

השפעת הזרימה של מי ים המלח באקוויפר החופי על האגם

יעל קירו

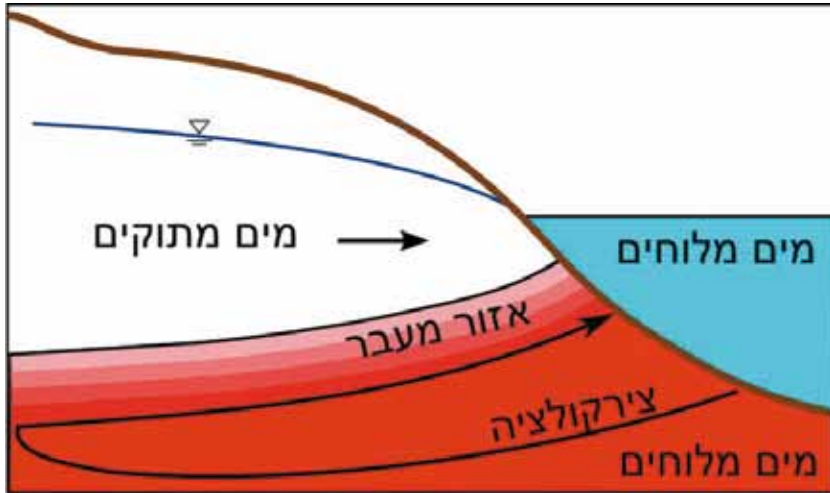
הרכב מימיו של ים המלח הוא הרכב ייחודי, הן במליחותו הגבוהה (340 גרם מלחים לליטר) והן ביחסים בין היסודות השונים המומסים בו. הרכב התמלחת הקלציום-כלורידית בים המלח הוא תוצאה של חדירת מי ים בתקופת הפליוקן דרך עמק יזרעאל לבקע ים המלח, אידויים, חדירתם לסלעי הסביבה ודלומיטיזציה שלהם (סטרניסקי, 2005).

ריכוז היסודות השונים במי האגם מוכתב על ידי היחס בין קצב הכניסה של היסוד לקצב סילוקו. יסודות נכנסים לרוב ממקורות שונים סביב ים המלח ומסולקים באמצעות שקיעה של מינרלים או ספיחה לחלקיקים. אשר לאיזוטופים רדיואקטיביים, אלה יכולים להיות מסופקים על ידי דעיכת 'אבותיהם' או מסולקים על ידי דעיכה רדיואקטיבית (ל'בנותיהם').

מאמר זה עניינו תהליך הידרולוגי המתרחש באזורים חופיים ומשפיע על הרכב יסודות הקורט במי ים המלח, אך לא על מאזן המים. במערכת מי תהום הסמוכה לאגם מלוח או לים זורמים מים מתוקים מעל המים המלוחים של הים או האגם, וביניהם אזור מעבר (איור 1). המים המלוחים חודרים לאקוויפר בגלל הפרש צפיפויות, מתערבבים עם המים המתוקים באזור המעבר וזורמים בתוכו בחזרה אל הים. זרימה זו היא תוצאה של זרימת המים המתוקים, שמפלסם גבוה יותר ביחס למפלס האגם. הזרימה של המלחים חזרה אל הים באזור המעבר דורשת כניסה מתמשכת של מי ים לתוך האקוויפר, לשם שמירה על שיווי משקל הידרוסטטי, כך שנוצרת צירקולציה

* ד"ר יעל קירו היא פוסט־דוקטורנטית במכון למונט־דוהרטי, אוניברסיטת קולומביה, ניו יורק.

של מים מלוחים באקוויפר. צירקולציה זו היא תהליך הידרולוגי בסיסי המתרחש בכל אקוויפר חופי ליד כל גוף מים מלוח.



איור 1: מערכת מי תהום הסמוכה לאגם מלוח או ים. מים מתוקים זורמים מעל מים מלוחים וביניהם אזור מעבר. המים המלוחים חודרים לאקוויפר בגלל הפרש צפיפויות וזורמים חזרה לים או לאגם בגלל ערבוב עם המים המתוקים באזור המעבר.

