

# הכימיה בשירות מדעי כדור הארץ - גיאוכימיה

ד"ר יהודית הרלבן, המכון הגיאולוגי

המכון הגיאולוגי לישראל הוא מכון מחקר ממשלתי, יחידת סמך עצמאית במשרד האנרגיה, בירושלים. יעודי המכון הם:

א. להוות מרכז ידע מדעי-יישומי ממוקד ומותאם לצרכים הלאומיים של ישראל בתחום מדעי האדמה והתשתית הטבעית וזאת בראייה ממלכתית, להבטחת האינטרס של המדינה ולרווחת תושביה.

ב. להוות גורם משמעותי בתכנון ארוך-טווח של פיתוח בר-קיימא לניצול מושכל של משאבי הטבע; להשתלב בגיבוש מדיניות לאומית בנושאי התשתית הטבעית, בתכנון ופיתוח ראויים של התשתית ובהיערכות נכונה בפני סיכונים טבעיים ומעשי ידי אדם.

**גיאוכימיה** (גיאואדמה ביוונית) היא תת-תחום במדעי כדור הארץ שעוסק בתחומים שבהם עקרונות הכימיה משמשים להבנת תהליכים ופענוח ההיסטוריה של כדור הארץ. מאמר זה יתמקד בעיקר בכימיה האי-אורגנית, תחום רחב מאוד שבו לכל אחד מיסודות הטבלה המחזורית, כולל היסודות הנדירים ביותר, יש שימוש בהבנת תהליכים כאלה. מחקרים בגיאוכימיה אינם אקדמיים בלבד אלא בעלי השלכה משמעותית על תחומים רבים בחיי האנושות על הכוכב שלנו, כגון שימוש וניצול משאבים, סיכונים, זיהומים מחומרים שונים, התחממות גלובלית ועוד.

עוד באמצע המאה הרביעית לפני הספירה כתב תיאופרסטוס (Theophrastus) את הספר "On Stones" שבו הוא ממיין את המינרלים, המשאבים והסלעים הידועים לו עפ"י התכונות הפיזיקליות הידועות באותה תקופה: חום וקשיות. אז כמו היום נבע העניין בהכרת תכונות חומרים מהרצון להשתמש בהם כמשאב. אך כיום הגיאוכימאים מבצעים כמובן מיונים מורכבים הרבה יותר.

אחד הגילויים המסעירים, עם תחילת הסקירה הגיאוכימית של חומרי כדור הארץ, היה שריכוזו של יסוד בכדור הארץ (נפיצות) יורד עם העלייה במשקלו האטומי. לדוגמה, נפיצות היסוד סיליקון בקרום כדור הארץ (28%) גבוהה בהרבה מזו של זהב (4 ppb). בנוסף עלה הצורך לקבץ את היסודות השונים מעט אחרת מהאופן שבו הם מקובצים בטבלה המחזורית, וב-1919 חילק הגיאוכימאי ויקטור גולדשמידט (Goldschmidt) את היסודות בטבלה המחזורית לקבוצות על פי נפיצותם בקרום כדור הארץ באופן הבא:

הקבוצה	קשר כימי עיקרי עם:	היסודות השולטים	היכן בכדור הארץ?
Lithophiles ליתופילים	חמצן	Na, K, Si, Al, Ti Mg, Ca	קרום
Siderophiles סידרופילים	ברזל	Fe, Co, Ni, Pt, Re, O	גלעין
Chalcophile כלכופילים	גופרית	Cu, Ag, Zn, Pb, S	סביבות ייחודיות
atmosphile אטמופילים		O, N, H, C וגזים אצילים	אטמוספירה

## גיאוכימיה איזוטופית

הגיאוכימיה האיזוטופית מנצלת את הנפיצות הטבעית של איזוטופים של יסוד לחקר תחומים רבים: גיל הסלע ואופן היווצרותו, ההיסטוריה האקלימית של העבר, זיהוי מקורות זיהום ועוד. כמעט לכל יסוד יש יותר מאיזוטופ אחד, והגיאוכימיה האיזוטופית נשענת על שתי תופעות חשובות:

- ההבדל במסה בין איזוטופים של אותו יסוד גורם לשינוי בתכונותיהם הקינטיות: איזוטופ כבד יותר נוטה להגיב לאט יותר. הבדל הזה בא לידי ביטוי בעיקר ביסודות הקלים כגון מימן, חמצן, פחמן, חנקן, גופרית וכלור, שבהם הבדלי מסה משמעותיים בין האיזוטופים השונים.
- ההתפרקות הטבעית של איזוטופ לא יציב (רדיואקטיבי) ליסוד אחר, כגון אורניום לעופרת ( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ), רובידיום לסטרונציום ( $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$ ), אשלגן לארגון ( $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ ), היא הבסיס לתארוך נומרי של סלעים, מינרלים, חומרים אורגניים ( $^{14}\text{C}$ ), ומים ( $^3\text{H}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ).

