אגם ים המלח: הנביעה הגדולה בעולם

אברהם סטרינסקי

מים מלוחים ממי אוקיינוס נמצאים בכדור הארץ בשתי צורות: כאגמים על פני השטח וכמי תהום בעומק. אם כי המליחות של שתי קבוצות אלה יכולה להיות דומה, ההרכב הכימי שלהן שונה לחלוטין (ראו הסברים במלבן 1 בעמ׳ 45). ים המלח נחשב לאגם יוצא דופן בהשוואה לאגמים מלוחים אחרים על פני כדור הארץ. מצד אחד הוא אגם, כלומר גוף מים הנמצא על פני השטח, ומצד אחר ההרכב הכימי של מימיו מתאים לזה של מי תהום. במילים אחרות, מקורם של מלחי ים המלח הוא במי תהום מלוחים הנובעים ממעיינות שלחופיו או מתוך קרקעיתו. תרומת המים העיליים – מי נהר הירדן או השיטפונות – להרכבו הכימי של האגם זניחה בשל מליחותם הנמוכה. לפיכך, מבחינת המלחים שבו, אפשר לראות את גוף המים של ים המלח כנביעה אחת גדולה, שהיא סך כול הנביעות הרבות לאורך זמן.

המאמר מציג את הרכב המלחים המומסים במי ים המלח ומסביר את מקורם לפי ראשי הפרקים הבאים: מצב האגם מבחינה כימית; הקשר הכימי בין מי התהום המלוחים (מעיינות) למי ים המלח; מנגנון היווצרות המים המלוחים בבקע ים המלח; עד כמה יכולים מי ים המלח להמשיך בתהליך האיוד; הסלעים שייווצרו בים המלח בהמשך איודו.

* אברהם סטרינסקי הוא פרופסור במכון למדעי כדור הארץ של האוניברסיטה העברית בירושלים.

תכונות כימיות של מי ים המלח

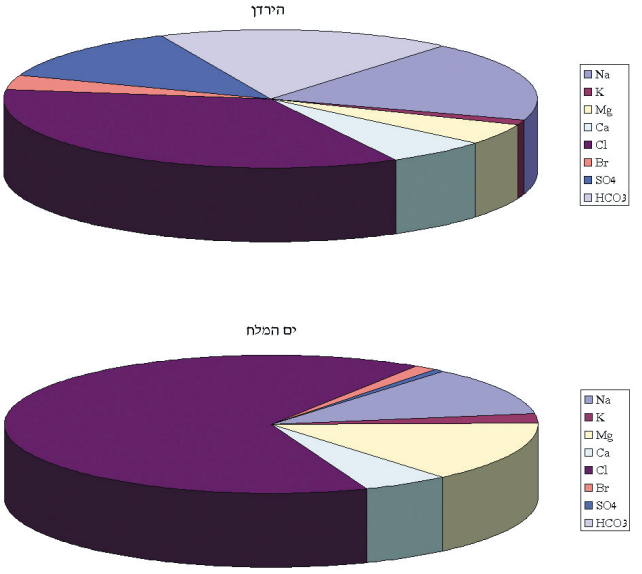
בטבלה 1 ואיור 1 מובאים נתונים מהשנים האחרונות על ההרכב והמליחות של מי ים המלח. מהטבלה עולה שהיונים החיוביים (הקטיונים) הראשיים לפי סדר ריכוזיהם הם מגנזיום (Mg) נתרן (Na) סידן (Ca) ואשלגן (K). האניון העיקרי הוא הכלור (Cl) המלווה על ידי ברום (Br). ים המלח הוא אגם כלורידי, להבדיל מרוב האגמים המלוחים שעל פני כדור הארץ הנשלטים על ידי אניונים אחרים. ההרכב הכימי והמליחות של האגם משתנים במידת מה עם הזמן. לדוגמה, מליחות האגם כיום היא כ־340 גרם של מלחים מומסים בליטר, לעומת כ־320 גרם בליטר לפני כ־50 שנים.

ריכוז המלחים במי ים המלח הוא כה גבוה, עד שמלחים שהם בעלי מסיסות נמוכה כמו ארגוניט ($CaCO_3$), גבס ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ואפילו מלח הבישול (NaCl) כבר שקעו מתוכו וכל אידוי מים נוסף מביא להמשך השקעתם. תהליך זה של השקעת מינרלים מתרחש כיום בברכות האידוי של מפעלי ים המלח באגן הדרומי. כאשר מאדים את מי ים המלח לדרגת איוד של 1.7 (ראו מלבן 1), מתחיל לשקוע המינרל קרנליט ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$). מקרנליט המושקע בברכות אידוי מופק בתהליך תעשייתי המינרל סילוויט (KCl) הידוע יותר בשמו המסחרי אשלג (potash). מפעלי ים המלח הם יצרן האשלג לדישון הרביעי בגודלו בעולם. נוסף על כך מפיקים ממי ים המלח כימיקלים רבים של היסודות מגנזיום וברום ומלחים תעשייתיים אחרים.

ההרכב הכימי של מי ים המלח (כלומר, היחס בין היונים הראשיים) שונה מאוד מזה של מי אוקיינוס מאוידים, גם אם רמת מליחותם זהה. כאשר משווים את ההרכב הכימי של מי ים המלח (טבלה 1) למי ים מאוידים בעלי אותה רמת מליחות (מי ים מאוידים בערך פי 20), מגלים שמי ים המלח מועשרים ביוני מגנזיום, סידן, אשלגן, ברום וכלור ומדולדלים ב־נתרן וביוני סולפט (SO_4^{2-}, או בקיצור SO_4 וביקרבונט (HCO_3^-, או בקיצור HCO_3).