באקוויפרים חופיים בסביבה אוקיינית או ימית מתוארים מנגנונים נוספים של צירקולציה המונעים על ידי גאות ושפל, גלים ושינויים עונתיים במפלס הים או במערכת מי התהום. קשה אפוא לעתים לבודד את המנגנונים השונים זה מזה וללמוד על התרומה של כל אחד מהם לאוקיינוס מבחינת כמות המים והיסודות הכימיים. ים המלח יכול לשמש מעבדה טבעית שממנה אפשר ללמוד על האופן שבו משפיעים על הצירקולציה השינויים בצפיפות בלבד, כיוון שאין בו גאות ושפל והשפעת הגלים בו זניחה. מנגנון צירקולציה זה, לעומת יתר המנגנונים, הוא ארוך טווח, ובאופן תאורטי ביכולתו להשפיע על ההרכב הכימי של מי התהום השוהים זמן רב יותר במגע עם הסדימנטים של האקוויפר.

על תרומה של מי תהום לים, לרבות המרכיב של מי צירקולציה, לומדים פעמים רבות מסמנים טבעיים. סמנים אלו הם יסודות המועשרים במי התהום, יחסית למי הים. באיזוטופים של רדיום משתמשים כסמנים לספיקות מי תהום תתי-ימיות.

איזוטופים אלה נוצרים מהסדימנטים של האקוויפר על ידי דעיכה רדיואקטיבית של יסודות האב שלהם (אורניום ותוריום). בגלל מסיסותם הגבוהה (יחסית לאיזוטופ האב) והרתע (כניסה של רדיום מהמוצק למים בשל האנרגיה המשתחררת בהתפרקות) הם מועשרים במי התהום. בטבע קיימים ארבעה איזוטופים של רדיום, שזמני מחצית החיים שלהם הם בטווח של מכמה ימים ועד 1,600 שנה.

איך יודעים על הצירקולציה של מי ים המלח באקוויפר?

המים המתוקים שבאקוויפר החופי של ים המלח מגיעים מכיוון אקוויפר ההר, המתמלא במי גשם. מי תהום שנמצאים בקידוחים ביבשה הם שמעידיים על חדירת מי ים לאקוויפרים. כך גם יודעים על חדירת מי ים המלח לאקוויפר שלאורכו. עם זאת על דבר קיומה של צירקולציה ועל קצב זרימת המים המלוחים מסיקים בעיקר משיקולים תאורטיים ובניית מודלים של זרימה. האקוויפר החופי של ים מלח מאפשר לנו לראות כי תהליך הצירקולציה אכן מתרחש ואף לחשב את מהירות הזרימה של המים המלוחים באקוויפר. ניתן לעשות זאת על פי הרכב יסודות מסוימים במי ים המלח באקוויפר: לפי יחסי נתרן לכלור (Na/Cl) ולפי הריכוז של האיזוטופ רדיום-228 (^{228}Ra).

במהלך עשרות השנים האחרונות, בגלל התערבות האדם במאזן המים, קטנה באופן ניכר כניסת המים המתוקים לים המלח – מכ-1,600 מ"מ"ק לכ-300 מ"מ"ק. תהליך זה גרם למאזן מים שלילי בים המלח ולירידת מפלס מתמשכת – מ-392 מ' מתחת למפלס מי הים בשנות השישים עד ל-427 מ' כיום. במקביל לירידת המפלס שקע הליט (מלח בישול, NaCl, שבו יחס הנתרן לכלור הוא 1) ויחס הנתרן לכלור ירד מ-0.28 ל-0.21. כיוון שיחס הנתרן לכלור נמדד בים המלח ברציפות בשנים אלה, מאפשר השינוי ביחס זה בעשרות השנים האחרונות, יחד עם המרחק מהחוף, תיארוך של מי ים המלח באקוויפר (איור 2). יחס מסוים מבטא את התקופה שבה מי ים המלח נכנסו מהאגם לתוך האקוויפר. מהירות חדירתם של המים המלוחים מהאגם אל תוך האקוויפר המתקבלת לפי שיטה זו היא בין מטר וחצי לארבעה מטרים בשנה. עדות נוספת לחדירה נוכחית של מי ים המלח לאקוויפר היא ריכוזי האיזוטופ רדיום-228. רדיום-228 נוצר מדעיכה של איזוטופ אחר, תוריום-232 (^{232}Th), שנמצא בסדימנט של האקוויפר ודועך בזמן מחצית חיים של 14 מיליארד שנה. זמן

מחצית החיים של רדיום-228 הוא 5.75 שנה, שהוא קצר יחסית, ולכן ריכוזו באגם נמוך (~1 התפרקות לדיקה לליטר). כאשר מי ים המלח חודרים לאקוויפר, ריכוז הרדיום-228 עולה ככל שהמים שוהים זמן רב יותר במגע עם הסדימנט, עד אשר הוא מגיע לשיווי משקל בין קצב היצירה שלו לקצב דעיכתו. מכאן, עלייה בריכוז רדיום-228 במי ים המלח שבאקוויפר עם המרחק מחוף הים (איור 3) מעידה גם היא על חדירת מי ים המלח לאקוויפר במהירות שבין מטר אחד לעשרה מטרים בשנה.

