

מקורות המים של התיישבויות פרהיסטוריות בדרום בקעת הירדן

יהודה לוי *

תקציר

במחקר זה התמודדנו עם התעלומה הארכיאולוגית הקשורה למקורות המים שאפשרו את קיומן של התיישבויות פרהיסטוריות חשובות בתקופות האפיפליאוליתית והניאוליתית (20,000~–10,000~ שנים לפני ההווה) בדרום בקעת הירדן. בתקופת הקרח האחרונה המפלס של אגם הלשון היה גבוה בבקע ים המלח. באמצעות מודל הידרולוגי בחנו את ההשפעה שהייתה למפלס הגבוה על שדה הזרימה באגן ההר המזרחי. תוצאות המודל מלמדות כי כמויות מים גדולות, שכיום מתנקזות אל עבר אזור עיינות צוקים, קנה וסמר בחוף ים המלח, התנקזו בעבר אל עבר דרום בקעת הירדן, מצפון לתוואי הנוכחי של ים המלח. כמויות מים אלו נבעו במעיינות קדומים גדולים, והתפתחה סביבם התיישבות פרהיסטורית ענפה. המקרה המוצג כאן מדגים כיצד ניתן לקשר בין מחקר הידרוגיאולוגי לתחומי מחקר אחרים, במקרה זה – לחידה ארכיאולוגית רבת שנים.

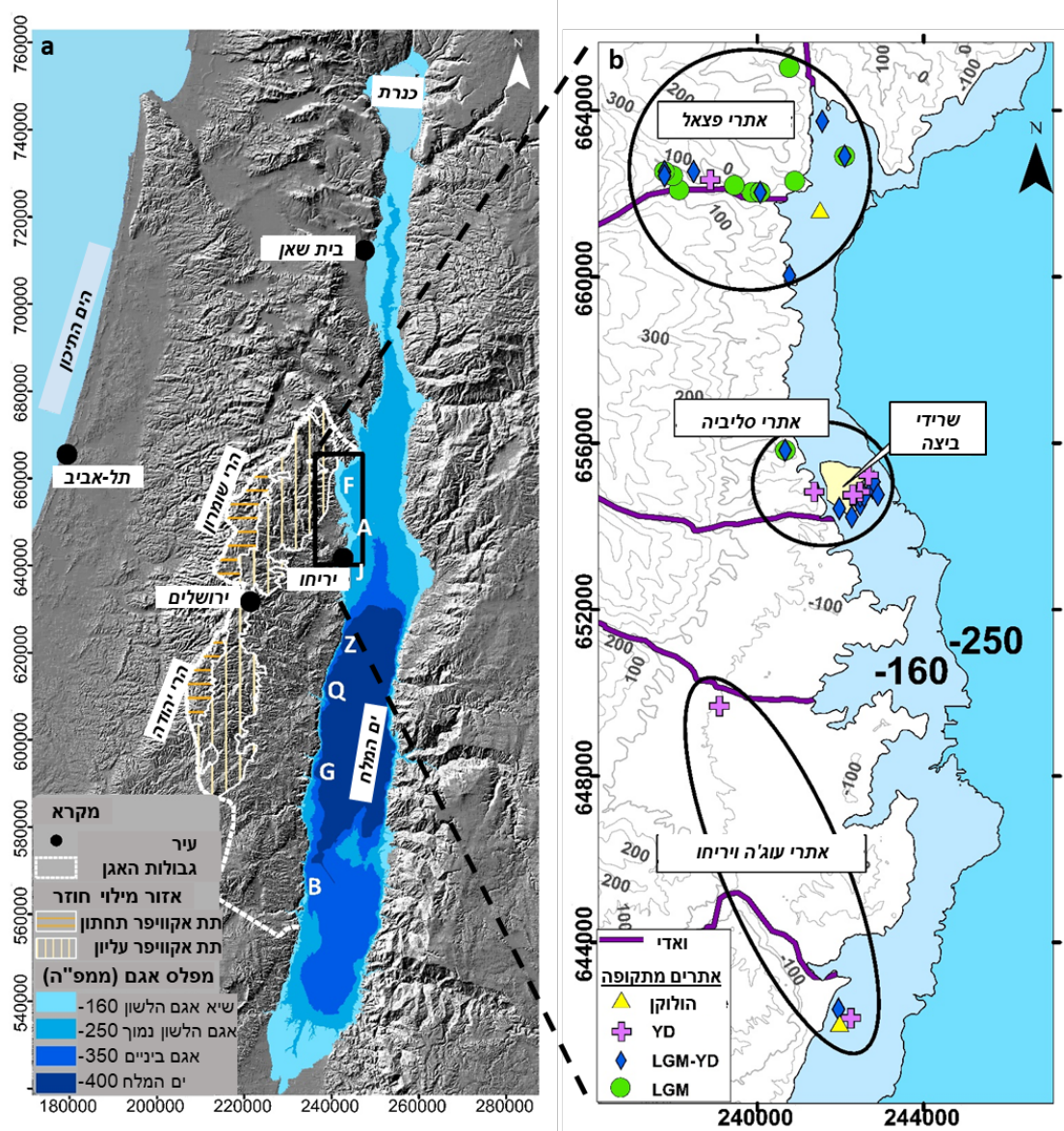
רקע כללי

המחקר המוצג כאן התמקד באגן המזרחי של אקוויפר ההר. אגן זה משתרע מאזורי המילוי החוזר בהרי יהודה ושומרון במערב ועד אזורי הניקוז בבקע ים המלח במזרח (איורים 1–2). בשוליים הצפון-מזרחיים של האגן, בדרום בקעת הירדן, זוהו בעבר ריכוזי אתרים ארכיאולוגיים של התיישבויות פרהיסטוריות לאורך רצף של תקופות (איור 1). לאתרים אלו חשיבות במחקר הארכיאולוגי-פרהיסטורי, מכיוון שנמצאו בהם סימנים (מהמוקדמים בעולם) למעבר מתרבויות נוודים לקטים-ציידיים לתרבויות קדם-חקלאיות בהתיישבויות קבועות.

אזור דרום בקעת הירדן מתאפיין מסוף תקופת הקרח האחרונה ועד היום באקלים חם ויבש, וכמעט שאין בו מקורות מים טבעיים גדולים ויציבים, שהם מחויבי המציאות להקמת התיישבויות קבע סביבם. אנו רואים כיום נביעות במעיינות עוג'ה ויריחו, אך הרוב הגדול של ההתיישבויות הפרהיסטוריות הקדומות לא היו ממוקמות סמוך להם, אלא מצפון לעוג'ה (ההתיישבות ביריחו עצמה מתקיימת ברציפות החל מ-8,000~ שנים לפני ההווה). על כן, במחקר הארכיאולוגי קיימת שאלה ארוכת שנים הנוגעת למקורות

* המאמר הוא פרק מעבודת הדוקטור של יהודה לוי באוניברסיטה העברית בירושלים בהנחיית חיים גבירצמן ואבי בורג.

