

מאזן המים של ים המלח: תמונה מצב, תהליכיים ו评议ות

איתי גבריאלי, עמוס בין

ים המלח הוא המקום הנמוך ביותר על פני כדור הארץ. למים המתנקזים אליו אין מוצא טבעי באידוי, ולכן ים המלח מוגדר כאגם סופי (טרמינלי). מפלסו משקף את המאזן בין נפח המים הנכנסים לאגם לבין הכמות המתאדה ממנו. השינויים הטבעיים במפלס נובעים אפוא משינויים בנפח המים המתנקזים לאגם והמשקפים את כמות המשקעים באגן ההיקוות, וממשינויים בקצב האידוי. בתקופות שבהן מאזן המים חובי, כמות המים הנכנסת לאגם גדולה מזאת המתאדה ולכל מפלס הים עולה, ואילו כאשר מאזן המים שלילי, מפלס הים יורד. אולם ירידת המפלסים החריפה המתרכשת ביום בהם הים תוציא ישירה של מעשה ידי אדם, ונובעת מסכירה והטיה של רוב מקורות המים הטבעיים שהתנקזו בעבר לים המלח. בשנים האחרונות גירעון המים של ים המלח עומד על כ-^{650,000,000} מטרים מעוקבים (מ"ק) בשנה, ומפלסיו יורדים בקצב אחד בשנה.

לשם המלח שני אגנים, צפוני عمוק ודרומי רדוד, המופרדים על ידי מצר לינץ' שקרקותו מצויה ברום מרבי של 400 – מטר (דהיינו 400 מטר מתחת לגובה מי האוקיינוסים). עד לשנת 1976 הייתה ים המלח את שני האגנים וכל אחד בתוכו, אולם עם ירידת מפלס הים אל מתחת לרום המצרים נתקק הקשר בין שני האגנים, והאגן הדרומי התיבש (איור 1). התיבשות האגן הדרומי הביאה לירידה חדה בשטח ים המלח, אולם בשל רדיידות האגן הדרומי ונפח המים הקטן שהוא הכליל, התיבשותו לוותה בשינוי קטן באופן יחסית בławף הים (איור 2). ביום נמצאות

* איתי גבריאלי ועמוס בין הם חוקרים במכון הגאולוגי בירושלים. עיקרי המאמר נגורו מתורמתם למסמך מדיניות לעתיד של ים המלח: בוחינת תרחיש "ברורת המחדל", משרד לאיכות הסביבה, משרד התשתיות הלאומיות (המכון הגאולוגי) ומכוון ירושלים לחקר ישראל, בדפוס.

באגן הדרומי ברכות האידוי של המפעלים הכימיים היישראליים ('מפעלי ים המלח' – DSW) והיר讚נים (Arab Potash Co. – APC). האגן הדרומי מנוקז לים המלח על ידי ערוץ נחל ערבה שמאו ירידת המפלס והתייבשות האגן הדרומי מתחתר באגן ובמצר לינץ'.

הרכב ים המלח והתפתחותו

ים המלח מתאפיין במליחות הגבוהה בעבר פי עשרה ממי ים רגילים ובהרכב כימי ייחודי. צפיפות התמלחת באגם כ-1.24 גרם לסנטימטר מעוקב או 1.24 טונה למ"ק, ומהמים מכילים כ-340 גרם מלחים לפחות. תמלחת ים המלח מוגדרת כתמלחת קלציום-קלורידית. בהשוואה להרכב מי ים רגילים מים המלח מדולדים באפן ייחסי ביוני הסולפט (SO_4^{2-}) והבירובונט (HCO_3^-), ויון הכלורייד (Cl^-) הוא היון בעל המטען השלילי הכלמעט בלבד בצד יערדי במערכת (איור 3; ראו גם מאמרו של סטרינסקי בקובץ זה). תמלחת בהרכבים הדומים להרכב ים המלח מוגדרות כמעט רק מהתת-קרקע, בדרך כלל באלה המצוות בגע עם נפט. לפיכך ים המלח הוא אגם ייחודי לא רק בשל מליחותו הגבוהה אלא גם בשל הרוכבו הכימי: בעולם קיימים רק אגמים ספורים בעלי הרכב קלציום-קלוריידי הדומה לים המלח. תמלחת ים המלח התפתחה ממי ים שהציפה את בקע ים המלח לפני כמה מיליון שנים (סטרינסקי, 1974; וראו מאמרו של סטרינסקי בקובץ זה). התאדות וכניתה מוגבלת של מים בלשון הים הקדומה הביאו לעלייה במליחות המים ולהתגבשות מלחים, בглавלם גבס ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) והליט (מלח בישול – NaCl) שהצטברו על קרקעית האגם. לאחר שכבות המלח התרבדו הן כוסו בסידמנטים צעירים. בשלב מאוחר יותר בהיסטוריה הגאולוגית, עקב תהליכי גאולוגיים מורכבים, התרוממו חלק מהסלעים האלה ויצרו את מחדרי המלח של הר סdom וחזי אי הלשון (ראו מאמרם של ינברגר ובגין בקובץ זה). תגבות כימיות בין התמלחת לבין סלעי הגיר שבשוליו הביקו גromo לשינויים נוספים בהרכבת התמלחת. לאחר ניתוק הקשר עם הים המשיכו להתקיים תגבות כימיות בין התמלחת לסלעי הסביבה, והתמלחת יצרה אגמים חדשים (אגם הסמרה ואגם הליסן). מי הנגר שהתקנו לאגמים אלה הביאו אותם מלחים אשר הוسيפו ושינו את הרכבת התמלחת ותרמו לשקיעה נוספת של גבס, הליט וגיר.