המכשור המתקדם למדידת ההרכבים הכימיים והאיזוטופים של יסודות קלים וכבדים הקיים במכון הגיאולוגי, מאפשר מחקרים בתחומים רבים מאוד, ונסקור כמה דוגמאות למחקרים המסייעים בהבנת תהליכים בגיאולוגיה של ישראל ואת ההשפעה של תוצאות המחקרים על מקבלי ההחלטות במדינת ישראל.

\* כל התמונות באדיבות המכון הגיאולוגי לישראל.

## ניטור זהו שם המשחק

המכון הגיאולוגי שותף בניטור כימי של מים למיניהם, קרקעות ומחצבים, כדי להכיר את ערכי הרקע ולאפשר זיהוי שינויים שמקורם בתעשייה, בחקלאות או בכל גורם אנושי, וכן כדי לאפשר הערכה של היקף המחצבים השונים בארץ.

### הוי כנרת שלי

זה שני עשורים נערך ניטור בכנרת המובל על ידי ד"ר לודוויג הליץ וד"ר גלית שרעבי בשיתוף פעולה עם רשות המים והמעבדה לחקר הכנרת (חיא"ל). למתכות הנבדקות זיקה ביולוגית או גיאוכימית, וחלקן בעלות פוטנציאל רעילות (Pb, Hg). מטרת העבודה הן יצירת מאגר מידע בסיסי למתכות קורט באגם, וניצול המידע המתקבל לצורך הבנת תהליכים באגם. במסגרת ניטור מתכות נמדדים כ-24 יסודות, החל במוליבדן (Mo) שריכוזו כ-1ppb וכלה בכור (B) שריכוזו כ-100ppb. דיגום המתכות נעשה במרכז האגם, במי שפך הירדן ובנחל משושים בעזרת מכשיר ICP-MS המאפשר קביעת ריכוז המתכות ברגישות ודיוק גבוהים מאוד. מעקב אחר שינויים בריכוז המתכות בכנרת, לדוגמה, בריכוזי העופרת או הכספית, מאפשר זיהוי אירוע חריג. חשוב לציין שמתחילת הניטור, דהיינו, משנת 2000 עד היום, נותר ריכוז המתכות בכנרת ללא שינוי ולא נמצאו חריגות, וכן שלמרות שמי הכנרת אינם מי שתייה אלא מי גלם לשתייה, ריכוז המתכות בכנרת נמוך בסדרי גודל מן המותר עפ"י תקנות בריאות העם 2013.

באגם הכנרת יש מחזור אחד בשנה של ערבוב ושיכוך<sup>1</sup>. בחודשי החורף האגם מעורבב, ולגובה כל עמודת המים יש טמפרטורה קבועה (כ-16°C). ריכוז חמצן מומס קבוע וגבוה (כ-250 mmol·L<sup>-1</sup>) וגם ריכוז המתכות בתקופה זו אחיד. עם תחילת האביב השכבה העליונה מתחממת ומתעשרת בחמצן שמיוצר בה או נקלט בה מן האטמוספירה, בעוד שהשכבה התחתונה נותרת קרה וחסרת חמצן. בשכבה התחתונה החמצן המומס שנכלא בעת הערבוב בעונה הקודמת, נצרך בתהליכים שונים כגון נשימה ופירוק בקטריאלי של חומרים. בקיץ האגם משוכב: השכבה העליונה מחומצנת וחמה, השכבה התחתונה מחוזרת וקרה, ובשכבת הביניים מפלי חמצן וטמפרטורה גדולים, ושם גם יש שינויים בנפיצות מתכות העוברות תהליכי חמצון-חיזור כגון מנגן, ברזל, אורניום וונדיום (Mn, Fe, U, V). מקור היסוד רדיום בכנרת הוא במעיינות המלוחים בשולי האגם הקובעים את מליחות הכנרת. על ידי שימוש באיזוטופים של רדיום, נעשה ניסיון לכמת את תרומת המעיינות המלוחים, אך הדרך במחקר זה עדיין ארוכה.

