 מלמ"ק לשנה בתחילת שנות ה-80 של המאה ה-20 לכ-700 מלמ"ק לשנה בעשור האחרון. קצב שינוי האוגר גדל עם הזמן בשיעור של כ-10% מלמ"ק לשנה. למעשה, שינוי האוגר גדול בכ-10% מחישוב הנפח על סמך שינוי מפלס ושטח, כיוון שהאוגר קטן גם בשל מלח שמצטבר בקרקעית^[11].

ב. **בחודשי הקיץ (יוני-ספטמבר)** נמדדו ערכים יציבים של קצב ירידת המפלס במהלך 39 שנות המדידה. המגמה היא של האטה בקצב ירידת המפלס בשיעור של 0.2 ס"מ לשנה. שינוי האוגר מראה מגמה מובהקת של האטה בקצב גירעון האוגר בחודשי הקיץ, בשיעור של 9.5 מלמ"ק לשנה.

ג. **בחודשי החורף (דצמבר-פברואר/מרץ)** נמדדה עלייה משמעותית בקצב ירידת המפלס. במהלך החורפים בשנות ה-70 ובתחילת שנות ה-80 של המאה ה-20 עלה מפלס הים בחודשי החורף, ואילו בשני העשורים האחרונים כמעט לא נרשמת עליית מפלס, אלא המשך ירידת מפלס גם בחודשים אלו. המגמה הכללית היא התגברות בקצב ירידת המפלס בשיעור של כ-4.3 ס"מ לשנה. לגבי חודשי החורף, בדקנו את החודשים דצמבר-פברואר וכן דצמבר-מרץ. ההתלבטות לגבי חודש מרץ הייתה שמצד אחד הוא מאופיין בנגר של סוף עונת הגשמים, אך מצד שני, בחודש זה מתחילות השאיבות של המפעלים.

נתונים ושיטות

את אוגר המים של ים המלח ניתן לקבוע בצורה מדויקת יחסית לאורך ציר הזמן, בזכות מדידות מדויקות של מפלס האגם והמיפוי המפורט של מבנה קרקעית האגם. לעומת זאת, ישנה אי-ודאות גדולה בהערכת כניסות המים והיציאות. ככלל, חסרות מדידות, וגם הדיוק של המדידות הקיימות קטן משמעותית מהדיוק של מדידת מפלס. לכן, הניתוח שערכנו מבוסס בעיקרו על נתוני מפלס ועל שינויי האוגר של ים המלח, כמייצג את קצה המערכת ההידרולוגית. נעזרנו בכך שהשינויים העונתיים באוגר המים של ים המלח קשורים ישירות לתפקוד ההידרולוגי העונתי-מרחבי של האגם: בחורף המערכת נשלטת על-ידי כניסות נגר מהנחלים כתגובה למשקעי גשם - בעיקר כניסות מהירדן בצפון, בעוד שהגירעון מהמפעלים קטן; בקיץ, לעומת זאת, הנגר מהנחלים נמצא בשפל, ואילו שאיבות המים מהאגן הצפוני לברכות האידוי הן בשיא התפוקה. מאפיין זה מאפשר לבחון את התמורות הרב-שנתיות בשינוי האוגר בקיץ ובחורף, ולהעריך בהתאם להן את ההשפעה של שינויים באגן הניקוז הצפוני של ים המלח ושל מפעלי האשלג בדרום. פירוט נרחב יותר על השיטות מופיע בדו"ח המכון הגיאולוגי^[2].

נתוני גובה מפלס ים המלח (איור 1) נמדדים אחת לחודש על-ידי השירות ההידרולוגי מאז שנת 1976. חישובנו את קצב שינוי המפלס והשינוי באוגר בשלושה אופנים:

- א. קצב שינוי שנתי - הפרש בין מדידות בפער של שנה;
- ב. קצב שינוי עונתי רצוף - הפרש בין מדידות בפער של חודש;
- ג. קצב אופייני לקיץ ולחורף בכל שנה: קיץ - ממוצע החודשים יוני-ספטמבר, חורף - ממוצע החודשים דצמבר-פברואר/מרץ.