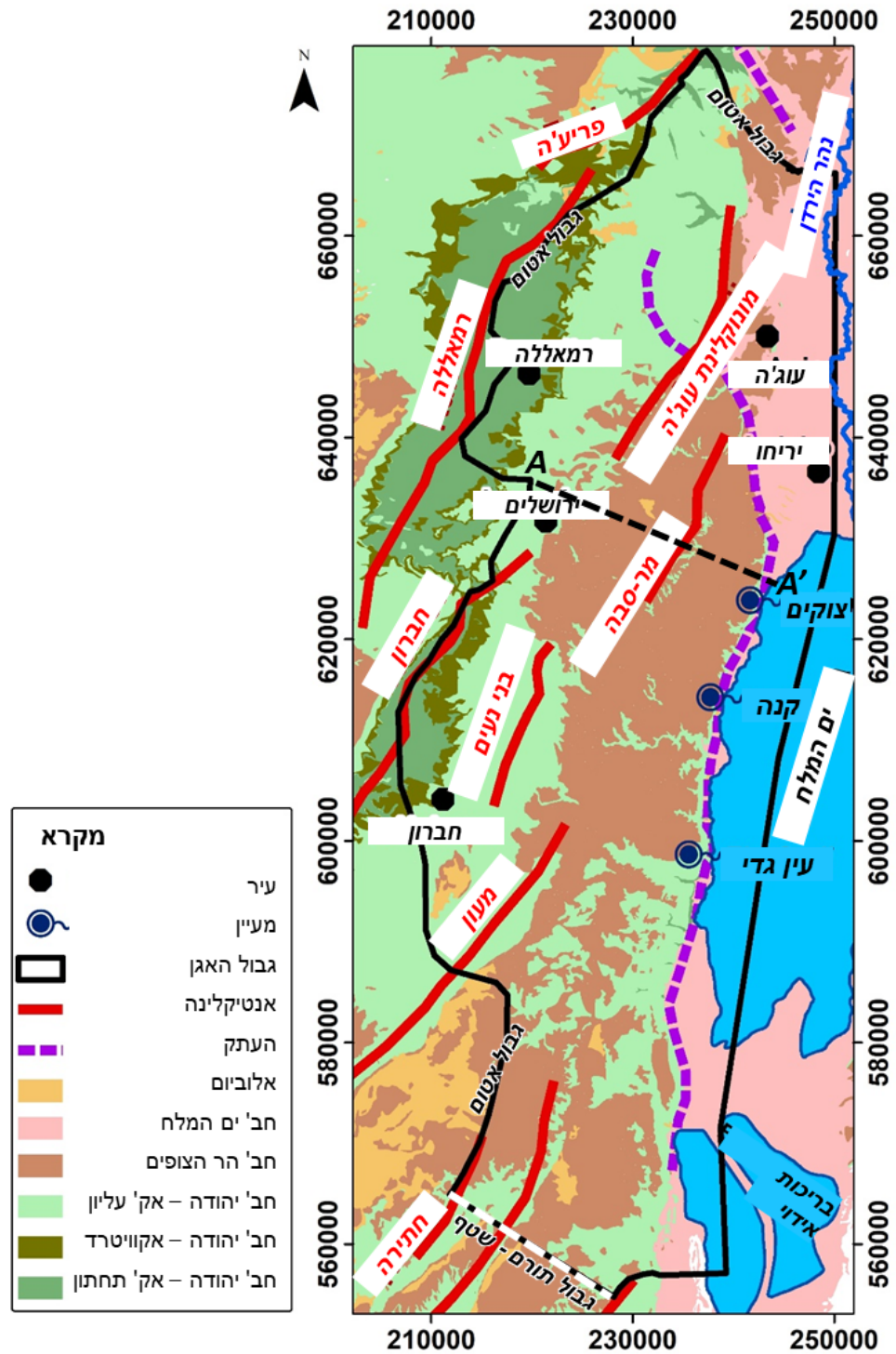
המים שאפשרו את קיומן של אותן התיישבויות לאורך זמן. הממצאים הארכיאולוגיים באתרים אלו מעידים גם על נוכחותם של בעלי חיים רבים האופייניים למקורות מים שפירים. במחקר הנוכחי, שנערך בכלים הידרולוגיים, שוחזר שדה הזרימה באגן ההר המזרחי בהשפעת מפלסי אגם קדום גבוהים. השחזור מסביר את קיומן של מעיינות קדומים בדרום בקעת הירדן שסביבם התפתחו התיישבויות הפרהיסטוריות.



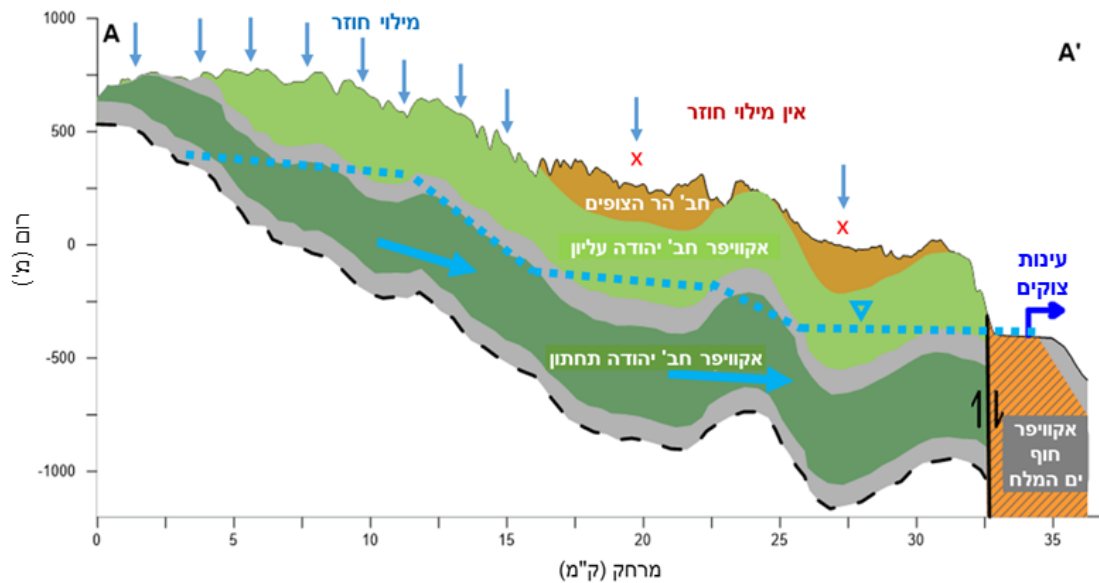
איור 1. (a) השתרעות אגן ההר המזרחי משרטטת על גבי מפת תבליט של ישראל. אזורי המילוי החוזר לשני תתי-האקוויפרים (עליון ותחתון) של חבורת יהודה מסומנים בקווים, ובאותיות מסומנים שבעת אזורי הניקוז שהוגדרו במחקר: F-פצאל, A-עוג'ה, J-יריחו, Z-צוקים, Q-קנה, G-גדי, B-בוקק. בגווי כחול מסומנים השטחים של אגמי בקע ים המלח במפלסים שונים. (b) התמקדות בדרום בקעת הירדן, בשטח שמרוכזים בו אתרים פרהיסטוריים רבים לצד חוף אגם הלשון במפלסי קיצון של האגם (-160 ו-250 מטר). האתרים קובצו לארבע קבוצות על פי הקשר לתקופה אקלימית: תקופת הקרח האחרונה (LGM, פליאולייתית-אפיפליאולייתית, 18,000-25,000 שנים לפני ההווה), מתום תקופת הקרח ועד לאפיזודת Younger-Dryas (LGM-YD, אפיפליאולייתית, 13,000-18,000 שנים לפני ההווה). במהלך אפיזודת Younger Dryas (YD, אפיפליאולייתית-ניאולייתית, 11,500-13,000 שנים לפני ההווה) ומסוף Younger Dryas ועד להולוקן (ניאולייתית, 9,500-11,500 שנים לפני ההווה). האתרים מפורטים באופן ספציפי אצל Levy et al. (2019). אתרי סליביה המסומנים באיור b כלולים בתוך תחומי אזור ניקוז "עוג'ה" שבאיור a.