במסגרת מחקר וניטור של מערכת החנקן בכנרת נעזרו ד"ר איתי גבריאלי והדוקטורנטית תמי זילברמן באיזוטופים של חנקן כדי לעקוב אחר שינויים במערכת החמצור (חמצון-חיזור) באגם. פותחה שיטת מדידה ייחודית לקביעת הרכבים איזוטופיים של צורני החנקן השונים במים גם בריכוזים נמוכים כדי לאפשר הבנה מעמיקה יותר של תהליכי החמצור באגם ושל מאזן המסה של החנקן בכנרת.



באופן דומה המכון הגיאולוגי שותף לסקר ניטור של מתכות כבדות לאורך חופי הים התיכון והים עצמו לצורך זיהוי אירועי זיהום וכן להערכת ערכי רקע, שלהם השלכה חוקית לכל פעילות סביבתית וכלכלית המתבצעות בים התיכון.

<sup>1</sup> שיכוך = חלוקת עמודת המים באגם לשכבות בעלות מאפיינים כימיים ופיזיקליים שונים בד"כ מליחות, טמפרטורה וריכוז החמצן.

ניטור קרקעות ומחצבים חשוב הן לחיפוש מחצבים מתכתיים והן לזיהוי סַקָּנים לזיהום סביבתי/אנתרופוגני (מעשה ידי אדם), ולכן להסברת תחלואה בבני אדם, בחי ובצומח. המכון הגיאולוגי ערך סקרים כאלה במשך כשני עשורים (1987-2006) בהובלתם של ד"ר משה שירב, ד"ר לודוויג הליץ וד"ר שמעון אילני. באזורי הסקר נכללים מוקדים אורבניים ותעשייתיים גדולים (חיפה, ירושלים, אזור הקריות, מורדות השומרון המערביים, נצרת, אגן הקישון). באמצעות ניתוח התוצאות אפשר להבחין באופן ברור בין תרומת יסודות קורט מתכתיים שמקורם במסלע הטבעי לבין תרומה אנתרופוגנית שמקורה במוקדי זיהום מקומיים (תעשייה או סילוק פסולת) או רחוקים יותר - כמו חלקיקי אבק הנישאים מאזורי תעשייה (לדוגמה: הזיהום המגיע לאזור טבעון ממפרץ חיפה).

בסקרים התגלו כמה ממצאים חשובים: כמעט בכל אחד מן האזורים האורבניים-תעשייתיים קיימת בקרקע העשרה משמעותית ביסודות רעילים כגון קדמיום, עופרת, אבץ, אנטימון ובדיל. בנוסף בוצת נחל הקישון, אשר הוצאה מאפיקו בשנים עברו וגם לאחרונה, מכילה ריכוזים גבוהים מאוד של אורניום שמקורו בסילוק רב-שנים של שפכי תעשיית הדשנים אל הקישון. כמו כן בקרקעות שעליהן הוטלו מעכבי בעירה בעת דליקה ביערות, התגלו ריכוזים חריגים של קדמיום ומתכות אחרות שמקורם בחומרי הגלם המשמשים לייצור מעכבי הבעירה (תרכובות פוספט). ולבסוף, המיפוי של תפוצת היסודות הרעילים בקרקע תואם את נתוני תפוצת חלקיקי האבק הנשימים (10PM) והעדינים (2.5PM), ולכן נתוני הסקרים הגיאוכימיים משמשים גם במחקרים אפידימיולוגיים.

### מים מתחת לרגלינו

ד"ר אביהו בורג מוביל מחקרים שבהם נעשה שימוש בהרכבים כימיים ואיזוטופיים של מי תהום, מי קידוחים ומי מעיינות. במחקרי האקוויפרים<sup>2</sup> בארץ עוקבים אחר תהליכי זיהום והמלחה, זיהוי תהליכי ערבוב בין גופי מים, הערכת קצבי תנועה של מים בתת-הקרקע ואפילו שחזור תנאים גיאוהידרולוגיים בתקופות עבר אקלימיות. לדוגמה, כאשר אקוויפר חבורת יהודה בצפון מזרח הנגב כולל מוצאו בעין בוקק, זוהם על ידי מי שפכים תעשייתיים, זוהה מקור הזיהום ע"י השוואת הרכבים ויחסים כימיים במי המעיין ובשפכים התעשייתיים. בעקבות זיהום זה נמצאה ירידה דרמטית ביחס Na/Cl, עלייה בריכוז הכלורידים וכן במספר יסודות קורט, כגון אבץ ובריום, והסביבה האקולוגית הייחודית נפגעה. דוגמה אחרת לזיהום היא חלחול מים מבריכות דגים (לדוגמה, בריכות חוף כרמל) לאקוויפר החוף. במקרה זה זוהה הזיהום באמצעות מדידת ההרכב הכימי והאיזוטופי של המים. ניהול מושכל של משאבי המים בישראל תלוי מאוד בניטור ובהבנת התהליכים בגופי המים השונים.