כדי לחשב אוגר מתוך נתוני המפלס השתמשנו בנתונים **בתימטריים** ברזולוציה גבוהה שהופקו בשנת 2007 בעזרת Multi-beam, גודל תא 5 מטרים^[16].

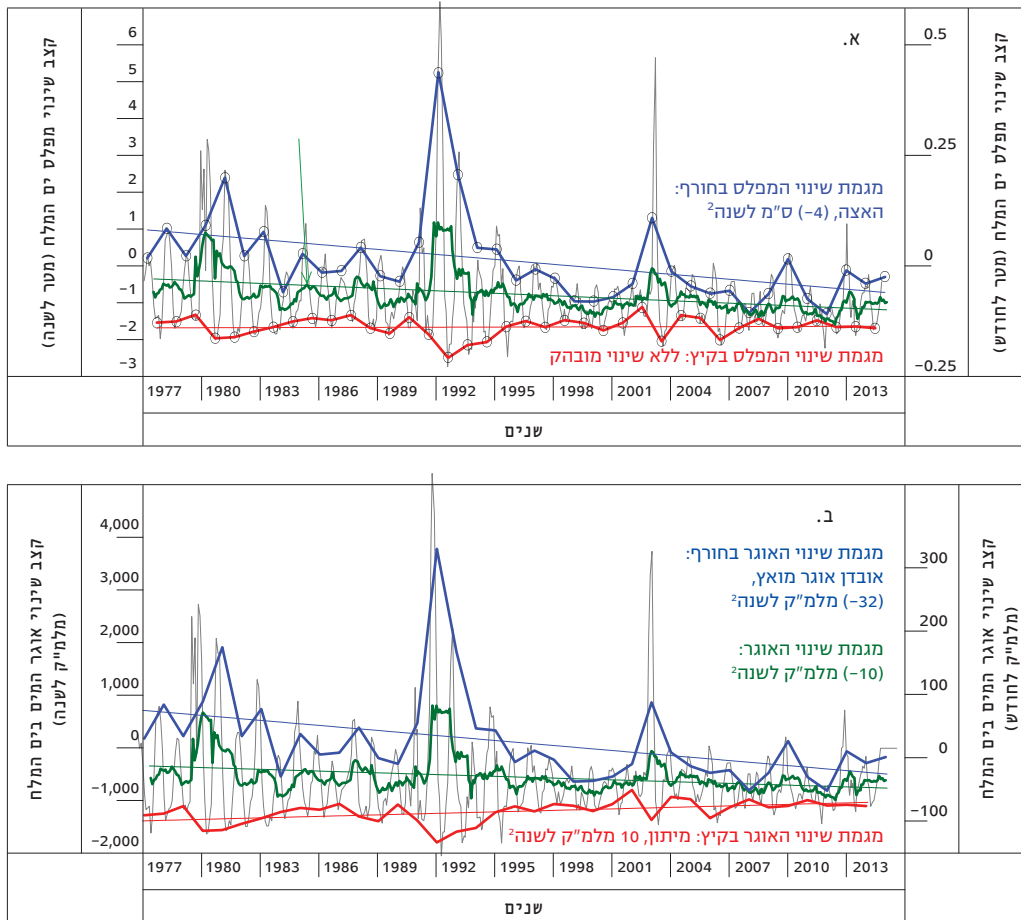
נתוני משקעים, שנמדדו על-ידי השירות המטאורולוגי הישראלי, שימשו לצורך ניתוח מגמות רב-שנתיות ועונתיות בכמויות המשקעים ודרכי השפעתם על מגמות השינוי במפלסי ים המלח. **נתוני הספיקות** באגני הניקוז חלקיים. השתמשנו באופי העונתי של זרימות הנחלים - זרימות מוגברות בחורף ומופחתות בקיץ.

לניתוח סטטיסטי של מובהקות המגמות בנתונים השונים השתמשנו ברגרסיה ליניארית ובמבחן האי-פרמטרי של Mann-Kendall (MK). מבחן זה מתאים במיוחד לנתונים המאופיינים בערכי קיצון, ולהתפלגות נתונים שאינה נורמלית.