תחילת המאה ה-20

רום מפלס : 390 - מטר

שטח : 950 קמ"ר

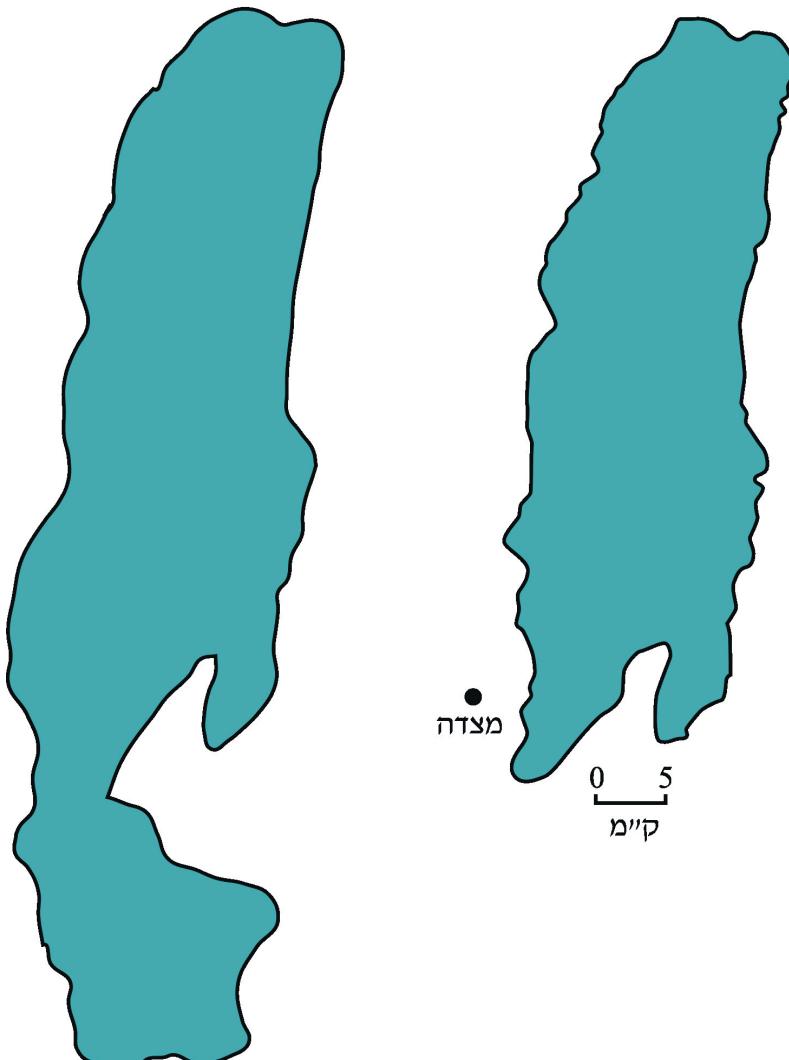
נפח : 155 ק"מ מעוקב

תחילת המאה ה-21

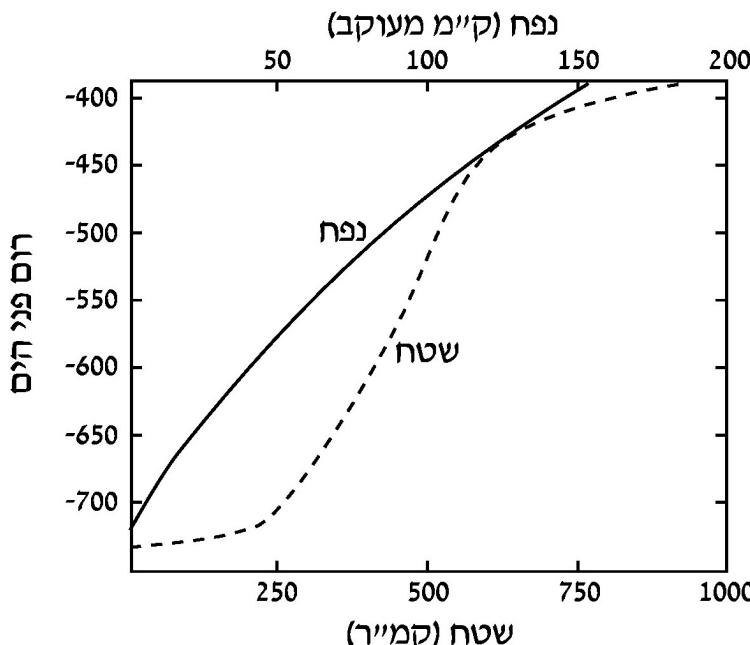
רום מפלס : 415 - מטר

שטח : 650 קמ"ר

נפח : 135 ק"מ מעוקב



איור 1 : ים המלח בתחילת המאה העשרים ותחילת המאה העשרים ואחת



איור 2: השתנות הנפח והשטח של ים המלח כתלות ברום פני הים. השטח מיוצג על ידי קו מקווקו ומתייחס לציר התחתון. הנפח מיוצג על ידי קו רצוף ומתייחס לציר העליון. הגרף מבוסס על מיפוי של קרקעית ים המלח משנת 1974 (Hall and Neev, 1978)