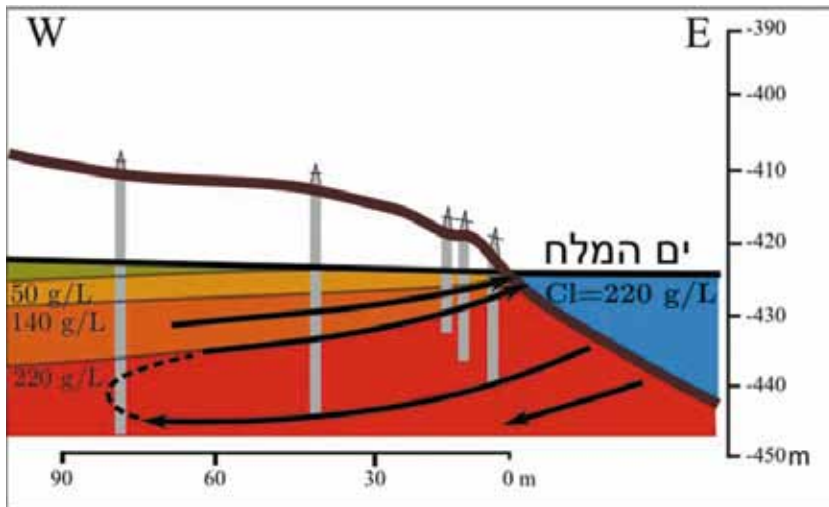
מה קורה למי ים המלח בתהליך הצירקולציה?

כאשר מי ים המלח נכנסים אל האקוויפר, שהוא תווך נקבובי, ובאים במגע קרוב עם הסלעים, הם מתחילים להגיב כימית עם הסלעים. אחד התהליכים המתרחשים באינטראקציה שבין מי ים המלח לסלעי האקוויפר הוא שקיעה של מינרל בשם בריט ($BaSO_4$). מי הים רוויים למינרל זה, אך שקיעתו אטית כל כך עד שאינה מורגשת או נצפית. המעבר מהאגם הפתוח לתווך הנקבובי של האקוויפר יכולה לגרום לשקיעת בריט, אשר יחד אתו שוקע רדיום-226, שכן אטום הרדיום דומה מאוד בגודלו ובתכונותיו לאטום הבריום. הכללת הרדיום בשריג הבריט הייתה השיטה שבה השתמשו בני הזוג מארי ופייר קירי כשבודדו לראשונה את היסוד החדש רדיום, בראשית המאה העשרים.

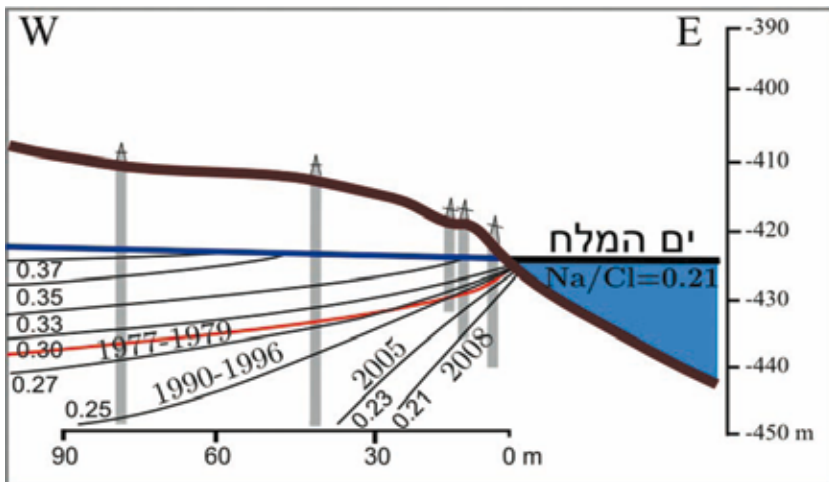
רדיום-226 הוא האיזוטופ ארוך החיים של רדיום (זמן מחצית חיים של 1,600 שנה), ולכן ריכוזו במי האגם גבוה (~145 התפרקות לדיקה לליטר). כאשר בריט שוקע עם כניסת מי ים המלח לאקוויפר, ריכוז הבריום (Ba) ורדיום-226 (^{226}Ra) יורדים בהדרגה (איור 4).

