מערכת הקרסט והאקולוגיה של מערת איילון, ישראל

עבודת גמר לתואר מוסמך במדעי הטבע
מוגשת על ידי:
ישראל נעמן

בהדרכת:
פרופ' עמוס פרומקין
פרופ' חיים גבירצמן

יוני, 2011
סיון תשע"א

החוג לגיאולוגיה
המגמה למדעי כדור הארץ
הפקולטה למדעי הטבע
האוניברסיטה העברית בירושלים

עבודה זו מוקדשת לזכרו של אחיקם עמיחי הי"ד.



צילום: בעז לנגפורד

אחיקם התנדב ביחידה לחקר מערות באוניברסיטה העברית בשנתיים בהן נאבק לקבל הזדמנות שווה לשרת שירות משמעותי בצה"ל למרות הפטור הרפואי שניתן לו. בתקופה זאת הוא גילה ומיפה עשרות מערות בהתלהבות ובמסירות אין קץ, ביסודיות ודייקנות נדירים. תמיד חקר ובדק כל דבר לעומקו ולא היסס להטיל ספק במה שנתפס על ידי אחרים כמובן מאליו. למרות אופיו השקט והצנוע, ידע אחיקם להצחיק, להיות חברותי ולמתוח ביקורת. אחיקם ליווה אותי מיום גילוי מערת איילון בעבודת המיפוי המורכבת והקשה ובשלבי המחקר שלאחריה ותרם תרומה משמעותית לעבודה זאת.

אחיקם, בדרכו הצנועה, הפגין את אהבתו לארץ דרך אינספור טיולים בשבילים.

ביום שישי י"ט בטבת תשס"ח, 28 בדצמבר 2007, אחיקם וחברו, דוד רובין נרצחו בידי מחבלים בעת שטיילו בנחל תלם.

תקציר

המחקר הנוכחי עוסק במבנה, בהידרולוגיה ובאקולוגיה הייחודיים של מערת איילון. מטרות המחקר היו הבנת התהליכים שיצרו את המערה, הערכת השינויים המתרחשים במערכת ההידרולוגית לאורך זמן, הבנת המבנה והתפקוד הכלליים של המערכת האקולוגית ותגובתה לשינויים ההידרולוגיים. לצורך כך המערה מופתה ושורטטו חתכי רוחב והיטלים אנכיים, בוצע ניטור מתמשך של התכונות הפיסיקליות וההרכב הכימי של מי התהום, נסקרו דפוסי המסה ומשקעים משניים במערת איילון ובמערות קטנות יותר שנתגלו במחשופי מחצבת נשר רמלה והוגדרו בעלי החיים.

מערת איילון ממוקמת בשפלה הפנימית, כ- 21 ק"מ מחוף הים התיכון ובסמוך לעיר רמלה. מי התהום של אקוויפר חבורת יהודה מתאפיינים באזור זה במליחות גבוהה יותר מהמים הסובבים אותם, בתנאים מחזרים ובנוכחות סולפיד. תופעה זאת נקראה לאחרונה אנומלית איילון. מיקומה של מחצבת נשר רמלה במרכז האנומליה חשפה אנומליה קרסטית המתבטאת בחללים רבים יחסית ובעלי אופי מיוחד.

מי התהום אשר נחשפים במערת איילון מייצגים באופן בולט ביותר את אנומליית איילון. ריכוז הכלוריד במי התהום במערה הגיע ל 524 מג"ל ותכולת המומסים הכוללת הגיעה ל 1371 מג"ל. ריכוז הסולפיד במים הינו כ 5 מג"ל וטמפרטורת המים (29°C) גבוהה בכ- 5° מהטמפרטורה הממוצעת באקוויפר. לא נמדדה נוכחות של חמצן מומס במים אך קיומה של שכבת מים מחומצנת הכרחית לקיום החיים במים. מפלס מי התהום באזור ירד בכ- 13 מ' מאז שנת 1951, מהם 5.2 מ' במהלך העבודה הנוכחית. על אף ירידה זו, לא נמדדו שינויים משמעותיים בהרכב המים בתקופת העבודה ולא נמצא קשר מובהק בין תכונות המים למפלס. השוואת יחסי היונים לאלו שנמדדו בבארות אחרות באקוויפר מצביעה על ערבוב של שני גופי מים במליחויות שונות וכי מי התהום הנחשפים במערת איילון הם הקרובים ביותר למרכיב הקצה האנומלי.

המערה בנויה שתי קומות של מחילות אופקיות בעלות מאפיינים שונים. הקומה העליונה הינה רשת מחילות דמוית מבוך (network maze cave). למחילות דפנות מוחלקות ותקרתן עשירה בכיפות המסה ושרשראות כיפות המסה היוצרות פיר אנכי או תת אנכי. מורפולוגיה זו ותכונות המים מלמדים כי המים חדרו למערה דרך ארובות קרסט אנכיות וסדקים מורחבים בתחתית. הממצאים מצביעים על היוצרות המערה בתווך הפריאטי, מתחת למפלס מי התהום, תוך זרימה איטית מאד של מים ממקור עמוק אל אזור יצירת המערה.

שכבת סלע בלוי על קירות הקומה העליונה ומשקעי גבס וקלציט משניים מצביעים על תהליכי המסה בהתעבות שהתרחשו בקומה העליונה בתווך הואדוסי, לאחר ירידת מפלס מי התהום, כתוצאה מקונבקציה של אוויר בחללים. אופי המשקעים המשניים ותפוצתם אפשרו לבצע שחזור של מסלולי זרימת האוויר במערכת הקונבקציה. הסעת האוויר בתווך הואדוסי גרמה לחמצון וקירור של פני המים, סירקולציה תרמלית פנימית במי התהום ודפוסי המסה אינדיקטיביים לזרימה אנכית בגוף המים.

הקומה התחתונה של המערה מאופיינת באולמות התמוטטות רחבים ובשכבת מפולת המכסה את קרקעית האולמות והמעברים. המורפולוגיה של הקומה התחתונה מצביעה על ספלאוגנזה (התפתחות חללים) פריאטית במפלס מי התהום. עד לאחרונה, התקיימה ספלאוגנזה פעילה ברוב שטח הקומה התחתונה אך ירידת המפלס כתוצאה משאיבת מים מהאקוויפר הביאה לייבוש כמעט מוחלט של הקומה והשטח הפעיל הצטמצם לחלון צר בו עדיין נחשפים מי התהום לחלל המערה.

חשיפת מי התהום במערת איילון מאפשרת הצצה נדירה ובלתי אמצעית למערכת האקולוגית המאפיינת את מי התהום באזור. בהעדר אור שמש וללא אספקה קבועה של חומר אורגני מן החוץ, המערכת מבוססת על יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית. יצרנות זאת מתבצעת על ידי חיידקי *Beggiatoa* היוצרים מצע בקטריאלי על פני המים. על פי ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחמצן בבעלי החיים ובמצע הבקטריאלי ניתן לקבוע כי האחרון מהווה את מקור המזון למערכת. במי התהום חיים ארבעה מינים חדשים של סרטנים חסרי עיניים ופיגמנט ומותאמים לחיים בתת הקרקע (טרוגלוביטים). בסביבה היבשתית הסמוכה למי התהום חיים שני מיני פרוקי רגליים יבשתיים (קפזנבאים ודמוי עקרב), גם הם טרוגלוביטים מובהקים.

לפחות שני מינים נוספים נכחדו מן המערכת בעשורים האחרונים. הגורם להכחדה הוא, ככל הנראה, ירידת מפלס מי התהום וצמצום השטח המוצף במערה הנחוץ לקיום היצרנות הראשונית. המשך ירידת מפלס מי התהום והמשך החציבה סביב המערה המשפיעה על סביבת המערה מעמידים בסכנה מוחשית את המשך קיומם של בעלי החיים שבמערכת ובמיוחד את בעלי החיים היבשתיים.

תודותי נתונות לאנשים הרבים שאילולא הם, עבודה זאת לא הייתה.

למדריכי ומורי, פרופ' עמוס פרומקין ופרופ' חיים גבירצמן. על ההדרכה, ההכוונה, הסבלנות והחופש להתוות את הדרך.

לד"ר חנן דימנטמן וד"ר מיכאל זילברברנד אשר תרמו לי מזמנם, ידיעותיהם וכישרונם והעשירו את עבודתי, כל אחד בתחומו.

לאנשים שליוו וסייעו לפרויקט בשלביו השונים: יגאל אראל, אברהם סטרינסקי, אמיתי כץ, איתן שש, יהונתן ארז, בעז לזר וזאב איזנשטט מהאוניברסיטה העברית בירושלים. עמוס סלמון מהמכון הגיאולוגי. גבריאל ויינברגר, בני רופא, יעקב ליבשיץ וולדימיר פרידמן מהשרות ההידרולוגי. צוות המעבדה של אגף איכות מים ברשות המים ובראשם אירנה פנקרטוב. אורית סיון מאוניברסיטת בן גוריון. אליזבטה בוארטו וסטיב ויינר ממכון וייצמן למדע.

לאנשים שתרמו מזמנם, סייעו בעבודת השדה הכרוכה בעבודה בתנאים קשים ומורכבים ובמאמץ פיסי רב. מתן אביטל, רועי פורת, שחר חנן ואלי חביב, רז בן יאיר, יעל בראון, מורן לוקיץ, אילן לדל, שמוליק אבידן, אורן קולודני, בעז לנגפורד, עופר שטייניץ ובעז, אחי.

אך יותר מכל, אני חב את הישגי ליעל, אשתי, על החברות, הליווי, העידוד והתמיכה הרחבה לאורך הדרך הארוכה מהשירות הצבאי דרך הלימודים לתעודת הבגרות ועד עולם האקדמיה. ואחרונות שהן ראשונות הן שתי בנותינו רתם ושחר ששומרות שלא אפסיק לחייך ☺.

תוכן העניינים

1 רקע 1
1.1 רקע גיאולוגי 2
1.2 רקע הידרוגיאולוגי 2
1.3 רקע ספלאולוגי 6
1.3.1 קרסט היפרגני 7
1.3.2 חללים בתחום הכלוא של האקוויפר – קרסט היפוגני 7
1.3.3 תהליכי הסעת חום, המסה בהתעבות והשקעה בתווך ואדוסי בסובב היפוגני 11
1.4 רקע אקולוגי – ביולוגי 12
1.4.1 אקוסיסטמות של מערות 13
1.4.2 ייחודה של המערכת האקולוגית במערת איילון 14
2 מטרות העבודה 15
2.1 הנחות העבודה 15
3 שיטות המחקר 15
3.1 תיאור פיסי של מערכת הקרסט - מיפוי חללים קרסטיים 16
3.2 גיאוכימיה ותכונות פיסיקליות של המים 16
3.2.1 בדיקת אחידות המים באגם 16
3.2.2 דיגום מים ובדיקות מעבדה 16
3.3 מדידות באגם 19
3.4 ניתוח התוצאות 20
3.5 תיאור המערכת האקולוגית בתוך המערה 20
3.6 בדיקת ההשתרעות הגיאוגרפית של המערכת האקולוגית 21
4 תוצאות 22
4.1 מי התהום 22
4.2 מערכת הקרסט 23
4.2.1 תופעות קרסטיות במחשופי מחצבת נשר רמלה מחוץ למערת איילון 23
4.2.2 מערכת הקרסט של מערת איילון 26
4.2.3 התמוטטויות לתוך חללים קרסטיים והסטה של חללים – 'טקטונוקרסט' 42
4.3 המערכת האקולוגית 46
4.3.1 בעלי החיים במערת איילון 46
5 דיון 50
5.1 מי התהום 50
5.1.1 קשר בין מליחות למפלס 50
5.1.2 הכימיה של המים במערת איילון והקשר למי תהום אחרים באזור האנומליה 51
5.2 מערכת הקרסט 55
5.2.1 שלבים ותהליכים בהתפתחות מערכת הקרסט של מערת איילון ומערות נוספות באזור העבודה 55
5.2.2 תהליכי הסעת חום, המסה בהתעבות והשקעה בתווך הואדוסי 57
5.2.3 תהליכי הסעת חום, השקעה והמסה בתווך הפריאטי 65
5.3 המערכת האקולוגית 68
5.3.1 מקור המזון 68
5.3.2 השתרעות המערכת האקולוגית האקוואטית 69
5.3.3 בעלי החיים היבשתיים 70

5.3.4 השפעת השאיבה מהאקוויפר על המערכת האקולוגית 70
5.3.5 סכנות עתידיות למערכת האקולוגית במערת איילון 72
5.3.6 מקור הפאונה של אנומלית איילון 73
5.4 סיכום 73
6 רשימה ביבליוגרפית 75
7 נספחים 81

רשימת איורים

איור 1 חתך סטרטיגרפי מוכלל 4
איור 2 מפת מיקום של מערת איילון 4
איור 3 אגם מי התהום אשר במערת איילון 4
איור 4 מורפולוגיה המציינת זרימה איטית כלפי מעלה בתנאים כלואים האופיינית למערכות קרסט היפוגניות 10
איור 5 השתנות המפלס, הטמפרטורה וה- pH באגם שבמערת איילון 22
איור 6 חתך גיאולוגי סכימתי של האגף הצפוני של מחצבת נשר רמלה ובו מערת איילון 24
איור 7 קער סטרטיגרפי מקומי ובמרכזו פתח מערת המפולת 25
איור 8 האולם הממוטט במערת המפולת 25
איור 9 משקע קלציטי על תקרת מערה 3 ואלמוגי מערות על הדופן, מעל פתח אוורור 25
איור 10 חתך גאולוגי עמודי של טור הסלעים הנחשף במערת איילון 26
איור 11 פיר אנכי בנקודת חיבורו לקומה העליונה 30
איור 12 כיפת המסה בתקרת מחילה בקומה העליונה 30
איור 13 מחילה בקומה העליונה שבתחתיתה סדק מורחב 31
איור 14 מפגש בין מחילה בקומה העליונה לחלל ממולא בחרסיות 31
איור 15 חרסיות משוכבות בדופן פיר אנכי באזור 1 31
איור 16 סדק מורחב, מלא בחלקו בחרסיות 31
איור 17 אופק החרסית המאפיין את הקומה העליונה כפי שהוא מופיע במחשופי המחצבה בקרבת פתח המערה 32
איור 18 סימני החלקה בין לווחי החרסית באופק החרסית בקומה העליונה 32
איור 19 המסה מועדפת בקומה העליונה יוצרת הבלטה של חרסיות ומאובנים מסלע המקור 32
איור 20 הבלטה של למינות חרסית אל חלל המערה בדופן מחילה בקומה העליונה 32
איור 21 למינות חרסית, מאובני אלמוגים ומחטי גבס על רצפת מחילה בקומה העליונה 32
איור 22 הצטברות חרסיות על רצפת המחילה בקומה העליונה 32
איור 23 גבישי קלציט משניים בין לווחי חרסית 33
איור 24 גיבוש משני של קלציט בסדקים שבעדשות צור 33
איור 25 שפות קלציט בקיר מחילה בקומה העליונה 33
איור 26 התפתחות מועדפת של שפות קלציט מקיר החלל כלפי מטה 33
איור 27 התפתחות מועדפת של שפות קלציט מרצפת המחילה כלפי מעלה 33
איור 28 התפתחות "מחיצת" קלציט בדופן מחילה בקומה העליונה 33
איור 29 התפתחות שפות קלציט בדופן מחילה בקומה העליונה 34
איור 30 גיבוש קלציט מול פתח של מחילה משנית בתקרת מחילה בקומה העליונה 34
איור 31 שפות קלציט יוצרות "שרוול" המשכי לפתח משני בקיר המערה 34
איור 32 מחטי גבס על רצפת מחילה בקומה העליונה 34
איור 33 ציפוי קלציטי על גבי החצי התחתון של המחילה 34

איור 34 חתך של רצפת מחילה באזור 3..... 34
איור 35 רצועה של גיבוש קלציט על גבי שכבת הבלייה..... 35
איור 36 מפגש בין חלק עליון של מחילה לחלק תחתון של מחילה המסתעפת ממנה..... 35
איור 37 עמוד היורד מהתקרה, שני מפנים של העמוד מתאפיינים בשכבת בלייה והשלישי בציפוי קלציטי..... 35
איור 38 "עצי" קלציט על דפנות ארובה 3 העולה מאזור 5..... 35
איור 39 סלע ומאובן מוחלפים בגבס באזור 7..... 35
איור 40 "דרגשי" גבס בולטים אל חלל המחילה בחלקה התחתון..... 35
איורים 41-42 החלפת הסלע הגירי בגבס יוצרת תפיחות המבקעת את קרום הקלציט הדק אשר ציפה את הדופן..... 36
איור 43 החלפת גיר בגבס בדופן מחילה..... 36
איור 44 חרבות גבס בחלק התחתון של קיר באזור 7..... 36
איור 45 שכבה דקה של גפרית אלמנטרית על גבי דפנות מחילה באזור 7..... 36
איור 46 רפסודות קלציט על גבי סלע בקומה התחתונה בגובה 23 מ'..... 39
איור 47 כיסי המסה בתקרת מחילה בקומה התחתונה..... 39
איור 48 המסה על בסיס מישורי שיכוב בקיר מחילה בקומה התחתונה..... 39
איור 49 מקבץ של חללים (cavernous porosity) בתקרת מחילה בקומה התחתונה..... 39
איור 50 נטישת מצע בקטריאלי על גבי סלעים בשולי האגם..... 39
איור 51 שריד של מצע בקטריאלי תלוי בין שני סלעים בקומה התחתונה של מערת איילון..... 39
איור 52 עדויות למפלסים קדומים בדופן הצפון מערבית של אולם האגם..... 40
איור 53 סלע באולם האגם עליו ניכרים שקעי המסה גליים מקבילים בכיוון הנטייה של הסלע..... 40
איור 54 סימני המסה דמויי "חצי צינור" על פני פאה אנכית של סלע 40
איור 55 ציפוי שחור על גבי חלק מהסלעים מתחת פני המים בקרקעית האגם..... 40
איור 56 המסה בקו המגע בין עדשת צור לסלע הסובב בדופן פיר אנכי..... 44
איור 57 ארובת קרסט אנכית שהתפתחה על בסיס סדק ומחברת בין קומות המערה..... 44
איור 58 דופן מחילה באזור 7 (איור 2). על גבי החוואר מונחת שכבה חומה-אדומה דקה..... 44
איור 59 מסלול זרימה ואדוסי על קיר בקומה התחתונה..... 44
איור 60 תקרת מחילה מוסטת לאורך סדק בקומה העליונה..... 44
איור 61 שכבה מרוסקת בדופן מחילה בקומה העליונה..... 44
איור 62 "החלקה" על גבי מישור שיכוב בדופן מחילה..... 45
איור 63 הסטה של שרידי קיר אשר חצץ בין שתי מחילות..... 45
איור 64 הסטה של עמוד שהיה חלק מקיר שחצץ בין שתי מחילות ורובו הומס..... 45
איור 65 מחילה חסומה במפולת..... 45
איור 66 דופן של חלל עליה "נשענת" מפולת סלעים אשר ממלאת את החלל..... 45
איור 67 חיידקי *Beggiatoa* מהמצע בקטריאלי שעל פני האגם..... 49
איור 68 דמוי העקרב *Ayyalonia dimentmani* *על גב סלע סמוך לאגם*..... 49
איור 69 שלד כיטין חלול של *Akrav-israchanani* *בקומה התחתונה של מערת איילון*..... 49
איור 70 סימני נבירה על גבי שכבת טין חווארית על קרקעית המחילה באזור 12..... 49
איור 71 שריד של בקטריה חוטית תלוי מתקרת מחילה בקומה העליונה..... 49
איור 72 השתנות המפלס וריכוז הכלוריד באגם שבמערת איילון..... 51
איור 73 הקשר בין Cl ל- TDS..... 53
איור 74 הקשר בין B ל- Cl..... 53