מאפיינים ושינויים בים המלח

עד שנת 1979 היה ים המלח גוף מים משוכב שכבה המים העליונה בו, עד עומק 40 מטר, הייתה מעט מהולה באופן ייחסי לגוף המים העמוק ולכון קלה יותר (Neev & Emery, 1967). שיכוב זה התקיים על פני תקופה של כמה מאות שנים שבמהלכן היו המים העמוקים מבודדים מהאטמוספירה. בידוד זה מנע אספקת חמצן למים העמוקים ואפשר התפתחות תנאים מחזירים (נטולי חמצן) ונוכחות של סולפיד מומס (H_2S). במחצית השנייה של המאה העשרים עלו המלחיות והצפיפות של המים העליונים בגלגול מאzon המים השלייל של הים. ב-1979 השתוותה צפיפות המים העליונים לזו של המים העמוקים, והים עבר ערבות ואורור מלא. מאז, בכל שנה מתפתח בים שיכוב עונתי המתחילה בחודשי האביב ונשمر

ים המלח

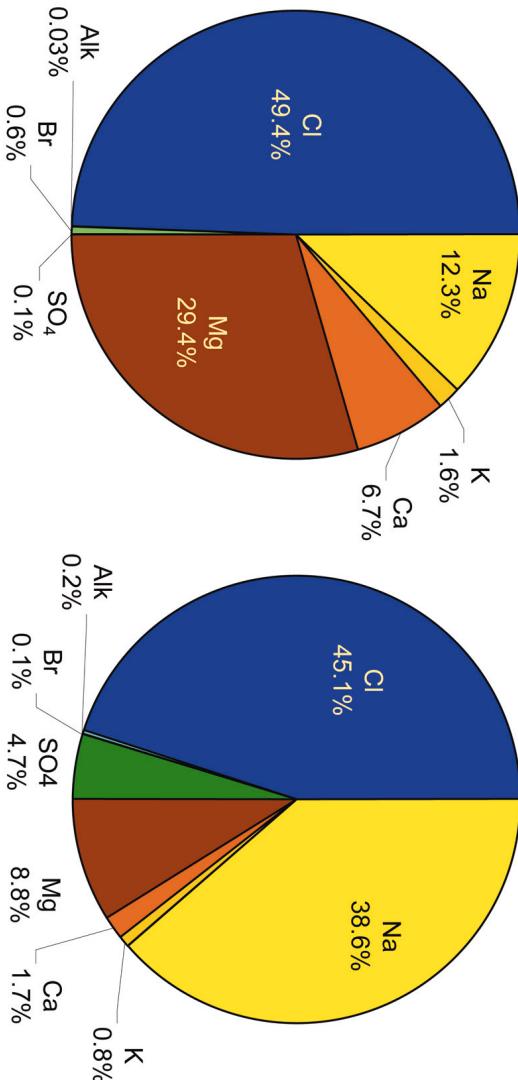
סodiumchloride: 34.0 g/mol/kg

αιρετικός: 1.24 g/mol/kg

מי ים

סodiumchloride: 35 g/mol/kg

αιρετικός: 1.03 g/mol/kg



אוור 3: הרכב מי ים המלח בהשוואה לאחורי מטען (יחידות אקלרולוגט) כרך שמהציתה הימנית יונום דיוויברים השاملילית יונם – Na, קאליום – K, סידן – Ca, אשלגן – Mg, מגנזיום – Mg – SO₄, ברום – Br, אלקליליט – Alk, כלור – Cl.

בחודשי הקיץ, וזאת למרות האידוי המוגבר מהמים העליונים והעליה במלחות שלהם (Anati & Stiller, 1991). השיכוב בתנאים אלה נשמר בוכות הטמפרטורה הגבוהה של המים העליונים, המגיע עד 35–36 מעלות צלזיוס, והמקטינה כמעט את ציפוי המים. היפוך והומוגנייזציה של עמודת המים מתרחשים בתחילת החורף, בחודשים נובמבר–דצמבר, עקב עליית ציפוי המים העליונים בעקבות התקרכרותם. יוצאי דופן במחזור זה היו השנהו של אחר החורפים 1979/1980 ו-1991/1992. נפח המים הגדולים מאוד שזרמו לים בחורפים אלה (1.5 מיליארד מ"ק בחורף 1991/1992) מלחו את המים העליונים ובהיאו לשיכוב של עמודת המים אשר נשך שלוש ארבע שנים. בתנאים הנוחיים ובאהלה הצפויים להתקיים בשנים הקרובות, ימשיך ים המלח להיות גוף מים הומוגני המקיים שכוב עונתי, או לכל היוטר שכוב בן שנים ספורות שיתפתח בעקבות נפח זרימות גדולים בחורפים גשומים במיוון.

בשל מאון המים השלייל בים המלח, מליחות המים עולה ואף צפופה להמשך ולעלות גם בשנים הבאות. עלייה זו מלולה בהtagבשות ובהרכבה של הליט (מלח בישול) השוקע ביום משנת 1983. התגבשות זו מקטינה את המשקל הכלול של המלחים המומסים בים ומרסנת את העלייה במלחית. הדבר מזמין את ביטויו בכר שקצב עליית המלחית (באחזוים בשנה) נמור מקצב ירידת נפח המים (גם הוא באחזוים בשנה). ההלייט מתגבש באופן ספונטני מכל עמודת המים במהלך השנה וכן מפני השטח בקיין. לאחר שמי ים המלח רווים, כל חפץ המזוי באגם מהווה מרכז גיבוש שעליו ההלייט מתגבש (איור 4).