אגן ההר המזרחי

אגן ההר המזרחי הוא אחד משלושת אגניו של אקוויפר ההר בישראל: אגן ירקון-תנינים במערב, אגן שכם-גלבוע בצפון והאגן המזרחי. ההידרולוגיה הבסיסית של האגן המזרחי הוצגה בעבר במגוון עבודות. האגן משתרע מקו פרשת המים ההידרולוגי בהרי יהודה ושומרון לאורך אנטיקלינות רמאללה וחברון במערב ועד לבקע ים המלח במזרח, ומהעתק תרצה (פריעה) בצפון עד לאזור עין בוקק בדרום (איורים 1 ו-2). הגבולות ההידרולוגיים המערבי והצפוני של האגן הם גבולות "סגורים" של פרשות מים, דהיינו, לא קיימת דרכם כניסת מים אל האקוויפר (איור 2). לעומת זאת, הגבול הדרומי הוא גבול "תורם", דהיינו קיים רכיב זרימה של מי תהום אל תוך האגן מהאקוויפרים בנגב, אך הוא קטן מאוד ביחס למאזן המים של האגן. דרך הגבול המזרחי מתנקזים מים מן האקוויפר אל עבר מעיינות בבקע ים המלח, שהעיקריים שבהם הם עיינות צוקים, קנה וסמר לחופו של ים המלח (איור 2). כניסת המים העיקרית אל האגן היא ממילוי חוזר ממשקעים שיורדים על גבי המחשופים של סלעי חבורת יהודה בהרי יהודה ושומרון. מי התהום זורמים בסלעים הקרבונטיים של חבורת יהודה, ומתנקזים מהם במזרח האגן (איור 3). כיוון הזרימה הכללי באגן הוא ממערב למזרח, אך קווי הזרם אינם "ישרים", אלא מפותלים בשל מבנה השכבות הגיאולוגיות באזור זה המאופיין כאנטיקלינוריום, דהיינו רצף של אנטיקלינות וסינקלינות (איור 2) השייכות למבנה הקשת הסורית. לכן, המוליכות ההידראולית במרחב הטרוגנית. בממד האנכי האקוויפר מחולק לשני תתי-אקוויפרים, עליון ותחתון, עם שכבת אקוויטרד ביניים (איור 3). תת-האקוויפר התחתון נכלל בתצורות העמוקות והקדומות (קנומן תחתון) של חבורת יהודה – כפירה, גבעת יערים, שורק וכיסלון. תצורות מוצא ובית מאיר, שההרכב שלהן חווארי יותר, מהוות את אקוויטרד הביניים, ותת-האקוויפר העליון נמצא בתצורות העליונות והצעירות יותר (קנומן עליון – טורון) של חבורת יהודה – עמינדב, כפר שאול, ורדים ובינה (כל שמות התצורות תואמות לחלוקה הסטרטיגרפית באזור ירושלים). בסיס הניקוז של האקוויפר בהווה הוא ים המלח. עם זאת, מפלס ים המלח משתנה בזמן, ולכך השפעה על מערכת הניקוז של האקוויפר (לוי ואחרים, 2021). גם אגמים קדומים שמילאו את בקע ים המלח בעבר תפקדו כבסיס הניקוז למערכת האקוויפרית שבחבורת יהודה, אולם עד כה לא נחקרה השפעת רום מפלסי האגמים הללו על מערכת הניקוז הטבעית של האקוויפר. המחקר הנוכחי מוסיף את השפעת השונות ברום מפלס בסיס הניקוז על שדה הזרימה.



איור 2. מפה הידרוגיאולוגית של אגן החר המזרחי. מחשופי התצורות המרכיבים את אקוויפר חבורת יהודה מקובצים על פי החלוקה ההידרוגיאולוגית לתת-אקוויפר עליון, תת-אקוויפר תחתון ואקוויטרד הביניים. הקו המקווקו A-A' מסמן את מיקום החתך באיור 3. המפה הגיאולוגית מציגה גם את היחידות הסטרטיגרפיות שמעל חבורת יהודה - חבורת הר הצופים, חבורת ים המלח ויחידות אלוביאליות. חבורת ים המלח מוגבלת בהשתרעותה לבקע ים המלח.



איור 3. חתך הידרוגיאולוגי לרוחב האגן המזרחי. מיקום החתך מוסמן באיור 2. מפלס מי התהום (תת-אקוויפר תחתון) וכיווני הזרימה באגן מסומנים באופן סכמטי. ניתן לראות בחתך את אזורי האנטיקלינות והסינקלינות, שם השכבות נטויות ומשפיעות על המוליכות ההידראולית ולכן על נתיבי הזרימה באגן.

אגמי בקע ים המלח ותקופות אקלימיות

את בקע ים המלח מילאו לפני מספר מיליוני שנים מי ים שחדרו אליו דרך עמק יזרעאל, ויצרו את מה שמכונה "לגונת סדום". לאחר שהקשר עם הים הפתוח נותק, מספר אגמים מילאו את הבקע, ושטח השתרעותם ורום מפלסם היו בהתאמה לאקלים ששרר. לדוגמה, בתקופות קרחוניות מילאו אגמים גדולים את הבקע, ובתקופות בין-קרחוניות הם הצטמצמו לשטחים מוגבלים יותר. האגם האחרון שמילא את הבקע, לפני ים המלח הנוכחי, היה אגם הלשון, שהשתרע מאזור חצבה בדרום ועד הכינרת בצפון (איור 1). אגם הלשון התקיים במהלך התקופה הקרחונית האחרונה (LGM – Last Glacial Maximum), בטווח הזמן שבין 15,000–70,000 שנים לפני ההווה. מפלס האגם היה במוצע כ-200 מטרים מעל מפלס ים המלח הנוכחי, אך השתנה במהלך הזמן. מפלסו המרבי היה לפני כ-25,000 שנים (רום של 160 מטר מתחת לפני הים). עם תום התקופה הקרחונית ירד מפלס האגם והצטמצם. תקופת הצטמצמות זו מכונה מכאן ובהמשך המאמר כ-"אגם הביניים". לפני כ-13,000 שנים התרחשה אפיזודה אקלימית קצרה שנמשכה כ-1,500 שנים, ובה האקלים היה שוב לח (YD – Younger Dryas). בתקופה זו עלה מפלס אגם הביניים. במהלך כ-11,500 השנים האחרונות (תקופת ההולוקן) האקלים יבש (תקופת בין-קרחונית), והאגם הקיים בבקע הוא ים המלח במפלס שעומד על כ-400 מטר מתחת לפני הים, ובעשרות השנים האחרונות אף נמוך יותר (איור 1).