יסודות קורט נוספים (למשל Mn, Fe, U, SO_4, Sr) משתנים במי ים המלח אגב זרימתם מהאגם אל תוך האקוויפר כתוצאה של שקיעת מינרלים נוספים, כגון גבס, או בגלל שינוי התנאים של מי התהום לתנאים מחזרים (מחסור בחמצן). בתנאים מחזרים ברזל (Fe) ומנגן (Mn) הופכים דו־ערכיים, ובמצב זה עולים מסיכותם במים וריכוזם. אורניום (U) נוטה בתנאים אלו להיספח לחלקיקים וריכוזו יורד. חשוב לציין כי ריכוז רוב היסודות משתנה בקצב אטי ובהדרגה עם כניסת מי ים המלח אל תוך האקוויפר, ותהליכים אלו מתרחשים לאורך שנים.

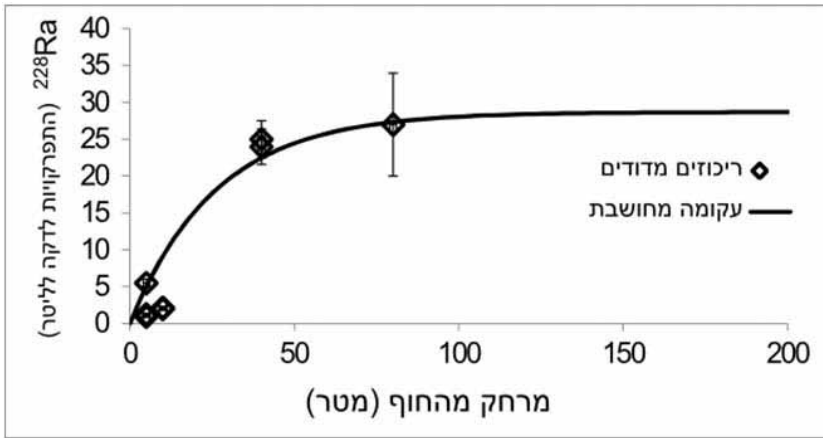
(א)



(ב)



איור 2: (א) חתך רוחב באקוויפר החופי של ים המלח, שבו מוצגים ריכוזי הכלוריד כיום. מוצגים מפלס מי התהום (הקו השחור) ואזור המעבר בין המים המתוקים למי ים המלח (באדום). החצים מציגים את מסלול הזרימה של מי התהום בתהליך הצירקולציה. (ב) יחסי הגנתרן לכלוריד במי האקוויפר והתאמת הזמן שבו יחס זה היה קיים במי האגם.



איור 3: ריכוזי רדיום-228 במי ים המלח באקוויפר ביחס למרחק מהחוף לכיוון פנים היבשה. המעוינים הם ריכוזים מדודים מדוגמאות בקידוחים, והקו המקווקו הוא קו מחושב לפי המשוואה המתארת את קצב הצטברות הרדיום עם המרחק מהחוף ומתאים למהירות זרימה של שלושה מטרים בשנה.

אילו מים חוזרים לים המלח?

כאמור, מי ים המלח זורמים מהאגם אל תוך האקוויפר וחוזרים אל האגם. כדי לדעת שהמים הזורמים חזרה לים המלח הם בעלי הרכב חדש יש לבחון את הרכבם באזור שבו הם חוזרים, כלומר באזור המעבר שבין המים המתוקים למלוחים (איור 2). איור 5 מציג את ריכוזי הבריום ורדיום-226 באזור המעבר שבין המים המלוחים למתוקים. הריכוזים בכל הדוגמאות, כולל אלו מהקידוחים הקרובים לים המלח, הם תוצר ערבוב בין מים מתוקים, הדלים ברדיום-226 ובריום, לבין מי ים המלח, העשירים ברדיום ובריום אך בעלי ריכוז נמוך יחסית (אחרי שקיעת הברייט) של רדיום-226 ובריום. משמעות התצפית הזו היא כי מי ים המלח הזורמים באזור המעבר חזרה לים המלח הם מים שזרמו מערבה עמוק לתוך האקוויפר, שהו זמן רב במגע עם הסדימנט, והרכב יסודות הקורט שבהם השתנה.