### בין ים למי תהום

זה עשרות שנים ידוע שישנה המלחה של מי תהום בצפון מערב אקוויפר ההר. מקור ההמלחה של מי תהום אלה לא היה ידוע: האם אלו מי ים צעירים החודרים אל האקוויפר או אולי מים מלוחים עתיקים? אם אלו מים עתיקים, הרי אפשר לשאוב אותם ולמנוע את המלחת המאגר, אך אם מקור המים במי ים עכשוויים, תגביר השאיבה את ההמלחה. ד"ר יוסי יחיאלי מוביל מחקרים העוסקים בקשר ההידרולוגי בין מי הים לאקוויפר ובקביעת קצב חדירת מי הים לאקוויפר. החדירה היא תהליך טבעי שהחל מאז סיומה של תקופת הקרח האחרונה לפני כ-18,000 שנה. מאז החלו פני הים לעלות והביאו לעליית הלחץ ההידרולוגי (עומס המים) ולחדירה של מי הים אל האקוויפר. בתהליך טבעי זה מי הים יכולים לחדור מערבה כ-1-3 מטר בשנה, ולכן במרחק כ-10 ק"מ מהחוף, לדוגמה, יהיו המים בני כ-10,000 שנה. החוקרים מדדו את גיל המים המלוחים בשימוש בשני איזוטופים <sup>14</sup>C ו-<sup>81</sup>K, וכך נקבע שהמים צעירים, חלקם פחות מ-12,000 שנה, ושאיבתם יכולה לגרום להמלחה של האקוויפר. גם באקוויפר החוף ישנה חדירה של מי ים הנגרמת גם עקב שאיבת מים בקידוחים שונים, וכיום השאיבה באקוויפר זה מנוהלת כך שלא תביא לחדירת מי ים מלוחים מזרחה.

### ים המלח שאין שני לו

ים המלח נוצר מחדירת מי הים התיכון דרך עמק זרעאל ובקעת הירדן אל אגן ים המלח לפני כ-4-5 מיליון שנה. תמלחת ים המלח מאופיינת בהרכב כימי ייחודי שבו ישנה העשרה ביונים של סידן ביחס ליוני הסולפט והביקרבונט ( $Ca^{+2}/SO_4^{-2} + HCO_3^- > 1$ ) ושל כלור לעומת נתון ( $Na^+/Cl^- < 1$ ), תכונות המעידות על כך שמי הים המקוריים עברו שינויים כימיים ואינם מי ים שפשוט עברו אידי.

ד"ר איתי גבריאלי מוביל מחקרים שעיקרם מעקב והבנת השינויים וההתפתחות הגיאוכימית העכשווית של תמלחת ים המלח, וההשלכות העתידיות של הזרמת מי ים או מי רכז מהתפלה (הנותרים לאחר הפקת מי השתייה) אל ים המלח. לדוגמה, בין ישראל לירדן מקודם היום פרויקט מובל השלום שבמסגרתו מתוכננת התפלה של מי ים בעקבה והובלת מי הרכז ממתקן ההתפלה, יחד עם תוספת של מי ים סוף לים המלח, כדי להאט את ירידת המפלס ולהימנע מפגיעה באקולוגיה של מפרץ אילת בגלל הזרמת מי הרכז של ההתפלה. מחקרים על מגננוני שקיעת מלחים מורים שערבוב מי ים סוף עם מי ים



**תמונה 2: ניסוי המדמה ערבוב בין מי ים סוף ומי ים המלח. אפשר לראות פריחה של הארכיאה, הצובעת את המים באדום.**

<sup>2</sup> אקוויפר הוא יחידת סלע בתת-הקרקע הרוויה במים. יש לה מוליכות הידראולית גבוהה (תנועת המים יעילה ומהירה), וניתן לקדוח ולהפיק ממנה כמויות גדולות של מים.