טבלה 1: ההרכבים הכימיים של מי ים המלח, מי ים מאוידים, מי מעיין לחוף ים המלח ומי הירדן. הריכוזים נתונים ביחידות של גרם מלחים בליטר תמיסה

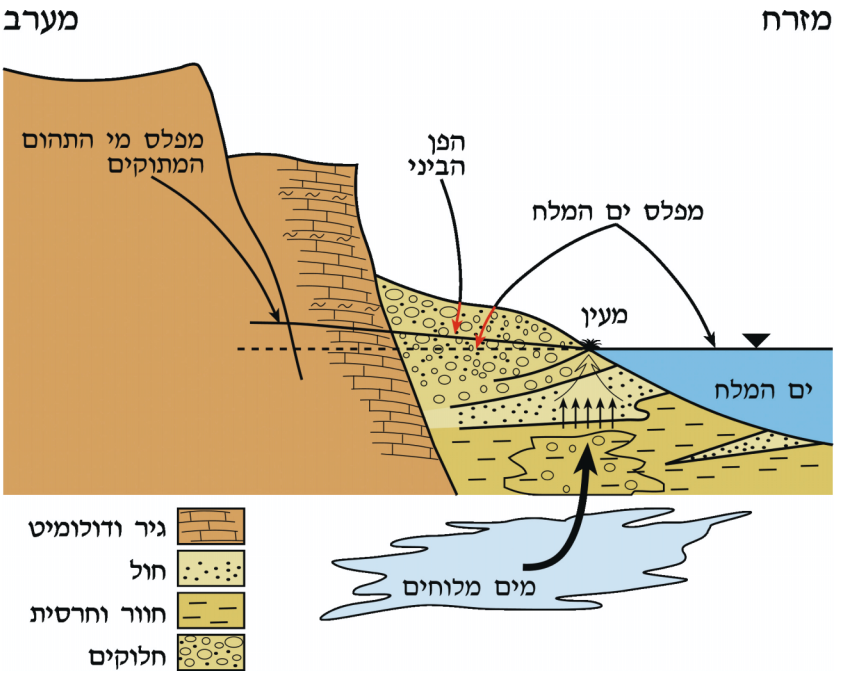
היסוד	ים המלח (מאי 1995)	מי ים מאוידים פי 20	עין קדם	מי ירדן (דרום) 1960
Na	38.3	86.0	8.52	0.253
K	7.79	7.23	4.16	0.015
Mg	47.7	25.4	22.5	0.071
Ca	18.3	0.26	12.8	0.080
Cl	219.6	187.2	124.5	0.474
Br	5.49	1.26	2.76	0.043
SO_4	1.23	32.1	1.36	0.175
HCO_3	0.26		0.09	0.238
מליחות	338.7	339.1	196.8	1.310



איור 1: השוואה בין ההרכב הכימי של מי ים המלח לזה של מי הירדן (ביחידות משקל בליטר)

מעיינות לאורך ים המלח

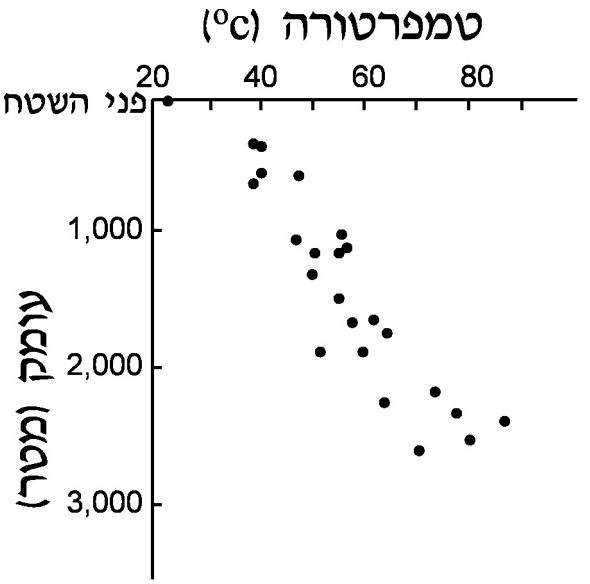
לאורך ים המלח, בעיקר בצדו המערבי, ישנם מעיינות רבים הנובעים סמוך לקו המים (איור 2). המעיינות מייצגים מי תהום מלוחים המרווים את הסלעים באזור. ההרכב הכימי של אחד המעיינות (עין קדם) נתון בטבלה 1. למעיינות הרכבים כימיים דומים והם נבדלים ממי ים המלח בתכונות אחדות: (1) המעיינות מלוחים פחות, בהשוואה למליחות של ים המלח שהיא כיום כ־340 גרם בליטר. המעיינות המלוחים ביותר הם בעלי מליחויות שאינן עולות על כשני שלישים מערך זה; (2) המעיינות מאופיינים ביחסים נמוכים יותר של Mg, K ו־Br ל־Cl לעומת היחסים בין היסודות Na ו־Ca ל־Cl שהם גבוהים יותר.



איור 2: חתך רוחב דיאגרמתי המציג את יחסי השדה בין גופי המים השונים באזור ים המלח. הקו השחור העבה מראה באופן סכמתי את כיוון זרימת המים. המים המתוקים לוחצים על המים המלוחים העולים ונובעים לחוף ים המלח

הטמפרטורה של המעיינות גבוהה באופן יחסי ומגיעה עד לכ־40°C. טמפרטורה גבוהה של מים הנובעים אל פני השטח מצביעה על כך שמקורם בעומק. באזור בקע ים המלח נמדדו טמפרטורות בעומק במסגרת קידוחי הנפט שנעשו באזור. תוצאות המדידות נתונות באיור 3. מהאיור אנו למדים שהגרדיינט הגאותרמי הממוצע בשלושת הקילומטרים העליונים הוא כ־20°C לקילומטר עומק. אם טמפרטורת המעיינות אכן מייצגת את הטמפרטורה בעומק, מקור המעיינות הוא במי תהום מלוחים הנמצאים בעומק של כמה מאות מטרים מתחת לפני ים המלח.

נביעת המעיינות על פני השטח נגרמת מ׳דחיפתם׳ על ידי גוף המים המתוקים הנמצא באזור ההר (חברון ויהודה). מקור המים המתוקים באזור ההר הוא במי גשם היורדים בחורף ונודדים בתת־קרקע לכיוון ים המלח. לעתים עוד לפני הגיעם אל הבקע הם נובעים באזור ההר במעיינות מתוקים כמו מעיינות עין גדי, מעיין דוד ועין ערוגות.