אתרים פרהיסטוריים בדרום בקעת הירדן

ארכיאולוגים של התקופות הפרהיסטוריות איתרו שלושה אזורים שהחקלאות הקדומה התחילה בהם לראשונה: מרכז מקסיקו, אזור נהר ינגצה בסין ומרכז הלבנט. באזורים אלו זוהה המעבר מתרבויות נוודים של לקטים-ציידים לתרבויות של התיישבויות חקלאיות קבועות – "המהפכה החקלאית". האזור שנמצא בו התייעוד הרציף והמפורט ביותר למעבר הוא מרכז הלבנט, מאזור הרי הטאורוס בטורקיה עד לחצי האי סיני. במרחבי אזור זה קיימים מספר ריכוזים של אתרים פרהיסטוריים, ואחד מהם מצוי בדרום בקעת הירדן. כאן זוהו כ-50 אתרים בשני ריכוזים עיקריים, פצאל וסליביה (איור 1), ובשניהם נמצאו התיישבויות פרהיסטוריות רציפות בזמן המתוארכות לכ-20,000 שנים ועד לכ-10,000 שנים לפני ההווה. חלק מההתיישבויות הן מהתקופה הקרחונית (LGM), המוגדרת במחקר הארכיאולוגי כתקופה הפליאוליתית, והן התקיימו לחוף אגם הלשון. חלק מתוארכות מסוף ה-LGM ועד לשנות ה-Younger Dryas, לפני כ-12,000 (התקופה האפיפליאוליתית), והן התקיימו לחוף אגם הביניים. הנתרות הן מתקופת ה-Younger Dryas ומעט לאחריה, והן התקיימו לחוף אגם הביניים או אף בגבולות ים המלח הנוכחי, לאחר שמפלס האגם ירד (התקופה הניאוליתית). מתחילת תקופת ההולוקן, כלומר לפני כ-10,000 שנים, הפסיקו להתקיים ההתיישבויות באזור פצאל וסליביה, והופיעו התיישבויות דרומיות יותר, באזור יריחו. באיור 1 מוצגים מיקומי האתרים הפרהיסטוריים על פי שיוכם לתקופות האקלים השונות. במתחם סליביה זוהה חתך של כמה מטרים של משקעי אגמים שאינם חלק מאגם הלשון, ברום גבוה מזה של אגם הלשון, שהתקיים באותו זמן. בשכבות משקעי האגמים הללו ישנם משקעי מעיינות (מים שפירים) – טופה וטרוורטין. אזור זה תואר בעבודות גיאולוגיות וארכיאולוגיות כאזור ביצתי עם הרבה נביעות מים קדומות. גם בוואדי פצאל הסמוך לאתרי פצאל נמצאו סלעי טופה גדולים. סלעי טופה אלו תוארכו לטווח הזמנים 16,000–60,000 שנים לפני ההווה.

מטרת המחקר

מה היה מקור המים של אותן התיישבויות בתקופה שלפני 10,000–20,000 שנה? כמו ים המלח, גם האגמים הקדומים בבקע היו מלוחים (אם כי במליחות נמוכה יותר), ולא יכלו לשמש מקור מים שפירים לבני האדם ולבעלי החיים. דרום בקעת הירדן הוא אזור יבש, המאופיין בטמפרטורות גבוהות ובמיעוט משקעים, ללא מקורות מים יציבים. שאלת מקור המים מתחזקת בייחוד לאור חשיבות האתרים הללו במחקר הארכיאולוגי. כיצד ניתן לקיים התיישבות של קבע לאורך כל השנה ללא מקור מים יציב? כיצד ניתן להשקות את הגידולים ולביית בעלי חיים? השאלה מתעוררת גם בקשר לאתרים של תרבויות קדומות יותר באותם אזורים, מכיוון שציד של בעלי חיים מחייב מקורות מים שבעלי החיים מגיעים אליהם באופן

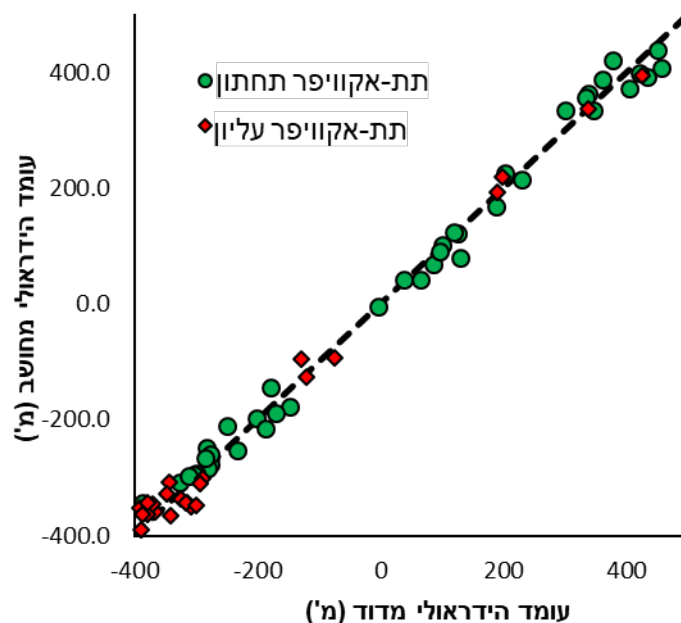
שוטף. באתרים הפרהיסטוריים נמצאו שרידים רבים של בעלי חיים (שניצודו) שחייבים מים שפירים לקיומם, כגון ברווזים, ארנבים ומגוון יונקים קטנים.

אם כן, גם המחקר הארכיאולוגי וגם המחקר הגיאולוגי מעידים על קיום נביעות מים שפירים קדומות גדולות בנפחן בדרום בקעת הירדן, שהשקיעו חתך עבה של סלעי טופה וטרורטין ואף משקעי ביצה, ומסתבר ששימשו מקור מים שפירים להתיישבויות הפרהיסטוריות הרבות לאורך זמן ממושך. מעיינות אלו אינם בנמצא כיום, ונשאלת השאלה מהיכן הגיעו אליהם המים, ומהו השינוי שהתרחש וגרם להתיישבותם. השאלה קיבלה מענה באמצעות שחזור פליאוהידרולוגי של שדה הזרימה באגן ההר המזרחי, בעת שבסיס הניקוז של האגן (אגמים בבקע ים המלח) היה גבוה יותר מים המלח הנוכחי. שחזור שדה הזרימה התבצע באמצעות מודל נומרי (ספרתי) מכויל של אגן ההר המזרחי. מודל נומרי מאפשר לדמות את שדה הזרימה בהשפעת תנאים שונים באמצעות תוכנת מחשב ייעודית. הרחבה על המודל נמצאת בנספח.