המלח יגרום לגיבוש של הגבס באגם בגלל תוספת של סולפט למערכת. אם הגבס יתגבש כגבישים קטנים, הם עלולים להישאר כתרחיף על פני השטח של ים המלח (תופעת "הלבנה"). מלבד התופעה הלא אסתטית של הים, תופעת ההלבנה יכולה להשפיע גם על מאזן האנרגיה בגלל שינוי האלבדו (מידת ההחזרה של קרינת השמש). כמו כן במחקר בשיתוף מפעלי ים המלח ואוניברסיטת ת"א התגלה כי מיהול מי ים המלח כתוצאה מהזרמת מי ההתפלה או מי ים סוף, עלול להביא לפריחה של אצות ייחודיות לים המלח ואף לפריחה של ארכיאה. מסיבה זו וסיבות נוספות, ההמלצות שניתנו ע"י חוקרי המכון הגיאולוגי היו שהזרמת מים מים-סוף לא תעלה על 400 מיליון קוב לשנה.

### מה בין מלח וקציר

קבוצת מחקר בהובלתו של ד"ר נדב לנסקי עוסקת בחקר התכונות הכימופיזיקליות של גוף מי ים המלח וכן באידי ושיקוע של מלח באגם. שקיעת מלח (NaCl) נגרמת כאשר המלח נמצא בעל-רוויה במי הים, והיא תלויה בטמפרטורה ובמליחות. אחת השאלות החשובות היא באיזו עונה של השנה שוקע המלח ומאיזה עומק. החוקרים מדדו את צפיפות התמיסה בשיטה חדשנית בעלת דיוק גבוה במיוחד, והתברר באופן מפתיע שגיבוש המלח קורה דווקא בחורף, ולא בקיץ כאשר האידיו בשיאו. בקיץ, כאשר טמפרטורת המים גבוהה יותר, מי הים נמצאים בתת-רוויה למרות שמליחותם גבוהה יותר, ולכן לא שוקע מלח. לממצא זה משמעות גדולה מבחינה תפעולית: השטת ספינת המחקר בים המלח קשה יותר בחורף, שאז מצטבר מלח על מדחף הספינה. כמו כן בחודשי הקיץ צינורות השאיבה של מי ים המלח במפעלי ים המלח נקיים ממלח, ואילו בחורף צינורות השאיבה נסתמים עקב שקיעת המלח בתוכם, ויש להמיס אותו במים רגילים. מחקרים אלה חשובים כדי למצוא פתרונות תפעוליים תוך כדי התמודדות עם הגיבוש האינטנסיבי של המלח.



תמונה 3: קרקעית ים המלח בעומק 10 מ'. מימין - בתקופת הקיץ (34°C) החלוקים שהגיעו עם הנחלים חשופים; משמאל - בחורף (24°C), אותם חלוקים "מצופים" בגבישי מלח (Sirota et al., 2017, GSA Bulletin)

### שכבות דקיקות כארכיב לאקלים העבר

ישנם מספר ארכיבים גיאולוגיים טבעיים לפענוח אקלים עבר, החל מגלעיני קרח בקטבים וכלה במשקעי אבק, קרקעות, אגמים ומערות. בסקירה זו נציג שני ארכיבים אשר נחקרו לפענוח חקר אקלים העבר באזורנו: משקעי אגם ים המלח ומערות נטיפים. לתוצאות מחקרים אלה יש השלכות להבנת אקלים עבר לא רק בישראל אלא בכל אגן ים התיכון.