איור 3: הקשר בין הטמפרטורה לבין העומק באזור ים המלח

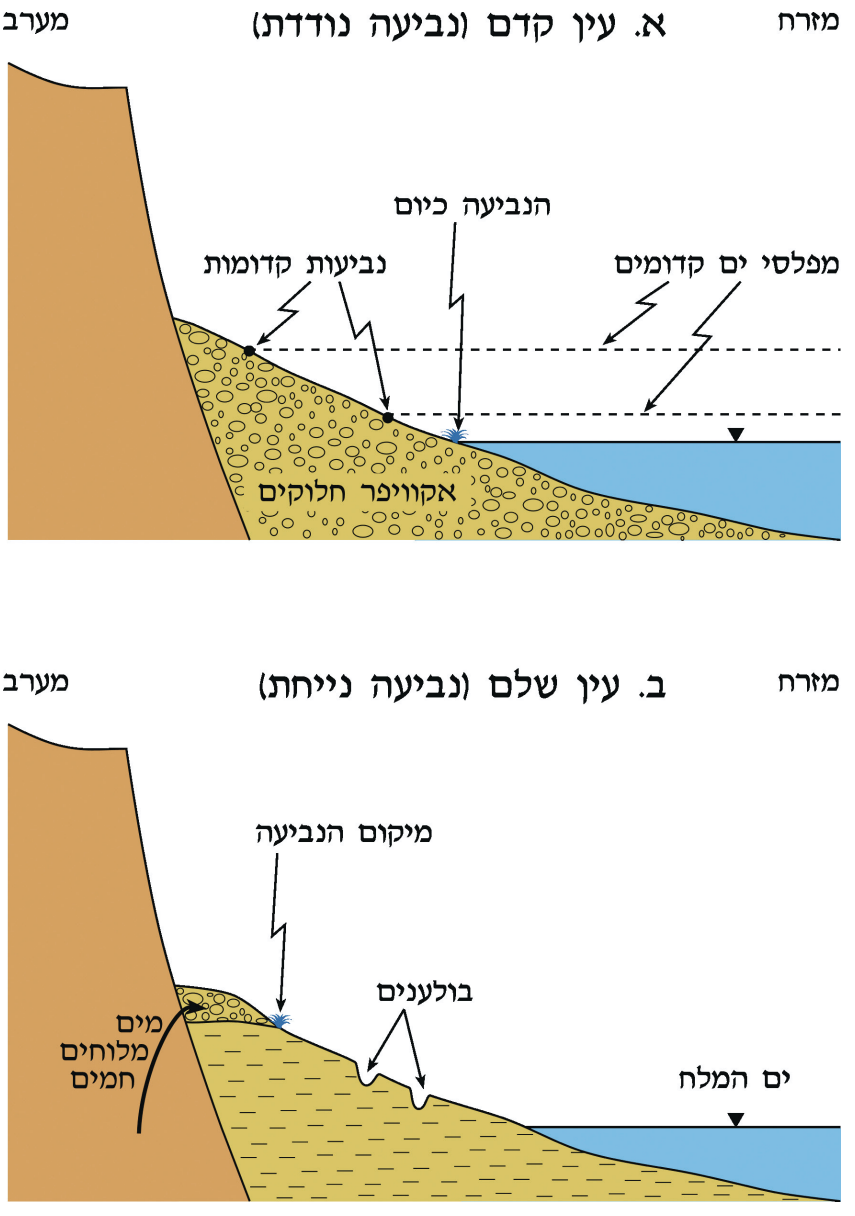
גוף המים המתוקים דוחף את מי התהום המלוחים שבבקע כלפי מעלה אל פני השטח, למקום שבו מבחינה הידרולוגית נוח ביותר למי התהום המלוחים לעלות אל פני השטח. זהו אזור קו המים כי בו הלחץ על המים שבתת־קרקע הוא מזערי (אוויר מול עמודת המים המתוקים בהר). התנאי לעליית מים במקום זה או בכל מקום אחר הוא קיומם של פתחים המאפשרים תנועה, כגון סדקים, חללים או העתקים פתוחים.

עקב ירידת המפלס בשנים האחרונות מתעוררת השאלה: מה קורה למעיינות הנמצאים על קו המים כאשר הים נסוג? כדי לענות על שאלה זו נבחן שני מקרים בולטים (איור 4): עין קדם ועין שלם.

חתך הסלעים באזור עין קדם בנוי חלוקים של מניפת סחף. סלעים אלה הם בעלי נקבוביות גבוהה ומקום הנביעה נשלט על ידי מקום הלחץ המזערי, קרוב לחוף הנסוג. לכן עם הנסיגה משתנה מקום הנביעה. בעין שלם סלעי הסביבה בנויים מסלעי משקע דקי גרגר (שטח מקווקו באיור 4) בעלי נקבוביות נמוכה. המים אינם יכולים לנוע בקלות בסלעים אלה, ומקום המעיין נותר בגבול בין החלוקים לסלעי המשקע הדקים.

כיצד נהפכים מי המעיינות למי ים המלח?

כאשר מים הנובעים ממעיינות ים המלח מתאדים, הם נעשים מלוחים יותר והרכבם נעשה דומה לזה של מי ים המלח. ההרכב דומה אבל אינו זהה. איור 5 מראה כיצד משתנה הרכב כימי של מי מעיין מלוח כזה בתהליך האיוד בטמפרטורה של 25°C. לחישוב נבחר הרכב של מעיין 'ממוצע' באזור ים המלח. על ציר ה־Y נתונים ריכוזים של היסודות הכימיים (ביחידות מול בק"ג אחד של מים, ראו מלבן 2), ועל ציר ה־X נתונה דרגת האיוד של מי המעיין. היסודות שאת התנהגותם נבחן הם: נתרן, אשלגן, מגנזיום, סידן, כלור וברום. עם התחלת התהליך עולים ריכוזי היונים כולם (לאורך הקו הרצוף המתאים לכל יון). בדרגת איוד של 1.7 בערך התמיסה מגיעה לרוויה לגבי הליט (מלח הבישול), והוא מתחיל לשקוע. בנקודה זו מתחיל ריכוז היסוד Na לרדת, ולכן היחס Na/Cl מתחיל לרדת אף הוא. הסבר מפורט יותר ניתן במלבן 2. כל שאר היסודות נותרים בתמיסה וריכוזיהם ממשיכים לעלות. בהמשך האיוד, בדרגה של 2.2 בערך,