בעבר הלא רחוק, עד לפני כמה עשורים שנים, שקוו בים המלח בעיקר המינרלים ארגוניט ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) וגבס (CaCO_3), שמקורם במלחים שהובאו על ידי הנחלים. חלק משקיעת מינרלים אלה התרחשה באירועי 'הלבנה' של פני הים שנצפו באגם אחד לכמה שנים ונמשכו שבועות עד ימים אחדים. ההסבר להתרחשותם של אירועים אלה הוא גיבוש ספונטני של שפע גבישים קתניים ולבניים של ארגוניט וגבס בפני המים. האירועים הסטיימו עם שקיעת המינרלים לקרקע. ראוי לציין כי כמוות הגבס והארгонיט שהתגבשו ושקעו במהלך אירועי ההלבנה אלה היו רק חלק קטן ממסת הגבס והארгонיט אשר שקעה מהאגם בכל שנה. בעקבות הקטנות זרימת מי הנחלים אל ים המלח והירידה באספקת סולפט ובקרבונט, כמוות הגבס והארгонיט המתגבשת בים קטנה בהרבה מאשר בעבר. בהתאם לכך, הסיכוי לציפות שוב באירועי ההלבנה קטן מאוד.

למרות כינויו 'ים המות' ושמו הרשמי באנגלית Dead Sea, ים המלח מאפשר קיום חיים למיני אצות וחידקים ייחודיים לים המלח, אם כי בתנאי עקה קשים. אולם המלחות הגבוהה של ים המלח בשנים האחרונות והמשך המגמה של עלייה במלחות אינן מאפשרים פריחות מיקרוביאליות ממשמעות. אלה מחייבים מיהול של המים לרמה של לפחות 10% עד 15% מהמלחות הנוכחיית ותוספת של פוספט (Oren & Silo, 1985). אירועי פריחה אלה נצפו בעקבות החורפים הגשומים של 1980/1981 ו-1991/1992 כאשר זרימות מסיבות של מים מתוקים התנקזו לים המלח ויצרו שכבות מים עלונה מהולה. בתנאי מיהול אלה מתפתחת אוכלוסייה של אצות (דונילאה) המזינה ומקיימת אוכלוסייה של חידקים. שני אירועי הפריחה הקנתה התפרצויות אוכלוסיות האצות לים צבע י록. פריחת החידקים שבאה בעקבות פריחת האצות צבעה את הים באדום-סגול. אולם במצב הים הנוכחי, ספירת האצות בים המלח שואפת לאפס ורמת החידקים נמוכה ביותר. האוכלוסיות האלה מתקיימות על סף גבול הסבולתי, והריכוז שלהם במים הוא מתחת או על גבול יכולת המאבק.



איור 4: הליט (מלח בישול) שהtagבש מים המלח על גבי סלעים בחוף ובקרקעית ים המלח (צילום: נדב לנסקי)

מazon המים ושינויי המפלס של ים המלח

עדויות היסטוריות וגאולוגיות מצביעות על כך שהמפלס של כ-390-395 מטר שאפיין את ים המלח בראשית המאה העשרים (השנתון הידרולוגי לישראל, 1971), אינו המפלס הנוכחי את המאות האחרונות, שהיה בדרך כלל נמוך יותר ועמד על כ-400-405 מטר, דהיינו סביבה רום קרקעית מצר לינץ' החוצץ בין האגן הדרומי הרדוד לבין האגן הצפוני העמוק. לפיכך שימוש האגן הדרומי גורם ממ탄 (buffer) לשינויי המפלס (Bookman et al., 2004); בתקופות של מazon מים היובי גרמה עליית המפלס מעל ל-400-405 מטר להצפת האגן הדרומי ולהגדלה ניכרת בשטח הים ובأידוי מפני המים, אשר בלמו את המשך עליית המפלס. בתקופות של מazon מים שלילי גרמה ירידת המפלס אל מתחת ל-400-405 מטר לירידה ניכרת בשטח האגם, להקטנת שטח האידוי ולבלימת מגמת הירידה.

קיימות הערכות אחדות בנוגע למazon המים הטבעי של ים המלח כפי שהתקיימן במחצית הראשונה של המאה העשרים. בסיס הנתונים להערכות אלה לקוח בהסר וمبرוס על מספר מוגבל של מדידות ספיקה בנחלים ובוואדיות (לחותיא את הירדן, שם התקיימה תחנת מדידה רציפה במשך שנים, מתוקופת המנדט הבריטי ועד לשנות השישים של המאה העשרים) ועל נתונים חלקיים המשליכים על חישוב קצב האידוי מפני המים. למרות מגבלה זו קיימת הסכמה כלילית כי הנפח השנתי של המים שהתנקזו לים המלח נע בין 1,500 ל-2,000 מיליאן מטרים מעוקבים (מלמי"ק). נפח דומה התארדה מפני הים, שככל בתקופה זו גם את האגן הדרומי. ראוי לציין כי נוסף על המים העולים המתחנקים לים המלח, ים המלח מהווה בסיס ניקוז גם למי תהום הנובעים לחופיו ובקרקעתו, כנביות תחת-ימיות. הערכה של נפחים אלה קשה במיוחד והוא נעה בין עשרות ספורות ועד למאות רבות של מיליון מטרים מעוקבים בשנה.

להלן הערכות לנפח הכנסיות השנתיות המוצעות לים המלח במחצית הראשונה של המאה העשרים. כאמור, בשל האידואות הרבה, יש להתייחס לנתונים אלה ככל הערכות מייצגות בלבד.