איור 75 הקשר בין Na ו- Cl 53
איור 76 הקשר בין ריכוז הסולפאט ל- Cl 53
איור 77 הקשר בין ריכוז הבריום ל- Cl 54
איור 78 הקשר בין ריכוז ה- Sr ל- Cl 54
איור 79 הקשר בין ריכוז ה- Ca ל- Cl 54
איור 80 הקשר בין ריכוז ה- Ca ל- SO_4 54
איור 81 הקשר בין δD ל- $\delta^{18}O$ 54
איור 82 תהליכי הסעת החום בתווך הואדוסי במערות באזור העבודה 59
איור 83 שחזור מסלולי זרימת האוויר במחילה העליונה באזור 5 62
איור 84 ההרכב האיזוטופי של פחמן וחנקן בסלע המארח ובמשקעי קלציט משניים 64
איור 85 קונבקציה במי התהום 67
איור 86 יצירת ה-flutes 67
איור 87 ההרכב האיזוטופי של פחמן וחנקן בחומר אורגני ממערת איילון ומפני השטח באזור המערה 68
איור 88 מפלס מי התהום בקידוח איילון 1 בשנים 1955-2006 71
איור 89 מפוי השטח המוצף בקומה התחתונה של מערת איילון 72

רשימת נספחים

נספח 1. מפות וחתכים של מערות במחשופי מחצבת נשר רמלה
נספח 1.1 מערת הקריסה 82
נספח 1.2 מערת המים 83
נספח 1.3 מערת הסדק 84
נספח 2. מפות מערת איילון
נספח 2.1 מפת מערת איילון 85
נספח 2.2 מפת מיקומי ההיטלים וחתכי הרוחב 86
נספח 2.3 מפת אזורים ונקודות עניין 87
נספח 3. היטלים אנכיים מייצגים של מערת איילון 88-90
נספח 4. היטלים אנכיים פרוסים של מחילות נבחרות במערת איילון 91-94
נספח 5. חתכי רוחב של מחילות 95-97
נספח 6. טבלאות
טבלה 6.1 ההרכב הכימי של מי תהום באגם במערת איילון, יונים ראשיים 98
טבלה 6.2 ההרכב הכימי של מי תהום באגם במערת איילון, יסודות קורט 98
טבלה 6.3 ההרכב הכימי של מי טפטוף במערת איילון, יונים ראשיים 99
טבלה 6.4 ההרכב הכימי של מי טפטוף במערת איילון, יסודות קורט 99
טבלה 6.5 יחסים כימיים וערכים איזוטופיים במי מערת איילון 99
טבלה 6.6 מדידות שדה שבוצעו במימי אגם במערת איילון 100
טבלה 6.7 טמפרטורה ולחות יחסית באוויר בפתחי מובילים קרסטיים 100
טבלה 6.8 ההרכב האיזוטופי של גפרית וחמצן בסולפאט 100
טבלה 6.9 ההרכב האיזוטופי של פחמן וחמצן בסלע המקור ובמשקעי קלציט משניים 100
טבלה 6.10 ההרכב האיזוטופי של פחמן וחנקן בחומר אורגני במערת איילון ובסביבתה 101

1 רקע

בשנת 2006 התגלתה במחצבת נשר רמלה מערת איילון, שהיא המערה השלישית בגודלה בארץ, ומהווה מוקד למחקר הנוכחי. בסקירה ראשונית נמצאה במערה מערכת אקולוגית ייחודית הנתמכת על יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית וכוללת שישה מינים חדשים של פרוקי רגליים ושרידים של שני מינים נוספים. המערה מאפשרת גישה בלתי אמצעית אל אקוויפר ירקון-תנינים ומהווה חלון הצצה מיוחד במינו אל מערכת הקרסט ואל המערכת האקולוגית המאפיינים אזור זה של האקוויפר. אקוויפר ירקון-תנינים הוא אחד משלושת מקורות המים החשובים של מדינת ישראל ולכן יש חשיבות רבה להבנה והכרת תכונותיו.

אזור המחקר מצוי בשפלה הפנימית, ליד עמק איילון, כ- 21 ק"מ מחוף הים התיכון ובסמוך לעיר רמלה. אזור המחקר ממוקם במרכז "אנומליית איילון" (Frumkin and Gvirtzman, 2006), סמוך לקידוח "איילון 1". במקום פועלת מחצבת נשר רמלה. במחצבה זאת מתבצעת כרייה פתוחה של סלע גיר קירטוני המשמש כחומר הגלם העיקרי לייצור מלט במפעל נשר רמלה הסמוך. המחצבה יוצרת בור אליפטי בגודל 600X1300 מ', בעומק של עד 100 מ' מתחת לפני השטח שהיו קיימים במקום בתנאים טבעיים, לפני תחילת החציבה.

בדצמבר 1997, עסק כלי הנדסי כבד של חברת נשר בחציבה מעל חלל שגובהו היה כ- 40 מ'. כתוצאה מהחציבה, תקרת החלל הלכה והידקקה עד שהתמוטטה. הדחפור צנח אל תחתית המערה ומפעילו מר חסון פארס ז"ל נהרג. בעקבות אירוע זה בוצעו במחצבה מספר סקרים בהזמנת חברת נשר, במטרה לצמצם את הסיכון שבחציבה. על פי ההמלצות שהתקבלו, החלה חברת נשר לבצע קידוחי סקר צפופים במטרה לזהות חללים מסוכנים ולפוצצם מבעוד מועד. תוצאה נוספת של התאונה הייתה גילוי מערת איילון. מאמץ מרוכז הושקע בחקר המערה ובשימורה לדורות הבאים.

המערה התגלתה ב 24 באפריל 2006 במהלך סקר חללים קרסטיים על ידי צוות היחידה לחקר מערות זמן קצר לאחר שאחת ממחילותיה נחתכה במהלך הכרייה במחצבה (נ"צ הפתח 193395x646334 ברשת ישראל החדשה). המערה משתרעת בתוך תא שטח שממדיו 140X100 מ' בגבהים שבין 50-11 מ' מעל פני הים (110-70 מ' מתחת לפני השטח בתנאים טבעיים). אורך מחילותיה כ-2700 מ' בשתי קומות אופקיות עיקריות המחוברות ביניהן בארובות קרסטיות אנכיות. הפתח המלאכותי של המערה נאטם מחדש בדלת זמן קצר לאחר גילוייה, על מנת לשמור על התנאים הטבעיים בתוכה.

לימוד המערה מחייב התייחסות ושילוב כמה גישות מדעיות ובתחומי עניין שונים. להלן יוצג רקע בתחומים הבאים: גיאולוגיה, הידרולוגיה, ספלאולוגיה, ביולוגיה ואקולוגיה של מערות.

1.1 רקע גיאולוגי

באזור המחקר חשופים בחלק מפני השטח סלעים מחבורת הר הצופים, ומתחתם בעומק רדוד (<40m) תצורת בע'נה השייכת לחבורת יהודה, בה מצויה המערה. מאות מ' מערבית למערה נוחתות יחידות אלו מתחת שכבות קינוזואיות המהוות חלק ממישור החוף.

סלעי חבורת יהודה בנויים בעיקרם מסלעים קרבונטיים מגיל אלביאן עד טורון בעובי כולל של 550-800 מ' (איור1). חלקה התחתון של החבורה, תצורות כפירה עד בית מאיר, בנוי בעיקר משכבות דולומיט עם אופקי חוואר דקים החוצצים ביניהם. תצורת מוצא היא חווארית בעיקרה, ומעליה תצורות עמינדב, כפר שאול וורדים המורכבות דולומיט מסיבי וגיר. בגג החבורה נמצאת תצורת בע'נה מגיל טורון אשר מורכבת באזור העבודה מגיר קירטוני, שבתוכו כמה אופקים קלסטיים דקים, שכבת קוורצוליט ומספר שכבות צור. סלעים אלה עברו קבורה, קומפקציה ודיאגנזה תחת מאות מטרים, לפחות, של סלעים מגיל סנון עד טרציאר.

גידוע אירוסיבי המושפע מן המבנה האנטיקלינלי של הרי יהודה הביא לחשיפה של רובדי הסלע היותר עמוקים של חבורת יהודה בקרבת צירי הקמרים חברון ורמאללה (Picard, 1943). בשוליים המערביים של הקמרים נחשף החלק העליון של חבורת יהודה. במעבר מן ההר לשפלה נוחתות שכבות הסלע של חבורת יהודה בתלילות ונקברות מתחת לחבורת הר הצופים ותצורות צעירות יותר. קמר משני המסתעף מקמר רמאללה לכיוון דרום מערב ונוחת אל אזור העבודה אפשר חשיפה של חבורת הר הצופים ואף חשיפה חלקית של תצורת בע'נה. בתוך מחצבת נשר רמלה נחשף חתך עבה (עד 90 מ') מתצורת בע'נה ומעליה חתך דק ולא רציף מתצורת עין זיתים. השכבות באזור העבודה אופקיות בקירוב, עם דפורמציות שכיחות.

הקמר המשני המאפיין את אזור העבודה תחום בשני קווי שבר מקבילים למבנה בשני צידיו (בכיוון כללי צפון מזרח - דרום מערב) וביניהם קווי שבר משניים בכיוונים כלליים צפון - דרום וצפון מערב - דרום מזרח (מפה הסטרוקטוראלית Klang and Gvirtzman (1988). פרומקין וארזי (1999) הצביעו על כך שצפיפות החללים הקרסטיים באתר המחצבה גדולה בסדר גודל מזו שבמחשופים טורוניים מרוחקים מהאתר וכן על שכיחות גבוהה יחסית של חללים גדולים מ- 5 מ'. בין התופעות שנצפו במחצבת נשר רמלה בולטת הופעת קערים קארסטיים שנוצרו במהלך שקיעה הדרגתית של שכבות הסלע כתוצאה מהמסה מתחת לשכבות אלה וקריסות שנוצרו בהתמוטטויות לתוך חללים גדולים, אם באופן הדרגתי תוך כדי התפתחות החלל ואם באופן פתאומי כאשר תקרת החלל מגיעה לנקודת כשל.

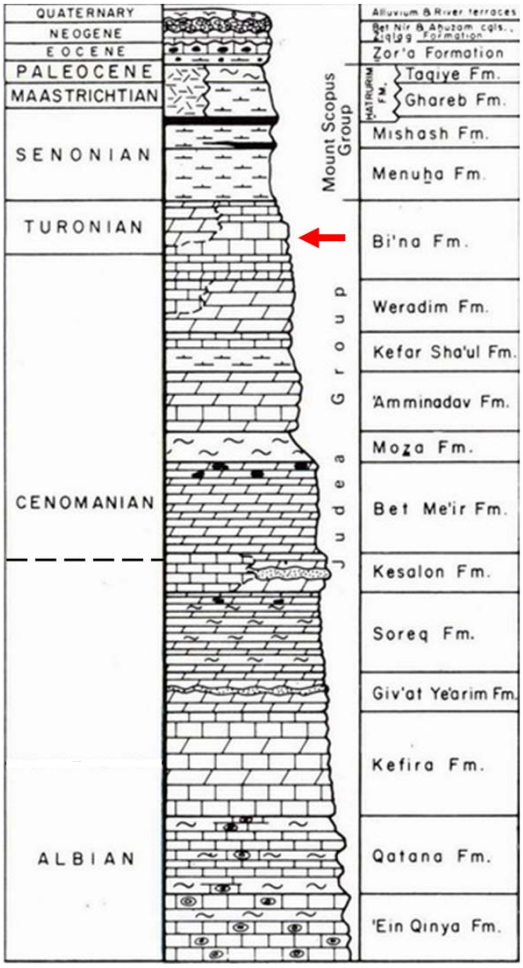
1.2 רקע הידרוגיאולוגי

אקוויפר ירקון תנינים (ירת"ן), האגן המערבי של אקוויפר חבורת יהודה (אקוויפר ההר), הוא המקור המשמעותי ביותר של מי תהום שפירים בישראל (גבירצמן, 2002); ההפקה השנתית ממנו מסתכמת בכ-400 מלמ"ק בממוצע. אזורי המילוי החוזר של האקוויפר נמצאים לאורך האגף המערבי של שדרת ההר ואילו עיקר ההפקה מתבצע בשפלה, באזור בו האקוויפר כלוא ברובו על ידי תצורת עין זיתים

שבבסיס חבורת הר הצופים. הדעה הרווחת היום היא, שתצורות מוצא ובית מאיר מגיל קנומן, העשירות בחוואר, מחלקות את האקוויפר לשני תתי אקוויפרים – עליון ותחתון, כאשר תת האקוויפר התחתון מאופיין בעומד גבוה יותר (בורג וחוב', 2001) ובזרימת מים מהירה יותר (גוטמן וחוב' 2001). מידת ההפרדה בין שני תתי האקוויפרים ורציפותה המרחבית עדיין אינן ברורות דיין. התרוממות סטרוקטורלית באזור קידוחי כפר אוריה ואיילון יוצרת תנאים מקומיים של אקוויפר פריאטי / מקורה (בורג וחוב', 2001). בתחילת שנות ה-50 של המאה העשרים מפלס המים באקוויפר היה 24-26 מ' מעל פני הים באזור קידוחי איילון ומוצא המים היה במעיינות הירקון. בעשורים האחרונים, בעקבות שאיבה אינטנסיבית של מי האקוויפר, ירד מפלס מי התהום באקוויפר באופן ניכר אל מתחת לקו האדום (נמוך מ-12 מ' מעל פני הים בקידוחי איילון בסוף 2010).

תולכת אקוויפר ההר היא גבוהה בגלל המערכת הקרסטית המפותחת. בשנים גשומות נוצר באזור קידוחי איילון קו פרשת מים הידרולוגי, המבדיל בין זרימות דרומה לבין זרימות צפונה באגן ירת"ן בשפלה (Frumkin and Gvirtzman, 2006).

קידוחי איילון אשר חודרים לתת-האקוויפר העליון של אקוויפר ירקון תנינים מצטיינים במליחויות מי תהום חריגות, נוכחות של H_2S ובטמפרטורות גבוהות (עד כ-30 מעלות) ביחס לטמפרטורת האוויר. תופעה זו, של המצאות מים חמים, מליחים ונושאי H_2S במרכז האקוויפר התגלתה כבר בשנת 1932 בקידוחי בן שמן ודיר טריף (בית עריף היום) ובשנת 1934 בבני עטרות (Goldschmidt, 1935) ולאחרונה קיבלה את השם אנומליית איילון (Frumkin and Gvirtzman, 2006). Kroitoru (1987) תיאר שינוי ריכוזי יונים ראשיים, איזוטופים (כולל איזוטופי פחמן), טמפרטורות, גילי המים ותנאי חמצון-חיזור לאורך חתך בכיוון מערב–מזרח שעבר דרך האנומליה. לאחרונה, במסגרת סקר כימיית מים באקוויפר ירת"ן (זילברברנד וחוב., 2006) התקבל אפיון גיאוכימי מלא של האנומליה על סמך יונים ראשיים, יסודות קורט, איזוטופים וגזים מומסים. האנומליה מתבטאת במליחות גבוהה, עד 550 מגכ"ל (יחסית ל 50-100 מגכ"ל במי ירת"ן סביב האנומליה), תכולת מלחים כללית (TDS) של עד למעלה מ 1,300 מג"ל וערך הגבה (pH) שיורד עד 6.4-7 (כ-6.8 בממוצע) לעומת 7.1-7.4 (כ-7.3 בממוצע) דרומית מהאנומאליה ו-6.5-7.6 (כ-7 בממוצע) צפונית ממנה. המים האנומליים מתאפיינים גם בתנאים מחזרים ובהופעת סולפיד (H_2S) מומס במים בריכוז של עד מספר ppm וכן, בריכוזים מוגדלים של Na, Sr, K, Br, F, SO_4, Li, B, Al, Mn, Rb, Sb , ערכים נמוכים של U, Tl ויחס $^{87}Sr/^{86}Sr$.



איור 1. חתך סטרטיגרפי מוכלל, מבוסס על ארקין 1976. מיקום מערת איילון מסומן בחץ אדום. המעבר אלביאן-קנומן סומן על פי Fleischer, (2002).



איור 2. מפת מיקום של מערת איילון. גבולות האקוויפר בעקבות דפני (2009).



איור 3. אגם מי התהום אשר במערת איילון (יולי 2006).

על אף העובדה שהאנומליה מוכרת מזה שבעה עשורים, הגורמים להיווצרותה עדיין נתונים לוויכוח. בעבר, הדעה הרווחת הייתה שהגורם לאנומליה הוא מקור עליון כלומר, תסנינים המגיעים אל האקוויפר עם חלחול מים משכבות שמעל האקוויפר (בורג וחוב', 2001 ; Avisar et al, 2003). כץ (2001) הציע שההמלחה באזור זה ובחלקים נוספים של האקוויפר נגרמת ע"י ערבוב ברמות שונות של מי המילוי החוזר המזינים אזורים אלו עם מים מלוחים Ca - כלורידים, שמקורם בתמלחות קדומות ושלל את הקשר למרכיב הקירטוני בסלע שמעל האקוויפר. לדעת Frumkin and Gvirtzman (2006), מקור האנומליה הוא מערכת קרסטית ארטזית גאותרמלית המעלה תמלחת חמה ומחוזרת, המכילה סולפיד, מתת האקוויפר התחתון אל החלק העליון של אקוויפר ירת"ן. דעה זו מתבססת על כך שטמפרטורת המים האנומליים מגיעה ל 30°C לעומת טמפרטורה ממוצעת באקוויפר של 26°C וישנו מתאם ישר בין טמפרטורת המים לפרמטרים האחרים המבטאים את האנומליה, וכן על כך שבתוך האנומליה ישנה שונות מרחבית גבוהה ביותר וישנן נקודות חמות (hot spots) בהן נמצאים המים האנומלים ביותר (Frumkin and Gvirtzman, 2006).

כץ (2001) וכן Frumkin and Gvirtzman (2006) הסכימו שהמליחות הנצפית באזור היא תוצאה של ערבוב ברמות שונות בין שני מרכיבי קצה. אחד, מי האקוויפר השפירים ושני של מים מלוחים. האחרונים הציעו שעליית המים מתת האקוויפר התחתון מתקיימת עקב הפרש עומדים בין שני תתי האקוויפרים לטובת תת האקוויפר התחתון. עדות לזרימת מים כלפי מעלה בתת האקוויפר התחתון נצפתה בקידוח אחיסמך 1 (גבירצמן, 2002). זילברברנד וחוב' (2006) העלו את האפשרות שמקור המים המלוחים הוא באקוויפר עמוק יותר מאקוויפר חבורת יהודה וזאת בתנאי שזרימת המים כלפי מעלה מתקיימת במעברים (מובילים קרסטיים או סדקים אנכיים) מבודדים יחסית, שכן, בקידוחים סמוכים לאזור איילון, אשר חודרים לתת האקוויפר התחתון, לא נמצאו מים מלוחים.

דפני וחוב' (2008) הציעו שכניסת המים המלוחים לאקוויפר מתרחשת באופן נקודתי יחסית בדרום האנומליה ומשם המומסים מתפשטים כפלומה עם כיוון זרימת המים השכיח באקוויפר (כיוון כללי-צפונה). אם כי, בסימולציה אשר בוצעה על ידם, ניכרת גם התפשטות של כתם המליחות כלפי דרום.

Frumkin and Gvirtzman (2006) הצביעו על קשר אפשרי בין האנומליה הקרסטית (ריבוי החללים שהתגלו במחצבה) לאנומליית איילון, ועל האפשרות שהחללים הנחשפים באתר נוצרו בתנאים פריאטיים תוך זרימת מים ממקור תחתון. הם הציעו מספר מנגנוני המסה אפשריים להתפתחות החללים: חמצון סולפיד, התקררות מים תרמליים וערבוב בין שתי תמיסות בעלות ריכוזים שונים של H_2S, CO_2, או של מלחים מומסים.

היחידה לחקר מערות באוניברסיטה העברית גילתה בשנת 2006 בקרבת קידוחי איילון שבמרכז האנומליה (במחצבת נשר) את מערת איילון (איורים 1, 2) בה ניתן היה לראשונה להגיע באופן פיסי לחלק העליון של אקוויפר ירקון תנינים אשר נחשף בתחתית המערה כאגם שעומקו היה כ- 5.5 מ' ושטח פני המים היה כ- 460 מ"ר ב-2006 (איור 3, נספח 2.1).