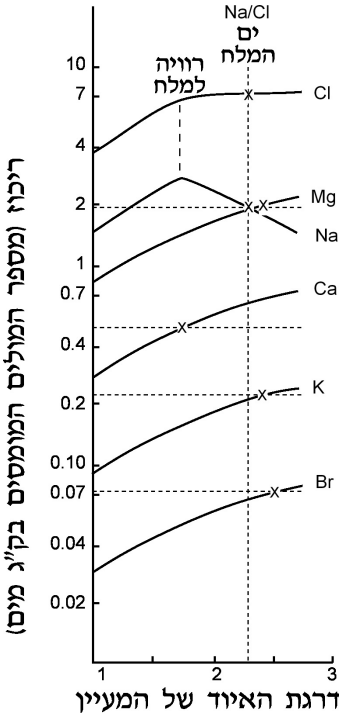


איור 4: חתכי רוחב דיאגרמתיים דרך מעיינות עין קדם ועין שלם. עין שלם הוא מעין 'נודד' המלווה את ירידת מפלס מי ים המלח

מתקבל במי המעיין יחס Na/Cl המתאים ליחס שבמי ים המלח (0.27). במבט ראשון המודל של מי המעיינות המאודים מסביר היטב את ריכוז שאר היסודות, פרט לסידן. בחינה מפורטת יותר מגלה כי הריכוזים של מגנזיום, אשלגן וברום גבוהים מעט יותר מהצפוי לדרגת איוד זו. באיור מסומנים ריכוזי היונים במי ים המלח בקווים אופקיים מקווקווים. תופעה זו כללית ונכונה גם לשאר הנביעות.

מהי הסיבה להבדלים אלה? ראינו שבקירוב טוב אפשר להסביר את ההרכב הכימי של מי ים המלח על ידי איוד של מעיין 'ממוצע'. עם זאת ברור שלים המלח נכנסים מים נוספים, רובם מהירדן ומיעוטם משיטפונות. נראה בהמשך את תרומתם האפשרית של המים האלה להרכב הכימי של ים המלח. הרכב מי הירדן והספיקה שלו אל ים המלח השתנו בוודאי במשך הזמן הגאולוגי בעקבות אירועים גאולוגיים. בעשרות השנים האחרונות רואים שינויים בהרכב הירדן ובספיקתו, בעיקר בגלל התערבות האדם. שינויים משמעותיים החלו בעיקר עם הפעלת המוביל הארצי בשנת 1964 וסגירת סכר דגניה בדרום הכנרת. בטבלה 1 נתון הרכב כימי של הירדן משנת 1960 לפני תקופת המוביל הארצי. אם כי הרכבו השתנה בעבר ומשתנה גם כיום בין עונות השנה, ההרכב הנתון כאן מייצג ממוצע של הרכבים מלפני 1964. בדיקות כימיות של מי ירדן משנת 2000 מראות הרכב דומה (יחסים דומים בין היסודות), אך המליחות גבוהה יותר.

כפי שנאמר, בשנים האחרונות מי ים המלח רוויים למינרלים כמו ארגוניט ($CaCO_3$), גבס ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ומלח הבישול (NaCl). מה קורה למי הירדן הנכנסים לאגם כזה? רוב היסודות הכימיים, כ־90% מהם (נתרן, כלור, סידן, ביקרבונט וסולפט) שוקעים במינרלים שהוזכרו לעיל ואינם מצטרפים למרכיבי האגם. לעומתם, יסודות שאינם נכנסים לשריג המינרלים השוקעים – כגון אשלגן, חלק מהמגנזיום, ברום וחלק מהכלור (כ־10% מהיסודות המוסעים מהירדן אל ים המלח) – מצטרפים אל מי ים המלח. בגלל המליחות הנמוכה של מי הירדן באופן יחסי לנפח מי ים המלח, ספיקתם הקטנה ומצב הרוויה של האגם, תרומת המים העיליים זניחה. אם מסיבה כלשהי (אקלימית או גאולוגית) תיפסק אספקת מי המעיינות לים המלח, תגדל בהדרגה תרומת המים העיליים והרכבו יתחיל להשתנות לכיוון העשרה בביקרבונט ובסולפט.



איור 5: השתנות ההרכב הכימי של מי מעיין 'ממוצע' באזור ים המלח עם איודם

מקור מלחי המעיינות (מנגנון שלושת השלבים)

כאמור, מקורם של מלחי ים המלח בעיקר במעיינות שלחופו (להבדיל ממעיינות מלוחים אחרים באזור הר סדום או מתוקים בחבל ההר). השאלה היא מהו המקור שממנו מגיעים המלחים למעיינות, או במילים אחרות, מהו המנגנון האחראי למליחויות ולהרכב הכימי של מי המעיינות (הן אלה שלחופי ים המלח והן אלה הנובעים לאורך בקעת הירדן).

הדמיון בהרכב הכימי של מי תהום מלוחים מגילים שונים בכל כדור הארץ מצביע קרוב לוודאי על מקור אחד: על גוף מים מלוחים שהיה בעל הרכב קבוע בתקופות הגאולוגיות השונות. גוף מים כזה יכול להיות האוקיינוס. מחקרים העוסקים בהרכב מי הים בתקופות קדומות (בחצי מיליארד השנים האחרונות) אכן מצביעים על הרכב כימי קבוע פחות או יותר.

אם האוקיינוס הוא מקור המים המלוחים על כדור הארץ, עלינו להסביר את ההבדלים בין ההרכב הכימי של מי האוקיינוס של היום לבין מים מלוחים בתת־קרקע. במי תמלחות יש להסביר את התכונות הבאות: 1. מליחות גבוהה של מי תהום מלוחים באופן יחסי למי אוקיינוס; 2. העשרה קבועה ביוני סידן וברום; 3. דלדול אפשרי ביסודות ביוני נתרן, מגנזיום, אשלגן וסולפט.