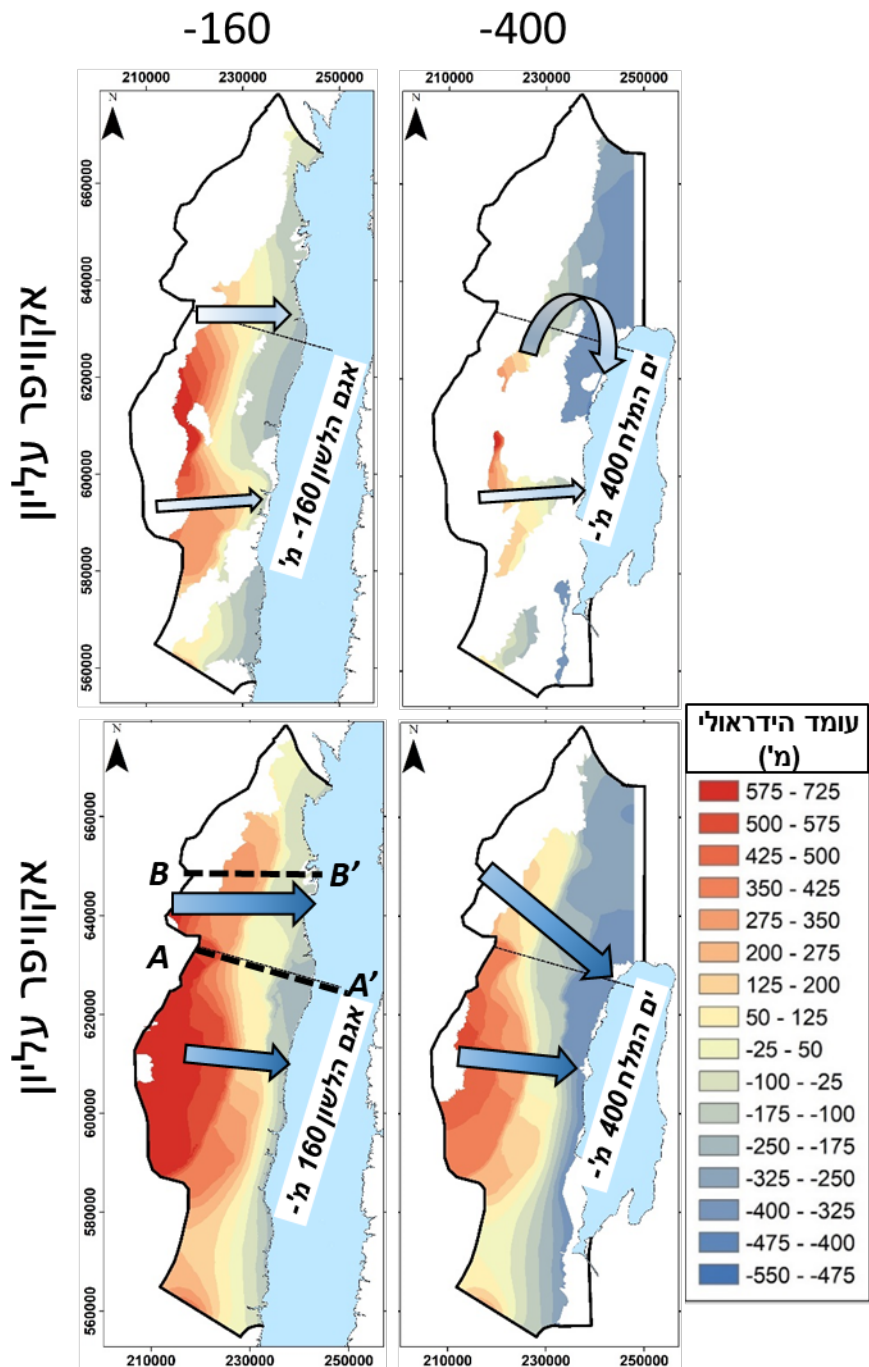
השתנות שדה הזרימה באגן ההר המזרחי בהשפעת מפלסי האגם בבקע ים המלח

סך המילוי החוזר שחושב לאגן ההר המזרחי עומד על 150 מיליון מ"ק בשנה (מלמ"ש) בממוצע. בסיום תהליך כיוול המודל הנומרי התקבלה, כאמור, התאמה מיטבית בין נתוני העומד ההידראולי המדודים והמחושבים (איור 4), והוצבו המוליכויות ההידראוליות במרחב האגן בשני תתי-האקוויפרים, כך שהמודל המכויל משחזר בהצלחה את שדה הזרימה ואת מפת המפלסים הנוכחית (איור 5). כיום רוב מי האגן מתנקזים לאזורי הניקוז בחופו הצפון-מערבי של ים המלח – כ-50% לאזור צוקים וכ-25% לאזור קנה-סמר. ערכים אלו מייצגים בעיקר זרימה לעינות צוקים, קנה וסמר ומעט זרימה אל עבר חוף ים המלח. עוד כ-13% מתנקזים על פי המודל המכויל לאזורי הניקוז הדרומיים גדי ובוקק (אך לא למעיינות עין גדי ובוקק שמנקזים נפחים קטנים יחסית מאקוויפרים שעונים מקומיים), ורק כ-12% מתנקזים לאזורי הניקוז שמצפון לים המלח הנוכחי (איור 6). לעומת זאת, הרצת המודל לפי תנאי אגם קדומים במפלסים גבוהים מהנוכחי מלמדת כי שדה הזרימה היה שונה באופן דרמטי; כאשר אגם הלשון היה ברום מפלס גבוה (250- מטר ויותר), רק כ-30% ממי האגן התנקזו אל עבר עינות צוקים, כ-30% לאזורי הניקוז הדרומיים לצוקים, וכ-40% אל עבר אזורי הניקוז הצפוניים – יריחו, עוג'ה ופצאל. התפלגות נפחי המים בין אזורי הניקוז הצפוניים משתנה גם היא על פי גובה האגם. במפלס השיא (160- מטר) רוב המים זרמו לאזורי עוג'ה ופצאל, בעוד שההתנקזות אל אזור יריחו הייתה קטנה יותר (איור 6). תוצאות אלו מלמדות כי בדרום בקעת הירדן, שמאופיין כיום בצחיחות וביובש, נבעו בעבר מעיינות מים שפירים גדולים ויציבים של עשרות מלמ"ש. סביב מעיינות אלו התפתחה צמחייה עשירה, והם היו מוקד משיכה לבעלי חיים ולבני

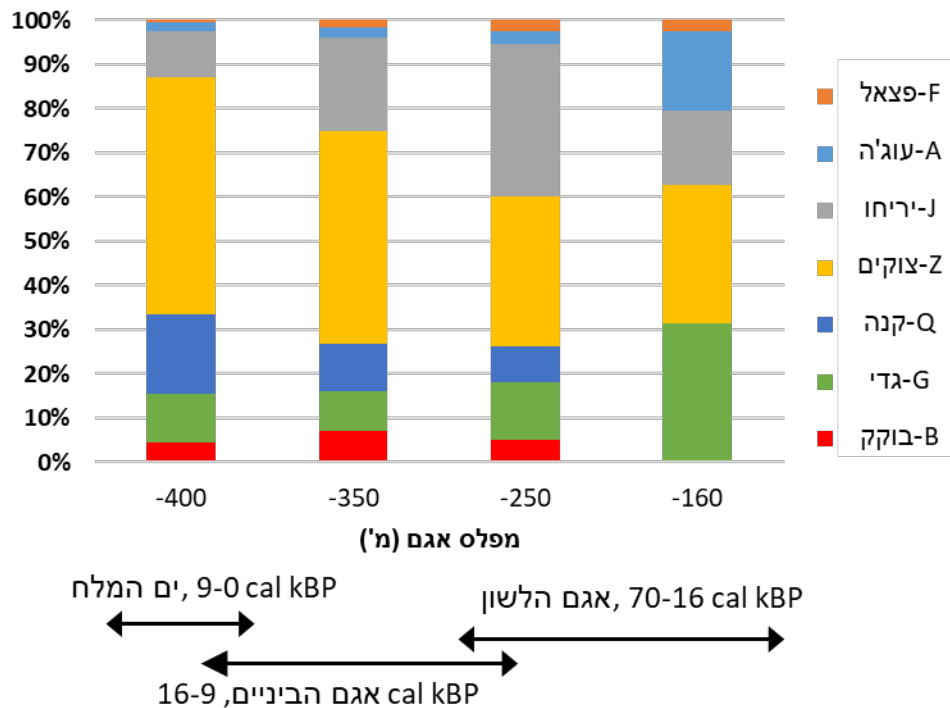
האדם. כלומר, המודל הנומרי מסביר את הימצאות הטופות, הטרוורטינים ומשקעי הביצות המתוארכים לאותה תקופה בוואדיות סליביה ופצאל. ראוי לשים לב שהמודל הנומרי אינו יכול ואינו מתיימר לקבוע את המיקום המדויק של המעיינות במרחב דרום בקעת הירדן. אם כך, תוצאות המודל ההידרולוגי מאירות באור חדש את ריכוזי האתרים הפרהיסטוריים בדרום בקעת הירדן. חברות הלקטים-הציידים הקדומות, כמו גם התרבויות המפותחות יותר שהתחילו לקיים התיישבויות קבע ולביית גידולים חקלאיים ובעלי חיים, התרכזו סביב אותם מקורות מים קדומים והסתמכו עליהם. עם ירידת מפלסי אגם הלשון ואגם הביניים אל מפלס ים המלח ההולוקני ברומו הנוכחי, התיישבו המעיינות הללו בדרום עמק הירדן, והמים החלו להתנקז אל עבר חוף ים המלח הצפון-מערבי. כפועל יוצא מכך, נעזבו אתרי ההתיישבות הפרהיסטוריים. בהנחה סבירה שהמילוי החוזר בתקופה הקרח האחרונה היה גבוה יותר מזה הנוכחי (ואז גם מפלסי האגם היו גבוהים יותר), המודל הורץ עם נפח מילוי חוזר גדול ב-33% מזה הנוכחי. נפחי ההתנקזות באזורי הניקוז השונים עלו בהתאם, אך ההתפלגות בין אזורי הניקוז (כלומר ההתנקזות היחסית בכל אזור ניקוז ביחס לכלל האגן) נשארה קבועה.