#### אגם הלשון

קבוצת המחקר בהובלת פרופ' מוטי שטיין חוקרת את ההיסטוריה האקלימית-הידרולוגית של אגן הניקוז של ים המלח על ידי בחינת תכונות כימיות ואיזוטופיות שונות של הסדימנטים ששקעו באגמים הקדומים (לדוגמה, ליד מצדה ונחל פרצים). החוקרים השתמשו באיזוטופ הקוסמוגני ברליום-10 (<sup>10</sup>Be), הנוצר באטמוספירה כתוצאה מפגיעה של קרינה קוסמית, לתארוך המלח הבונה את הר סדום, ונקבע שגילו הוא בין 4-6 מיליוני שנים. גוף המים שהתקיים בבקע ים המלח נקרא בתקופה מסוימת אגם הלשון, ומשקעיו נקראים תצורת ליסן. תצורת ליסן בנויה משכבות דקיקות המכונות "למינות" של ארגוניט שצבעו לבן (החומר הלבן שנקרה בתקופה מסוימת במערת הקמח) ושל חומר חום שמקורו בסחף נחלים דק (דטריטוס) המגיע מאגן הניקוז. מסתבר שזוג למינות כאלה משקף שנה אחת בדרך כלל (תמונה 4). ההרכבים הכימיים של הלמינות השונות משקפים את תרומת המים משני מקורות עיקריים: תמלחת סידן כלורידית הנתרמת משולי האגם וקרקעיתו, ומים מתוקים מאגן הניקוז. התרומה היחסית של שני מקורות המים משקפת את ההיסטוריה ההידרולוגית של אגן הניקוז, וזו משקפת את האקלים האזורי והעולמי. בעזרת מדידה של יחסי איזוטופים שונים אפשר לחשב, למשל, את כמויות המים המתוקים שהגיעו לאגם הלשון. ארכיב הלמינות מתעד את השינויים בהרכב מי האגם בכ-70 אלף השנים האחרונות, והוא הושווה לארכיבים גיאולוגיים עולמיים כגון גלעיני הקרח בגרינלנד. מחקרי ההידרולוגיה ואקלימי העבר באזור אגן הניקוז של ים המלח הם בעלי חשיבות רבה למחקר שינויי האקלים בהווה ובעתיד, להבנת שינויי האקלים באגן ים המלח נודעת חשיבות מכרעת, והיא מעוררת עניין רב, גם בגלל מיקומו בשולי רצועת המדבר וגם משום שבאזור זה חיים מאות מיליוני אנשים, ועל פי המודלים של ההתחממות הגלובלית, יש לצפות שיהיה נתון להתייבשות קיצונית.



**תמונה 4: מימין - תצורת ליסן, מצדה. משמאל - חילופי השכבות הדקיקות בין הקיץ לחורף. כל זוג שכבות (בהירה + כהה) מייצג שנה.**

בקידוח מדעי שנעשה בשנת 2010 בקרקעית ים המלח גילתה קבוצת המחקר עדויות לירידת מפלס ים המלח עד למצב של כמעט התייבשות בתנאי בצורת חמורה במיוחד אשר התרחשה באזור לפני עשרת אלפים שנה וכן לפני יותר ממאה אלף שנים. החוקרים מעריכים שניתן לראות בבצורות אלו תמרוז אזהרה למה שיתרחש באזור אם יתמשו התחזיות של שינויי אקלים.

### **מערת שורק, מעבר ליופי**

להתחממות הגלובלית הנמדדת זה עשורים יש מרכיב טבעי ומרכיב אנושי, וחשוב מאוד להבדיל ביניהם על מנת לקבל החלטות מושכלות לעתיד. ד"ר מירה בר-מטיוס וד"ר אבנר אילון חוקרים את התנאים המובילים ליצירת משקעי מערות (נטיפים וזקיפים) ומשקעים קלציטים אחרים, לדוגמה, קלציט<sup>3</sup> השוקע על פריטים ארכיאולוגיים כמו אבני יד פרהיסטוריות. החוקרים משתמשים באיזוטופים רדיואקטיביים לתארוך המשקעים ובאיזוטופים יציבים לשחזור תנאי האקלים והסביבה בעבר. אפשר להתייחס למשקעי מערות שעמם נמנים נטיפים וזקיפים כאל ארכיב אקלימי. למשקעים מבנה פנימי הדומה לטבעות גידול בעצים, וכל טבעת משקפת את תנאי הסביבה שבהם היא נוצרה לרבות הטמפרטורה, הרכב, כמות המשקעים וסוג הצמחייה (עשבונית, מדברית או עזית). טבעות הגידול מורכבות לרוב מהמינרל קלציט. כדי לקבוע את הגיל של כל טבעת גידול,