מי האגם עשירים ב- H_2S. סולפיד במי תהום נוצר בדרך כלל בתהליך של חיזור סולפאט דסימילטורי על ידי חיידקים מחזרי סולפאט (תגובה 1). ישנם שני תנאים הכרחיים לקיום תהליך זה, חוסר חמצן וזמינות של חומר אורגני. החומר האורגני הוא הדלק המניע את חיזור הסולפאט. בתהליך חיזור בקטריאלי של סולפאט, האיזוטופ הקל של הגופרית ^{32}S מועדף במטבוליזם הבקטריאלי ולכן הסולפיד הנוצר מועשר ב- ^{32}S והסולפאט הנותר מועשר ב- ^{34}S. בתנאים טבעיים נצפו פרקציונציות של 4 - 46‰ בין סולפאט לסולפיד (Nriagu et al, 1991). כתוצאה מכך, ההרכב האיזוטופי של סולפיד וסולפאט הינו אינדיקטור רגיש לשינויים סביבתיים (Hurtgen et al, 2002).

$$2CH_2O + SO_4^{2-} \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$$ תגובה 1.

בנוסף לאפקט האיזוטופי הנצפה בגפרית, בזמן חיזור סולפאט בקטריאלי נצפה גם שינוי בהרכב האיזוטופי של חמצן בסולפאט. השינוי ב- $\delta^{18}O_{sulfate}$ במהלך חיזור הסולפאט תלוי בהרכב האיזוטופי של החמצן במים, בטמפרטורה, בריכוז הסולפאט ובגורמים נוספים. בתנאים סביבתיים (טמפרטורה, pH) שאינם יוצאים מגדר הרגיל, אין שיחלוף חמצן בין סולפאט למים (Zak et al, 1980). לכן, שינויים ב- $\delta^{18}O_{sulfate}$ בתנאים חסרי חמצן בהכרח מעידים על תהליך ביוגני (Blake et al, 2006).

לשיטתם של בורג וחוב' 2001, ישנה אספקה קבוע של חומר אורגני אל תת האקוויפר העליון של אקוויפר ירת"ן מסלעי הביטומן שמעל. החמצן המומס במים נצרך עד תום כתוצאה מחמצון החומר האורגני, ובהעדר חמצן מתבצע חיזור הסולפאט. לשיטתם של Frumkin and Gvirtzman, 2006, הסולפיד מגיע עם המים המלוחים האחראים על המלחת המים באזור, ויתכן שסולפיד זה נוצר זמן רב לפני עליית המים המלוחים אל תת האקוויפר העליון של אקוויפר ירת"ן. מכאן, שהבנת המחזורים הביוגאוכימיים של גפרית ופחמן במערה תוכל, אולי, לשפוך אור על מקור ההמלחה באזור.

1.3 רקע ספלאולוגי

כיום, מוכרים שני תנאי בסיס גנטיים להתפתחות מערות בהמסה של סלע קומפקטי שעבר קבורה (Klimchouk et al, 2000; Ford, 2006; Klimchouk, 2009):

1. קרסט היפרגני\אפיגני, קרסט הנוצר באזורים בהם מתרחשת חדירת מים אל אזור יצירת המערה מפני השטח שמעל.

2. קרסט היפוגני, בעיקר כלוא (confined), שבו מים חודרים אל אזור יצירת המערה מלמטה.

בעבר, מרבית תשומת הלב של המחקר הספלאולוגי הופנתה לקרסט ההיפרגני. הרעיון שמערות יכולות להיווצר בעומק על ידי זרימה עולה של מים תרמלים מוכר כבר מאמצע המאה ה-19 ועם זאת, מרבית המודלים והתפיסות הנוגעים ליצירת חללים קרסטיים התייחסו לחדירת מים מפני השטח הסמוכים. מאז שנות ה-80 של המאה ה-20 הולכת וגוברת ההכרה בחשיבות המעשית והמדעית של הקרסט ההיפוגני וכן ההכרה בכך שהתופעה רחבה הרבה יותר ממה שחשבו בעבר.

1.3.1 קרסט היפרגני

הקרסט ההיפרגני נוצר בדרך כלל במערכות זרימה מקומיות או במסלול המילוי החוזר של מערכות זרימה גדולות יותר. אגרסיביות המים ביחס לסלעים הקרבונטיים בקרסט ההיפרגני נוצרת בעיקר בשכבת הקרקע. את החללים הנוצרים במערכות הקרסט ההיפרגניות ניתן לחלק לפי סביבת היווצרותם: חללים ואדוסיים וחללים פריאטיים הנוצרים בפני מי התהום.

החללים הואדוסיים נוצרים תוך זרימה גרביטטיבית של מים המחלחלים באזורי המילוי (recharge zone) (זרימה ואדוסית). מערות אלה מתפתחות בדרך כלל על בסיס סדקים אנכיים או משופעים. המים הזורמים כלפי מטה ממיסים בדרכם את הסדק ההתחלתי עד קבלת חללים אנכיים – קמינים (פרומקין, 1984 א). בחללים אלה הזרימה מתרחשת בדרך כלל בצורת פילם וניתן לאתר את מסלולי הזרימה. צורה נוספת של חללים ואדוסיים היא של צינורות קרסטיים לטרליים תת-אופקיים או משופעים, צורה זאת נפוצה ביחידות סלע קרסטיות בהן השיכוב הינו דומיננטי ושולט על כיוון הזרימה ויחידת הסלע הקרסטי הינה דקה ומונחת בסמיכות ליחידות שאינן קרסטיות. מנגנון ההמסה העיקרי הפועל ביצירת חללים ואדוסיים הינו המסה על ידי חומצה פחמתית הנוצרת על ידי פחמן דו חמצני שעיקרו מומס במים בעת החלחול בקרקע (תגובות 2, 3).

$$H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$$ תגובה 2.

$$H_2CO_3 + CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$ תגובה 3.

חללים פריאטיים שכיחים הם מערות אולם שקוטרן נע בין מטרים בודדים למאות מטרים. Frumkin and Fischhendler (2005) הראו שהגאומטריה של החללים, דוגמת יחס אורך כללי (L) לרום ממוצע של מערה (W) היא מדד טוב לאפיון סביבת ההיווצרות של המערה. מערות אולם מתאפיינות ביחס אורך לרוחב קטן (L/W<20) ובמפולות רבות עקב מימדיהן. מערות אלה נוצרות בדרך כלל באזור המפגש בין מי התהום למים המגיעים אליהם בזרימה ואדוסית. במקרה כזה למערה יהיה קשר הידרולוגי טוב עם פני השטח כדוגמת קמינים הנמשכים כלפי מעלה מתוך החלל. במקומות בהם לא התרחשה התמוטטות או השקעת ספלאותמים ניתן להבחין במורפולוגיה פריאטית של דפנות ותקרת המערה, כגון דופן מוחלקת עם כיסי המסה מעוגלים. את חידוש האגרסיביות של המים ביחס לסלע הקרבונטי, לעיתים במרחק רב מפני השטח, נהוג לייחס לערבוב המתרחש באזור יצירת המערה בין מי התהום למי המילוי החוזר המגיעים ממעל.

1.3.2 חללים בתחום הכלוא של האקוויפר – קרסט היפוגני

בקרסט היפוגני מים זורמים דרך אזור יצירת המערה מלמטה כלפי מעלה, מונעים על ידי לחץ הידרוסטטי או מנגנון אחר, ללא תלות במילוי החוזר בפני השטח שמעל המערה. הקרסט ההיפוגני קשור בפריקה (discharge) של מערכות זרימה בקנה מידה בינוני או אזורי, אך גם ערבוב עם מערכות מקומיות הינו דבר שכיח. הגדרה זאת אינה מתייחסת למנגנון המסה מסוים, לסוג מערות או ליתולוגיה

ספציפיים או לעומק בו נוצרה המערה אלא למנגנון הידרוגיאולוגי, למקור התחתון של המים היוצרים את המערה. כאשר מערות היפוגניות מורמות ומתקרבות אל פני השטח בעקבות דנודציה או מנגנון אחר ומאבדות את התנאים הכלואים אך עדיין מקבלות אספקת מים ממקור תחתון, זו עדיין ספלאוגנזה היפוגנית. ספלאוגנזה היפוגנית בתנאים לא כלואים יכולה להיחשב לשלב ההכחדה של הספלאוגנזה ההיפוגנית (Klimchouk, 2007, 2009).

אקוויפר רב שכבתי כולל שכבות הטרוגניות ברמת המוליכות ההידראולית וברמת המסיסות של הסלע. התפתחות של קרסט היפוגני תלויה ביכולת הסלע להעביר זרימה חוצת שכבות (transverse speleogenesis (Klimchouk, 2007). זרימת המים דרך אזור יצירת המערה מתרחשת דרך השכבות שמעל ומתחת וקצב הזרימה נקבע אם כן, על פי השכבה בעלת המוליכות ההידראולית הנמוכה יותר או תנאי הסף של מערכת הזרימה. מכאן שבספלאוגנזה היפוגנית ישנה בקרה הידרולוגית חיצונית על הזרימה באזור יצירת המערה, דבר המדכא את ה"תחרות הספלאולוגית" ואת "המשוב החיובי של זרימה-המסה", שני המנגנונים העיקריים הפועלים בספלאוגנזה לא כלואה (היפרגנית). זרימה בתנאים כלואים תהיה איטית, בדרך כלל. לאחר יצירת החללים הראשוניים תתרחש בחללים (במקביל למגמת הזרימה הכללית) זרימה אנכית המונעת על ידי הבדלי צפיפות של חלקים שונים בגוף המים. לכן דפוסי המסה של זרימה קונבקטיבית (כגון כיפות המסה) שכיחים במערכות הקרסט ההיפוגניות (Klimchouk, 2007, 2009).

1.3.2.1 דפוסי המסה הנוצרים על ידי ספלאוגנזה היפוגנית

מערות היפוגניות הן בדרך כלל מערות בעלות מבנה מורכב מזה של מערות היפרגניות. הגורמים לכך הם חוסר הומוגניות ליתולוגית, אנכית ולטרלית, של האקוויפר אפילו בתוך אותה יחידה גיאולוגית (כגון גודל גרגר, מינרלוגיה, טקסטורה, תנאים סטרוקטורלים וכן גודל, צורה ופיזור של הנקבובים המשפיעים על התכונות ההידראוליות של המטריקס); מנגנונים המעודדים התפתחות מסועפת של חללים רבים (כגון "transverse speleogenesis" (Klimchouk, 2007) או " thermal coupling between fluid and rock" (Andre and Rajaram 2005)); אי התאמה לתרלית בין אזור כניסת המים למערכת למקום יציאת המים. מורכבות זאת באה לידי ביטוי בריבוי סוגי החללים הבסיסיים המרכיבים את המערכת ההיפוגנית ובמבנה המורכב במרחב התלת מימדי.

סוגי החללים העיקריים המאפיינים את הקרסט ההיפוגני הם:

מחילות מבודדות

המסה ספוגית (spongework / spongework maze)

מקבצים של חללים (zones of cavernous porosity)

מבוך דמוי רשת

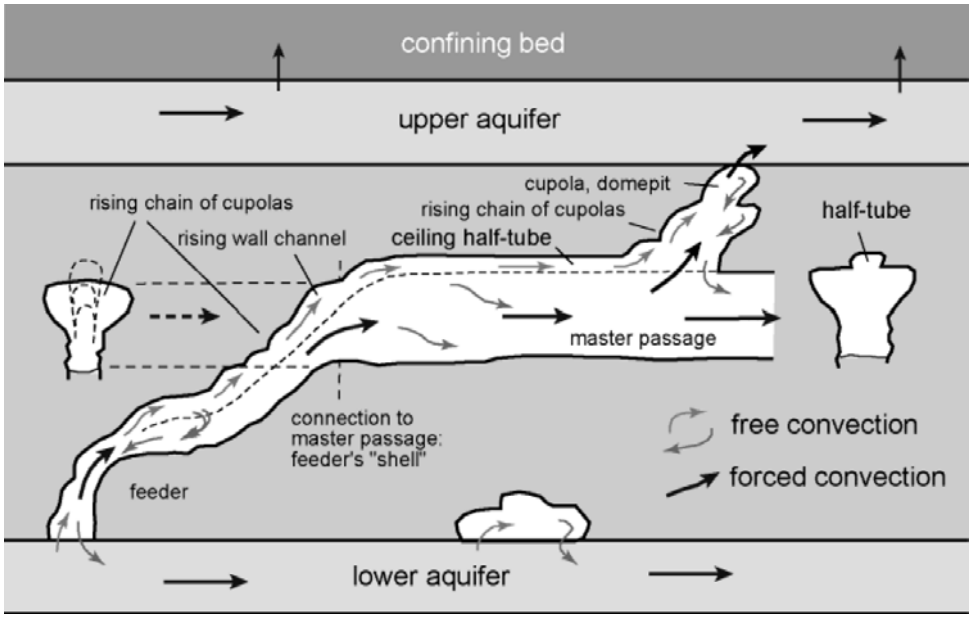
חריצי הזנה

ארובות קרסט

מחילות מבודדות יופיעו פעמים רבות במקבצים של מחילות מקבילות או מצטלבות. מקבצים של חללים קשורים בהמסה הנוצרת מערבוב בין מרכיב זרימה עמוק עם מרכיב רדוד. מבוכים דמויי רשת נוצרים בדרך כלל במקביל לסטרטיגרפיה ומהווים לעיתים חלק ממערכת רבת קומות, לעיתים 5-6, המחוברות בניהן במעברים אנכיים. חריצי הזנה, ארובות קרסט ומעברים אנכיים ותת אנכיים בדרך כלל מזינים את המערה ההיפוגנית ממערכות היפוגניות עמוקות, כאשר בסיס הארובות לרוב אינו נגיש. חללים גדולים ומבודדים נוצרים בדרך כלל בבסיס היחידה המסיסה במעורבות של מערכות הידרותרמליות עמוקות ועיקר ההמסה בהם נוצרת תוך קונבקציה חופשית. (Klimchouk, 2007, 2009; Hill, 2000A; Audra et al, 2009; Osborne, 2007).

Brik et al (2003, 2005) ביצעו מודלים נומריים בניסיון לדמות את התנאים בהם התפתחו מערות הגבס הגדולות במערב אוקראינה באקוויפר רב שכבתי בתנאים ארטזיים עם מנגנון של המסת גבס. המודל דימה גם את הזרימות הדיפוסיביות ואת הרחבת הצינורות הקרסטיים במהלך ההמסה. תוצאות המודל הראו שיש העדפה להיווצרות מערות מבוך היכן שיש הטרוגניות ברמת המוליכות ההידראולית האנכית של מערכות הסידוק. בנוסף להעדפות סטרוקטורליות, גם שינויים בתנאי הסף עם הזמן, כגון הגדלת הגרדיאנט ההידראולי דרך אזור יצירת המערה אל השכבה הבלתי מסיסה שמעל האיצו את התפתחות דפוסי המבוך.

מערות היפוגניות יכולות להיווצר על ידי מנגנוני המסה שונים ובתנאים גיאולוגים וסטרוקטורלים שונים ולכן הן יכולות להכיל דפוסים שונים. למרות השונות המיקרומורפולוגית, המבנה המזומורפולוגי של המערות ההיפוגניות בולט באחידותו, מבנה המציין זרימה איטית כלפי מעלה בתנאים כלואים. דפוסים ספציפיים, כגון כיסי המסה כיפתיים, יכולים להופיע גם בחלקים פריאטיים של מערכות היפרגניות, וגם באתרי המסה על ידי התעבות במערות ואדוסיות. המיוחד למערכות ההיפוגניות זה הארגון המרחבי של המבנים השונים לאורך מסלול הזרימה של הנוזל: מובילים קרסטיים אנכיים או תת אנכיים המהווים את מסלול כניסת המים למערכת (feedres), דפוסים המאפיינים את תנועת המים במערכת ודפוסי מוצא של המים מהמערכת. השילוב בין שלושה מרכיבים אלה הוא אופייני וייחודי לקרסט ההיפוגני. איור 4 מתאר באופן סכימטי מורפולוגיה אופיינית למקטע של קרסט היפוגני, שמופיעה במערות היפוגניות ברחבי העולם, ולעיתים חוזרת על עצמה פעמים רבות במערכת בודדת (Hill, 2000B; Klimchouk, 2007, 2009; Audra et al, 2009).



איור 4. מורפולוגיה המציינת זרימה איטית כלפי מעלה בתנאים כלואים האופיינית למערכות קרסט היפוגניות. מתוך Klimchouk (2007), עמ' 36.

מנגנוני ההמסה הבולטים בקרסט ההיפוגני הם: קירור מים תרמליים, ערבוב של שני גופי מים, וחמצון סולפיד. תגובה 4 מציגה את חימצון הסולפיד לחומצה גופרתית:

$$H_2S_{(aq)} + 2O_{2(aq)} \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$$ תגובה 4.

תגובה 5 את המסת הגיר המתרחשת כתוצאה מכך:

$$2H^+ + CaCO_{3(s)} \rightarrow Ca^{2+}{}_{(aq)} + CO_{2(aq)} + H_2O$$ תגובה 5.

כאשר מפלס מי התהום מתייצב בתוך מערכת מערות שהייתה היפוגנית כלואה, עשויה להתרחש התרחבות משמעותית ואיחוד של המעברים לחדרים גדולים עם דפוסים ספלאוגנים כגון גומחות אופקיות ושולחנות המסה. במקרים של מערכת בסלע קרבונטי הממשיכה לקבל הזנה של מים סולפידיים ממקור עמוק בתנאים לא כלואים, יתכנו תופעות של המסה בהתעבות בתווך הקרוב למפלס מי התהום. לעיתים, קשה להבחין בין דפוסי המסה של מערכת היפוגנית לאלה של המסה בהתעבות (Klimchouk, 2009) (ראה פרק 1.3.3).

1.3.2.2 תוצרי לוואי ספלאוגנטיים

גבס הוא תוצר הלוואי הנפוץ ביותר המתקבל מהתגובה בין חומצה גופרתית (H_2SO_4) לסלע קרבונטי והוא נפוץ במערכות הקרסט ההיפוגניות מגבישים בודדים ועד בלוקים שעוביים מגיע ל 10 מ' (מערת לצ'גייה, ניו מקסיקו (Hill, 1987)). Polyak and Provencio, (2001) אפיינו את המינרלים שבמערות לצ'גייה, קרלסבד ומערות נוספות בהרי גואדלופ בניו מקסיקו ומצאו מאסף מגוון של תוצרי לוואי שנוצרו במהלך הספלאוגנזה הגופרתית. הסלע המארח במערות אלו כלל את המינרלים העיקריים קלציט ודולומיט ולעיתים גם קוורץ, איליט (illite), דיקיט (dickite), קאוליניט (kaolinite) סמכטיט

(smectite), מונטמורילוניט, קרנדליט-בודניט (crandallite-beudanite group) ומיקה. את תוצרי הלוואי הם חילקו לתוצרי לוואי ספלאוגנים ראשוניים, שנוצרו ישירות מהתגובה בין החומצה הגופרתית לסלע המארח ולתוצרי לוואי ספלאוגנטים משניים, מינרלים ומינרלים אמורפיים שנוצרו ע"י אלטרציה של תוצרי הלוואי הספלאוגנים הראשוניים או ע"י רה-מוביליזציה מאוחרת של אלמנטים שרוכזו במהלך הספלאוגנזה. הקבוצה הראשונה של תוצרי הלוואי כללה גבס, גופרית אלמנטארית, הידרטים של הלויסיט (hydrated halloysite), אלוניט (alunite), נטרואלוניט (natrualunite), ג'רוזיט (jarosite), הידרו-בסלומיניט (hydrobasaluminite), קוורץ, טודורוקיט (todorokite), רנציאיט (rancieite), סיליקה אמורפית ועוד. הקבוצה השנייה כללה אלומיניט (aluminite), טיויאמוניט (Tyuyamunite), מטה-טיוימוניט (metatyuyamunite), קוורץ, אופל ועוד. הכותבים הציעו שלושה תהליכים ליצירת מאסף המינרלים: 1. אלטרציה של סדימנט בלתי מסיס; 2. החלפה או אלטרציה של סלע קרבונאטי; 3. השקעה של צורונים מומסים.