המנגנון האחראי להבדלים אלה כולל שלושה שלבים:
1. איוד של מי אוקיינוס על פני השטח בלגונה (ראו מלבן 1). עקב האיוד נעשים המים בלגונה מלוחים יותר ואם הם מאודים דיים, הם משקיעים, כפי שכבר הוזכר, מינרלים כמו גבס ומלח בישול. בשלב זה קטן באופן יחסי ריכוז ה־Na שבמים ועולה בהם ריכוז הברום (ראו מלבן 2).
2. תגובה בין המים שהתאדו בלגונה לבין הסלעים הנמצאים במגע אתם. התגובה יכולה להתרחש הן עם המשקעים שבלגונה והן עם סלעי הסביבה. בשלב זה מתרחשים תהליכים של החלפה בין היסודות שבמים ובסלעים. החלפה זו מתבטאת בירידה בריכוזי הסולפט, המגנזיום והאשלגן במים ועלייה בריכוז הסידן (ראו מלבן 2).
3. חלחול של המים המלוחים (משלב 2) מן הלגונה לסלעי הסביבה כלומר – אל התת־קרקע. בשלב זה יכולים המים לפגוש במים מתוקים ולהימהל.

היכן נמצא מנגנון כזה באזור ים המלח?
לשם כך עלינו ללכת אחורה בזמן, לתקופה שלפני מאות אלפים ואפילו מיליוני שנים. באותה העת חדר הים התיכון, כנראה דרך עמק יזרעאל, אל אזור ים המלח של היום. מי הים התיכון שזרמו דרומה התאדו הן בדרכם והן באזור ים המלח, שבו התפתח אגם. המים היו מאוידים מאוד, והשקיעו גבס ומרבצים גדולים של מלח בישול (לדוגמה, סלעי המלח הבונים כיום את הר סדום; ראו מאמרם של וינברגר ובגין בקובץ זה). ההרכב הכימי של המים המאוידים השתנה בתגובה עם הסלעים שבסביבה והתקבל ההרכב הכימי שמאפיין כיום את מי המעיינות: העשרה בסידן וברום ודלדול בנתרן, באשלגן, במגנזיום ובסולפט (במלבן 2 מוצג מנגנון להעשרה בסידן ודלדול במגנזיום). המליחות הנמוכה של מי המעיינות בהשוואה לזאת של מי הים המאוידים היא תוצאה של חלחול (שלב 3) לתת־קרקע ושל ערבוב ומיהול עם מים מתוקים שהיו בסלעים.

מלבן 1

מליחות של מים מוגדרת כסכום משקל המלחים המומסים בהם. לדוגמה, במי אוקיינוס ממוצעים יש כ־35 גרם מלחים מומסים בליטר מים. במי שתייה מתוקים המליחות היא בדרך כלל פחות מגרם אחד מלחים מומסים בליטר.

הרכב כימי: היונים של היסודות הכימיים המייצגים את סך כול המלחים המסיסים במים הם: נתרן (Na^+), אשלגן (K^+), מגנזיום (Mg^{2+}), סידן (Ca^{2+}), כלור (Cl^-), ברום (Br^-), סולפט (SO_4^{2-}) וביקרבונט (HCO_3^-). סכום משקלם של מרכיבים אלה ברוב המים המלוחים הוא יותר מ־99% של המלחים המומסים. הרכב כימי של מים מלוחים (בהשוואה ל**מליחות** של מים) מוגדר על ידי היחסים שבין שמונה מרכיבים אלה. יכולים להיות מים מלוחים מאוד המכילים למשל רק שניים מהיסודות, נתרן וכלור. בדרך כלל המים שעל פני השטח מאופיינים בריכוזים גבוהים של סולפט וביקרבונט והמים שבתת־קרקע מאופיינים בריכוז גבוה של כלור וריכוזים נמוכים של סולפט וביקרבונט. אחד המאפיינים המבדילים בין ההרכבים הכימיים של שתי קבוצות המים הוא היחס המולרי $Q = (2Ca^{2+}/(HCO_3^- + 2SO_4^{2-})$ כאשר במים בתת־קרקע יחס זה גבוה בדרך כלל מ־1, ובמים שעל פני השטח הוא קטן מ־1. במי ים המלח יחס זה הוא כ־30.

המסה ואיוד: למים כושר **המסה** של מלחים, אולם כושר זה מוגבל. תמיסה מגיעה לרוויה לגבי מינרל מסוים כאשר אין היא יכולה עוד להמיסו. כאשר מתרחש תהליך של **איוד**, המים המאוידים נעשים מלוחים יותר, ואם הם מאוידים דיים, הם מגיעים לרוויה לגבי מינרל אחד או יותר. בהמשך האיוד מתחילים המינרלים שלגביהם נעשו המים רוויים, להתגבש ולשקוע. לדוגמה, ניקח כוס ובה מי אוקיינוס וניתן למים להתאדות בטמפרטורת החדר. בהתחלה יעלה בהם שיעור המלחים המומסים ויגיע לרוויה לגבי המינרל ארגוניט ($CaCO_3$). על פני המים יתחילו לצוף גבישים מחטיים של המינרל. בהמשך האיוד, לאחר שהמים ירדו עד לגובה שליש הכוס – **דרגת איוד 3** – יתחיל להתגבש המינרל גבס ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) וכאשר יגיעו המים לעשירית הגובה, יתגבש המינרל הליט (NaCl) או כפי שהוא נקרא מלח בישול. בהמשך תהליך האיוד יתגבשו מינרלים נוספים בכמויות קטנות.

תמלחת: מים מלוחים שמליחותם גבוהה מזאת של מי אוקיינוס (יותר מ־35 גרם מומסים בליטר תמיסה).

נקבוביות (פורוזיות): גודל המבטא את כמות החללים בסלע (מבוטאת ב־%).

לחץ אדי תמיסה: כאשר נוזל בכלי פתוח הופך לאדים, הוא יכול להמשיך להתאדות עד להיעלמותו המוחלטת. לא כך המצב כאשר הנוזל נמצא בכלי סגור. במקרה זה חלק מהנוזל הופך לאדים (אידוי), אבל חלק מהאדים חוזרים בחזרה אל הנוזל (עיבוי). כאשר מידת האידוי שווה למידת העיבוי, מתקיים מצב של שיווי משקל והלחץ של האדים על הנוזל מוגדר אז כלחץ אדי תמיסה. לחץ אדי מים בטמפרטורה של 25°C הוא 23.8 מ״מ כספית (אטמוספרה אחת = 760 מ״מ כספית).

מפל (גרדיינט) גאותרמי: ככל שיורדים לעומק כדור הארץ, הטמפרטורה עולה. שינוי הטמפרטורה עם העומק נקרא ׳מפל (גרדיינט) גאותרמי׳. המפל משתנה ממקום למקום ותלוי בזרימת החום מתוך כדור הארץ ובמוליכות החום של הסלעים.