איור 4. השוואה בין עומד הידראולי מחושב במודל הנומרי למדוד בקידוחי האגן. ההתאמה הושגה בסיום תהליך הכיול.



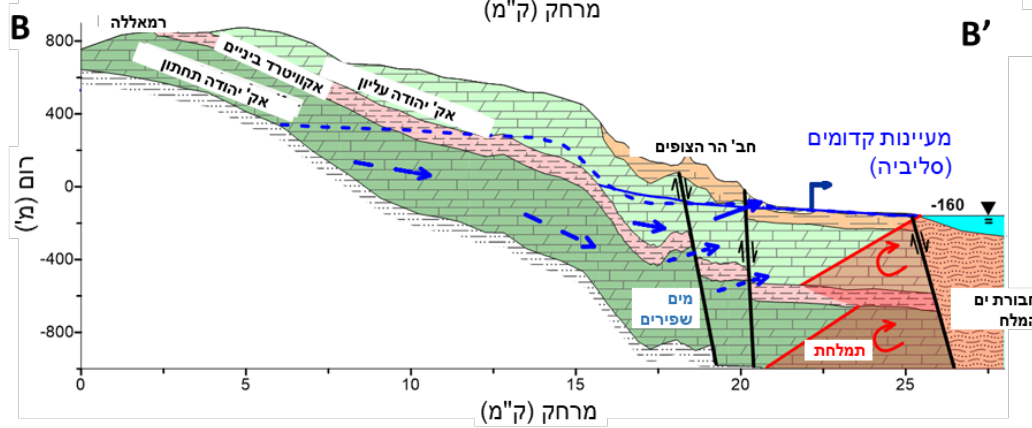
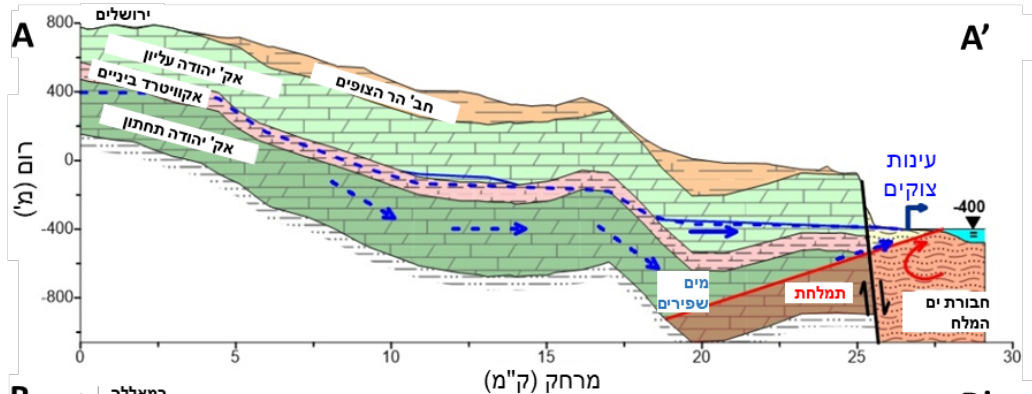
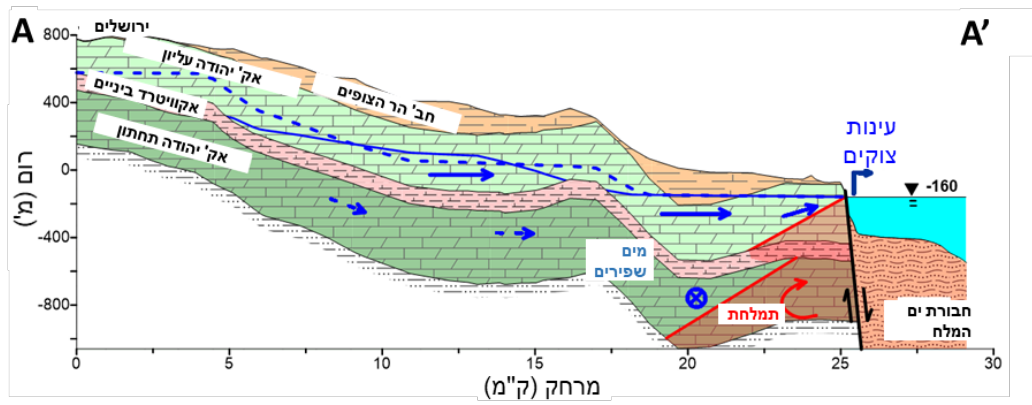
איור 5. ארבע מפות מפלסים של האגן המזרחי. שתי העליונות הן של תת-האקוויפר העליון ושתי התחתונות של תת-האקוויפר התחתון. שתי השמאליות מציגות את מפלסי מי התהום במפלס השיא של אגם הלשון (160- מטר) ושתי הימניות את מפלס של ים המלח בהולוקן (400- מטר). החיצים מייצגים את כיווני הזרימה העיקריים. החץ המעוקל במפה השמאלית העליונה מבטא זרימה עוקפת מבהה גיאולוגי מורם. מיקומי החתכים שבאיור 7 מסומנים.



איור 6. ההתנקזות היחסית מהאגן המזרחי לכל אחד מאזור הניקוז המוגדרים (איור 1). ההתנקזות היחסית מוצגת עבור ארבעה מפלסי אגם בבקע ים המלח: מפלס השיא של אגם הלשון (-160 מטר), מפלס מינימום של אגם הלשון (-250 מטר), מפלס אגם ביניים (-350 מטר), ומפלס ים המלח בהולוקן (-400 מטר). Cal kBP = עשרות אלפי שנים לפני ההווה.

מדוע השתנה שדה הזרימה?

כאמור, שדה הזרימה באגן ההר המזרחי, בעת שמפלס האגם היה גבוה יותר, שונה מהנוכחי, ולכך שני גורמים עיקריים: (1) ההשתרעות המרחבית של בסיס הניקוז ועקב כך כיוון הגרדיאנט ההידראולי: כאשר האגם היה במפלס גבוה והשתרע לכל אורך שוליו המזרחיים של האגן המזרחי, כיוון הגרדיאנט ההידראולי בצפון האגן היה ממערב למזרח, אל עבר בסיס הניקוז הקרוב, בדרום בקעת הירדן. כאשר מפלס האגם ירד, כל המים מצפון האגן החלו לזרום לבסיס הניקוז הנמוך יותר (ים המלח) בכיוון כללי דרום-מזרח (איור 5); (2) עליית רום הפן הבייני: כאשר מפלס האגם היה גבוה, הפן הבייני, דהיינו אזור המגע בין מי האקוויפר השפירים לבין מי האגם המלוחים שחוזרים אל האקוויפר, עלה וחדר מערבה למרחק גדול יותר. מים מלוחים הם בעלי צפיפות גבוהה יותר, ולכן מהווים מחסום הידראולי לזרימת מים שפירים. בסביבת אזור הניקוז צוקים הקשה השילוב של המבנה הגיאולוגי (מיקום ההעתק השוליים של בקע ים המלח) עם פן בייני גבוה על יציאת מי תהום מתת-האקוויפר התחתון. בעקבות זאת, אחוז ניכר מהזרימה בתת-האקוויפר התחתון הוסט לאזורים הצפוניים יותר, שם התאפשרו זרימה מתת-האקוויפר התחתון לעליון והתנקזות במעיינות (איור 7).