1.3.3 תהליכי הסעת חום, המסה בהתעבות והשקעה בתווך ואדוסי בסובב היפוגני

קונבקציה של אויר מתרחשת היכן שקיים גרדיאנט תרמלי בין גוף מים תרמלי לחלק העליון והקר של המערה; אידוי של המים התרמלים מספק זרם של אויר חם ולח כלפי מעלה בעוד אויר קר שוקע מטה. האוויר העולה מתקרר במגע עם התקרה והקירות הקרים ומתרחשת התעבות. ההתעבות משחררת חום אל פני הסלע ומפחיתה את הגרדיאנט התרמלי (Audra et al. 2007). הודות להולכת חום דרך מאסת הסלע אל פני השטח הגרדיאנט התרמלי משתמר (Lismonde 2003) ותאי קונבקציה קבועים מחליפים חום ומים בין חלקי המערה השונים. Dreybrodt et al. (2005) הראו שהשטף התרמלי לא תלוי במרחק מפני השטח, אך חלחול מים מטאורים יכול לקרר את תקרת המערה קרוב לפני השטח.

המסה בהתעבות (condensation-corrosion) היא המסת קרבונטים על ידי מים המתעבים מעל מפלס מי התהום תוך קליטת גז (מימן גופריתי או פחמן דו חמצני) והפיכתם לחומציים (Ford & Williams, 1989). חלק מן הספלאוגנזה ההיפוגנית מתרחשת באטמוספירה שמעל בריכות תרמליות. זרמי הקונבקציה מגבירים את תהליך ההמסה בהתעבות ויוצרים מגוון של דפוסי המסה.

הזמן הקצר הדרוש למים המתעבים כדי להגיע לשיווי משקל עם האטמוספרה העשירה בפחמן דו חמצני ו\או סולפיד וזמן השהות של המגע בין המים האגרסיביים לדופן המערה העשוי סלע קרבונטי מאפשרים את המסת הסלע. מידול של קצב נסיגת קיר בתנאי המסה בהתעבות מעל מים תרמלים מראה קצב גבוה בסדר גודל מזה של קרסט היפרגני, בין 2 ל- 20 ס"מ לאלף שנה (Mucke et al., 1983; Cigna and Forti, 1986; Dreybrodt et al., 2005).

ישנם מספר תהליכי גיבוש אשר יכולים להתרחש בנפרד או במשולב בסביבת ההמסה בהתעבות. 1. על ידי אידוי המים המעובים במגע עם אויר יבש כגון בבסיס הקירות, שם האוויר יבש יותר; 2. החלפת סלע גיר בגבס כאשר מתקיים שחרור סולפיד מגוף מים תרמלי; 3. גיבוש משקעי "פופקורן" או Frostwork ומשקעי שׂפה (rims) על ידי אידוי, מיון והצטברות אירוסולים (Dublyansky &

Sarbu & Lascu (1997) מצאו קשר איזוטופי (פחמן וחמצן) בין הרכב המים, (Pashenko, 1997 האטמוספרה ומשקעי קלציט שונים במערת מובילה (רומניה) והציעו שהמסה בהתעבות היא התהליך המרכזי הפעיל היום בעיצוב החלק הואדוסי של המערה.

תהליכי ההמסה בהתעבות מתבטאים במספר מאפיינים ספלאולוגים הן בצורת החללים ודפוסי ההמסה והן במשקעים (Audra et al 2007):

1. תעלה בתקרת המערה המאופיינת בהתרחבות כלפי מעלה ובמשקעים (קלציט בד"כ) בחלקה התחתון;

2. חלל עגול (בקירוב) בעל חיבור צר לחלל שתחתיו (ספרות spheres). יתכנו שרשראות של ספרות כאשר כל ספרה מתפתחת מתקרת הספרה שתחתיה ומתקבל מבנה דמוי שיח;

3. שכבת סלע בלוי. בסלע גיר מסיבי תהליך ההמסה בהתעבות הוא דיפרנציאלי ומעדיף אלמנטים מסויימים של הסלע על גבי אחרים, החומרים הנותרים מצטברים על גבי קירות ורצפת המערה. לעיתים, תהליך זה מותיר דפוסים נוספים המוכרים כתוצרי המסה מועדפת גם בקרסט ההיפרגני כגון boxwork ו- 'hieroglyphs' ;

4. פתחי אוורור (vents), צינורות צרים ומבודדים אשר מעבירים אויר בין קומות שונות של המערכת: אויר חם ורווי אדי מים מהקומות התחתונות כלפי מעלה, או אויר קר ויבש כלפי מטה. בשני המקרים תתקבל השקעה של שִׂפות (rims) קלציט במוצא של פתח האוורור אל חלל המערה;

5. כיסי החלפה בגבס הנוצרים בתהליך של החלפת קלציט בגבס בסביבה סולפידית; לכיסים אלה צורה דמויית חצי כדור, ובמקרים מסויימים הגבס נופל או נשטף ומותיר אחריו שקע בקיר;

6. דפוסים של טפטוף וזרימה הנוצרים במסלול הזרימה של המים המעובים (condensation runoff)

ניתן לשחזר את מסלולי הזרימה של האוויר במערה בשלבים השונים של תהליך ההמסה בהתעבות באמצעות ניתוח של המאפיינים הספלאולוגים הקשורים בתהליך זה ובמערה פעילה ניתן למדוד באופן ישיר טמפרטורה, לחות וקצבי זרימה של אויר (Audra et al 2007, 2009).

1.4 רקע אקולוגי – ביולוגי

רוב המערכות האקולוגיות מבוססות על יצרנות ראשונית פוטוסינתטית, כלומר שימוש באור השמש כמקור אנרגיה לקיבוע פחמן. אולם, ישנן אוכלוסיות המבוססות על יצרנות ראשונית כימוסינתטית, בדרך של חמצון תרכובות איאורגניות מחוזרות כמקור אנרגיה לקיבוע פחמן (Corliss and Dymond, 1979). אחת התגליות הביולוגיות החשובות של המאה ה 20 הייתה גילוין של מערכות אקולוגיות בים העמוק בקרבת הרכסים המרכז אוקיאניים, מערכות המתקיימות ללא אור שמש או אספקה של חומר אורגני אלוכטוני ומתבססות על יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית (כימו = תהליך כימי מהווה מקור לאנרגיה; אוטוטרופי = הזנה עצמית, CO_2 מהווה מקור לפחמן) המתבצעת על ידי בקטריות

המחמצנות סולפיד שמקורו בזרמים הידרותרמלים (Tunnicliffe, 1992). יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית של חיידקים מחמצני סולפיד מראה העדפה בולטת ל- ^{12}C על פני ^{13}C ובחומר האורגני הנוצר מתקבלים ערכי $\delta^{13}C$ שליליים במיוחד (Ruby et al, 1987).

סביבה תת קרקעית מאופיינת בהעדר אור, בלחות גבוהה ובטמפרטורה יציבה (ככל שהמערה מבודדת יותר כך יהיה פחות ביטוי לשינויים הסביבתיים - היומיים והעונתיים). בהעדר אור, לא מתאפשרת יצרנות ראשונית פוטוסינתטית. לכן, החיים במערה תלויים במזון שמקורו מן החוץ, כגון חומר אורגני שחודר לתת הקרקע באמצעות בעלי חיים הנכנסים למערה על בסיס קבוע או במקרה, או על ידי מים כמוצק או כמומס (Poulson and White, 1969). לחילופין, החיים במערות יכולים להיתמך על יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית כאשר נמצאות תרכובות כימיות מחוזרות (כגון סולפיד, מתאן, אמוניה ועוד) וחמצן (Sarbu et al, 1996). בהעדר חמצן, יצרנות כימואוטוטרופית תיתכן על ידי חימצון בקטריאלי חלקי של סולפיד, למשל לגפרית אלמנטרית (S^0) (Ehrlich, 2000).

1.4.1 אקוסיסטמות של מערות

מטבע הדברים, רוב המערות המוכרות לאדם הן המערות הקרובות והפתוחות אל פני השטח. במערות אלה קיימות לרוב אוכלוסיות של טרוגלוקסנים (trogloxenes), אשר מקיימים חלק ממחזור החיים שלהם במערות ובשאר הזמן שוהים מעל פני השטח וטרוגלופילים (troglophiles) אשר מסוגלים להשלים מחזור חיים בתת הקרקע אך עדיין נשמר הקשר הגנטי בינם לבין בני מינם אשר חיים על פני השטח (למשל מתחת לאבנים או בקרקע) ובמערות אחרות. לעומת זאת, טרוגלוביטים (troglobites), הידועים גם בכינוי סטיגוביוטים (stygobiotic), הם יצורים החיים בבתי גידול תת-קרקעיים בלבד ומותאמים לסביבתם. טרוגלוביטים יתפתחו בתנאי בידוד מפני הקרקע (או מן הים, כאשר מדובר ביצורים תת ימיים) וניתוק ממושך מאוכלוסיית המקור. מקור הטרוגלוביטים הוא בדרך כלל בטרוגלופילים אשר חיו במערות ונותקו מפני השטח בגלל שינוי סביבתי או בגלל הגירה לעומק, הרחק מפני השטח, או ביצורים אחרים אשר חדרו אל תת הקרקע ומצאו שם תנאים המאפשרים את המשך קיומם. התפתחות הטרוגלוביטים כרוכה בהתאמת גופם ואורחות חייהם לתנאי המערה, לדוגמא: פיתוח אברי חישה (כגון מחושים ארוכים או שערות חישה), הסתגלות למקורות מזון חדשים והסתגלות למחסור במזון על ידי האטת חילוף החומרים. מאידך, ההסתגלות למערה כרוכה באיבוד תכונות שאינן נחוצות בסביבת המערה כגון איבוד יכולת הראייה המתבטא בהתנוונות העיניים עד לאיבוד מוחלט של העיניים או כל שריד לעיניים (Chapman, 1982).

פעמים רבות נתקלים בטרוגלוביטים, בעיקר תרמוהלינים, כאשר הם נפלטים מסביבת המחייה שלהם במי התהום דרך מעיינות, כגון מעיינות אל חמה בטוניס שם הסרטן *Thermosbaena mirabilis* שורד בטמפרטורה של 40ºC ומעיינות גפרתיים תרמוהלינים לאורך בקע ים המלח שם נמצאו סרטני *Tethysbaena relicta* והאיזופוד *Turcolana reichi*. לעיתים קורה שהטרוגלוביטים נשאבים מסביבת המחייה שלהם בעקבות שאיבת מי תהום (Longley. 1981).

רוב המערכות האקולוגיות בסביבות תת קרקעיות, המוכרות לאדם, שייכות ל-allobiosphere, כלומר ניזונות מחומר אורגני מיובא שמקורו ביצרנות ראשונית פוטואוטוטרופית בפני השטח, כגון גואנו של עטלפים וציפורים, ביצי צרצרים, חלחול חומר אורגני מפני השטח, חדירת שורשי עצים ועוד.

בשנת 1986 נחשפה מערת מובילה ((Movile Cave, Romania (Lascu, 2004) על ידי קידוחי סקר בעומק 18 מ' מתחת לפני השטח. המערכת האקולוגית של מערת מובילה, הניזונה מחומר אורגני אוטוכטוני (יצרנות ראשונית על ידי בקטריות מחמצנות גפרית) (Sarbu et al. 1996) נחשבה למקרה יוצא דופן ונעשו הקבלות בינה לבין המערכת האקולוגית של ה Hot vents בים העמוק. מערת מובילה בולטת במגוון הרב של בעלי החיים היבשתיים החיים בה (30 מינים, 24 מתוכם אנדמיים) והייתה למקום הראשון בו נמצאו בעלי חיים יבשתיים הניזונים מיצרנות ראשונית כימואוטוטרופית. בנוסף לבעלי החיים היבשתיים חיים במי התהום הנחשפים במערת מובילה 18 מיני בעלי חיים אקוואטיים. המים במערת מובילה מליחים, תרמליים ($21^{o}C$), נושאי סולפיד ($30_{mg/l}$) וחסרי חמצן, למעט המילימטר העליון של המים שמכיל חמצן המספיק לקיומם של חלק מהיצורים האקווטיים (אלה שלא נושמים מן האויר) (Sarbu, 2000).

1.4.2 ייחודה של המערכת האקולוגית במערת איילון

בעולם מוכרות מספר זעום של מערות אשר מכילות מערכות אקולוגיות בהן חיים מיני טרוגלוביטים, המבוססות על יצרנות כימואוטוטרופית כמקור מזון (Sarbu et al, 1996; Hose and Pisarowicz 1999). רובן המכריע של מערכות אלה היו מקושרות אל פני השטח זמן רב לפני חשיפתן בידי אדם. בארץ מוכרת פאונה תת-קרקעית אקוואטית מגוונת, המתגלה בעיקר במעיינות לאורך בקע ים המלח, ממקורות הירדן בצפון ועד באר מנוחה בדרום (Dimentman and Por, 1991; Por et al, 2001), כדוגמת המערכות בעין נור (בטבחה) ובחמי זהר בהן המערכת האקולוגית מבוססת על יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית, אך קשורות אל פני השטח (Tsurnamal, 1978; פור, 1984). חלק מבעלי חיים אלה הם צאצאים לבעלי חיים שחיו בים התיכון ובאוקיינוס הטתיס ומהווים לפיכך שריד לחדירות ימיות קדומות (Dimentman and Por, 1991; Por et al, 2001). חיים תת-קרקעיים נמצאו גם במערת שורק שהייתה סגורה עד לפתיחתה בידי אדם, אך מערה זאת קרובה אל פני השטח והחיים בה מבוססים על תסנין של חומר אורגני במים החודרים אל המערה מפני השטח (ד"ר דימנטמן ח., מידע אישי). ייחודה של המערכת האקולוגית במערת איילון הוא בכך שהיא הייתה סגורה ומבודדת מפני השטח עד לפתיחתה בידי אדם, במיקומה בשפלה באקוויפר ירת"ן, בהיותה מבוססת על יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית, ובמגוון בעלי החיים שבה שחלקם ממוצא ימי, חלקם ממוצא של מים מתוקים וחלקם ממוצא יבשתי. בניגוד למקבילה הקרובה ביותר, מערת מובילה ברומניה, המערכת האקולוגית במערת איילון לא היתה קשורה ככל הנראה אל המערכת של פני השטח בעשרות אלפי השנים האחרונות.

2 מטרות העבודה

בחינת היבטים ספליאולוגיים, סדימנטולוגיים, הידרולוגיים ואקולוגיים במערת איילון, על מנת להשיב על שאלות המחקר הבאות:

א. כיצד נוצרה המערכת הקרסטית של מערת איילון.

ב. מה הם השינויים המתרחשים במערכת ההידרולוגית של מערת איילון לאורך זמן (עונתי ורב שנתי) בעקבות תהליכים טבעיים (דוגמת כמות הגשם), ואנתרופוגניים (דוגמת הפקה - שאיבת יתר),

ג. כיצד פועלת האקוסיסטמה תוך התיחסות למארג המזון ולסביבת המחייה.

ד. מה השפעת השאיבה (שינויים במפלס האקויפר) על התהליכים הביולוגיים.

2.1 הנחות העבודה

ההנחות הבאות, המסתמכות על התצפיות הראשוניות במערה והשוואתן לספרות העולמית. נבדקות במידת האפשר במהלך מחקר זה.

א. התהליכים שיצרו את מערת איילון עדיין פעילים ברובם.

ב. גוף מי התהום המופיע במערה (איור 3) מייצג את המים הפעילים ביצירת המערה.

ג. המערה הייתה מבודדת מפני הקרקע. בהיעדר אור ומקורות אנרגיה אחרים, המערכת האקולוגית במערה מתבססת על תהליכי כימוסינטיזה.

3 שיטות המחקר

איסוף מידע, מיפוי וניטור שוטף מאפשרים ניתוח של התהליכים הביוגאוכימיים במערכת הקרסטית של מערת איילון, כמפורט להלן:

א. ניתוח המבנה הפיסי של מערת איילון. הניתוח יכלול מיפוי מפורט בקנ"מ 1:200 והיטלים אנכיים לאורך ולרוחב המחילות, והצגתם באמצעות מפות וחתכי רוחב. אפיון של תופעות ספלאולוגיות (המסה והשקעה) ותפוצתם המרחבית.

ב. הגדרת התכונות הגיאוכימיות והפיסיקליות של מי האגם במערת אילון בעזרת ניטור מתמשך של מפלס המים והטמפרטורה, בדיקות תקופתיות של הכימיה הכללית של המים, של יסודות קורט ואיזוטופים יציבים.

ג. ניתוח בסיסי של המערכת האקולוגית במערה וסביבתה הקרובה, על ידי דיגום בעלי החיים במערה, זיהוי השיוך הטקסונומי שלהם, תיאור תפוצתם המרחבית בתוכה, ובדיקות היחסים האיזוטופיים בין מרכיבי המערכת להבנת מעברי האנרגיה ביניהם.

3.1 תיאור פיסי של מערכת הקרסט - מיפוי חללים קרסטיים

מיפוי מערת איילון נעשה ברמה D3 (דרוג לפי פרומקין 1984 ב') על ידי צוות המונה 2 אנשים. בעזרת מד טווח לייזר (Disto), מצפן וקלינומטר ידני, נמדדו מרחק אזימוט ושיפוע בין תחנות צלעון המשתרע לאורך כל המחילות והאולמות. בכל תחנה נמדד המרחק לתקרה, לרצפה ולקירות בניצב לכיוון הצלעון. נבנה צלעון ממוחשב ושורטטו מפות והיטלים אנכיים באמצעות תוכנת LIMELIGHT. על בסיס הצלעון צוירו פרטי המערה בשטח בקנה מידה של 1:200 על פי ראייה ובעזרת מדידות נוספות לפי הצורך. מיקום פתח המערה נמדד ברמת דיוק 2 ס"מ באמצעות GPS דיפרנציאלי. בנוסף סורטטו חתכים ניצבים למחילות בנקודות נבחרות.

מערות אחרות במחצבת נשר רמלה מופו ברמה 2A/B כלומר, נלקחו מעט מדידות מרחק וכיוון בשטח, סרטוט המערה בוצע מזיכרון בלבד או על פי סרטוט סכמתי מהשטח, מיקום המערות נמדד באמצעות GPS בדיוק של 5 מ'.

3.2 גיאוכימיה ותכונות פיסיקליות של המים

בוצעו לראשונה מדידות שונות ודיגום של המים באקוויפר באופן ישיר ובלתי אמצעי (שלא באמצעות נטל או שאיבה של המים).

תדירות הביקורים במערה ותזמונם הושפעו רבות מהדרישות שהציבה חברת נשר (אשר מערת איילון נמצאת בשטחה) כתנאי לעבודה במערה.

3.2.1 בדיקת אחידות המים באגם

בוצעה סריקה של טמפרטורת פני המים באמצעות סורק אינפרא אדום בסיוע ד"ר לאוניד וולפסון מהיחידה לחישה מרחוק באוניברסיטת בר אילן. נמדדו טמפרטורה ומוליכות חשמלית של גוף המים ברזולוציה של חצי מטר באמצעות DIVER מדגם 3001, מתוצרת Solinst Levellogger ובוצעו אנליזות כימיות של מי האגם בעומק 1 ו 4 מטר במרכז האגם ובפני המים בחלקים שונים של האגם.

3.2.2 דיגום מים ובדיקות מעבדה

כל דגימות המים הועברו למיכל קירור מייד עם היציאה מהמערה ואחסנו בתנאי קירור עד להעברתם למעבדה הרלוונטית, עד 18 שעות מזמן הדיגום. שאיבת מים מעומק האגם נעשתה באמצעות משאבה פריסטלטית. יתר הדגימות נדגמו ישירות מגוף המים.

הדגימות AC-300 ו AC-302 נדגמו בכלים, בהדרכה ובסיוע המכון הגיאולוגי והאנליזה בוצעה במעבדות המכון הגיאולוגי. בדיקות המעבדה שבוצעו בשתי דגימות אלה ומתוארות בעקבות זילברברנד וחוב' (2006).