מלבן 2

מול: מספר האטומים ב־12 גרם של פחמן (ליתר דיוק ב־12 גרם של האיזוטופ 12C של פחמן). מספר זה הוא 6.022×10^{23} אטומים (602,200,000,000,000,000,000,000).
משקל מולקולרי: המשקל בגרמים של מול אטומים. לדוגמה, במול אחד של כלור שמשקלו 35.5 גרם יש מספר אטומים זהה לזה שיש ב־23 גרם נתרן, 24.3 גרם מגנזיום או 40.1 גרם סידן.

מדוע יורד ריכוז הנתרן כאשר מתחיל לשקוע מלח בישול ממי ים המלח?

נניח שבנפח מסוים של תמיסה יש 500 אטומים של נתרן ו־1,000 אטומים של כלור. היחס בין נתרן לכלור הוא 0.5. מתמיסה זו שוקע מלח הבישול שבו היחס בין האטומים של נתרן וכלור הוא 1. אם ישקעו 300 אטומי נתרן ו־300 אטומי כלור, תתקבל תמיסה שבה יהיו 200 אטומי נתרן ו־700 אטומי כלור. היחס יהיה אז 0.28 בערך. לדוגמה, בים המלח ירד היחס מ־0.28 בשנות החמישים לערך של 0.24 כיום.

לגונה: גוף מים מלוחים הנמצא סמוך לים. הקשר עם הים יכול להיות קבוע או חלקי. לגונה מופרדת ממי ים על ידי גופי סלע כגון ריף, מחסום של קרקע או חול.

עליית ה־Ca וירידת ה־Mg קשורים בתהליך היווצרותו של סלע הדולומיט בתהליך הנקרא דולומיטיזציה. בתהליך זה עוברים המינרלים קלציט או ארגוניט (שנוסחתם זהה) למינרל דולומיט על פי התגובה הבאה:

$$2CaCO_3 + Mg^{2+} \div CaMg(CO_3)_2 + Ca^{2+}$$

יון בתמלחת + דולומיט ÷ יון בתמיסה + קלציט

רואים שעל כל יון Mg^{2+} היוצא מהתמיסה אל המינרל דולומיט נכנס לתמיסה יון אחד של Ca^{2+}.

ירידת הסולפט קשורה לשקיעת גבס או לחיזור, **וירידת האשלגן** קשורה לספיחתו על מינרלים חרסיתיים.

לחות יחסית מוגדרת כיחס בין לחץ אדי המים באוויר ללחץ אדי המים באוויר רווי מים באותה טמפרטורה. משמעות הגדרת הלחות היחסית היא שמים רגילים מתאדים כל עוד הלחות היחסית נמוכה מ־100% (כל עוד האוויר אינו רווי במים). **לחץ האדים** של תמיסות נמוך יותר מזה של מים רגילים ויורד עם העלייה במליחות. לכן תמיסות מפסיקות להתאדות כבר בלחות יחסית נמוכה מ־100%.

מנין הערך הגבולי הנוכחי של לחות יחסית 67%?

על פי מדידות וחישובים נמצא שלחץ האדים של מי ים המלח כיום הוא כ־16 מ״מ כספית ב־25°, כלומר כ־67% מלחץ אדי מים נקיים באויר רווי בטמפרטורה זו (23.8 מ״מ כספית). כלומר, כל עוד הלחות באוויר גבוהה מ־67%, ים המלח אינו מתאדה.

איך משתנה ההרכב הכימי של המים המלוחים בתהליך המיהול?

נניח שמי הים המאוידים המתחילים את מסעם בסלעי הסביבה הם בדרגת איוד 20. במקרה זה, כפי שרואים בטבלה 1, הם בעלי מליחות של כ־340 גרם מומסים בליטר תמיסה. היחס של Na/Cl במים אלה הוא 0.7. אם המים המלוחים פוגשים בתוך הסלעים שאליהם נדדו מים מתוקים והם נמהלים לדוגמה פי שניים, מליחותם יורדת לחצי, ל־170 גרם בליטר, אולם בגלל כמות הנתרן והכלור הקטנה מאוד במים המתוקים, נותר בעינו היחס Na/Cl. כלומר, כאשר מי הים המאוידים מחלחלים לתת־קרקע, הם אינם שומרים בהכרח על מליחותם המקורית. עם זאת הם שומרים על היחסים בין היסודות השונים כי תוספת המים המתוקים עקב הערבוב כמעט שאיננה מוסיפה יסודות חדשים. המים שנמהלו פי שניים בהשוואה לתמיסת האם ומליחותם ירדה לחצי (מ־340 ל־170 גרם בליטר) יהיו בעלי Na/Cl מקורי, היינו 0.7. יחס זה יכול להצביע על דרגת האיוד המקורית של מי הים.

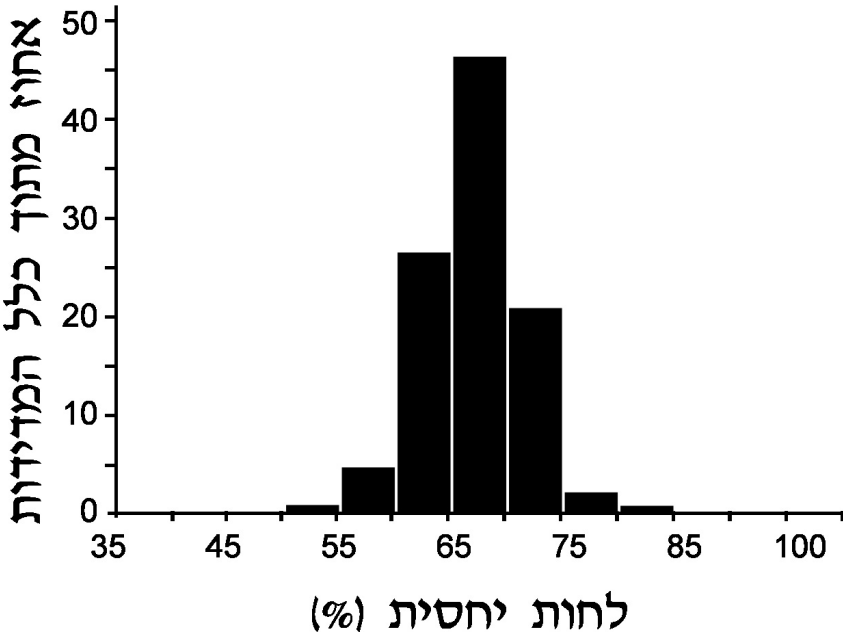
עד כמה יכולים מי ים המלח להתאייד?