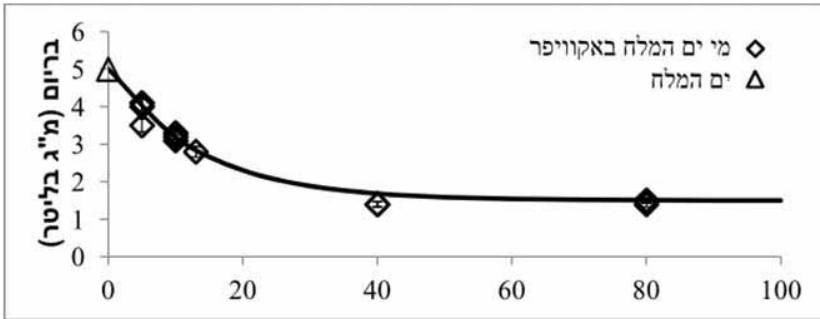
נפח המים המשתתפים בתהליך הצירקולציה

אחרי שראינו כי ריכוזים של יסודות קורט מושפעים מזרימת מי ים המלח באקוויפר, נשאלת השאלה, כמה מים משתתפים בתהליך הצירקולציה, והאם תהליך זה משפיע על ריכוז יסודות מסוימים באגם עצמו? היה וריכוז יסוד מסוים במי האגם הגיע לשיווי משקל (ריכוזו אינו משתנה עם הזמן), משמעות הדבר היא ששטף הכניסה של אותו יסוד לאגם שווה לשטף היציאה. לשם כך צריך לדעת את התרומה והסילוק של היסוד בים המלח. במחקר זה נעשה שימוש במאזן הרדיום בים המלח על מנת לחשב את נפח המים בצירקולציה. הצירקולציה חושבה עבור המצב הטבעי של ים המלח, לפני שהחל המפלס לרדת.

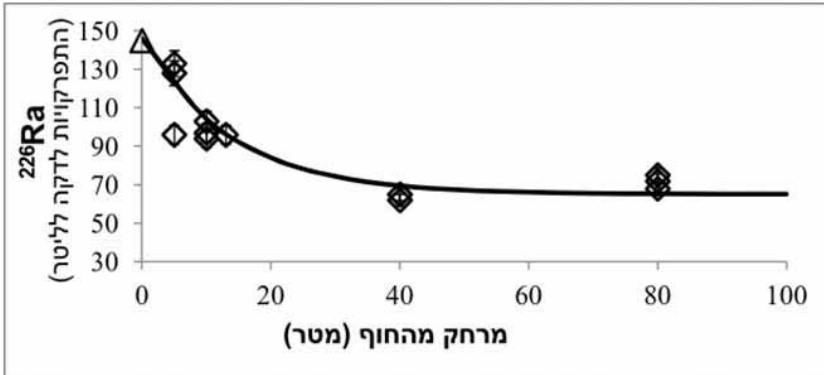
כאמור, בתהליך הצירקולציה (איורים 3, 4) מסולק רדיום-226 ממי ים המלח ורדיום-228 נתרם למי ים המלח. ההתנהגות ההפוכה של שני האיזוטופים הללו מאפשרת חישוב מדויק יחסית של מידת הצירקולציה. רדיום נכנס למי ים המלח ממקורות המים שסביב ים המלח ועל ידי דיפוזיה ושחרור מהסדימנטים. דעיכה רדיואקטיבית מסלקת רדיום לפי זמן מחצית החיים שלו. מקורות המים השונים סביב ים המלח תורמים לאגם רדיום-226, רדיום-228 ובריום בכמויות שונות, כי הסלעים שהמים באים אתם במגע שונים בכל אחד מהמקורות. רדיום-226 מגיע בעיקר ממעיינות עין קדם, הנובעים לאורך ים המלח, רדיום-228 מגיע בעיקר מנביעות וזרימות באגן הניקוז המזרחי של ים המלח, ובריום מגיע בעיקר מהירדן (איור 6).