יונים ראשיים – ריכוזי הקטיונים Na^+ K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Sr^{2+}, האניון SO_4^{2-} והסיליקה (כ-SiO_2) נמדדו במכשיר AES-ICP דגם Optima 3300 של חברת Perkin Elmer. ריכוזי האניונים

NO_3^-, Br^-, Cl^-, SO_4^{2-} נמדדו בעזרת יון כרומטוגרף מודל ICS-2000 של חברת Dionex. ריכוז הכלוריד נמדד גם בעזרת טיטרטור כלור מסוג 702-SM-Titrino של חברת Mtrohm על ידי טיטרציה עם 0.1N $AgNO_3$. ריכוז הביקרבונט (HCO_3^-) נמדד בעזרת טיטרטור מסוג Mukti-Dosomat 775 של חברת Metrohm ע"י טיטרציה של 50 סמ"ק ממי הדוגמה עם חומצת 0.02N HCl ובנוכחות אינדיקטור הצבע BDH-4460, כאשר ההנחה היא שכל האלקליניות הנמדדת בדרך זו היא קרבונטית. כושר ההפרדה של מכשיר הטיטרציה הוא 0.05 סמ"ק של חומצה שהם שווי ערך ל- 1 מג"ל ביקרבונט. הערכים מדווחים כולם במג"ל, אולם לצורך חישוב יחסי יונים הועברו לערכים אקוויוולנטיים. כבקרה לאיכות האנליזה חושב כמקובל אחוז השגיאה במאזן החשמלי של התמיסה, עם סף שגיאה קביל של עד ±2%.

אנליזה של יסודות קורט – דגימות לאנליזה של יסודות קורט סוננו בשדה בעזרת פילטר של 0.45µm לתוך בקבוקי פוליאתילן של חברת Nalgene בנפח 125 סמ"ק, המכילים חומצת HNO_3. הבקבוקים נוקו לפני כן במעבדה בעזרת חומצה ניטרית. הריכוזים נבדקו במכון הגיאולוגי במכשיר ICP-MS מדגם Elan DRC-II של חברת Perkin Elmer-Sciex. נמדד הריכוז של היסודות - Ag, Al, As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sb, Sb, Sn, Th, V, U, Zn. הריכוזים מדווחים כולם במיקרוגרם לליטר (µg/l).

אנליזה איזוטופית של חמצן ומימן במים (AC-300, AC-302, ACW-113)– דגימות לאנליזה איזוטופית של חמצן ומימן נלקחו בבקבוקי פוליאתילן תוצרת חברת Nalgene בנפח 30 סמ"ק. ההרכבים האיזוטופיים נמדדו באמצעות ספקטרומטר מסוג VG SIRA II. רמת הדיוק של האנליזות ±0.1‰ ($\delta^{18}O$) ו- ±1.0‰ (δD). ההרכבים האיזוטופיים מדווחים כמקובל בערכי $\delta^{18}O$‰ ו- δD‰ ביחס לסטנדרד SMOW.

ריכוז סולפיד (כ- H_2S) – כל דגימה לבדיקת ריכוז הסולפיד במים נלקחה בתוך 3 בקבוקי 1.5 ליטר, הסולפיד קובע והושקע בשדה כאבץ סולפיד (ZnS) לאחר הוספת תמיסת $Zn(CH_3COO)_2$ ותמיסת NaOH. במעבדה סולקו המים העודפים בדקנטציה והמשקע הרטוב עם יתרת המים הועברו לכוס שלתוכה הוכנסה תמיסת KI בתוספת יודין (I_2) וחומצת מלח (HCl), כאשר היודין המוכנס הוא בעודף מעל לתכולת הסולפיד המשוערת במים. את היודין העודף מטטרים באמצעות $S_2O_3^{2-}$ ובנוכחות עמילן כאינדיקטור. סיום הריאקציה לחישוב ריכוז הסולפיד הוא במעבר צבע התמיסה מסגול לשקוף.

ריכוז אמוניום – דגימות למדידת ריכוז אמוניום נלקחו בבקבוקי זכוכית בנפח 100 סמ"ק אשר נעטפו ברדיד אלומיניום ובשקית פלסטיק אטומה לאור כדי למנוע את השפעת אור השמש. הדגימות אוחסנו בהקפאה עד לביצוע האנליזה שנעשתה בשיטה פלורומטרית באמצעות מכשיר Aquafluor מתוצרת Turner Designs, על פי הפרוטוקול של Holmes et al (1999). הריכוזים מדווחים כולם במיליגרם לליטר, דיוק המדידה עבור הריכוזים הוא 0.0002 מ"ג לליטר.

הדגימות ACW-106 עד ACW-117 נדגמו בכלים, בהדרכה ובסיוע המעבדה של אגף איכות מים ברשות המים אשר ביצעה גם את האנליזות. בדיקות המעבדה שבוצעו בדגימות אלה מתוארות להלן.

יונים ראשיים - מים לבדיקת יונים ראשיים נדגמו במיכל פלסטיק בנפח 300 מ"ל. המים נדגמו ישירות מימי התהום לאחר 3 שטיפות של הבקבוק במי התהום. הבדיקה לאניונים (למעט ביקרבונט) בוצעה ביון כרומטוגרף מדגם ICS 2500 מתוצרת Dionix בשיטה שנקבעה על ידי ה- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), EPA 300. הבדיקה לקטיונים בוצעה במכשיר ICP-OES מדגם 720ES מתוצרת Varian בשיטה EPA 6010c.

ריכוז הביקרבונט (HCO_3^-) נמדד בעזרת טיטרטור מסוג ABU 901 של חברת Radiometer ע"י טיטרציה של 50 סמ"ק ממי הדוגמה עם חומצת 0.02N HCl. הערכים מדווחים ביחידות מג"ל עם שגיאה של עד 2% עבור הערכים שנמדדו.

יסודות קורט - דגימות לבדיקת מתכות (יסודות קורט) סוננו בעזרת מסנן 0.22µm ישירות לבקבוק 15 מ"ל המכיל חומצה חנקתית (HNO_3). הבדיקה בוצעה במכשיר ICP-MS מדגם 820MS מתוצרת Varian בשיטה EPA 6020A.

TOC - דגימות למדידת Total Organic Carbon נדגמו בבקבוקי זכוכית בנפח 100 מ"ל אשר נשטפו בתמיסת 5% HCl. לאחר הדיגום, הוספה לדגימות תמיסת 5% HCl עד לקבלת pH 3-3.5. מדידת ריכוז הפחמן האורגני המומס בוצעה במכשיר מדגם TOC-V cpn, TOC Analyzer מתוצרת Shimadzu. הערכים מדווחים ביחידות מג" לליטר עם שגיאה של עד 0.02 מ"ג לליטר.

$\delta^{13}C_{DIC}$ (ACW-113) (על פי Rossak and Sivan 2010) - דגימה למדידת $\delta^{13}C_{DIC}$ סוננה בשדה בעזרת פילטר של 0.45µm לתוך בקבוק זכוכית בנפח 100 מ"ל אשר נשטפו מראש והורעלו בתמיסת HgCl. $\delta^{13}C_{DIC}$ נמדד באמצעות מכשיר GS-IRMS ברמת דיוק 0.1% בסקלת VPDB.

אלקליניות - 2 דגימות למדידת אלקליניות סוננו בשדה בעזרת פילטר של 0.45µm לתוך בקבוקי זכוכית בנפח 100 מ"ל אשר נשטפו מראש והורעלו בתמיסת HgCl. האלקליניות נמדדה בדגימות בנפח 10 מ"ל בטיטרצית גרן (Stumm and Morgan, 1996) בעזרת תמיסת 0.05N ,HCl ואלקטרודת PH מדגם Sentron PH-System 1001. השגיאה חושבה בעזרת מיצוע של של 3 דופליקטים והייתה קטנה מ- $0.03_{mEq/L}$.

$\delta^{34}S$,$\delta^{18}O_{sulfate}$ - הטיפול בדגימות ואנליזות של $\delta^{34}S$ בוצעו על ידי פרופ' זאב אייזנשטט, המכון לכימיה ומכון קזאלי לכימיה יישומית האוניברסיטה העברית בירושלים. סולפאט במים הושקע כ-$BaSO_4$ בתגובה עם $BaCO_3$. גבס הומס והושקע מחדש כ- $BaSO_4$,$BaSO_4$ נשטף במים מזוקקים חמים ויובש בטמפרטורה של 70ºC. דגימה לבדיקת $\delta^{34}S_{sulfide}$ נלקחה במיכל בנפח 20L, מילוי המיכל בוצע באמצעות משאבה פריסטלטית. לאחר מילוי ראשוני של המיכל, הוא הוצב בקרקעית האגם בעומק מטר אחד כאשר צינור המשאבה ממוקם בתחתית המיכל ומזרים מים במשך 10 דקות בספיקה מקסימלית,

סגירת המיכל בוצעה מתחת לפני המים וזאת על מנת להחליף את נפח המים שבמיכל במים שלא היו במגע עם אוויר. המיכל הועבר במהירות האפשרית למעבדה, שם מוצה הסולפיד מהמים על ידי בעבוע גז חנקן בתחתית המיכל והזרמתו למלכודת בה הושקע הסולפיד כ- Ag_2S. מדידת $\delta^{34}S$ בוצעה באמצעות continuous-flow elemental analyzer המחובר ל- Finnigan Delta Plus stable-isotope ratio monitoring mass spectrometer (EA-IRMS). לכל דוגמה נבדקו שלושה דופליקטים מול סטנדרד NBS-127 ($\delta^{34}S=20.3‰_{(CDT)}$). התוצאות נתונות ביחידות $‰_{(CDT)}$ עם טווח שגיאה ±0.2‰. משקעי $BaSO_4$ הועברו למעבדות Zmax (גרמניה) שם בוצעה בדיקת $\delta^{18}O_{sulfate}$ לפי השיטה המתוארת על ידי Shakur (1982). התוצאות נתונות ביחידות $‰_{(V\text{-}SMOW)}$ עם טווח שגיאה ±0.2‰.

בדיקת כלל פחמימני דלק (TPH) בוצעה במעבדת המכון הישראלי לאנרגיה וסביבה. המים נדגמו בבקבוקי זכוכית שטופים מראש בנפח 1 ליטר. דיגום מי האגם בוצע ישירות מפני המים ומי הטפטוף נאספו בטפטוף ישיר לבקבוק במשך 72 שעות. מיד בתום הדיגום, הוספנו למים 5 מ"ל חומצת HCl בריכוז 16%. מדידת ריכוז TPH בוצעה במכון הישראלי לאנרגיה וסביבה באמצעות FTIR, בשיטה EPA 418.1. התוצאה מדווחת ב-מ"ג לליטר עם רמת דיוק של ±0.1 מ"ג לליטר.

דגימות חומר אורגאני למדידת $\delta^{13}C$ ו- $\delta^{15}N$ מוינו ויובשו בתנור בטמפרטורה של 50ºC למשך יממה. סילוק משקעי קלציט מדוגמת המצע הבקטריאלי בוצעה על ידי הוספת חומצה כלורית בריכוז 10%. בעקרב שנאסף על פני השטח (לשם השוואה) נבדקה קליפת הכיטין בלבד, בדומה לעקרב ממערת איילון. יחס C:N, $\delta^{13}C$ ו- $\delta^{15}N$ נמדדו על ידי פרופ' בעז לוז וד"ר יבגני ברקן מהמכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית ירושלים. באמצעות elemental analyzer / continuous flow isotope ratio mass spectrometry (EA/CF-IRMS). המערכת כללה: FlashEA 1112 analyzer המחובר ל- Delta^plux XL mass spectrometer מתוצרת: ThermoFisher Scientific. התוצאות עבור $\delta^{13}C$ מדווחות ביחידות $‰_{(PDB)}$ עם שגיאה עד 0.15‰, התוצאות עבור $\delta^{15}N$ מדווחות ביחידות $‰_{(AIR)}$ עם שגיאה עד 0.15‰. השגיאה ביחס C:N עד 2%.

מדידת $\delta^{13}C$ ו- $\delta^{18}O$ במשקעי מערות מקלציט בוצעה על ידי פרופ' בעז לוז וד"ר יבגני ברקן מהמכון למדעי כדור הארץ באמצעות gas bench/continue flow isotope ratio mass spectrometry. המערכת כללה: GasBench III connected to Delta^plux XL mass spectrometer. התוצאות עבור $\delta^{13}C$ מדווחות ביחידות $‰_{(PDB)}$ עם שגיאה עד 0.1‰.

3.3 מדידות באגם

בשדה נמדדו מפלס המים באגם, טמפרטורה, pH, Eh - פוטנציאל חימצון/חיזור, מוליכות חשמלית, וריכוז חמצן מומס. עד התאריך 11/05/2008: pH נמדד אלקטרודת pH מדגם Sentron pH-System 1001, מדידות מוליכות חשמלית (EC) וטמפרטורה נמדדו באמצעות DIVER מדגם 3001, מתוצרת Solinst Levellogger. ומדידות ריכוז חמצן מומס בוצעו באמצעות מכשיר מדגם OXI 330

מתוצרת WTW. מתאריך זה ואילך, המדידות בוצעו באמצעות ערכת פרוב מדגם IQ280G מתוצרת IQ.

מדידת תנודות המפלס: בוצע מעקב אחר תנודות המפלס באגם בעזרת סרגל אנכי (לאטה) שהוצבה באופן קבוע בתוך האגם במטרה לבדוק את מידת הקשר ההידראולי של האגם עם שאר האקוויפר.

3.4 ניתוח התוצאות

התוצאות נותחו ועובדו לאור הידע הקיים על האקוויפר באזור שבין ראש העין לכפר אוריה. נערכה השוואה לנתונים ממחקרים אחרים באזור העבודה: בסיס הנתונים של השירות ההידרולוגי, זילברברנד וחוב' (2006), Kroitoru (1987), Kronfeld (1997), בורג וחוב' (2001), גוטמן וחוב' (2001), Frumkin and Gvirtzman (2006) וכץ (2001). כמו כן בוצע עיבוד מחודש לנתונים אלה.

3.5 תיאור המערכת האקולוגית בתוך המערה

אחת הבעיות המרכזיות בתיעוד המערכת האקולוגית אשר במערת איילון היא שמירתה במצבה הראשוני כפי שנתגלתה ללא הפרעות או זיהום סביבתי. לצורך כך נאטמה המערה, כבר בתחילת העבודה, במטרה לצמצם חדירת אוויר ופלישת בעלי חיים מן החוץ למערת איילון: בוצעה סגירה של פתח הכניסה בדלת אטומה. בוצעה אטימה, בעזרת פוליאוריטן מוקצף, של קידוחי גישוש של חברת נשר רמלה, שפגעו במערכת ויצרו פתחים נוספים.

ניתוח המערכת האקולוגית במערה וסביבתה הקרובה כלל איסוף בעלי חיים מתוך המערה ומסביבתה ואנליזה איזוטופית כדי לאפיין את המערכת האקולוגית ולבחון את מארג המזון ומידת הניתוק מפני השטח. לשם כך בוצעו:

א. <u>איסוף בעלי חיים מתוך המערה</u> והעברתם להגדרה. נערכו סריקות של שטח המערה בעזרת תאורה אולטרא סגולה (UV) במטרה לאתר עקרבים חיים ושלדי עקרבים. חומר חי נדגם באמצעות רשתות 60μm ו 200μm, מלכודות נפילה, פינצטה, משאף ועוד.

ב. <u>הגדרת בעלי חיים:</u> החומר הועבר לד"ר חנן דימנטמן מהמכון למדעי החיים (אס"א), האוניברסיטה העברית. אשר ביצע הפרדה ומיון. באפיון פרוקי הרגליים וזיהויים השתתפו ד"ר חנן דימנטמן, ד"ר גרשום לוי ז"ל פרופ' דוב פור וד"ר משה צורנמל, כולם מאס"א, Dr. Dafaye מהמוזיאון הלאומי לטבע בפריס, ו- Prof. B. P. M. Ćurčić מהמכון לזואולוגיה באוניברסיטת בלגרד. זיהוי מיקרוביולוגי ראשוני בוצע על ידי פרופ' אהרון אורן מהמכון למדעי החיים, האוניברסיטה העברית.

ג. <u>איסוף בעלי חיים מסביבת המערה:</u> לצורך השוואת ההרכב האיזוטופי של בעלי החיים נאספו בעלי חיים גם מפני השטח. בעלי חיים ממקור מימי נאספו ב 3 שלוליות חורף ובריכה אחת קבועה (ככל הנראה קשורה למפלס מי תהום מקומי של אקוויפר שעון). הבריכות

ממוקמות כ-500 מ' מדרום-מערב למחצבת נשר רמלה. בעלי חיים יבשתיים נאספו סביב הבריכות ובסביבות חירבת בית ענבה, עד 1500 מ' מצפון למחצבה.

ד. <u>אנליזה איזוטופית של פחמן וחנקן</u> נערכה בחומר אורגני מהפאונה של מערת איילון ושל יצורים מקבילים ככל האפשר (מבחינה סיסטמטית ואקולוגית), שנאספו מפני השטח בקרבת מערת איילון, במגמה לאפיין את מארג המזון במערת איילון ואת מקור המזון של המערכת. האנליזה בוצעה במעבדה של פרופ' בעז לוז וד"ר יבגני ברקן מהמכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית.

3.6 בדיקת ההשתרעות הגיאוגרפית של המערכת האקולוגית

<u>עבודה בקידוחים בסביבת המערה</u>

חברת נשר מבצעת קידוחי גישוש רדודים תוך כדי התקדמות החציבה מסיבות בטיחותיות, רובם לעומק של 21 מ'. הקידוחים המבוצעים במפלס התחתון של המחצבה (23 מ' מעל פני הים) חודרים אל מתחת למפלס מי התהום ומאפשרים גישה למי התהום גם מחוץ למערת איילון. ב 30 קידוחים נמדדו טמפרטורה ומוליכות של המים ובוצע דיגום בעלי חיים בעזרת רשת 200μm ומלכודת סרטנים שנבנו במיוחד למטרה זאת. מרחק הקידוחים שנבדקו מהאגם שבמערת איילון 200-600 מ'. הנתונים עובדו בדומה לנתונים מתוך המערה כפי שתואר לעיל.

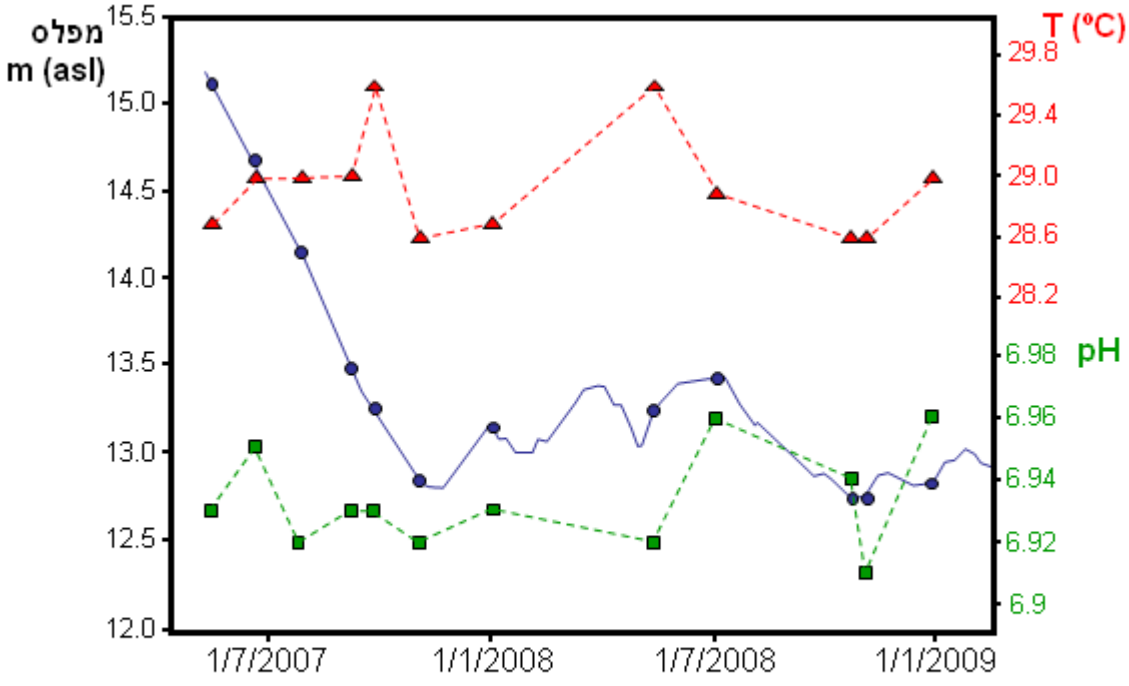
במטרה לבחון את השתרעות המערכת האקולוגית מחוץ לתחומי המחצבה, נבדקו קידוחי תצפית של רשות המים ובארות נטושות. הבארות והקידוחים נבדקו באמצעות רשת פלנקטון ומלכודות סרטנים שנבנו למטרה זאת.