איוד של גוף מים יכול להתקיים כל זמן שלחץ אדי המים של הגוף המתאייד גבוה באופן יחסי ללחות היחסית שבאוויר. לפיכך תהליך של אידוי יכול להתקדם במידה רבה יותר באזורים בעלי אקלים יבש לעומת אזורים בעלי אקלים לח. את גבול האיוד של מי ים המלח בתנאי אקלים של היום אפשר למצוא בדרך ניסיונית או על ידי מדידות אקלימיות וחישובים. לדוגמה, כאשר מניחים כוס של מי ים המלח על רפסודה במרכז הים למשך פרק זמן ארוך דיו (שנים אחדות), אפשר למדוד את הגובה הסופי שאליו ירדו המים בכוס ולתרגם אותו לגובה מפלס מי הים. חשוב שניסוי כזה יערך במשך תקופה ארוכה כדי שייכללו בו ההבדלים במזג האוויר (טמפרטורה ולחות יחסית בעיקר) המתרחשים בעונות השנה השונות.

באיור 6 נתונות תוצאות מדידות של לחות יחסית מעל ים המלח שעשה המכון הלאומי לאוקיינוגרפיה בין השנים 1992–1998. האיור מבוסס על 139,000 מדידות שנעשו בתחנה קבועה במרכז ים המלח. מנתונים אלה עולה שבכ־90% מן הזמן הלחות היחסית מעל ים המלח היא בתחום של 60%–70%. הלחות היחסית הנמוכה ביותר קרובה ל־50% והגבוהה ביותר ל־85%. על פי לחץ האדים של מי ים המלח (15–16 מ״מ כספית) הם יכולים להתאייד רק כאשר הלחות היחסית שמעליהם נמוכה מ־67% (ראו מלבן 2). כלומר, כאשר הלחות היחסית מעל ים המלח גבוהה

מ־67% לא יכול להתקיים איוד של המים. מהאיור אנחנו לומדים עוד שיותר ממחצית הזמן הלחות היחסית מעל ים המלח גבוהה מ־67% ולכן בפרק זמן זה לא מתקיים איוד. כדאי לציין כי בתנאים הנוכחיים עדיין גדול האיוד מסך כניסות המים לאגם ופניו יורדים (ראו מאמרם של גבריאלי וביין בקובץ זה).

מתי יגיע בתנאי האקלים של היום האיוד של מי המלח לסוף דרכו? חישובים מראים שבתנאי לחות יחסית שמעל ל־50% יכולה להתאייד ממי ים המלח עמודת מים של כ־100 מטר בלבד. כלומר מי ים המלח יפסיקו להתאייד כשיגיעו עד לגובה של 500 מטר מתחת לפני הים. גם ניסוי האיוד בכלי פתוח מעל ים המלח מצביע על תוצאה דומה.



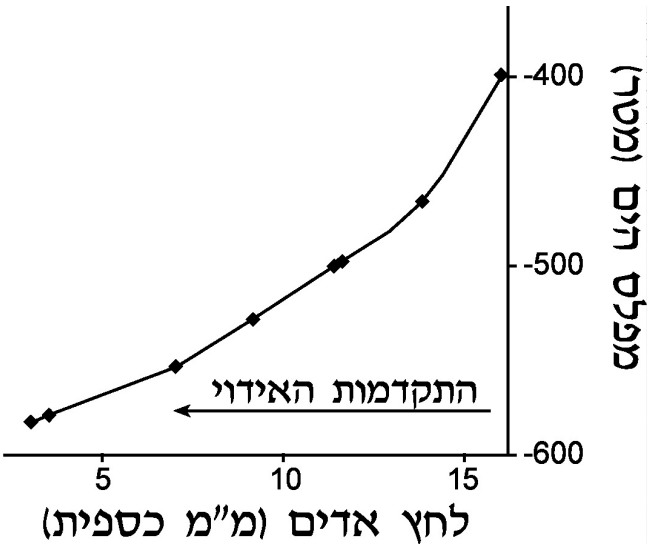
איור 6: הלחות היחסית מעל ים המלח בשנים 1992–1998

איור 7 מראה את שטחו של ים המלח בסוף שלב איודו, בתנאי האקלים של היום. במפלס בגובה של כ 500 מטר מתחת לפני הים נפח ים המלח יהיה 88 קמ״ק (לעומת 146 קמ״ק ב־1979) ושטחו 526 קמ״ר (לעומת 815 קמ״ר ב־1979). באיור 8 נתון הקשר בין רום מפלס ים המלח ללחץ האדים שלו. ציר ה־Y מייצג את מפלס האגם במטרים באופן יחסי למפלס מי הים. על ציר ה־X מסומן לחץ אדי המים שמעל לאגם בדרגות מליחות שונות. לחץ האדים פוחת והולך ככל שהמים נעשים מלוחים יותר. לדוגמה, כאשר מפלס הים ירד לרום של כ־475 מטר מתחת לפני הים, לחץ האדים של המים יהיה כ־13 מ״מ כספית בלבד.