סקירות

איור 3. שינויים עונתיים ורב-שנתיים במפלס (א) ובאוגר של ים המלח (ב) באפור - קצב שינוי חודשי, בירוק - קצב שינוי שנתי, באדום - קצב ממוצע חודשי הקיץ, בכחול - קצב ממוצע חודשי החורף. מגמת השינוי ניכרת בממוצעים השנתיים, ובעיקר בחודשי החורף. בחודשי הקיץ נמצאה מגמה של מיתון קל בקצב גירעון האוגר.



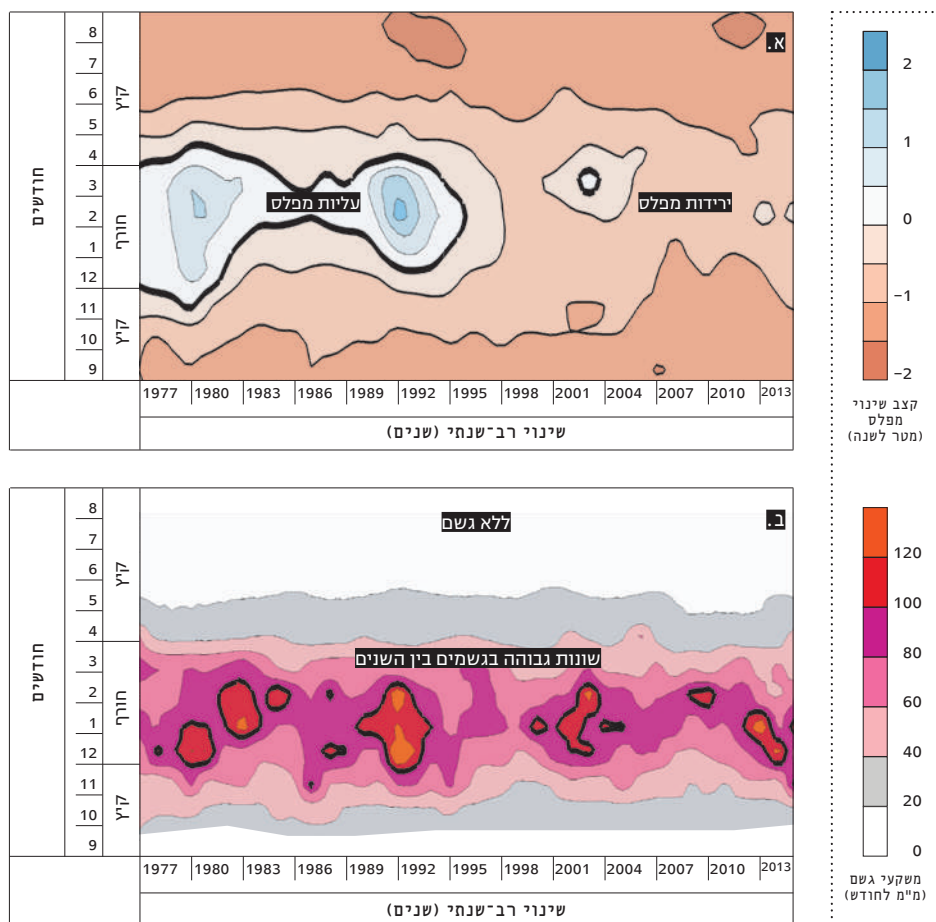
המפעלים התגברה. ייתכן ששינויים רב-שנתיים אלה מתקזזים, ואינם באים לידי ביטוי בשינוי קצב ירידת המפלס, ושקצב שינוי האוגר אף קטן במעט. השינויים העיקריים שהתרחשו באגן הדרומי בארבעת העשורים האחרונים, שהיו יכולים להגדיל את צריכת המים מהאגן הצפוני, כוללים גידול בשטחי האידוי בברכות המפעלים, בעיקר במפעל הירדני. זאת ועוד, תיתכן הגברה בקצב האידוי בברכות, כפי שנמדד בסדום בניגית^[3] (נתוני השירות המטאורולוגי). בתחילת שנות ה-80 הוקמו ברכות האידוי הירדניות, וניתן להעריך שכדי למלא את הברכות נשאבו מהאגן הצפוני 100-250 מלמ"ק (לכל התקופה, כארבע שנים). ייתכן ששאיבות אלה בוצעו גם בחורף, והייתה להן השפעה קצרת טווח על ירידת מפלס האגן הצפוני (שווה ערך לירידת מפלס של 15-35 ס"מ).