נבדקו יחסי האיזוטופים של אורניום (<sup>234</sup>U) ולתוריום (<sup>230</sup>Th) החיוניים לחישוב הגיל (בשיטה זו משתמשים גם לתארוך הלמינות הארגוניטיות בתצורת הליסן). מדידת האיזוטופים היציבים של פחמן ושל חמצן מאפשרת ללמוד על סוג הצמחייה בקרקע שדרכה חלחלה טיפת המים, טמפרטורת המערה, מקורות הגשם וכמותם. לדוגמה, לפי ההרכב האיזוטופי של פחמן וחמצן בטבעות גידול שגילן 120 אלף שנה בנטיפים ממערת שורק, התגלה כי באזורנו, כולל הנגב, הייתה כמות המשקעים המשוערת אז כפולה מכמות המשקעים השנתית הממוצעת היום. מצב דומה היה לפני 54 אלף שנה. בתקופות אלו תועדה נדידת האדם מאפריקה, והממצאים תואמים גם את ממצאי האדם הקדמון במערות בכרמל ובגליל. השינויים האיזוטופיים שתועדו במשקעי המערות מאפשרים לעקוב גם אחר אירועים בהיסטוריה האנושית ברמת דיוק של מספר עשרות שנים. דוגמה יפה לכך היא השינוי האקלימי שהתרחש לפני כ-4200 שנה, כאשר ההרכב האיזוטופי בנטיפים מתקופה זו מצביע על מגמה ברורה של התייבשות. שינוי זה מקביל להתמוטטות האימפריה האכדית והממלכה המצרית.



**תמונה 5: פרופ' מוטי שטיין ומאחוריו אסדת הקידוח המדעי העמוק בים המלח. הקידוח שהתבצע במסגרת ארגון International Continental Drilling Program (ICDP), הגיע לעומק של 455 מטר מתחת לקרקעית האגם, בעומק מים של 300 מטר. מהקידוח הוצאו סדימנטים ששקעו באגמי ים המלח במשך 220 אלפי השנים האחרונות.**

כיום מתבצעים במכון הגיאולוגי מחקרים הבודקים כיצד השינויים בכמויות המשקעים בשנים האחרונות מתבטאים במשקעי מערות הנוצרים כיום. תוצאות ראשוניות מצביעות על כך שקיימת מחזוריות של תקופות לחות ויבשות באזורנו

<sup>3</sup> CaCO<sub>3</sub>



**תמונה 6: היווצרות נטיף זקיף במערת שורק. טיפת המים מכילה  $\text{CaCO}_3$  מומס שיתגבש בהיקף הנטיף וגם על הזקיף עם התנפצותה.**

החל משנות החמישים, ועל פי מחזוריות זו יתכן והתקופה השחונה הנוכחית תתחלף בתקופה רטובה יותר בעשור הבא. יש לציין כי חיזוי זה נסמך רק על המחזוריות הטבעית בלי להביא בחשבון את השפעת האדם.

### להבחין בין זיוף לאמת

לחקר תהליכים טבעיים של שקיעת קלציט יש גם תרומה חשובה לזיהוי זיוף עתיקות. לפני למעלה מעשור התפרסמו מספר פריטים ארכיאולוגיים שהיו חשודים כמזויפים: ארון קבורה שיוחס לאחיו של ישו, לוח יואש שסיפר על בדק הבית של בית המקדש הראשון ועוד. חדשות אלה הסעירו את העולם הארכיאולוגי בארץ ובחו"ל. ד"ר אבנר אילון וד"ר מירה בר-מטיוס מדדו את הרכבו האיזוטופי של החמצן בקרום (הפטינה) המצפה את הפריטים האלו והשוו אותו להרכב האיזוטופי של פטינה שנוצרה בתנאים טבעיים (טמפרטורה והרכב הגשמים) בהרי יהודה במהלך 3000 השנים האחרונות. נמצא שהרכב הפטינה בפריטים הארכיאולוגיים חריג מההרכב הצפוי, ולכן קבעו החוקרים חד-משמעית שהפטינה לא נוצרה בתנאים טבעיים אלא בטמפרטורה גבוהה בהרבה (לפחות ב-40 עד 50°C), עובדה המטילה ספק כבד במקורותם של פריטים אלה.

### זיהוי ומעקב אחר זיהומים תעשייתיים

זיהום הקרקעות והאקוויפרים החל עוד בראשית המפעל הציוני בארץ, ולצערנו, הוא נמשך עד היום. ההתיישבות הציונית לוותה בייבוש ביצות השרון והחולה ובהפיכתן לשדות חקלאיים, בהקמת מפעלים תעשייתיים ומפעלי נשק, כרייה ועוד. בחלק זה נתוודע לאופן המעקב אחר המזהמים השונים וכן נציג דרכים אפשריות לטיפול בבעיה.