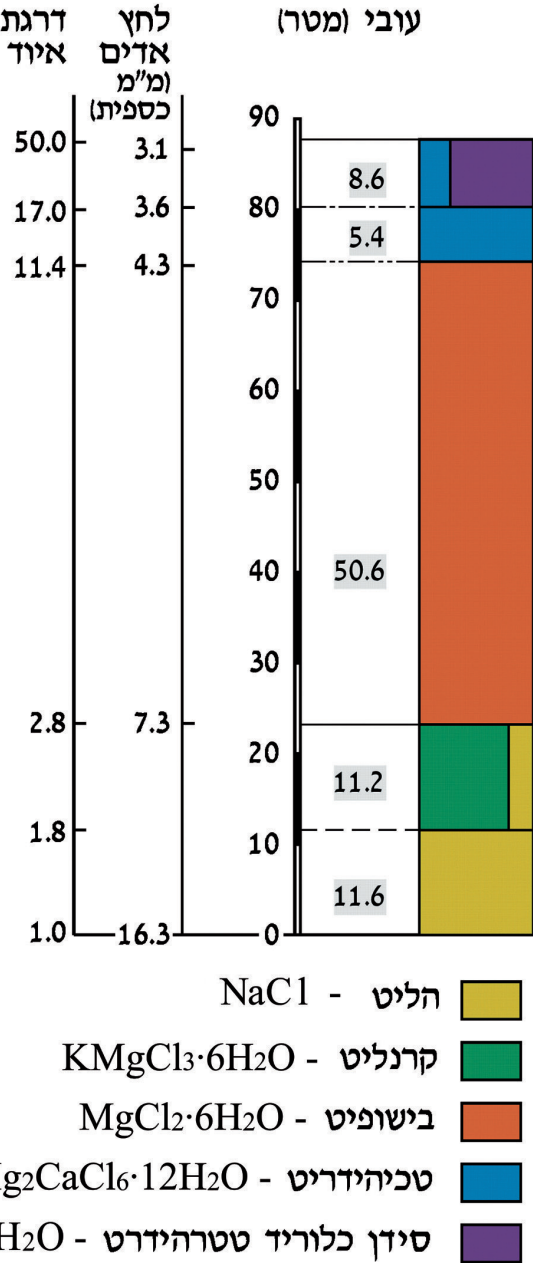
איור 7: הקשר בין מפלס ים המלח לשטחו. 500 מטר מתחת לפני הים הוא העומק שמי ים המלח יכולים להתאדות עד אליו בתנאי האקלים הנוכחי. המפלס של 402- מטר הוא משנת 1984

מהו חתך הסלעים שיתקבל עם איוד מי ים המלח?

כפי שנאמר, איוד מי ים המלח גורם למינרלים מסוימים המגיעים לרוויה לשקוע על קרקעיתו. כאשר מאדים את מי ים המלח פי 50 בערך, כאשר יישארו כ־2% ממשקל מי הים של היום, תיווצר עמודה של סלעים שעל פי החישוב יגיע עוביה ל־80–90 מטרים. רשימת המינרלים וסדר התגבשותם בחתך הגאולוגי שייווצר עם איוד מי הים נתונים באיור 9. החתך יהיה בנוי בבסיסו מנתרן כלורי (מלח בישול), עליו יתווסף מלח של אשלגן ומגנזיום כלורי (קרנליט) ומעליהם ישקעו כלורידים של מגנזיום וסידן. נוסף על מינרלים אלה ישנן כמויות קטנות מאוד של המינרלים מקבוצת הסולפטים אנהידריט ($CaSO_4$), בריט ($BaSO_4$) וצלסטין ($SrSO_4$). כדי שאיוד כזה יוכל להתקיים צריך לשרור מעל ים המלח אקלים יבש במיוחד והלחות היחסית (ראו מלבן 2) צריכה להיות מתחת ל־13%. מכיוון שתנאים קיצוניים כאלה אינם קיימים כיום וגם לא התקיימו בעבר באזורנו, לא נמצא חתך סלעים שלם כזה בים המלח והוא נדיר גם בעולם. סלעים כאלה ידועים מגבון־קונגו באפריקה ומברזיל בדרום אמריקה. הסלעים נוצרו שם לפני יותר מ־100,000,000 שנים מאגם שהיה דומה בהרכבו לים המלח בימינו.



איור 8: הקשר בין רום המפלס של ים המלח ללחץ האדים של מימיו ב־$25^{\circ}C$



איור 9: חתך עמודי של סלעים שייווצרו מאיוד של מי ים המלח

סיכום

מליחות מי ים המלח כיום מגיעה ל־340 גרם מלחים מסיסים בליטר אחד של מי הים. מליחות מי אוקיינוס רגילים היא כ־35 גרם מלחים בליטר. המליחות הגבוהה וההרכב הכימי של מי ים המלח הם תוצאה של **איוד** מי המעיינות הנובעים לחופו של הים או בקרקעיתו. לפיכך אפשר להתייחס אל אגם ים המלח כאל נביעה ענקית המורכבת ממספר רב של נביעות במשך זמן רב. מעיינות אלה מייצגים גוף גדול של מי תהום מלוחים (תמלחות) והרכבם הוא הקובע את הרכבו המיוחד של הים. מי התהום המלוחים המזינים את מלחי ים המלח הם שרידים של מי ים קדום שחדר אל האזור לפני מאות אלפי שנים או אפילו מיליוני שנים. מי ים אלה התאדו על פני השטח והשקיעו עקב כך כמויות גדולות מאוד של מלח בישול באזור בקע ים המלח. מרבצי מלח אלה נחשפים כיום בהר סדום, לחופו המערבי של ים המלח. במהלך ההיסטוריה שלהם השתנה ההרכב הכימי של מי הים הקדומים (מנגנון שלושת השלבים) והם מיוצגים כיום על ידי מי המעיינות. התרומה של מלחי הירדן או השיטפונות הנשפכים אל ים המלח היא זניחה. מסיבות הידרולוגיות המעיינות נובעים סמוך לקו המים. עם ירידת המפלס 'נודדים' חלק מהם אל המפלס החדש וחלקם נשאר במקום. נדידת המעיינות תלויה בנקבוביות של האקוויפר שבו המים זורמים.

מפלס מי ים המלח כיום הוא בערך 416 מטר מתחת למפלס מי האוקיינוס. ים המלח המתאייד כיום בקצב של כמטר אחד בשנה יוכל להמשיך להתאייד בתנאי האקלים של היום עוד כ־100 מטר. אידויו ייפסק בגובה של כ־500 מטר מתחת למפלס מי האוקיינוס. באקלים לח יותר מזה הקיים כיום יוכל ים המלח להתאייד פחות מזה, ובאקלים יבש יותר הוא יוכל להתאייד יותר.

איודם של מי ים המלח פי 50 בערך יביא ליצירת חתך גאולוגי של סלעים בעובי של כ־90 מטר. הסלעים שייווצרו יהיו בנויים בעיקר ממינרלים כלוריידיים וסדר הופעתם בחתך הוא (מלמטה למעלה): Na, K, Mg ו־Ca כלוריד.