לסיכום, למרות התגברות בפעילות המפעלים בעשורים האחרונים, אין הדבר בא לידי ביטוי בקצב שינוי ירידת המפלס ובאבדן האוגר.

תמיכה לממצאים אלה ניתן לראות באיור 4, המציג את שינוי המפלס בים המלח לאורך השנים בפילוח חודשי. באיור זה ניתן לראות בבירור שבחודשי הקיץ קצב ירידת המפלס גבוה לאורך כל התקופה, ויציב באופן יחסי. מאידך גיסא, בחודשי החורף ישנה מגמה רב-שנתית של מעבר מעליות מפלס למצב של ירידות מפלס מאמצע שנות ה-90 של המאה ה-20.

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 ליחס לגירעון מוגבר בחודשים הללו. בחודשי הקיץ מושפעת המערכת ההידרולוגית בים המלח בעיקר מאידוי מפני המים באגן הצפוני ומפעילות המפעלים, שכוללת אידוי מהאגן הדרומי. בעוד ששטח האגן הצפוני קטן משמעותית עם השנים בכ-20%, הפעילות של



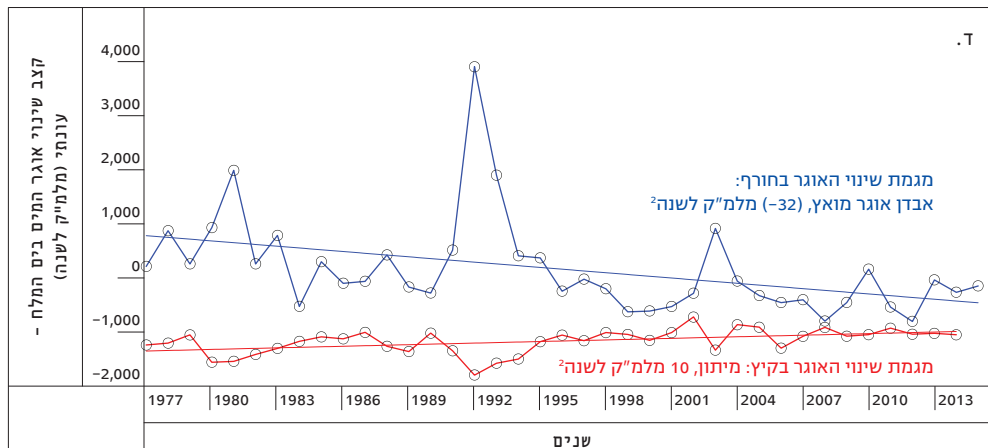
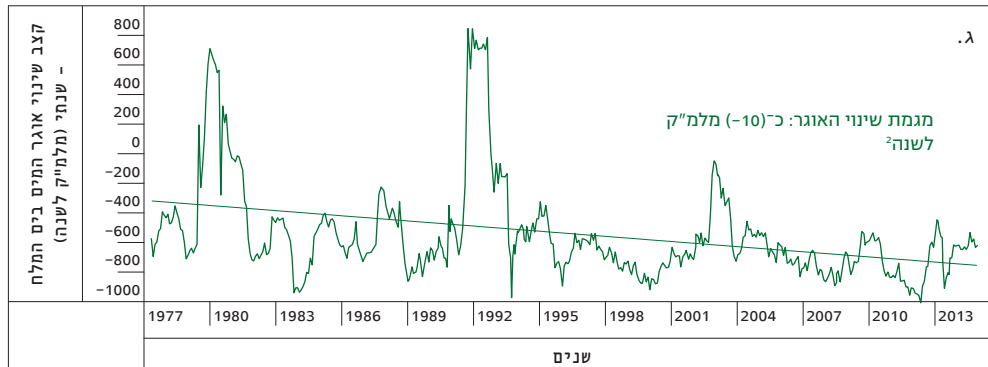
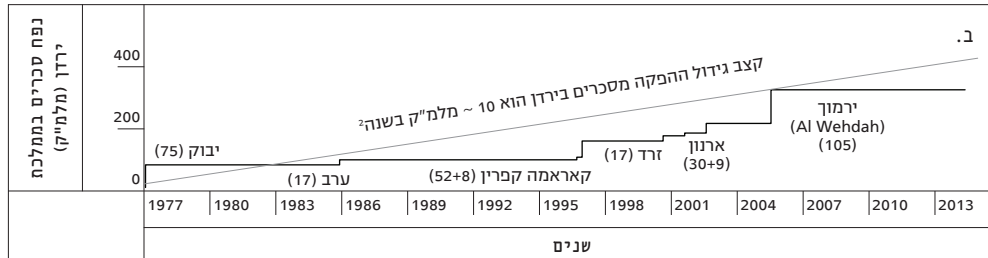
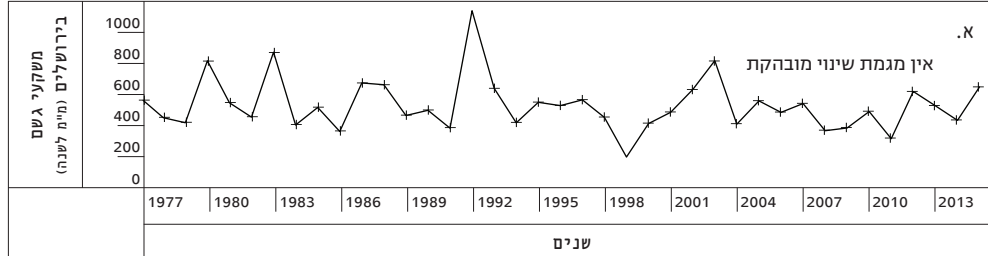
איור 4. שינויים עונתיים ורב-שנתיים בקצב שינוי המפלס של ים המלח (א) ובכמות משקעי הגשם החודשיים בירושלים (ב) באיור 4 נ4 מוצגים ערכים של קצב שינוי המפלס ביס המלח; בחודשי הקיץ קצב ירידת המפלס גבוה לאורך כל התקופה, ואילו בחודשי החורף ישנה מגמה ברורה של מעבר מחורפים שמפלס האגם עלה בהם, לחורפים שירידת המפלס נמשכת גם במהלכם (בעשורים האחרונים). זהו ביטוי למגמת דלדול האוגר ביס המלח בחודשי החורף - כמות הנגר שמגיעה בחורף לאגם הולכת וקטנה. באיור 4 ב מוצגים ערכי משקעים שנתיים בתחנה של ירושלים, כמייצגת את האגן [2]. ישנם שינויים משמעותיים בכמות המשקעים בחורף בין שנים סמוכות, אך לא ניכרת מגמת שינוי רב-שנתית מובהקת.