- מקרא**
- עומד הידראולי בתת-האקוויפר העליון
 - - - עומד הידראולי בתת-האקוויפר התחתון
 - הפנ הבייני
 - כיוון זרימה בתת-האקוויפר העליון
 - - - → כיוון זרימה בתת-האקוויפר התחתון
 - ⊗ זרימה צפונה בניצב לחתך

איור 7. שני חתכים הידרוגיאולוגיים ממערב למזרח לרוחב האגן. מיקום החתכים מסומן באיור 5. חתך A-A' העובר דרך עינות צוקים מוצג פעמיים, פעם אחת בתנאי מפלס מרביים (-160 מטר, האיור העליון) ופעם אחת בתנאי מפלס ים המלח ההולוקני (-400 מטר, האיור האמצעי). חתך B-B' העובר דרך אזורי הניקוז הצפוניים מוצג בתנאי מפלס מרביים (האיור התחתון). בכל החתכים העומד ההידראולי המוצג הוא על פי תוצאות המודל הנומרי. הפנ הבייני מסומן בחתכים בחישוב אנליטי לפי משוואת גיבן-הרצברג (לכן הוא מקורב בלבד). ניתן לראות כי במפלס אגם מרבי מיקום הפנ הבייני ביחס לאקוויטר הביניים ולהעתק הראשי מקשה על ההתנקזות מתת-האקוויפר התחתון. ההתנקזות באזורים הצפוניים נשארת פתוחה בשל מיקום מערבי יותר להעתק הראשי, המאפשר מעבר מים לתת-האקוויפר העליון.

סיכום ומסקנות

כאשר המפלס של אגם הלשון היה גבוה בהרבה מזה ים המלח הנוכחי, שדה זרימת מי התהום באגן המזרחי היה שונה. כיום רוב מי האגן מתנקזים למעיינות גדולים לחוף ים המלח, בעיקר לעינות צוקים. רק כ-10% מהמים מתנקזים לאזורי הניקוז שמצפון לים המלח, אל עבר דרום בקעת הירדן, והאזור צחיח ודל במעיינות. בעבר, בתנאי מפלס גבוהים, רק 33% ממי האגן התנקזו לעינות צוקים, וכ-40% התנקזו לאזורי הניקוז הצפוניים בשורה של מעיינות מים שפירים גדולים ויציבים ששפיעתם הגיעה לעשרות מלמ"ש. מעיינות קדומים אלו היוו נקודות משיכה לבעלי חיים ולאנשים מתרבויות לקטים-ציידיים קדומות, ובהמשך שימשו אתרי התיישבות של תרבויות ניאוליתיות שהחלו לקדם התיישבות קבע עם ביות בעלי חיים וגידולים חקלאיים. עם התכווצות אגמי הבקע לגבולות ים המלח בהולוקן המעיינות הקדומים הלכו והתייבשו, ובעקבות זאת ננטשו אתרי ההתיישבות הפרהיסטורית בדרום בקעת הירדן. המודל ההידרוגיאולוגי שכויל עבור האגן המזרחי (ראו נספח) פתר שאלה ארכיאולוגית על אודות מקורות המים להתיישבות הפרהיסטורית בדרום בקעת הירדן. תוצאות המודל הראו את היכולת לקשר בין מחקר ההידרוגיאולוגי לסוגיות בתחומי מחקר שונים לחלוטין, במקרה זה – לחידה ארכיאולוגית רבת שנים.

נספחים:

א. **עומד הידראולי:** מדד **לכמות** האנרגיה של יחידת משקל נוזל. העומד ההידראולי של מים בתת-הקרקע כולל בתוכו את מרכיב האנרגיה הפוטנציאלית ואת מרכיב אנרגיית הלחץ. בזרימה בצינורות או בתעלות העומד ההידראולי כולל גם את מרכיב האנרגיה הקינטית. העומד ההידראולי קיים בכל נקודה במרחב התת-קרקעי, נמדד בדרך כלל באמצעות מד מפלס מים בקידוחים ביחידות של מטר מעל פני הים. מים זורמים תמיד בכיוון מפל העומד ההידראולי, דהיינו מעומד הידראולי גבוה לנמוך.

ב. **מודל נומרי:** הכמות, הזמן והכיוון של תנועת מים בתווך הנקבובי בתת-הקרקע מתוארים ומחושבים באמצעות משוואת זרימה פיזיקלית (משוואת דיפוזיה של המים). משוואת הזרימה היא דיפרנציאלית-חלקית (משוואה שקצב שינוי ערך המשתנה המבוקש בה תלוי בשני משתנים אחרים, במקרה זה – שינוי העומד ההידראולי תלוי גם במרחב וגם בזמן) ואינה ניתנת לפתרון אנליטי. מודל נומרי (ספרתי) הוא מערכת ממוחשבת המאפשרת בתנאים שונים ובמגבלות לפתור את משוואת הזרימה בשיטות מתמטיות מתקדמות הנקראות "שיטות נומריות". כך ניתן לבצע הדמיות וחישובים של זרימת המים בתת-הקרקע.

ג. **טופה וטרורטין:** טופה וטרורטין הם סלעי משקע מעיינות, ויש ביניהם הבדלים מינוריים בתכונות ובסביבות ההשקעה. מסלע גיר מורכב ממינרלי קלציט (סידן-דו-פחמתי, CaCO_3). מי תהום הזורמים בין נקבובי סלעי הגיר ממיסים אותם, וכך נעשים עשירים בסידן (Ca^{2+}) ובדו-פחמה (HCO_3^-). בשלב מסוים המים נעשים רוויים לסידן הדו-פחמתי, וכבר אינם יכולים להמיס יותר. כאשר המים רוויים לסידן דו-פחמתי, מספיק אידוי קטן של המים או קליטת מים לשורשי צמחים ללא הסידן הדו-פחמתי כדי שהמים יהיו "על-רוויים". כאשר המים "על-רוויים", הם מתחילים להשקיע בחזרה את מינרלי הקלציט. כאשר מי תהום רוויים בקלציט נובעים אל פני השטח במעיינות, הם משקיעים את הקלציט במוצאים השונים. פעמים רבות המינרלים מושקעים סביב קנים וגבעולי צמחייה. סלעי הטופה והטרורטין נוצרים כאשר ברבות השנים החומר האורגני הצמחי נרקב ומתחמצן, והמסלע הקלציטי נשאר בצורה של הצמחייה שהושקע עליה. הקלציט יכול גם להיווצר בהשקעה על גבי סלעים קיימים, חלוקי נחל וכו'.