4 תוצאות

4.1 מי התהום

באביב 2006 נערכו מדידות ראשוניות במי האגם. נמדדו מליחות של כ-500 מגכ"ל (אשר עולה על מליחות מי התהום בקידוחי איילון) וטמפרטורה של 28.8°C. מפלס המים באגם השתנה בהתאם לשינוי מפלס מי התהום בקידוח הסמוך איילון 1. מי האגם, בדומה למי תהום בקידוחי איילון, מכילים H_2S ואינם מכילים חמצן מומס.

ב 12 מדידות נוספות שבוצעו בין 2007 ל 2009 התברר כי מי האגם שומרים על תכונות יציבות למדי, למעט מפלס המים. טמפרטורת מי האגם הינה 28.8±0.2°C והמוליכות החשמלית 2.28±0.1 ms/cm ללא תלות במיקום המרחבי באגם. גם במדידות pH, Eh, חמצן מומס ובהרכב הכימי לא נמצאו הבדלים משמעותיים במרחב ובזמן ולא נראה קשר בין השינויים במפלס מי התהום למדדים אלה (איור 5). מפלס מי התהום במערה מתאים למפלס האזורי באקוויפר ירת"ן והתאפיין בתקופת המחקר בירידת מפלס של כ 5.2 מ' (16.5m-asl ב- 3/2006 לעומת 11.3m-asl ב- 11/2010), ובעליות מינוריות שנמדדו בתקופות החורף והאביב.



איור 4. השתנות המפלס, הטמפרטורה וה- pH באגם שבמערת איילון בתקופה שבין 06/07 ל- 12/08.
מפלס המים בבאר איילון 1. ● מפלס המים במערת איילון. ▲ טמפרטורה. ■ pH.

טבלאות הנתונים מופיעות בנספח 6. ההרכב הכימי של מי האגם מפורט בטבלאות 6.1, 6.2. ההרכב הכימי של מי הטפטוף באזור 12 (נספח 2.3) מפורט בטבלאות 6.3, 6.4. יחסי יונים וערכים איזוטופיים של חמצן, מימן וגם פחמן במים מפורטים בטבלה 6.5. מדידות השדה שבוצעו במערה

מפורטות בטבלה 6.6. ההרכב האיזוטופי של גפרית וחמצן בסולפאט שבמי האגם ובחומרים נוספים ממערת איילון מפורט בטבלה 6.8.

ריכוז פחמימני דלק (TPH) במי האגם ובמי הטפטוף נמצא נמוך מסף הדיוק של הבדיקה (1ppm). במי האגם נמדד ערך של 0.7ppm ובמי הטפטוף נמדד 0.2 ppm.

אינדקס רוויה (SI) של מי האגם יחסית לקלציט חושב באמצעות תכנת PHREEQC ונמצא 0.2-.

יחסי האיזוטופים של Sr (87/86) הם 0.70820 ו- 0.70814 בשתי דגימות מי תהום אשר נדגמו בתאריך 12/12/2008.

האלקליניות של מי התהום במערה נמדדה בשתי דגימות שנדגמו בתאריך 19/6/2007 ונמצאה 5.62mEq/L בפני המים ו- 5.33mEq/L בעומק 1 מ'.

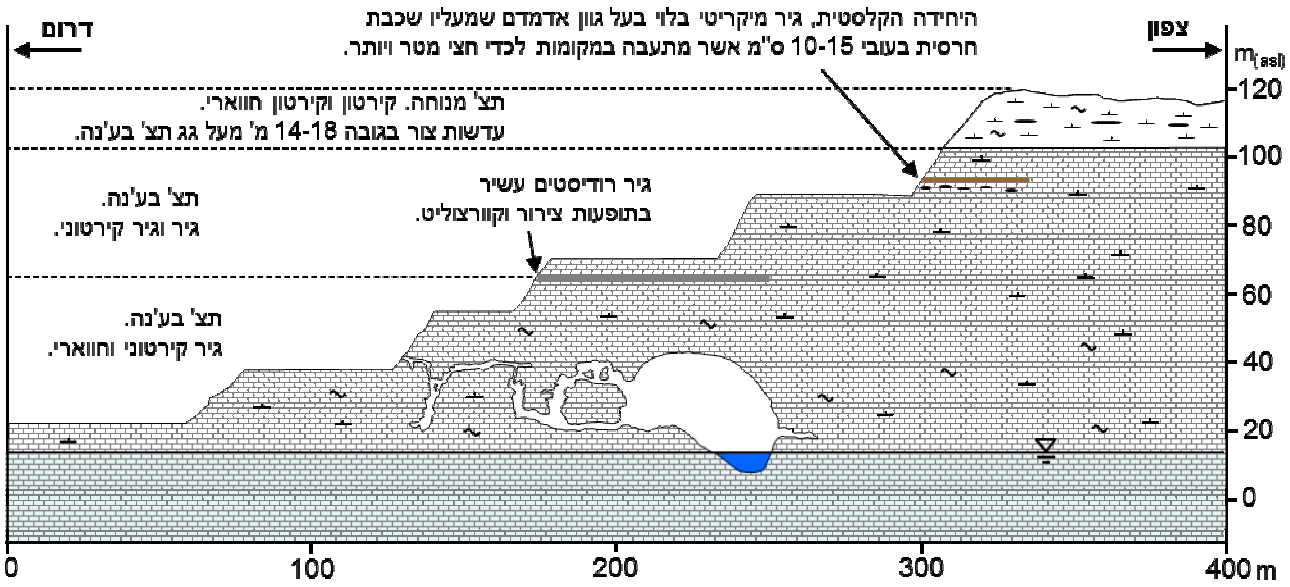
4.2 מערכת הקרסט

4.2.1 תופעות קרסטיות במחשופי מחצבת נשר רמלה מחוץ למערת איילון

במהלך החציבה במחצבת נשר רמלה מתגלות ונחתכות מערות ותופעות קרסטיות אחרות. מערת איילון שהתגלתה ונחקרה במחקר הנוכחי זוכה לשימור בשל חשיבותה, אך שאר התופעות נהרסות במהלך החציבה. פרק זה מתעד את התופעות שנסקרו.

רוב המערות שנבדקו היו ממוקמות במחשופי המחצבה הצפוניים והמזרחיים בהן מתנהלת עיקר החציבה. רובן מחילות מבודדות בכיוון צפון-דרום או מזרח-מערב בקירוב, אופקיות או תת אופקיות, בעלות מורפולוגיה כלואה. מחילות בעלות חתך רוחב עגול או אליפטי, עם דפנות מוחלקות, ללא הבדל בין קירות, תקרה ורצפת המחילות מבחינה מיקרו מורפולוגית. במקרים רבים המחילות נחסמו במפולות מלאכותיות. זוהו שני מפלסים שבהם שכיחות הופעת המערות גבוהה יחסית למפלסים אחרים: 48-43 מ' מעל פני הים, מפלס שבו נמצאת הקומה העליונה של מערת איילון וכן הכניסה למערת המפולת; 67-60 מ' מעל פני הים, מפלס שבו נמצאות מערות 2, 3 (ראה פרוט בהמשך פרק זה). מערות אלה סמוכות לאופק הקוורצוליט (איור 6) אשר נחשף לעיתים בתקרת החללים.

במחשופי המחצבה ניתן להבחין במספר תופעות של פלאוקרסט, חללים קרסטיים אשר ממולאים בחרסיות. החרסית מסוג מונטמורילוניט מופיעה בחלק מהחללים בצבע חום-אדום ובאחרים בירוק. גודל החללים הסתומים שנצפו לא עולה על מטר אחד, ובמקרים רבים מדובר בסדק מורחב שהתמלא בחרסיות. במקרה אחד נצפו גם חרסיות ממלאות את החללים שבין הסלעים שבשכבת ההתמוטטות הממלאת שרידי אולם שהתמוטט.



איור 6. חתך גיאולוגי סכימתי של האגף הצפוני של מחצבת נשר רמלה (בניצב למדרגות החציבה) ובו מערת איילון. מפלס מי התהום סומן לפי זה של זמן מיפוי המערה (מאי 2006).

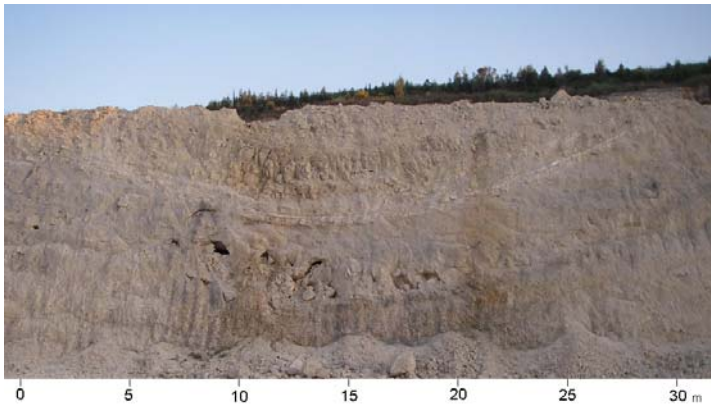
4.2.1.1 מערות עיקריות שנבדקו במחשופי המחצבה

<u>מערת המפולת</u> (נ"צ 193392/645846). פתח המערה (איור 7) נמצא ברום 45 מ' מעל פני הים, בקער קרסטי ברוחב של כ- 40 מ', והינו חלק ממקבץ חללים המרוכזים ביחידת סלע אחת בסמוך לציר הקער. בחינה של המחשוף במדרגת הסלע שמתחת לפתח המערה (23-38 מ' מעל פני הים) מראה דעיכה בעוצמת הקער והמצאות חללים נוספים שקרסו באזור ציר הקער בשכבות נמוכות יותר. מבנה המערה (נספח 1.1) הינו 2 מחילות מקבילות בכיוון צפון-דרום בעלות נטייה ברורה דרומה. מחילות אלה עברו מעוות הניכר בחתך הרוחב של המחילות (נספח 1.1), וקשור לתהליך השקיעה שגרם להיווצרות הקער. שתיים מן המחילות מגיעות לשרידי אולם תת קרקעי שקרס. באולם זה ניתן להבחין בבירור בדופן האולם המקורית ושכבת המפולת הממלאת אותו (איור 8). סלעי המפולת מאופיינים בסימני המסה ובשכבת סלע בלוי שעובייה מגיע לכדי 1 ס"מ.

<u>מערת המים</u> (נ"צ 193218/646226) (נספח 1.2). פתח המערה ממוקם בתחתית המחצבה, בגובה 23 מ' מעל פני הים. הפתח נוצר כאשר כלי הנדסי נע מעל המערה וגרם להתמוטטות תקרת ארובה. מערה זו מורכבת מחלל פריאטי שבתקרתו שתי ארובות אנכיות כאשר כל ארובה מורכבת משרשרת של כיפות המסה. בחלק העליון של הארובה הצפונית (פתח המערה) (נספח 1.2, היטל אנכי 'a-a) בגובה 23.3 מ' מעל פני הים ישנה התרחבות אופקית של כיפת ההמסה. בדופן הדרומית של החלל, ניכרים בחלקה התחתון סימני המסה על בסיס מישורי השיכוב (כדוגמת אלה שבאיור 48). בשנת 2006 (כשהתגלתה המערה) היה בקרקעיתה אגם קטן של מי תהום (חלק מאקוויפר ירת"ן) בעומק 1.5 מ', בדומה לאגם של מערת איילון.

מערת הסדק (נ"צ 193642/646218) (נספח 1.3). פתח המערה ממוקם ברום 75 מ' מעל פני הים באגף הצפוני של המחצבה. מבנה המערה הינו שתי מחילות מבודדות, מקבילות ואופקיות בכיוון צפון-דרום בקירוב אשר מחוברות בקצה הצפוני של המערה. שתי המחילות נוצרו על בסיס אותו סדק אלכסוני, בשני מפלסים שונים שלו.

מערה 2 (נ"צ 193660/646083) ומערה 3 (נ"צ 193593/646217). שתי מערות אלה הן מחילות מבודדות, אופקיות, ברום 65 מ' מעל פני הים. בשתי המערות לא ניתן היה להגיע לקצה הטבעי של המחילה כיוון שהן נחסמו על ידי מפולות מלאכותיות. רצפת המחילות מכוסה בשכבה של סלעים (Debris) שנפלו מהתקרה בהתמוטטויות ועם זאת ניכרים סימני המסה על קירות ותקרת המחילות וכן על סלעי המפולת שברצפת המערה. בתקרת המערות יש חשיפות מקומיות של אופק הקוורצוליט. במקומות אלה ישנה התרחבות של תקרת המחילה בקו המגע בין שכבת הקוורצוליט לסלע הגיר שתחתיו. ברצפת המחילות ניתן לזהות סדקים מורחבים דרכם עולה אוויר חם ולח (יחסית לחלל המערה) (קצה עליון של פתחי אוורור). דפנות המחילות מצופות במשקע קרבונאטי לבן בעובי של כ- 6 מ"מ. משקעי הקלציט מתעבים סמוך לפתחי האוורור ובאזורים אלה ישנה הופעה של אלמוגי מערות (איור 9), ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחמצן באלמוגי מערות אלה מופיע בטבלה 6.9.



איור 7. קער סטרטיגרפי מקומי ובמרכזו פתח מערת המפולת.

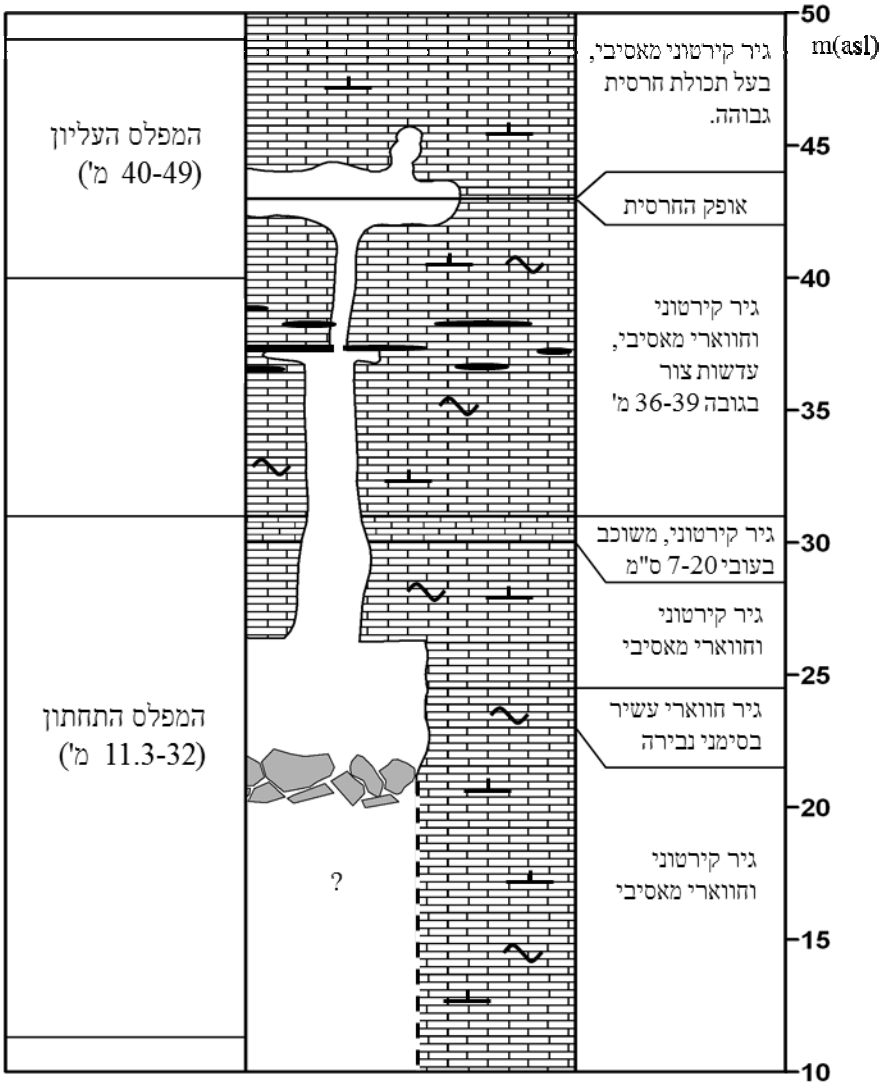

איור 8. האולם הממוטט במערת המפולת. משמאל למעלה, תקרת האולם ומימין למטה שכבת המפולת הממלאת את האולם.


איור 9. משקע קלציטי על תקרת מערה 3 ואלמוגי מערות על הדופן, מעל פתח אוורור.

4.2.2 מערכת הקרסט של מערת איילון

מערת איילון ממוקמת בסלע גיר קרטוני וחווארי בחלק התחתון של תצורת בע'נה (איורים 6, 10), המערה משתרעת בתוך מלבן המשתרע על שטח של 140X100 מ' בגבהים שבין 11.2-49 מ' מעל פני הים. אורך מחילותיה כ- 2780 מ' בשתי קומות אופקיות עיקריות המחוברות ביניהן בארובות קרסטיות אנכיות (איורים 6, 11 נספחים 2, 3, 4). בחלקה הנמוך ביותר, המערה נושקת למפלס מי התהום היוצר גוף מים חופשיים ('האגם'), אשר שטחו ועומקו משתנים בהתאם לתנודות מפלס מי התהום.

ברוב הפעמים בהן בוצעו מדידות, הלחות היחסית גבוהה מ 94% (סף הכימות של מד הלחות) וטמפרטורת האוויר נעה בין 26 ל 28 מעלות צלסיוס, למעט מקומות ספציפיים אשר יפורטו בהמשך, וימים מסוימים בהם הטמפרטורה ירדה עד 21°C והלחות היחסית ל 74%. שינויים אלה הורגשו בעיקר בחלקי המערה הקרובים למחשופי המחצבה והתרחשו באירועים קצרים ונדירים.



איור 10. חתך גאולוגי עמודי של טור הסלעים הנחשף במערת איילון. הסלעים מהחלק התחתון של תצורת בע'נה מגיל טורון. מבוסס על נתוני חברת נשר רמלה ותצפיות בשדה.

4.2.2.1 הקומה העליונה של מערת איילון

<u>מאפיינים כלליים</u>

קומה זו הינה רשת מחילות דמוית מבוך רשת (network maze cave) ברום שבין 40 ל 49 מ' מעל פני הים. רוב המחילות אופקיות ורומן 43±2 מ' מעל פני הים. מיקום המחילות במרחב האנכי מוכתב על ידי מישור שיכוב, וכיווני המחילות מוכתבים על ידי מערכות סידוק תת-אנכי במבנה של שתי וערב, בכיוונים מקורבים צפון-דרום ומזרח-מערב. חתך הרוחב האופייני של המחילות בקומה זו הוא עגול או אליפטי והן בעלות דפנות מוחלקות. מבחינה מיקרומורפולוגית לא ניתן להבחין בהבדל בין התקרה, הקירות ורצפת החללים, אם כי על רצפת המחילה מצטבר לעיתים חומר רזידואלי, בלתי מסיס (להלן). בולט העדר הקשר בקומה זו כלפי מעלה; תקרתו חלקה ועשירה בכיפות המסה (איור 12) שאינן ממוקמות לאורך סדקים. לא נצפו ארובות העולות למעלה לאורך סדקים. מאידך בולט הקשר של קומה זו כלפי מטה דרך ארובות קרסטיות אנכיות (איור 11) ודרך סדקים מורחבים שבתחתית המחילות (איור 13). מחילות רבות הן קצה עליון של סדק מורחב (נספח 5, חתך רוחב 'O-O; איור 13). אורך המחילות המצטבר בקומה העליונה הוא 1988 מ' (כ- 74% מסך כל אורך המערה) ורוחב המחילות נע בין 0.3 ל 1.4 מ'. הרוחב הממוצע של המחילות מוערך כ 0.8 מ'. יחס אורך כללי של המחילות לרוחב הממוצע הינו 2485.