המשקעים לאורך השנים; קצב ירידת המפלס הולך ומתגבר בחודשי החורף, בעוד שהמגמה של שינוי בכמות המשקעים, גם אם קיימת, אינה מובהקת (איור 4).
 בחנו את השפעתם האפשרית של הסכרים והמאגרים, שנבנו לאחר סכירת הכינרת והירמוק, על המאזן ההידרולוגי של ים המלח. מאז 1977 נבנו שמונה סכרים גדולים בעלי נפח איגום כולל של יותר מ-300 מלמ"ק בממלכת ירדן בחלקו המזרחי של אגן הניקוז של הירדן ובאגנים המזרחיים לים המלח [9, 14] (איורים 1, 5, נספח 1 בדו"ח מאת מחברי המאמר [2]). ככלל, נבנו הסכרים במורד אגני ההיקוות, והם סוכרים כ-18,500 קמ"ר (כ-43% משטח אגן ההיקוות של ים המלח) שרובם ממוקמים באזורים המאופיינים באקלים צחיח למחצה עד ים תיכוני (יותר מ-200 מ"מ לשנה). מעל 40 סכרים נוספים נבנו בסוריה במעלה אגן הניקוז של הירמוק-רוקד, בנפח של כ-245 מלמ"ק [5]; הסכרים נבנו בעיקר בשנות ה-80-90 של המאה ה-20 [18], וכן נבנו עוד סכרים בעשור האחרון [15]. ייתכן שחלק מהמאגרים שנבנו בסוריה אוצרים מים על חשבון המאגרים הירדניים במורד אגני הניקוז. בסך הכל, נפח