### דלק ותעשייה

ד"ר פאינה גלמן מובילה תחום שבו נעזרים באיזוטופים יציבים להבנת תהליכי פירוק של מזהמים אורגניים במי התהום. במסגרת המחקרים האלו פותחו במכון הגיאולוגי שיטות לשימוש באיזוטופים של הלוגנים, כמו ברום וכלור, למעקב אחרי תהליכי פירוק בקטריאלי. עם פיתוח התעשייה בארץ, זוהמו קרקעות רבות בריכוזים גבוהים של מזהמים אורגניים המוצאים את דרכם לתת-הקרקע ומשם עלולים להגיע למי השתייה. כדי לטפל במזהמים השונים, צריך להבין בין היתר את דרך פירוקם בתת-הקרקע. אחד המזהמים הנפוצים ביותר הוא דלק שדלף ממכלים בתחנות הדלק אל מי התהום באתרי תחנות הדלק, ומתפשט משם הלאה. שני מרכיבים בדלק: מתיל-טרף-בוטיל-אתר ובנזן נחשבים מסוכנים ביותר ומוגדרים כמסרטנים פוטנציאליים. החוקרים בדקו את קצב הפירוק של חומרים אלה בעזרת איזוטופים של פחמן, שכן קצב הפירוק קובע את זמן השהות של המזהם בתת-הקרקע ואת פוטנציאל הסיכון שלו. התברר כי בתנאים ארוביים הפירוק הבקטריאלי מהיר יותר מאשר בתנאים אנארוביים, ומכאן שאפשר לטפל בזיהום על ידי החדרת חמצן. תוצאות דומות התקבלו לגבי פירוק של תרכובות ברום-אורגניות המצויות בשימוש נרחב בתעשייה כחומרים מעכבי בעירה, והנמצאות בריכוזים גבוהים במי התהום ברמת חובב: ניסוי מעבדה הראו שקיים פוטנציאל פירוק בקטריאלי בתנאים ארוביים, ולכן ייתכן שדרך הטיפול היא בהחדרת חמצן למי התהום באתר.

### נסיעה לא פשוטה

עד המהפכה התעשייתית שבה החלו בשריפת פחם, לא הייתה עופרת באטמוספירה אלא כחלק מאבק טבעי. אולם עד לאחרונה (2005) השתמשו בעופרת כתוסף לדלק, ובמשך שנים רבות השתחררה כמות עצומה של עופרת לאטמוספירה ששקעה מיד כאבק ו"ציפתה" את פני כדור הארץ. למרות השימוש בעופרת כתוסף פסק, הרי שהאבק סביבנו ובעולם כולו מהווה היום מקור זיהום משני לעופרת, וניתן למצוא אותה באבק דרכים, בסחף בשולי דרכים, בקרקעית הים, באבק הביתי ועוד. ניטור העופרת חשוב לקביעת מנגנוני הסעה והערכת פוטנציאל הזיהום שלה. החוקרות ד"ר יהודית הרלבן וד"ר נדיה טויטש עקבו אחר נוכחות העופרת באבק בערים (חיפה וירושלים) באמצעות איזוטופים של עופרת. נמצא כי העופרת מצויה ברחובות הערים בריכוזים גבוהים כמו לפני כ-20 שנה, ומקורה בפני קרקע מזהמים המורחפים עם הרוח.

בדוגמה אחרת עקבו החוקרות ד"ר יהודית הרלבן וד"ר אהובה אלמוגי-לבין אחר בוצת השפעול של בריכות השפד"ן בים התיכון. השפד"ן מטפל בביוב של כמיליון וחצי תושבי גוש דן רבתי, ובמהלך הטיפול בשפכים נוצרת גם בוצה שעד לאחרונה פונתה בצינור שאורכו כ-5 ק"מ אל הים. ניטור מקיף של המכון לחקר ימים ואגמים שבחיפה בודק את הזיהום הפוטנציאלי של קרקעית הים התיכון במתכות שמקורן בבוצה. המכון הגיאולוגי ביצע מעקב אחר הבוצה באמצעות איזוטופים של עופרת ומצא כי העופרת מורחפת מיד על ידי הגלים ומוסעת צפונה עם הזרמים. עוד התברר שלמרות שריכוז המתכות אבץ, עופרת ונחושת גבוה פי 25 מזה הנמצא באופן טבעי בקרקעית הים, משטר הסופות המרחיף את הבוצה גורם לריכוזי המתכות, ובכללן העופרת, להיות נמוכים מהתקן.

תם אך לא נשלם, המחקרים הגיאוכימיים במכון מתבצעים במסגרת פרויקטים נושאים, קצרים וארוכי טווח, בהתאם לצרכים הממלכתיים והציבוריים. מומלץ לגשת ולהתעדכן באתר המכון הגיאולוגי [www.gsi.gov.il](http://www.gsi.gov.il).