מחילות הקומה העליונה חותכות לעיתים חללים שהיו סתומים בחרסיות (איור 14) השייכים ככל הנראה לשלב קדום של חללים קרסטיים (paleokarst). בחלק מן המקרים, החרסית שבחלל הסתום "נשפכת" אל המחילה ובמקרים בודדים בלבד ניתן להבחין בשיכוב בתוך מחשופי חרסית אלה. קטעים ממחילות באזורים 1, 2 (נספח 2.3) מכילים חרסיות צמודות לתקרה ולקירות החללים (איור 15. נספח 4, היטל אנכי '6-6) ואף ממלאות קטעים של סדקים מורחבים (איור 16).

מישור השיכוב אשר מכתיב את גובה מחילות הקומה העליונה הינו קו מגע בין שכבת גיר קירטוני מתחת לבין שכבת גיר ממעל, אשר ביניהן מפרידה שכבת חרסית (מונטמורילוניט) לא רציפה שעובייה מגיע לכ- 6 ס"מ (איורים 11, 17; נספח 4, היטל אנכי '5-5; נספח 5, חתכים 'l-l, 'f-f, 'e-e). שכבה זו נוטה לבלוט מעט אל תוך חלל המערה. במקומות בהן השכבה בולטת אל חלל המערה היא עבה יותר ונוטה להתפצל ללווחים אופקיים,שביניהם ניתן לזהות סימני החלקה (slickensides) הפונים אל חלל המערה (איור 18). אופק חרסית זה מהווה סמן ברור של רוב מחילות הקומה העליונה. במקומות בהם אופק זה נעדר מתקבל מבוך תלת מימדי. המחילות נוטות במקרה כזה להיות משופעות או להתפצל למספר קומות שמורכבות ממספר מחילות מקבילות, זו מעל זו, על בסיס אותו סדק (נספח 2.3 אזורים 3, 4). מחילות גבוהות מאופק החרסית אשר שומרות על המאפיינים הכלליים של הקומה העליונה סומנו במפות המערה (נספח 2) כ"קומה עליונה גבוהה".

קירות הקומה העליונה מכוסים בשכבת סלע בלוי ורך מאד, שעובייה מגיע לכ- 5 ס"מ. אצבע שוקעת לעומק השכבה בהפעלת לחץ קל מאד. שכבה זו מהווה שארית של סלע אם שהתבלה ונשאר

באתרו (corrosion residue). המסה מועדפת של הגיר \ גיר קירטוני, יוצרת הבלטה של אלמנטים פחות מסיסים אל חלל המערה כגון מאובנים ושכבות חרסית דקות (איור 19).

הבלטת אלמנטים בלתי מסיסים בשכבת הבלייה מדגישה הבדל בין שכבת הסלע שמתחת לאופק החרסית לזו שמעל. בשכבת הסלע שמעל אופק החרסית ישנן למינות חרסית דקות מאד אשר נחשפות אל חלל המערה (איור 20) ומהוות חלק משמעותי משכבת הסלע הבלוי שבדפנות ותקרת המחילות, וזאת לעומת העדר חרסיות בתוך שכבת הסלע שמתחת לאופק החרסית. הבדל זה בולט בצבעה של שכבת הסלע הבלוי (איור 11). צבען של למינות החרסית משתנה בין חום-אדום לירוק-צהוב כאשר האחרון מופיע בעיקר בסביבת פירים המקשרים בין קומות המערה.

ברוב מחילות הקומה העליונה ישנה הצטברות משנית של חרסיות על רצפת המחילות. ככל הנראה מקורן בשארית בלתי מסיסה שנשרה מתקרת המחילה ודפנותיה, מן הסלע שמעל אופק החרסית ומאופק החרסית. חרסית זו סותמת לעיתים פתחים וסדקים שנמשכו כלפי מטה מתחתית המחילה ואף יוצרת חיפוי בלתי מסיס לרצפת המחילה. בחלק מן המקרים, חרסיות אלה מהודקות וצפופות ובמקרים אחרים מדובר בלמינות החרסית שהתנתקו מן התקרה והדפנות ונערמו על רצפת המחילה וביניהן חללים רבים, לעיתים יחד עם מאובנים שגם הם התנתקו מן התקרה והדפנות בתהליך של המסה מועדפת (איור 21). בחלק מן המחילות ערימות החרסית הצטברו למרגלות כיפות המסה (איור 22). צבע החרסיות שעל קרקעית המחילות משתנה אף הוא בין חום-אדום לצהוב-ירוק ובמספר מקרים מופיע כסגול.

מינרלים משניים בקומה העליונה

קלציט. לעיתים ניתן למצוא גיבוש משני של קלציט יוהדרלית (euhedral) בין לווחי החרסית (איור 22),

בסדקים שבסלע המקור הקרבונטי, בסדקים שבתוך שכבות הצור (איורים 6, 24) ובסדקים שבין עדשות הצור לסלע הקרבונטי ניתן למצוא לעיתים קרום קלציטי שעוביו מגיע לכ 2 מ"מ על גבי שכבת הבלייה. ציפוי של משקע קלציטי על גבי קירות המערה מופיע בחלק ממחילות הקומה העליונה ובעיקר בחלק התחתון של המחילות.

שׂפות קלציט (rims), מופיעות לרוב בחיבור שבין מחילות הקומה העליונה למעברים צרים יותר ובלתי עבירים שבדרך כלל לא מופו. השׂפות מתחילות במחילה המשנית עוד לפני החיבור שלה עם מחילות הקומה העליונה, ועיקרן במחילה הראשית, סביב נקודת החיבור. לקראת נקודת החיבור השׂפות הולכות ומתעבות. נקודת החיבור יכולה להיות ברצפה, בקירות או בתקרת המחילה. שׂפות הקלציט יכולות להיווצר באופן סימטרי סביב נקודת החיבור (איור 25) או עם כיוון מועדף (איורים 26, 27). במקרים מסוימים פתח המחילה המשנית נסתם באופן חלקי או מלא על ידי התפתחות קרום קלציטי על פני הפתח (איור 28) או מהתעבות הטבעות (איור 29). במקרים בודדים, נמשכת התפתחות שׂפות הקלציט מנקודת המפגש בין המחילות אל תוך מחילות הקומה העליונה (איורים 30, 31). במקרים רבים, השׂפות מופיעות בנקודה בה הובחנה זרימת אוויר החודרת מן המחילה המשנית אל תוך המחילה הראשית. מדידות

טמפרטורה ולחות יחסית הראו שהאוויר החודר דרך פתחים אלו קר ויבש יחסית לחלל המערה סמוך לפתח (טבלה 6.7). ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחמצן בשפות קלציט אלה נתון בטבלה 6.9 (נספח 6)

גבס. גבס מופיע הקומה העליונה כמעט תמיד (למעט אזור 7 אשר יפורט בהמשך פרק זה), כמחטים על רצפת החלל ובסמיכות לחרסיות, בין החרסיות הרזידואליות שהצטברו על רצפת המחילות ועליהן. עובי המחטים יכול לנוע בין עשרות מיקרונים (איור 32) לחצי ס"מ (איור 21), ואורכן מגיע עד 28 ס"מ. במקרה אחד נמצאו מחטי גבס עליהן התגבש קלציט. ערכים איזוטופיים של גפרית וחמצן במחטי גבס נתונים בטבלה 6.8 (נספח 6).

<u>אזורים בעלי מאפיינים מיוחדים</u>

אזור 5 (נספח 2.3). אזור זה מצטיין בניגוד חריף בין אופי הדפנות בחלק העליון של המחילות לחלקן התחתון (איור 33). רצפת המחילות באזור זה מתאפיינת בציפוי קלציטי משני בעובי של עד 15 ס"מ עם ריכוזים מקומיים ושכבות של חרסית (איור 34). קירות המחילה (נספח 4, היטל אנכי '8-8. נספח 5, חתך 'i-i) בחלקם התחתון, מצופים בקלציט משני בעובי של עד 3 ס"מ. החלק העליון של קירות המחילות וכן תקרתן מאופיינים בשכבת בלייה רזידואלית רכה. המעבר בין הציפוי הקלציטי לשכבת הבלייה חד ולפעמים ישנה שפה של הציפוי הקלציטי אל תוך החלל (איור 33). בשנים האחרונות התגבשה בקטע אחד באזור זה רצועה צרה של שכבת קלציט דקה על גבי שכבת הבלייה (איור 35). גובה המעבר בין האזור הבלוי לאזור המצופה קלציט בדרך כלל בחצי גובה המחילה או מעט למטה ממנו. באזור זה ישנה מחילה המסתעפת מתקרת מחילה אחרת כך שרצפת מחילה אחת נושקת לתקרת השנייה, גם במקרה זה יש מעבר חד בין ציפוי הקלציט על רצפת המחילה העליונה לשכבת הבלייה הרזידואלית שעל תקרת המחילה התחתונה (איור 36). מעל נקודת מפגש זאת, ישנו עמוד (שריד להפרדה שהייתה בין כיפות המסה שהתאחדו) היורד מהתקרה כ 60 ס"מ. לעמוד זה חתך משולש, ממנו שתי פאות פונות אל המחילה התחתונה ופאה אחת פונה אל המחילה העליונה ומהווה מעין המשך לחלק התחתון של דופן המחילה העליונה. שתי הראשונות מתאפיינות בשכבת בלייה רזידואלית על הדפנות ואילו האחרונה מתאפיינת בציפוי קלציטי (איור 37).

גם האטמוספרה של המחילות באזור זה מתאפיינת בהבדלים משמעותיים בין החלקים העליונים של המחילות בהן נמדדו טמפרטורות גבוהות ב 0.9-1.7ºC ולחות יחסית גבוהה ב >15% בהשוואה לחלקים התחתונים. בחלק העליון של אזור זה ישנן שלוש ארובות הפונות כלפי מעלה שאינן עבירות לאדם (נספח 4, היטל אנכי '8-8, 1, 2 ו- 3). ארובה 1 היא צינור קרסטי תת אנכי בעל חתך אליפטי המאופיין בשכבה רזידואלית של סלע בלוי ובציפוי קלציטי על הדופן התחתונה שלו כאשר לכיוון הארובה יש רכיב אופקי. ארובה 2 היא סדק מורחב בניצב לכיוון המחילה שדפנותיו מכוסות שכבת סלע בלוי. בארובה 3 מורגשת כניסת אוויר קר ויבש (T=23.4ºC, RH=79%) יחסית לאזור ולמערה בכלל, על דפנות ארובה זו ישנו ציפוי קלציטי עבה אך רך ועליו "עצי" קלציט (frostwork) אשר כיוון גדילתם תואם את כיוון זרימת האוויר בארובה (איור 38).

אזור 6 (נספח 2.3). אזור זה גבוה ממחילות הקומה העליונה בכ- 5 מ', בראשו שרשרת כיפות המסה אנכית, ובקרבתו פיר המקשר בין קומות המערה העליונה והתחתונה (נספח 5, חתך 'o-o. נספח 4, היטל אנכי '6-6). באזור זה לא ניתן להבחין באופק החרסית באתרו. הקירות והתקרה באזור זה מתאפיינים בשכבת בלייה רזידואלית עבה במיוחד (עד 10 ס"מ) ועשירה בחרסיות ומאובנים שהובלטו בעקבות המסת הגיר שסביבם (איור 19). הרצפה מכוסה בשכבה בעובי עד 25 ס"מ בה חילופין של שכבות משניות של חרסית רזידואלית עם שכבות קשות של קלציט עם גבס משניים. האוויר באזור זה מצטיין בלחות וטמפרטורה גבוהים (T=28.3 ºC, RH ≥ 95%).

אזור 7 (נספח 2.3). רק באזור זה ישנו חיבור ישיר בין הקומה העליונה לאולם בו נמצא האגם. אזור זה מאופיין באוורור גרוע, ריכוז חמצן נמוך באוויר ובניחוח סולפיד. באזור זה נמצאו משקעי גבס מרובים וגפרית אלמנטרית. חלק ניכר מדופן סלע המקור באזור זה מוחלף בגבס, מפני דופן המחילה ועד עומק של 4 ס"מ. לרוב, מעל אופק החרסית, ההחלפה שומרת על צורת הסלע המקורית, לרבות מאובנים (איור 39). מתחת לאופק החרסית ההחלפה מלווה בתפיחה של הסלע ובביקוע של קרומי הקלציט שהיו על דופן המחילה על ידי גבישי הגבס (איורים 40-42). ערכים איזוטופיים של גפרית וחמצן בגבס המחליף גיר נתונים בטבלה 6.8. באחת מהמחילות באזור זה, גובשו 'חרבות' גבס (איור 43) על גבי החלק התחתון של קיר המחילה (איור 44). בחלקו הצפוני של אזור זה, בקרבת החיבור לאולם, מונחת שכבה דקה וחומה של גופרית אלמנטרית (איור 45).



איור 11. פיר אנכי בנקודת חיבורו לקומה העליונה, המקשר אותו עם הקומה התחתונה, בקירות המחילה ניתן להבחין באופק חרסית חום כהה. רוחב המחילה הוא 1.3 מ'.



איור 12. כיפת המסה בתקרת מחילה בקומה העליונה.



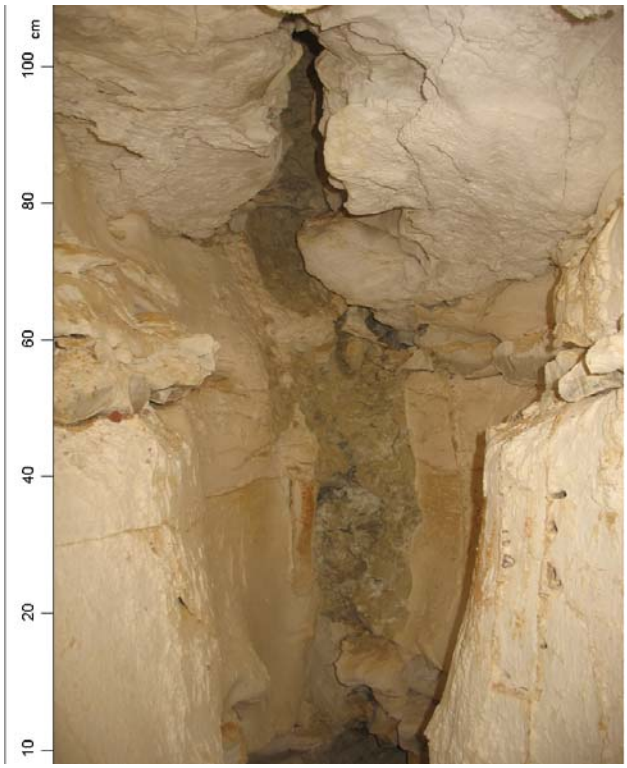
איור 13. מחילה בקומה העליונה שבתחתיתה סדק מורחב.



איור 14. מפגש בין מחילה בקומה העליונה לחלל ממולא בחרסיות.



איור 15. חרסיות משוכבות בדופן פיר אנכי באזור 1 (נספח 2.3).



איור 16. סדק מורחב, מלא בחלקו בחרסיות (בחלק הרחוק של התמונה). בחלק העליון, התרחבות של הסדק מתחת צור סדוק. צולם באזור 1 (נספח 2.3).



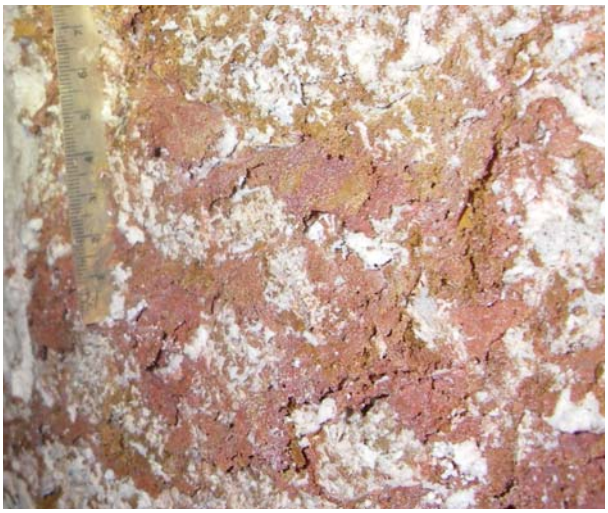
איור 17. אופק החרסית המאפיין את הקומה העליונה כפי שהוא מופיע במחשופי המחצבה בקרבת פתח המערה.



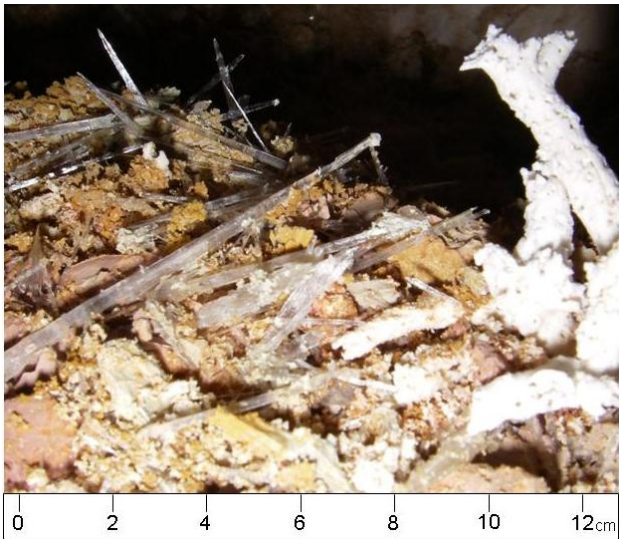
איור 18. סימני החלקה בין לווחי החרסית באופק החרסית בקומה העליונה.



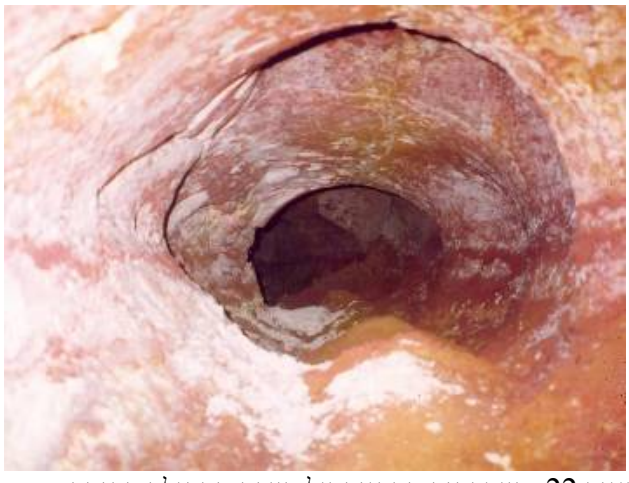
איור 19. המסה מועדפת בקומה העליונה יוצרת הבלטה של חרסיות ומאובנים מסלע המקור



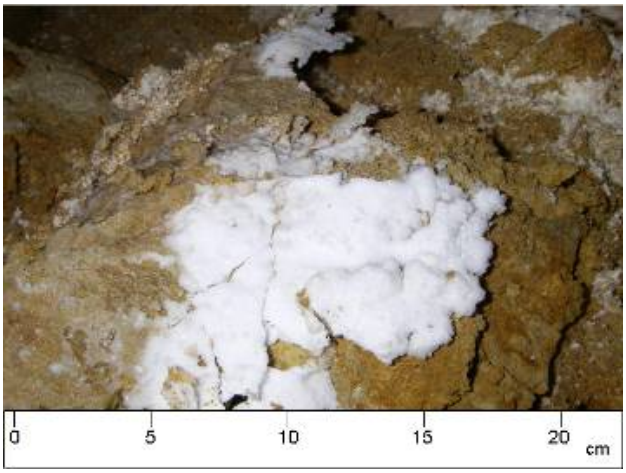
איור 20. הבלטה של למינות חרסית אל חלל המערה בדופן מחילה בקומה העליונה.