חודשי החורף
 המגמה הרב-שנתית של שינוי המפלס בחודשי החורף (איורים 3, 4) נובעת מכך שפחות מים מגיעים לאגם בחורף, ויש לכך שתי סיבות אפשריות: א. מגמה רב-שנתית של התמעטות משקעים על האגן וכתוצאה מכך פחות נגר; ב. מגמה של תפיסת מי נגר במעלה האגנים.
 דו"ח עדכני של השירות המטאורולוגי [1] קובע שלא נמצאה מגמה מובהקת של שינוי בכמות המשקעים בישראל, ומעל אגן הניקוז של ים המלח בפרט. ניתן לזהות שינויים בין חורפים סמוכים, אך לא נראית מגמה רב-שנתית של ירידה בכמות המשקעים. עם זאת, בשל השונות הגבוהה של סדרת הזמן, ייתכן שיש מגמה שאינה מובהקת ברמה של עד 25 מ"מ לעשור [13, 17].
 נראה שישנה תאימות בין השינויים העונתיים בכמות המשקעים ובקצב שינוי המפלס: בעונה הגשומה ישנן עליית מפלס או התמתנות בקצב הירידה, ובעונת הקיץ ישנה ירידת מפלס בקצב גבוה. לעומת זאת, במגמה הרב-שנתית בחודשי החורף יש חוסר תאימות בין קצב שינוי המפלס לכמויות

המאגרים על האגנים המזרחיים עולה על 550 מלמ"ק. מאגר תרצה שהוקם במהלך סוף שנות ה-90 של המאה ה-20, הוא המאגר הגדול במערב אגן הניקוז של הירדן, ונפח האיגום שלו כ-5

איור 5. סדרת זמן:
 א. כמות משקעי גשם שנחית (תחנה בירושלים);
 ב. נפח מצטבר של סכרים שנבנו באגנים המזרחיים של ים המלח מדרום לירמוך, כולל סכר אל ווחדה (Al Wehdah) (9) (גרף מדרגות). קו מגמה (אפור) מייצג את הערכת קצב הגידול הממוצע של הפקת המים מכלל הסכרים שנבנו גם באגן הירמוך בתקופה זו (בנפח כולל של כ-550 מלמ"ק). קצב הגידול מוערך בכ-10 מלמ"ק לשנה² (בהנחה שהנצולת מהמאגרים היא 75%);
 ג. קצב שינוי האוגר של ים המלח - מגמה מחגרת של גירעון בשיעור של כ-10 מלמ"ק לשנה². נפח המים שנאגר בסכרים בחודשי החורף יכול להסביר את מגמת הגירעון הרב־שנתית באוגר בים המלח (כ-10 מלמ"ק לשנה²);
 ד. מגמות רב־שנתיות של שינוי האוגר בים המלח בפילוח לפי עונות חורף וקיץ (כחול ואדום בהתאמה).



השאיבות של המפעלים נעזרנו בעובדה שהזרימות מופיעות בחודשי החורף והאביב כתגובה למשקעי הגשם, בעוד הגירעון של המפעלים מתרחש בעיקר בחודשי הקיץ. במהלך הקיץ לא נמצא שינוי במגמת ירידת קצב המפלט. לפיכך, הגירעון שנוצר מפעילות המפעלים קבוע בזמן, ומרכיב זה בגירעון המים לא יכול להסביר את המגמה הכללית של ההתגברות בקצב ירידת המפלט. לעומת זאת, במהלך החורף נמצאה מגמה ברורה של התגברות בקצב ירידת המפלט עם השנים. מגמה זו בחורף מסבירה את המגמה הרב-שנתית של הירידה המואצת במפלט האגם. הגורמים האפשריים לעלייה בקצב ירידת המפלט בחורף הם התמעטות משקעי חורף או איגום מים בסכרים במעלה אגני הניקוז. נתוני השירות המטאורולוגי מצביעים כי בארבעת העשורים האחרונים לא חל שינוי מובהק בכמות משקעי הגשם מעל אגן הניקוז של ים המלח. לעומת זאת, תפיסת המים במאגרים התגברה עם הפיתוח האזורי בעשרות השנים האחרונות. מאז הקמת סכר דגניה, הפעלת המוביל הארצי והטיית מי הירמוך לתעלת הע'ור, הוקמו סכרים על כל האגנים המזרחיים הגדולים לצורך תפיסת מים לשתייה ולהשקיה, בנפח של מעל 550 מלמ"ק (נצולת 75%-50). קצב ההתגברות של תפיסות המים בארבעת העשורים האחרונים מוערך, לפיכך, בכ-10 מלמ"ק לשנה². התרומה של מאגרים באגנים ממערב לנהר הירדן וליים המלח ובערבה בדרום קטנה בהרבה, ומסתכמת בפחות מ-20 מלמ"ק. העלייה המשמעותית בנפח המים הנסכר במעלה אגן הניקוז של ים המלח יכולה להסביר את ההפרה המתמשכת של מאזן המים באגם, שמתבטאת בהתגברות קצב ירידת המפלט שלו.