חישוב המאזן עבור רדיום-226 ורדיום-228 מראה כי נפח המים השנתי המשתתף בצירקולציה הוא 320 ± 60 מל"מ³. נפח זה הוא נפח בעל משמעות, ודומה לנפח המים השנתי הנכנס כיום לים המלח, שהוא כ-300 מל"מ³. חישוב נפח המים השנתי הכולל לנפח מים לק"מ חוף מראה ספיקה של 2 מל"מ³ לק"מ חוף. בחינה של ערכי ספיקות תתימיות שהתקבלו במחקרים במקומות שונים בעולם מראה כי טווח הערכים רחב מאוד ונע בין 0.001 ל-1,000 מל"מ³ לק"מ חוף. הערך המתקבל במחקר המתואר כאן הוא באמצע טווח זה. אף על פי כן, ערך זה אינו מבוטל ומבטא את ערך הספיקה במנגנון הצירקולציה ארוך הטווח.

(א)



(ב)

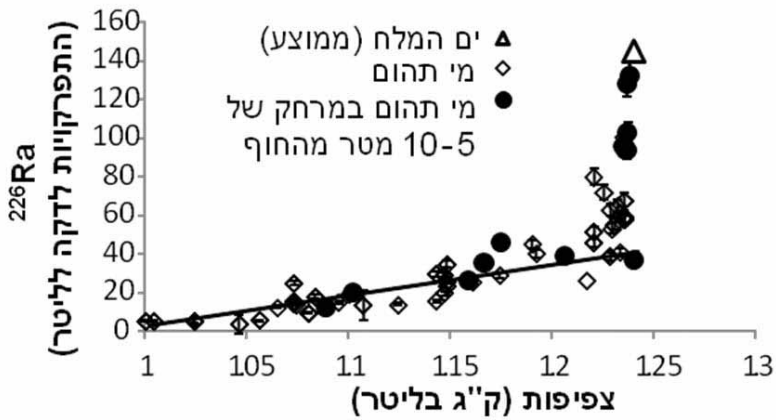


איור 4: השתנות ריכוזי בריום (Ba, א) ורדיום-226 (^{226}Ra , ב) במי ים המלח באקוויפר עם המרחק מהחוף.

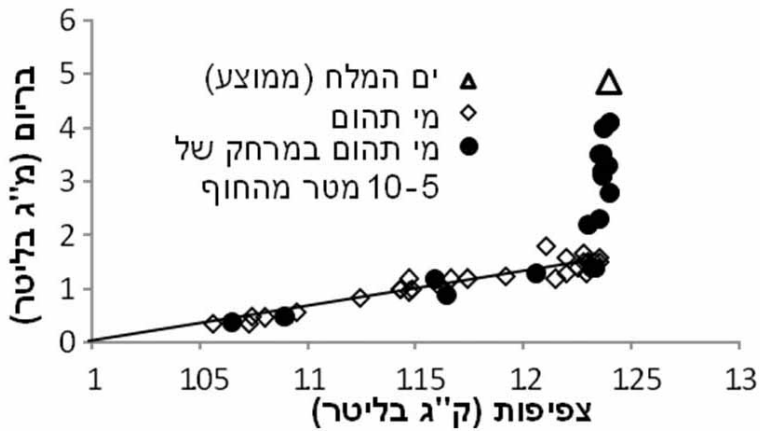
השפעת הצירקולציה על הרכב יסודות הקורט בים המלח

מי ים המלח זורמים אל תוך האקוויפר וחוזרים חזרה לאגם בהרכב חדש. במקביל לתצפית זו ראינו כי נפח המים השנתי המשתתף בתהליך הצירקולציה גדול מאוד, ומכאן שתהליך הצירקולציה יכול להשפיע על ריכוז יסודות הקורט במי האגם עצמו. להלן אדון בהתנהגות האיזוטופים רדיום-226, רדיום-228 והיסוד בריום. להוציא את תהליך הצירקולציה, התרומה העיקרית של איזוטופים אלו לאגם היא ממקורות