טבלה 1: טווחי אומדי הכנסות והיציאות מאגן ים המלח במחצית הראשונה של המאה העשורים (רשימת המקורות במכון הגיאולוגי)

כנסות	כנסה/ק/שנה	מלמ"ק/שנה
הירדן	1,300-1,100	זרימות ישירות ממערב
(עינות צוקים, קנה וסמר)	150-100	זרימות ישירות ממזרח
(הארנון, זרד ועוד)	200-150	גשם ישיר
~ 80	200-100	ניקוז תתיימי
סה"כ כנסות	2,000-1,500	
יציאות		
התאזרות מפני המים (כ-1,000 קמ"ר 2.0-1.5 מ'/שנה)	2,000-1,500	

המספרים לעיל מייצגים הערכות של ממצאים רב-שנתיים. נפח השיטפונות (בניגוד לזרימות הבסיס) המגיעים ישירות לים המלח ממזרח, ממערב ומדרום נמוכים באופן יחסי ומסתכנים בכמה עשרות מלמ"ק/שנה לכל היתר. עיקר השינויים בזרימות בין חורפים גושים לשחונים באים לידי ביטוי בשינויים בזרימות בנהר הירדן.

ירידת המפלס הדрамטית המתרחשת ביום ביום הים (איור 5) נובעת משינוי מהותי שחל באמון המים, דהיינו מעבר לאמון מים שלילי קיזוני. שלא כמתואר לעיל, ירידת זורם מבראת שניינו אקלימי, אלא את התערבותה האדם באמון הים של ים המלח. ירידת המפלס האופיינית לשנים האחרונות, בשיעור של כמטר אחד בשנה, מייצגת גירעון מים שנתי של כ-650 מלמ"ק. שניינו זה הוא בראש ובראשונה תוצאה של שימוש מוגבר במים במעלה הזורימה והטיית מקורות הירדן; סכירת מוצאו הכנרת בסכר דגניה והפניית המים למרכז הארץ דרך המוביל הארץ, והטיית מי הירמוּך על ידי סוריה וירדן. נוסף על כך, חלק מהוואדיות המזרחיים של בקעת הירדן, שהתקשו בעבר לים המלח דרך הירדן, נסקרו אף

הם. עקב תהליכיים אלה הירדן מורים כיום לים המלח רק 70-150 מלמ"ק בשנה שהם כ-10% מהספקות המקוריות שלו.

נוסף על הירידה החדרה בורות המלח קיימת גם ירידת בורות היישרות לים המלח ממזוחה, בעקבות הנטהיה או הסירה של חלק מהוואדיות המזרחיים. תופעה זו ניכרת פחות בחופו המערבי של ים המלח, אך יש להניח כי בעתיד תהיה ירידת בספקות של עינות צוקים, קנה וסמר בשל שאיבות מים מהאקוופר המזרחי המזין מעינות אלה.

גורם נוסף התורם לגירעון המים הנוכחי בים המלח הם המפעלים הכימיים הישראליים והירדניים. אלה שואבים מים מהאגן הצפוני לברכות אידוי באגן הדרומי, שם התמלחת מת勁ה לכדי מלח מנהפה ומשקיעיה מינרלים שלחלקים ערך כלכלי רב. התמיסות המרכזות (המכונות תמלחות סופיות) מוחזרות לים דרך התוואי המלאכותי של נחל ערבה העובר בין ברכות האידיוי הישראלית והירדנית. סך גירעון המים עקב פעילות תעשייתית זו עומד על 250-300 מלמ"ק בשנה.

אומדן מאון המים של ים המלח **במצבו הנוכחי** מבוסס גם הוא על הערכות זרימה ומאזני מים. ההבדלים בין הערכות השונות נעים בטוחים הגدولים בהרבה (באופן יחסי) מאשר אלה של הערכות ההיסטוריות, ומתבטים בכך מהות מלמ"ק. במיוחד בולט ההבדל בין הערכות של מקורות ישראלים לאלה הירדניים לגבי השפעת ירידת המפלס על הגדלת זרימת מי התהום התת-קרקעית לים המלח. הירדנים טוענים כי תחילה זה מביא לאבדן של יותר מ-400 מלמ"ק מאוגר מי התהום לכל מטר ירידת מפלס. לטענתם, נפח זה הוא מעבר לנפח הזורימות הטבעיות התת-ימיות לים המלח בתנאי מפלס קבוע. הערכות הישראליות לאבדן מי תהום בגין ירידת המפלס מתחנות בהרבה ועומדות על כמה עשרות מלמ"ק בשנה לכל היתר.