הסכר בנחל ארנון, שנחנך ב-2004, מסוגל לאגור 39 מלמ"ק צילום: לאונרדו, פליקר 2.0 BY-NC

בהיעדר נתונים הידרולוגיים רציפים ומפורטים במרחב על אודות האגנים המזרחיים של ים המלח ומורד נהר הירדן, קשה להעריך במדויק את הגירעון שיוצרים הסכרים במאזן המים של ים המלח. על סמך דיווחים חלקיים על הפקדה שנתית של מי הסכרים, וכן לפי נתונים הידרולוגיים כלליים, ניתן לחשב טווח נפחים כולל הנגרע מהמאזן עם השנים. חלק מהמים במאגרים אלה נשמרים עד סוף הקיץ (כפי שניתן לראות בתצלומי לוויין). מדד מינימום להערכת נפח המים שנגרע על-ידי הסכרים מהנגר העילי באגן הוא מידת ההפקה מהם (מים הנשאבים מהמאגרים לשימושים שונים), שעומד על 75%-50 מנפח האיגום⁹. כלומר, לאחר 2006 (הקמת סכר אל ווחדה [Al Wehdah] על הירמוך) עולה נפח המים המנוצל מהסכרים במזרח אגן ים המלח (שהוקמו מאז 1977) על 275-415 מלמ"ק לשנה^{5,10}. באיור 35 מוצג קו מגמה המתנייחס להתגברות סכירת מים בשיעור של 10 מלמ"ק לשנה², עד למצב הנוכחי שמוערך ב-500 מלמ"ק כגבול עליון.

לפיכך, מגמת העלייה בגירעון השנתי באוגר המים בים המלח, מכ-400 מלמ"ק בשנות ה-80 של המאה ה-20 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 35). נפחי מים המשמשים את משק המים^{4,15} נגרעים בסופו של דבר מאגן הניקוז של ים המלח, ומהווים גורם מרכזי להאצה בקצב ירידת המפלט.

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

סיכום ומסקנות

מפלס ים המלח ירד בארבעת העשורים האחרונים בשיעור כולל של למעלה מ-30 מטר. קצב ירידת המפלט מתגבר עם הזמן - בשנות ה-70-80 של המאה ה-20 עמד על 0.7 מטר לשנה, וכיום על 1.2 מטר לשנה; שיעור התאוצה עומד על כ-2.2 ס"מ לשנה². קצב האידי מל האגם היה אמור לקטון ביותר מ-20% בעקבות שילוב של צמצום שטח האגם ועלייה בריכוז התמלחת שבפני השטח שלו. לפיכך, קצב ירידת המפלט היה צפוי להתמתן, אך המדידות מראות שהוא במגמת עלייה. משיקולי מאזן הידרולוגי, הסיבה לעלייה בקצב ירידת המפלט יכולה להיות מוסברת במיעוט כניסות מים לאגם (נחלים, מעיינות, משקעים) או בשאיבה על-ידי מפעלי האשלג. כדי להבחין בין מרכיב הזרימות לאגן לבין

[5] FAO. 2008. Syrian Arab Republic, irrigation in the Middle East region in figures - AQUASTAT Survey 2008.