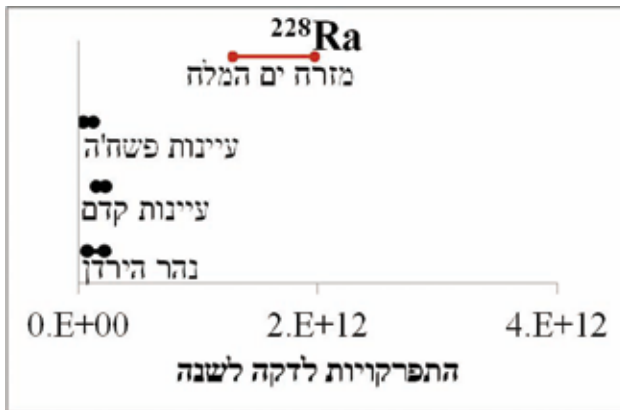
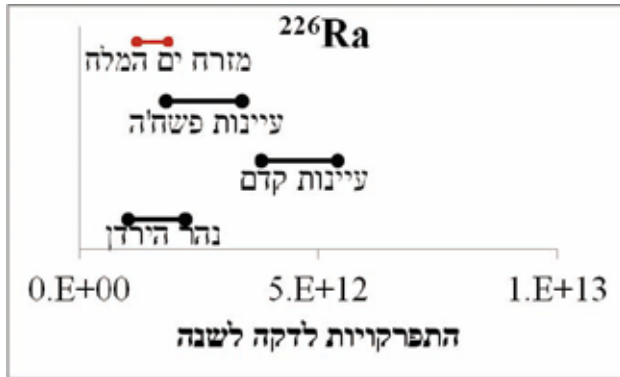
(א)



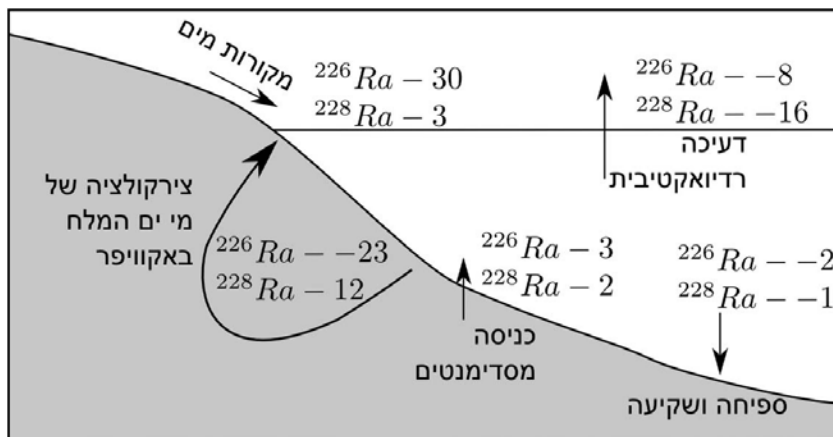
(ב)



איור 5: השתנות ריכוזי רדיום-226 (א) ובריום (ב) כנגד הצפיפות במי ים המלח ובמי תהום מלוחים. המעוינים מציגים את הריכוז בקידוחים במרחק של יותר מ-40 מטר מהחוף, והעיגולים השחורים מציגים את הריכוז בקידוחים במרחק של 5-10 מטר מהחוף. האיור מציג שני תהליכים: (1) סילוק שני היסודות; (2) מיהול של מי ים באקוויפר המלח על ידי מים מתוקים.



איור 6: התרומה השנתית של רדיום-226, רדיום-228 ובריום לים המלח. הריכוזים מבטאים את המצב בים המלח לפני התחלת ירידת המפלס (עד שנות השישים).



איור 7: מאזן רדיום בים המלח לפי מודל הכולל את תהליך הצירקולציה. מצוינים הערכים הסבירים ביותר שהתקבלו מהחישוב. היחידות של הערכים המצוינים הן 10^{12} התפרקויות לדקה לשנה. סילוק רדיום מים המלח מסומן על ידי סימן (-).

המים והסילוק העיקרי הוא דעיכה רדיואקטיבית. תרומה נוספת של איזוטופים אלו לאגם היא יצירתם בסדימנטים על ידי דעיכה של איזוטופי האב שלהם וכניסתם לאגם על ידי דיפוזיה. מלבד דעיכה רדיואקטיבית, איזוטופים אלו גם מסולקים על ידי שקיעה של מינרלים או ספיחתם לחלקיקים באגם. עבור רדיום-226 הסילוק על ידי דעיכה נמוך ממה שנכנס ממקורות המים, בעוד עבור רדיום-228 הסילוק גבוה יותר ממה שנכנס. מכאן שכדי לאזן את מאזן הרדיום בים המלח, צריך תהליך התורם רדיום-228 למי האגם ומסלק רדיום-226 ממי האגם. הצירקולציה של מי ים המלח באקוויפר עונה על פער זה. סיכום של התרומה והסילוק של רדיום מים המלח מראה כי הצירקולציה היא התרומה הגדולה ביותר של רדיום-228 והסילוק הגדול ביותר של רדיום-226 (איור 7).