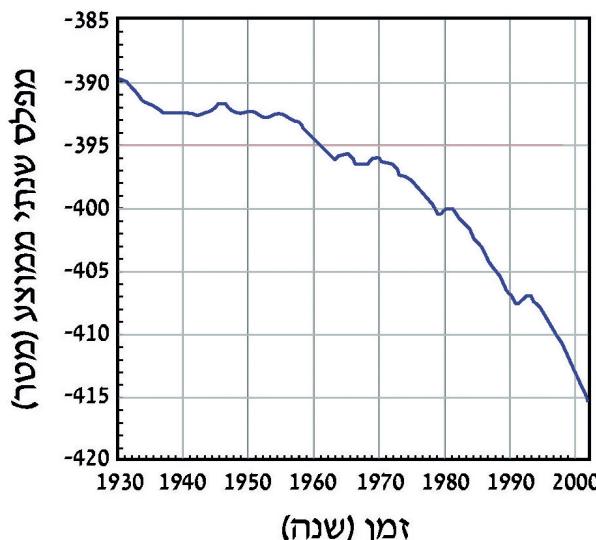
מכיוון שאין וכיום בוגר לקצב ירידת המפלס וסך גירעון המים שהוא מבטא, הרי שכניות של מי תהום לים המלח בנפחות הגدولים שהירדנים מעריכים מחייבות קצב אידיוי גבוה מאוד מפני ים המלח (שני מטרים בשנה). קצב זה אינו توأم את הערכות של מדענים ישראלים ושל מפעלי ים המלח. חישובי מאוניברסיטת אונרג'יה-מלחים שנעשו במכון הגאולוגי מצבאים על קצב אידיוי נמוך בהרבה, כ-1.1 מטר/שנה (Lensky et al., 2005). הערכת המכון הגאולוגי לסך הנקודות לים המלח כיום, כפי שמסוכמות בטבלה 2, עומדת על כ-350 מלמ"ק

בשנה, דהיינו כ-20% בלבד מנפח המים שהתנקזו באופן טבעי לים המלח עד אמצע המאה העשרים. ההערכות הגבוהות של הירדנים לכניות ולהתאדות מפני הים מבוססות בעיקר על שיקולים ועל הנחות hidROLוגיים, ואינן מתיחסות לשינויים בים המלח. אולם גם ללא קביעת מazon מים מדויק, ברור כי ירידת מפלס של כמטר בשנה מבטאת גירעון מים שנייה של כ-50 מיל"ק.

טבלה 2: אומדן המכוון הגאולוגי לכניות והיציאות מagon ים המלח ביום

כניסות מלמ"ק/שנה	כניות
הירדן ~100	
זרימות ישירות ממערב (כולל מעינות) ~100	
זרימות ישירות ממזרח (כולל מעינות) ~100	
גשם ישיר (אגן צפוני בלבד) ~50	
מי תהום בניקוז תת-ימי (כולל בגין ירידת מפלס) <50	
סה"כ כניות ~350	
	יציאות
התאדרות מפני הים (כ-50 קמ"ר) 750-700	
התאדרות במפעלים הכימיים (ישראל וירדן) 300-250	
סה"כ יציאות ~1,000	

מazon המים השלילי של ים המלח גרם לתמורות אחדות באגם, הבולטות שבהן התרחשה כאמור בסוף שנות השבעים עם ניתוק הקשר בין האגן הצפוני של ים המלח, המהווה את גוף המים העיקרי, לבין האגן הדרומי שהתייבש. ירידת המפלסים חשפה שטחים נרחבים, במיוחד חלקו הצפון מערבי של ים המלח, של בזע טובעני המהווה מפגע אסתטי, סביבתי ותכנוני (איור 6). קריסת התשתית באזורי התפתחות הבולענים קשורה גם היא בירידת המפלסים והוא תוצאה של חיפוי שכבות מלח בתת-קרקע למי תהום תת-ירודויים למלח היוצרים חלי' המסה בלתי יציבים הקורסים פנימה (יחיאלי ואחרים, 2004).



איור 5: שינויים במפלס ים המלח ב-70 השנים האחרונות
(מקור: השירות הhidrologiy)



איור 6: היחספות משטחי ברץ והתפתחותבולענים באזור חוף מינרל כתוצאה מירידת
מפלס ים המלח