[6] Gavrieli I, Lensky N, Abelson M, et al. 2011. Red Sea to Dead Sea water conveyance (RSDSC) study: Dead Sea Research Team, Geological Survey of Israel and Tahal Group, Jerusalem. www.tinyurl.com/Dead-Sea-Study.

[7] Gertman I and Hecht A. 2002. The Dead Sea hydrography from 1992 to 2000. *Journal of Marine Systems* 35(3-4): 169-181.

[8] Greenbaum N, Ben-Zvi A, Haviv I, and Enzel Y. 2006. The hydrology and paleohydrology of the Dead Sea tributaries. *Geological Society of America Special Papers* 401: 63-93.

[9] Hadadin N. 2015. Dams in Jordan current and future perspective. *Canadian Journal of Pure and Applied Sciences* 9(1): 3279-3290.

[10] Kaisi A, Yasser M, and Mahrouseh Y. 2005. Syrian Arab Republic country report. In: Hamdy A, El Gamal F, Lamaddalena N, et al. Non-conventional water use: WASAMED project. Bari : CIHEAM / EU DG Research (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 53).

[11] Lensky NG, Dvorkin Y, Lyakhovsky V, et al. 2005. Water, salt, and energy balances of the Dead Sea. *Water Resources Research* 41(12): 1-13.

[12] Lensky NG, Gertman I, Gavrieli I, et al. 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. Jerusalem: Geological Survey of Israel.

[13] Morin E. 2011. To know what we cannot know: Global mapping of minimal detectable absolute trends in annual precipitation. *Water Resources Research* 47(7).

[14] MWI. 2004. National Water Master Plan. Ministry of Water and Irrigation, The Hashemite Kingdom of Jordan.

[15] Namrouqa H. 2012. Yarmouk water sharing violations require political solution. *The Jordan Times*. Dec 28.

[16] Sade AR, Hall JK, Sade H, et al. 2014. Multibeam bathymetric map of the Dead Sea. Jerusalem: Geological Survey of Israel report GSI/01/2014.

[17] Shohami D, Dayan U, and Morin E. 2011. Warming and drying of the eastern Mediterranean: Additional evidence from trend analysis. *Journal of Geophysical Research* 116(D22): 1-12.

[18] Soffer A, Rosovsky M, and Copaken N. 1999. Rivers of fire: The conflict over water in the Middle East. Lanham (Ma): Rowman & Littlefield Publishers.

[19] Zbranek V. 2012. Red Sea - Dead Sea Water Conveyance Study Program, Chemical Industry Analysis Study. World Bank report.



סירה השייכת לספינת המחקר 'תנגלית' מורדת לניחת מחקר בים המלח | צילום: נדב לנסקי

תודות

לרבקה אמית, איל שלו, רביד רוזנצוויג, יהודה אנזל, אפרת מורין, יוסי יחיאלי, שמואל אסולין, יוסי טנאי, אלון רימר ומיכאל בייט על הערות מועילות. לחגי אטינגר, אורי שמחאי, אפרת פרבר, אהוד סימון, אבי בורג, והלל גלזמן באיתור חומר על מאגרים. לעמיר גבעתי, אודי גלילי וריטה צ'ודינוב על נתוני מפלס ים המלח. לשחר בוקמן ולענבר קמחי-אנגרט על העריכה וההערות המועילות.

מקורות

[1] השירות המטאורולוגי. 2015. שינויים אקלימיים בישראל - ממצאי השירות המטאורולוגי. www.tinyurl.com/climatic-changes-Israel.

[2] לנסקי נ ודנה א. 2015. הגורמים לירידה המואצת של מפלס ים המלח בעשרות השנים האחרונות. דו"ח המכון הגיאולוגי GSI/16/2015.

[3] Alpert P, Shafir H, and Issahary D. 1997. Recent changes in the climate at the Dead Sea - A preliminary study. *Climatic Change* 37: 513-537.

[4] Al-Taani AA. 2013. Seasonal variations in water quality of Al-Wehda Dam north of Jordan and water suitability for irrigation in summer. *Arabian Journal of Geoscience* 6(4): 1131-1140.