ד. שיטות - מודל נומרי מכויל של אגן ההר המזרחי

שחזור שדה הזרימה הפליאוהידרולוגי באגן ההר המזרחי נעשה באמצעות שימוש במודל נומרי מכויל של האגן. המודל הוצב בתוכנת FEFLOW אשר פותרת את משוואת הזרימה במי תהום (משוואה 1) בשיטת האלמנטים הסופיים:

$$(1) \quad S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R$$

כאשר s_s - האגירות הסגולית, t - הזמן (T), h - העומד ההידראולי (L), K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} - המוליכויות ההידראוליות (L/T) לאורך שלושת הצירים x,y,z, ו-R - איבר מקור עבור המילוי החוזר (L/T). שלד המודל (איור נספח 1) הוצב באמצעות בניית מפות סטרוקטורליות של בסיס וגג ביחידות ההידרוסטריטיגרפיות הרלוונטיות, המבוססות על המיפוי הסטרוקטורלי של גג חבורת יהודה וכן על מידע ליתולוגי שנאסף מקידוחים הפזורים ברחבי האגן, דו"חות ועבודות גיאולוגיות. היחידות הרלוונטיות הן: בסיס תת-האקוויפר התחתון (בסיס חבורת יהודה), בסיס אקוויטרד הביניים (בסיס תצורת בית מאיר) ובסיס תת-האקוויפר העליון (גג תצורת מוצא).

המילוי החוזר לאקוויפר משמש קלט למודל, והוא חושב באמצעות נתוני עובי גשם עדכניים מ-35 תחנות מדידה הפזורות ברחבי האגן ובאמצעות משוואות מילוי חוזר שפיתחו גוטמן וצוקרמן. תנאי השפה הראשוניים למודל הם העומד ההידראולי (Dirichlet) של מפלס ים המלח לאורך קו חוף האגם בשנת 1980 (400 מטר מתחת לפני הים), קרי לפני ירידת המפלס החדה בעשרות השנים האחרונות. ערך זה מייצג את המפלס הממוצע לאורך ההולוקן. תנאי שפה נוספים הם תנאי מסוג שלישי (Cauchy), בו השטף תלוי בסף עומד הידראולי (במקרה זה ערך הסף הוא הגובה הטופוגרפי).

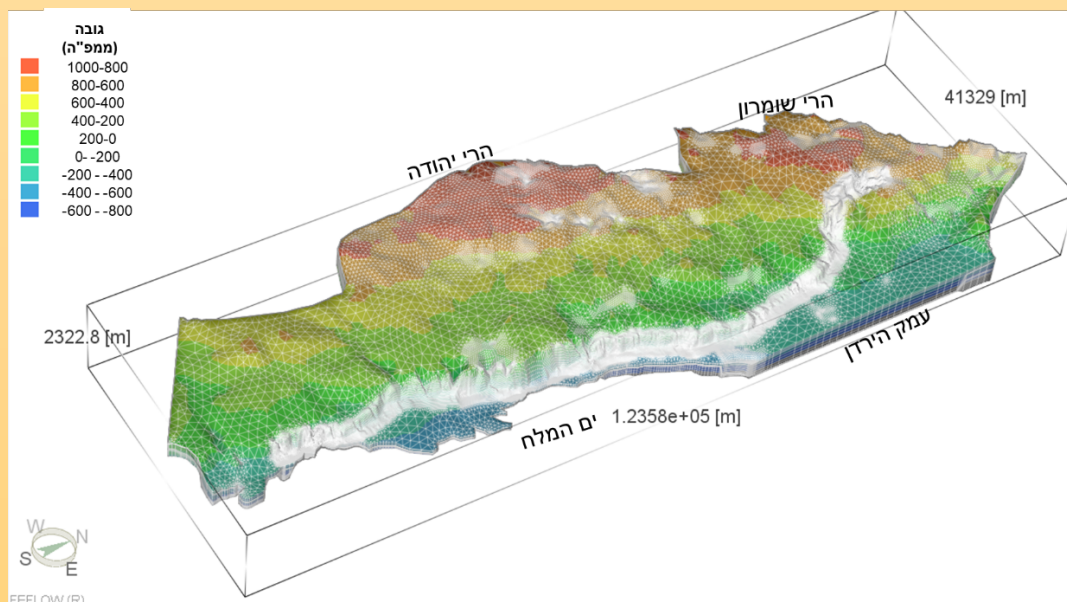
ברחבי אגן ההר המזרחי ישנם, כאמור, מספר מבנים גיאולוגיים משמעותיים שמשפיעים על שדה הזרימה: אנטיקלינות, סינקלינות והעתקים. אזורים שהשכבות הגיאולוגיות בהם נטויות, הוגדרו ככאלו שמשוערת בהם מוליכות הידראולית נמוכה יותר, וכך המודל מכויל באופן נאמן למבנה הגיאולוגי. לאורך מספר שברים הוגדרה מוליכות הידראולית גבוהה יחסית באקוויטרד הביניים, שמאפשרת מעבר מים בין תתי-האקוויפרים התחתון והעליון. מעבר זה הכרחי בשל חסימה, חלקית לפחות, של הזרימה בתת-האקוויפר התחתון בקרבת ים המלח על ידי תמלחות שאריתיות מאגמים קדומים.

המשך:

ערכי המוליכות ההידראולית הותאמו במהלך הכיול על ידי ניסוי וטעייה, עד שהתקבל הפרש מינימלי מיטבי בין ערכי עומד הידראולי מדוד ב-65 קידוחים הפזורים ברחבי האגן, לעומד הידראולי מחושב על ידי המודל. הכיול נערך במצב יציב. נתוני העומד ההידראולי המדודים הם ברובם משנות השבעים והשמונים, טרם השפעת השאיבה על מפלסי המים באגן (בהתאמה גם לתנאי השפה של מפלס ים המלח באותן שנים). המוליכות האנכית שווה לעשירית מהמוליכות האופקית (אנאיזוטרופיה=0.1) והאגירות הסגולית ל-0.004.

המודל המכיל שימש לשחזור שדה הזרימה באקוויפר, כאשר תנאי השפה במוצא הוצבו בכל פעם ברום אחר, המייצג מפלס קדום של אגמי הלשון והביניים: -350, -250 ו-160 מטר. חשוב לציין שגם כאשר מפלס אגם הביניים נמוך יחסית (350- מטר), האגם משתרע בבקע לכל אורך שולי אגן ההר המזרחי, עד כ-15 ק"מ צפונה מהשתרעות ים המלח הנוכחי.

שולי אגן ההר המזרחי בבקע ים המלח, כלומר אזורי הניקוז של האגן, חולקו מבחינה גיאוגרפית לשישה אזורים ניקוז, מדרום לצפון: בוקק, גדי, קנה, צוקים, יריחו, עוג'ה ופצאל (איור 1). בכל אזור ניקוז חושב נפח הניקוז הממוצע עבור כל אחד מתנאי רום האגם, גם דרך מעיינות וגם דרך קו החוף אל האגם. כך ניתן לזהות שינויים בשדה הזרימה שבאים לידי ביטוי בנפח שמתנקז בכל אזור ניקוז כפונקציה של הבדלים ברום של בסיס הניקוז.



איור נספח 1. שלד רשת האלמנטים של המודל הנומרי

מקורות נוספים

לוי י, גבירצמן ח, יחיאלי י ובורג א. 2021. תגובת המערכת ההידרולוגית של עינות צוקים לירידת מפלס ים המלח: תצפיות ותחזיות לעתיד. *אקולוגיה וסביבה* **12**(2).
<https://www.magazine.isees.org.il/?p=30422>

Levy Y, Goring-Morris AN, Yechieli Y, Burg a, and Gvirtzman H. 2019. Harnessing Paleohydrologic Modeling to Solve a Prehistoric Mystery. *Scientific Report* **9**: 16349.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-52761-x>

Levy Y, Burg A, Yechieli Y, and Gvirtzman H. 2020. Displacement of springs and changes in groundwater flow regime due to the extreme drop in adjacent lake levels: The Dead Sea rift. *Journal of Hydrology* **587**: 124928.