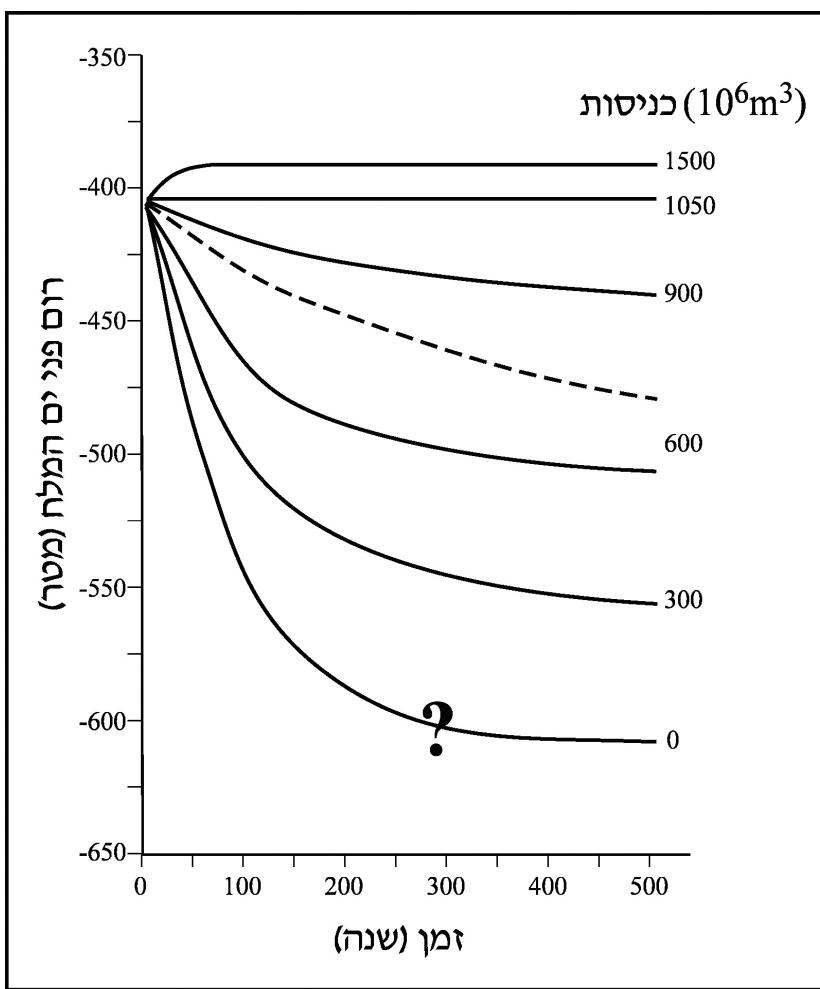
עתיד ים המלח

לא התערבות מחודשת רחبت היקף במאון המים של ים המלח, מפלסו צפוי להמשיך ולרDOT גם בשנים הבאות. קצב IRידת המפלס יכול אף לעלות אם חלק ממעט המים המתנקזים CIום לים המלח – ITפסו וויטו. עם זאת, המשר IRידת המפלס מלאה בעלייה במיליחות ובירידה בשטח האגם, שני גורמים המקטינים את האידוי מפני המים. כמה מודלים בלתי תLIים חזזים CI' בנפחים הזורמים CIום לים המלח הוא צפוי להתייצב בתוך 100 עד 400 שנים במפלס הנמוך BI00-150 מטר מהמפלס הנוכחי, דהיינו סביבה 550- מטר (Yechieli et al., 1998; אIOR 7). שטח האגם במפלס הקרוב לשינוי משקל זה יהיה כ-450 קמ"ר. לKראת הגעה למפלס זה יקטן קצב האידוי, ובהתאם לכך תהיה גם התמתנות בקצב IRידת המפלס.

עתיד ים המלח וסיבתו מעורר לאחורה עניין ציבורי CI'ם היבטים. מצד אחד גוברת המודעות לפגיעה בערך טבע ייחודי ולצורך לשמרו. מצד אחר, הפיתוח התשתייתי והתיירותי סביר הים נובל ואינו מתאפשר בשל חוסר ודאות לגבי מפלס הים המשתנה והescoנות הגלומות בהתקפות הבולענים. בעקבות כך Kיבלה ממשלה ישראלי BIינואר 2003 החלטה לבחון את נושא Utיד ים המלח תוך התיחסות לשולשה תסרים אפשריים, ולגבש מסמך מדיניות בהתאם לממצאים:

1. בררת המחדל' – השארת המצב הקיים.
2. חידוש הזורת מים שפירים מהירדן ומהירמור או מקורות אחרים.
3. Tעלת/MOVבל Mים: הזורת מי ים מהים התיכון או מים סוף לים המלח. פתרון זה יכול להיות Mושלב עם מערכת להתפלת מי ים אשר במסגרתו יופנו מ' הרכו לים המלח ואילו המים השפירים ישמשו את ישראל, ירדן והרשויות הפלسطינית.

בחינת התרחישים נעשית על ידי צוות הכלול מומחים מתחום מדעי האדמה, כלכניים, משפטניים, מהנדסים ואנשי תכנון והוא מקודם על ידי המשרד לאיכות הסביבה ומשרד התשתיות הלאומית (המכון הගאולוגי) ובשותפות מכון ירושלים לחקר ישראל. בחינת בררת המחדל הסטיימה והדווח הסופי הוגש לממשלה (מסמך מדיניות לעתיד ים המלח: בחינת תרחיש של בררת מחדל, 2005) ועתיד להתפרנס גם באינטרנט.



איור 7: מודל להשתנות מפלס ים המלח בזמן כפונקציה של סך נפח המים המתנקזים לים המלח בשנה (מתוך Yechiali et al., 1998). המספרים מיינן לכל עוקמה מצינינית את סך כל כנישות המים לים המלח בשנה במליאני מטרים מעוקבים, אשר שימשו בחישוב המודל. התוצאות במפלס מסווגת כאשר נפח הכנישות משתווה לנפח האידוי מפני המים. ניתן לראות שככל שנפח הזרימות קטן מפלס ים המלח צפוי להתויב על רום נמוך יותר. כל העוקמות, למעט הקוו המקווקו, מניחות המשך פעילות של המפעלים הכימיים בהיקף הנוכחי. הקוו המקווקו מציג את השתנות המפלס בהנחה של כנישה של 600 מלמ"ק לשנה ללא פעילות המפעלים.

שתי החלופות האחרונות, שבוחינתן טרם הchallenge, מחייבות נפח הזרמה של מאות מיליון מטרים מעוקבים לצורך יצוב המפלס או הרמתו לכל רמה שתיקבּע. ברור כי בנסיבות הקיימות באורךנו, שבה כבר כיוון הדרישת למים שפירים עולה על האוגר המתחדר, האפשרות של הפניות מים איכוטיים בנפחם המזוכרים לטבות ים המלח נראהית מועשית פחותה. לעומת זאת, האפשרות של הזרמת מי ים יכול להיות חלופה מועדף על פני השארת המצב הקיים, מה עוד שפרויקט כזה יכול להיות מנוף לפיתוח תיירותי ולהתפלת מי ים שישיבו לחיזוק השלום באורך. עם זאת, לאפשרות זו יש השלכות מרחיקות לנכת על התפתחות ים המלח בעתיד.