סילוק בריום (שאיננו רדיואקטיבי) מהאגם על ידי ספיחה ושקיעה זניח. הסילוק העיקרי שלו הוא בתהליך הצירקולציה, שבו הוא מסולק על ידי שקיעה של המינרל בריט (BaSO_4). בתהליך הצירקולציה מסולקים 1,200 טון בריום בשנה מתוך 700,000 טון בכל האגם.

סיכום

ים המלח הנו מעבדה המשמשת הן לחישוב כמות המים המשתתפים בתהליך הצירקולציה ארוך הטווח והן לשינוי ההרכב של יסודות קורט בגוף מים באזור חופי. נפח המים השנתי שחושב הוא 320 מלמ"ק (בערך שני מלמ"ק לק"מ חוף), והוא דומה בגודלו לכמות המים המתוקים הנכנסים לאגם כיום. המחקר המתואר בפרק זה מראה כי יש להביא בחשבון בחישוב מאזנים בים המלח את תהליך הצירקולציה, והוא עשוי להיות חשוב באזורים חופיים באופן כללי. תהליך הצירקולציה של מי ים המלח באקוויפר תורם רדיום-228, מסלק רדיום-226 והוא הגורם העיקרי לסילוק של בריום ממי האגם.

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

תמלחת קלציום-כלורידית: תמלחת אשר האניון העיקרי בה הוא כלור ומתקיים בה הקשר $Ca > (HCO_3 + SO_4)$ (למידע נוסף ראו סטרינסקי, 2005).
איזוטופ רדיואקטיבי: יסוד בעל גרעין לא יציב, המתפרק באופן ספונטני עד ליצירת איזוטופ בעל מבנה יציב.

שווי משקל הידרוסטטי: שוויון בלחצים בין שתי נקודות כך שאין מעבר חומר ביניהן. במערכת מי תהום חופית שבה זורמים מים מתוקים לים נוצר מצב שבו עמודת מים מתוקים נמצאת ליד עמודת מי הים המלוחים. מצב זה הוא מצב 'לא יציב', כיוון שהלחץ שמפעילה עמודת המים המלוחים גדול מהלחץ של עמודת המים המתוקים, ולכן מי ים חודרים לאקוויפר שמתחת למים המתוקים עד היווצרות שוויון בלחצים.

יסוד/איזוטופ אב: איזוטופ של יסוד מסוים הדועך רדיואקטיבית ויוצר איזוטופ אחר הנקרא 'איזוטופ הבת'.

התפרקויות לדקה לליטר: מידה של רדיואקטיביות האקוויוולנטית למספר האטומים (מספר ההתפרקויות לדקה שווה למספר האטומים כפול מקדם הדעיכה).
התפרקויות לדקה לליטר היא מידה של ריכוז יסוד רדיואקטיבי בתמיסה.

מדידת ריכוזי איזוטופים רדיואקטיביים: מהותו של גרעין רדיואקטיבי היא שאינו יציב והוא דועך בהתפרקות לטיפוס גרעין אחר.

מספר ההתפרקויות ביחידת זמן של מאסף גרעינים רדיואקטיביים (A) פרופורציוני למספר הגרעינים במאסף.

$A = \lambda N$, כש- N הוא מספר הגרעינים ו- λ קבוע פרופורציונית המיוחד לכל גרעין (איזוטופ). על כן מדידת כמות של איזוטופים ארוכי חיים מאוד נוחה יותר בריכוזם (כגון מספר חלקים למיליון – ppm), ואילו ריכוזי איזוטופים קצרי חיים נוחים יותר למדידה במספר התפרקויות לדקה (dpm).

תמיסה על־דויה: תמיסה המכילה בתוכה מומסים בריכוז גבוה יותר מזה שהיא יכולה להכיל בתנאים נורמליים של טמפרטורה ולחץ.

קינטיקה של ראקציה: קצב של ראקציה כימית, כלומר קצב השינוי בריכוז המגיבים בראקציה.

שטף: קצב זרימה של חומר מסוים (כמות ליחידת זמן).

רשימת מקורות וקריאה נוספת

סטרנינסקי, א'. 2005. 'ים המלח – הנביעה הגדולה בעולם', מלח הארץ 1: 25-52.