בשפטember 2002 יצאו ישראל וירדן בהכרזה משותפת בכנס לפיתוח בר קיימא, ובה הודיעו על כוונתם לקדם את בחינת 'МОבל השלום' דרך העربה, פרויקט שבמסגרתו יזרמו מים ממרץ אילת לים המלח. במאי 2005 חתמו נציגים בכירים בישראל, מירדן ומהרשות הפלסטינית על מסמך משותף (TOR – Terms of Reference) המכול נושאים לבחינה במסגרת סקר היתכנות לМОבל השלום'. סקר זה מתוכנן להתבצע על ידי גורמים בינלאומיים ומוקומיים במימון מדינות תורמות ובפיוקה הבנק העולמי. מעבר לנושאים ההנדסיים והכלכליים הדורשים בדיקה, קיימת דרישת לבדוק את ההיבטים הסביבתיים של הפרויקט. בדיקה זו צריכה לכלול את שלושת מרכיבי התכנון: השפעת שאיבת מי הים על ראש מರץ אילת, ההשפעה והסכנות הגלומות בהזרמת מי הים בערבה (בתעליה ו/או ב津ור), והשפעת הכנסתה והערבות של מי ים או של מי רכו על ים המלח. במסגרת זו יש לוודא מראש כי תיקון הנזק של ירידת המפלסים על ידי הזרמת מי ים לא יגרור בעקבותיו נזקים כבדים ובلتיה הפיכים לים המלח ולמערכות השונות הקשורות אליו (Gavrieli et al., 2005). בין הנושאים הדורשים בחינה נכללים:

א. התפתחות השיכוב בים המלח עקב מיחול מי ים המלח העליוניים על ידי מי הים או מי הרכו מתקדם התפללה. במסגרת זו יש לקבוע את יחס הערבות הצפויים, הרכב וצפיפות של שכבות המים העליונה וקצב השתנותם במהלך קיומם המפעל.

ב. אפשרות פריחה מיקרוביאלית בים המלח עקב המיחול, ושינוי צבע פני הים. ג. התגבשות גבס עקב ערבות בין מי ים המלחعشiri סידן (Ca) ומיאים עשירי סולfat (SO_4^{2-}). יש לוודא כי גבישי הגבס ישקוו לקרקעית ולא ישארו כתרחיף לבן במים העליוניים.

ד. קביעת קצב האידוי מפני מי ים המלח החדשם. קצב זה יכתיב את הקצב והנפחים של המים שנשנתן להרים לים המלח על מנת להרים ו/או לייצר את המפלס בגובה מוסכם מראש.

כדי לחזות ולכ觅ת תהליכיים אלה לאורך זמן ולנתח את השינויים המלח עקב כניסה מי ים, נדרש פיתוח מודל אגמי דינמי לים המלח. מודל זה צריך לכלול את כל הפרמטרים הקובעים את התנאות האגם ולאפשר ניתוח תרחישים להתפתחות האגם בתנאי הזרמה שוננים. בסיס המודל צריכה להיות היכולת לחזות את ההתפתחות הפיזיקלית של עומדת המים והתפתחות השיכוב עם הזמן. מאחר שההתפתחות השיכוב תלויה מכלול משתנים, ובכללם הכימיה, האקלים, קצב האידוי, ההידרולוגיה סביב האגם ועוד, על המודל הבסיסי להיות מוון במשתנים אלה ולעקוב אחר השינויים בזמן. מודל זה מקודם אלה במכון הגיאולוגי בשיתוף עם מומחים בארץ ו בחו"ל.

מקורות וקריאה נוספת נספחת

יחיאלי, י' ואחרים, 'טופוגרפיה הבלתי נזקנית (בורות) לאורך חופי ים המלח: הממצאים, מגנון היצירה וצפי לעתיד'. דוח המכון הגאולוגי, GSI/21/04, 2004
מסמך מדיניות לעתיד ים המלח: בחינת תרחיש של ברחת מחדל', 2005. המשרד לאיכות הסביבה, משרד התשתיות הלאומית (המכון הגאולוגי) ומכון ירושלים, בדפוס

- Anati, D.A. & Stiller, M. 1991. 'The post-1979 thermohaline structure of the Dead Sea and the role of double-diffusive mixing'. *Limnol. Oceanogr.* 36(2), pp. 342–354
- Bookman, R. et al. 2004. 'Late Holocene lake-levels of the Dead Sea', *Bulletin of the Geological Society of America*, 116, pp. 555–571
- Gavrieli, I., Bein A. & Oren A. 2005. 'The expected impact of the "Peace Conduit" project (the Red Sea – Dead Sea pipeline) on the Dead Sea', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 10(1), pp. 3–22
- Hall, J.K. & Neev D. 1978. 'The Dead Sea geophysical survey', *Geological*

- Survey of Israel Report MG/1/78*
- Lensky, N.G. et al. 2005. 'Water, salt and energy balances of the Dead Sea'. *Water Resources Research*, In Press
- Neiv, D. & Emery, K.O. 1967. 'The Dead Sea: Depositional processes and environments of evaporites', *Geological Survey of Israel Bulletin* 41, pp. 147
- Oren, A. & Shilo, M. 1985. 'Factors determining the development of algal and bacterial blooms in the Dead Sea: a study of simulation experiments in outdoor ponds'. *FEMS Microbiology Ecology* 31, pp. 229–237
- Yechieli, Y. et al. 1998. 'Will the Dead Sea die?' *Geology* 26, pp. 755–758