איור 21. למינות חרסית, מאובני אלמוגים ומחטי גבס על רצפת מחילה בקומה העליונה.



איור 22. הצטברות חרסיות על רצפת המחילה בקומה בקומה העליונה, תלוליות החרסית ממוקמות מתחת לכיפות ההמסה. רוחב המחילה הוא 0.6 מ'.



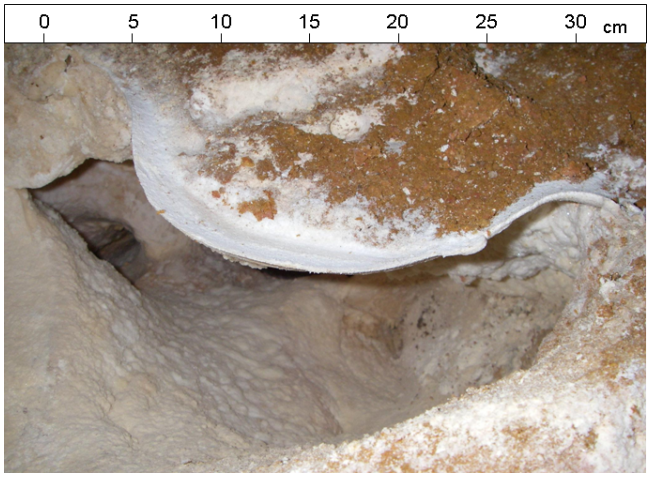
איור 23. גבישי קלציט משניים בין לווחי חרסית.


איור 24. גיבוש משני של קלציט בסדקים שבעדשות צור.

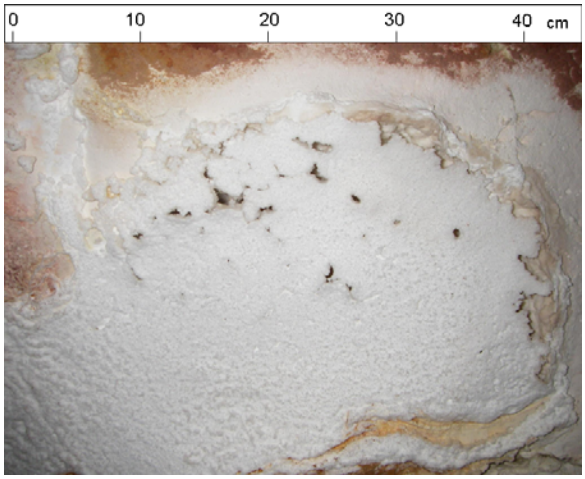

איור 25. שפות קלציט בקיר מחילה בקומה העליונה.



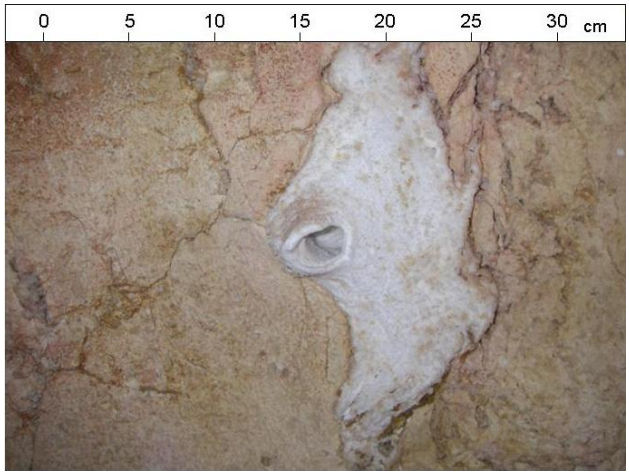
איור 26. התפתחות מועדפת של שפות קלציט מקיר החלל כלפי מטה.



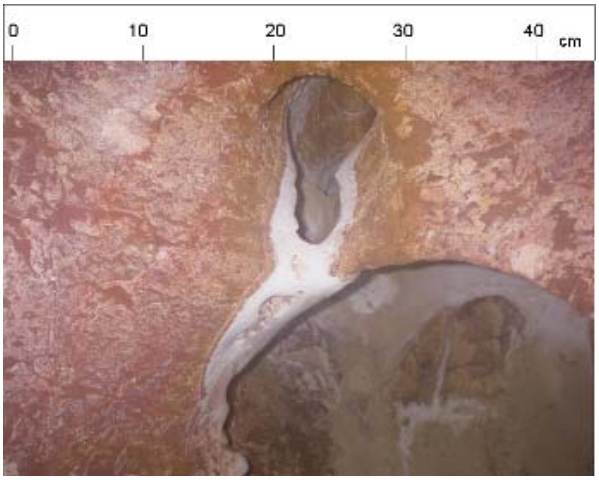
איור 27. התפתחות מועדפת של שפות קלציט מרצפת המחילה כלפי מעלה.



איור 28. התפתחות "מחיצת" קלציט בדופן מחילה בקומה העליונה. קרום קלציט בעובי של כ- 5 מ"מ יוצר סגירה כמעט מוחלטת של פתח המחילה הצדדית.



איור 29. התפתחות שׂפות קלציט בדופן מחילה בקומה העליונה, התעבות הטבעות הביאה לסתימה כמעט מלאה של פתח המחילה המשנית.



איור 30. גיבוש קלציט מול פתח של מחילה משנית בתקרת מחילה בקומה העליונה.



איור 31. שׂפות קלציט יוצרות "שרוול" המשכי לפתח משני בקיר המערה. במורד, ה"שרוול" נפתח ודומה לתעלה.



איור 32. מחטי גבס על רצפת מחילה בקומה העליונה.



איור 33. ציפוי קלציטי על גבי החצי התחתון של המחילה (מתחת לפטיש) לעומת שכבת בלייה בחלק העליון של המחילה (מעל בסיס הפטיש).



איור 34. חתך של רצפת מחילה באזור 3.



איור 35. רצועה של גיבוש קלציט על גבי שכבת הבלייה (מסומנת בחץ כחול).



איור 36. מפגש בין חלק עליון של מחילה (מהפטיש וימינה) לחלק תחתון של מחילה המסתעפת ממנה (משמאל לפטיש).



איור 37. עמוד היורד מהתקרה, שני מפנים של העמוד מתאפיינים בשכבת בלייה והשלישי בציפוי קלציטי.



איור 38. "עצי" קלציט על דפנות ארובה 3 העולה מאזור 5.



איור 39. סלע מוחלף בגבס באזור 7 (נספח 2.3). במרכז, מאובן שהוחלף גם הוא בגבס.



איור 40. החלפת הסלע הגירי בגבס באזור 7 יוצרת בחלק התחתון של המחילה (מתחת לאופק החרסית) "דרגשי" גבס הבולטים אל תוך חלל המחילה.



איור 41. החלפת הסלע הגירי בגבס יוצרת תפיחות המבקעת את קרום הקלציט הדק אשר ציפה את הדופן באזור 7 (נספח 2.3).



איור 42. כנ"ל.



איור 43. החלפת גיר בגבס בדופן מחילה.



איור 44. חרבות גבס בחלק התחתון של קיר באזור 7.



איור 45 שכבה דקה של גפרית אלמנטרית על גבי דפנות מחילה באזור 7 (נספח 2.3).

4.2.2.2 הקומה התחתונה של מערת איילון

<u>מאפיינים כלליים</u>

גובה רצפת הקומה בין 11.3 ל 32 מ' מעל פני הים והוא מתאפיין בהתמוטטויות רבות ובמחילות רחבות (לרוב עד 7 מ', מלבד אולמות גדולים שקוטרם עולה על 20 מ'), באופן משמעותי יותר מאלה של הקומה העליונה. רצפת הקומה מכוסה בשכבה של סלעים (debris) שנפלו מהתקרה בהתמוטטויות; עובי השכבה לא ידוע. בנוסף למחילות העבירות שמופו, ניתן להבחין בקומה זו גם במחילות אשר נחסמו לחלוטין במפולות ולא ניתן לחדור אליהן ולמפותן. בדומה לקומה העליונה, גם בקומה התחתונה מערכות הסידוק התת-אנכי במבנה של שתי וערב מכתיבות את כיווני המחילות (מפת המערה, נספח 2.1). בקומה זו נמצאו שרידים של מפלסי מי תהום סוב-רצנטיים כגון "רפסודות קלציט" (איור 46), ושרידים שונים של חומר אורגני על קירות ורצפת המערה. שרידי מפלסי מי התהום מגיעים עד רום מירבי של 33 מ'. אורך המחילות המצטבר בקומה זו הוא 670 מ' (כ- 25% מסך כל המערה), רוחב המחילות הממוצע הוא 4.5 מ'. יחס אורך לרוחב בקומה זו הוא 189.

כאמור, הקומה התחתונה מאופיינת בהתמוטטויות ורצפת המחילות הינה שכבת Debris של סלע שהתמוטט מהקירות והתקרה. גודל סלעי המפולת מגיע ל 6 מ'. קירות ותקרת המחילות בקומה זו הינן מישורי השיכוב והסידוק שלאורכם נותקו סלעי המפולת. במקרים רבים ניתן להבחין בסימני המסה על קירות ותקרת המחילות, בצורת כיסי המסה (איור 47), בהמסה לתוך מישורי השיכוב (איור 48) ובמקבצים של חללים (cavernous porosity) (איור 49). שכבת הבלייה הרזידואלית העבה השכיחה בדפנות בקומה העליונה חסרה בדרך כלל בקומה התחתונה.

בקומה זו קיימים שלושה אולמות גדולים (נספח 2.3, נקודות 8-10), שקרקעיתם מכוסה בסלעי התמוטטות שנפלו מהתקרה. בשלושת האולמות ובקרבתם לא זוהה מסלול כניסה אפשרי של מים ממקור עליון. אם יש ארובות קרסט או סדקים מורחבים בתחתית האולמות, הם כוסו בשכבת ההתמוטטות ולא ניתן לזהותם. האולם הגדול ביותר, אולם האגם (נספח 2.3, 8), הינו אולם עגול שקוטרו 40 מ'. לאולם זה תקרת התמוטטות בעלת מבנה כיפתי. הפרש הגבהים בין הנקודה הנמוכה באולם לתקרתו הוא 38 מ'. חלקו התחתון של האולם (רום 11.3 מ' מעל פני הים) נמוך ממפלס מי התהום של אקוויפר ירת"ן ובו נחשפים מי התהום של האקוויפר לחלל המערה (איור 6).

<u>מינרלים משניים בקומה התחתונה</u>

על הקירות באזור 11 (נספח 2.3) ישנו ציפוי של קלציט משני, בהיר וקשה. ציפוי זה מתחיל בחלקו התחתון של הקיר שם עוביו מגיע לכ- 5 ס"מ והוא מידקק כלפי מעלה ונעלם כחצי מטר עד מטר לפני המגע עם התקרה. פני הגבישים הפונים לחלל המערה הם דרוזיים ולעיתים מחטיים (באורך 1-2 מ"מ).

על פני המים באגם מתרחש תהליך מתמיד של גיבוש קרום קלציטי דק (רפסודות קלציט) בצמוד למצע הבקטריאלי אשר על פני המים (ראה פרק 4.3.1). עם הגיבוש, רפסודות הקלציט מתעבות ונהיות

כבדות ובהגיען למסה קריטית הן שוקעות לקרקעית האגם. עם זאת, אין הצטברות של רפסודות קלציט על קרקעית האגם כיום.

<u>עדויות למפלסי מי תהום סוב-רצנטיים</u>

בתקופת העבודה נצפתה ירידה של 5.2 מ' במפלס מי התהום. עם ירידת מפלס מי התהום ניטשו רפסודות הקלציט וחלק מן המצע הבקטריאלי על גבי הסלע שננטש בעת ירידת המפלס (איור 50). ברוב השטח היבש של הקומה התחתונה (עד לגובה 24.5 מ' מעל פני הים) מופיעות רפסודות קלציט רליקטיות על גבי קירות ורצפת המחילות (איור 46) וכן שרידים מן המצע בקטריאלי תלויים על קירות המחילות ולעיתים על תקרתן (איור 51), שרידי המצע הבקטריאלי יוצרים לעיתים קווים אופקיים עד דפנות המחילות והאולמות (איור 52). בנוסף נמצאו בקומה התחתונה שלדים (קליפות כיטין) ונשלים של כמה עשרות עקרבים (ראה פירוט בפרק 4.3.1.2). בחלק מן המקרים נמצאו שלדים שלמים ובמקרים אחרים רק חלקי שלדים (חוליות זנב, צבתות וכדו') צמודים לקירות המחילות. גם במקרים אלה ניתן לזהות קוים אופקיים ברורים עליהם נמצאים חלקי השלדים. עדויות למפלסים קדומים נמצאו גם בצורת שינויי צבע של דפנות המערה, ככל הנראה כתוצאה מתהליכי המסה והשקעה בגוף המים או על דפנות החלל מעל מפלס מי התהום (איור 52).

על הסלעים אשר מרפדים את רצפת הקומה התחתונה ניכרים, לרוב, סימני החלקה\המסה ועל גבם ישנה הצטברות שכבה חווארית-טינית בהירה שעובייה מגיע לכ 1.5 ס"מ, ככול הנראה שארית בלתי מסיסה מסלע האם שהומס. במקומות מסויימים באגם וסביב לו, ב- 4 המטרים הנמוכים ביותר במערכת, מתעבה שכבה זו לכדי 6 ס"מ ומאופיינת בסידוק במבנה של פוליגונים שגדלם כ 15-20 ס"מ ובמספר אופקים כהים בתוך השכבה. העדר ההחלקה של סלעי המפולת ושכבת הטין החווארי במספר מוקדים מאפשר לזהות מוקדי התמוטטות שאירעו לאחר ירידת המפלס מתחת לגובה רצפת המערה.

<u>תופעות נוספות</u>

על חלק מן הסלעים באגם וכן על סלעים סביב האגם (סלעים שבעבר היו מתחת לפני המים) ניתן לראות flutes - דפוסי המסה היוצרים שורת רכסים ועמקים על פני הסלע שכיוונם עם השיפוע של פני הסלע כאשר המרחק בין הרכסים מגיע עד 16 ס"מ (איור 53). דפוסים אלה בולטים יותר על גבי פאות הסלע הפונות אל תוך גוף המים, על פני פאות אנכיות של סלעים ההמסה מגיעה לעומק מירבי ויוצרת תעלות אנכיות דמויות חצי צינור (איור 54) ולפעמים צינור כמעט מושלם. על גבי הפאות האופקיות בקירוב מונחת שכבה של המשקע החווארי המשני המאפיין את האגם וסביבתו.

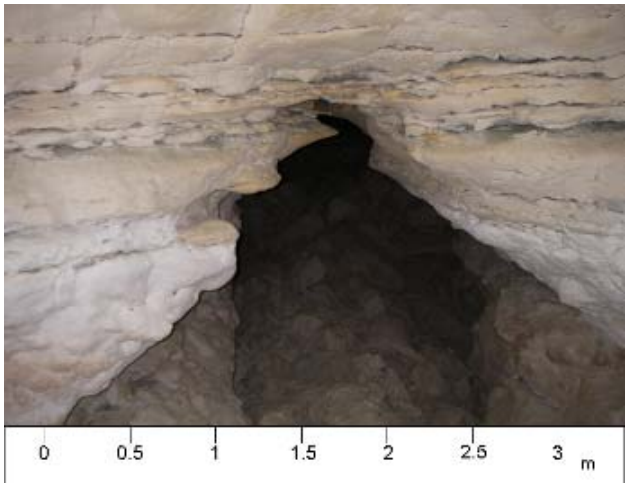
על חלק מסלעי המפולת הקרובים למפלס מי התהום (ממפלס המים ועד כ- 30 ס"מ מתחת פני המים) ישנה הופעה של ציפוי שחור (איור 55). עם ירידת המפלס וחשיפת סלעים אלה לאוויר, הציפוי הכהה נעלם בתוך יום ועל הסלעים אשר מפלס המים היורד התקרב אליהם מופיעה השכבה. היקף המשקע השחור אשר על פני הסלעים והעומק אליו הוא מגיע משתנה מפעם לפעם.



איור 46. רפסודות קלציט על גבי סלע בקומה התחתונה בגובה 23 מ'.



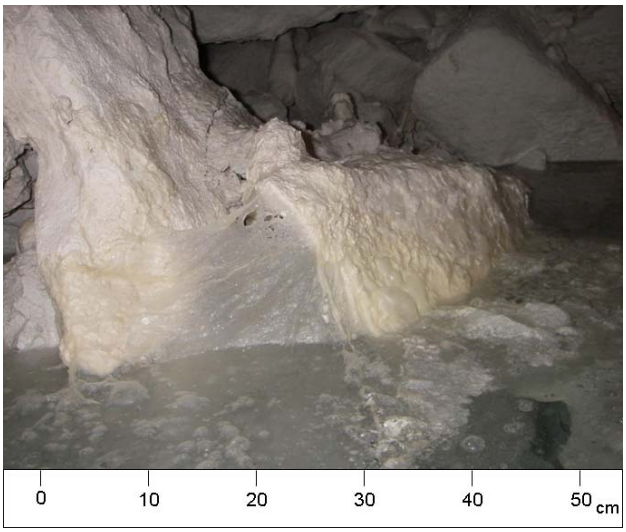
איור 47. כיסי המסה בתקרת מחילה בקומה התחתונה.



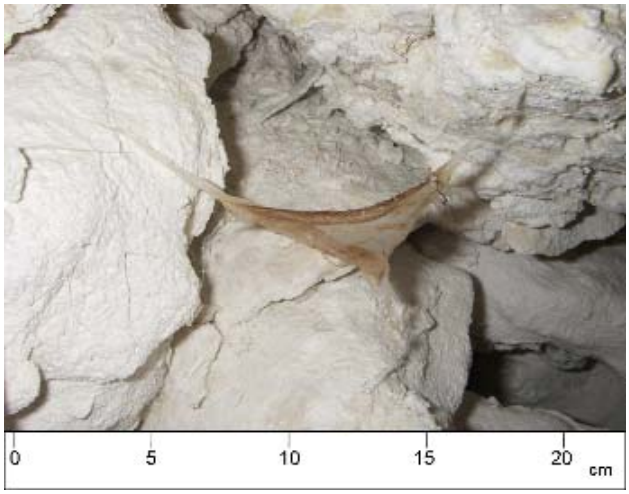
איור 48. המסה על בסיס מישורי שיכוב בקיר מחילה בקומה התחתונה.



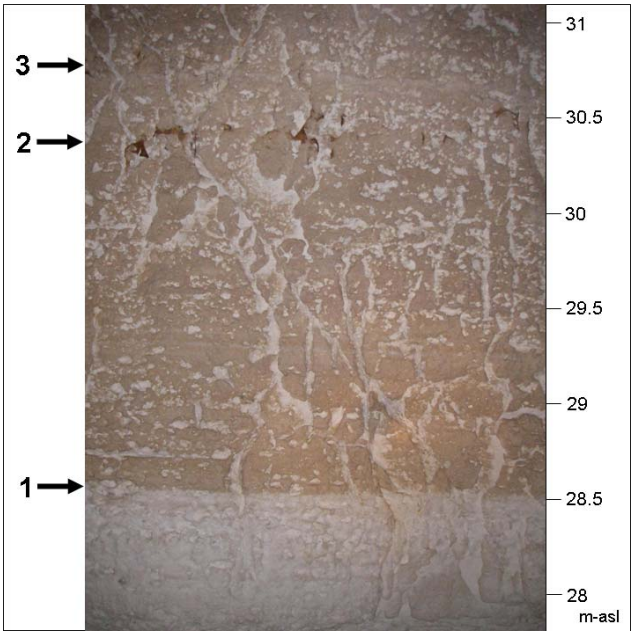
איור 49. מקבץ של חללים (cavernous porosity) בתקרת מחילה בקומה התחתונה.



איור 50. המצע הבקטריאלי אשר על פני המים באגם ניטש על גבי הסלעים שבשולי האגם בעת ירידת המפלס. התמונה צולמה ביוני 2006, בתקופה בה קצב ירידת המפלס היה 17 מ"מ ביום.



איור 51. שריד של מצע בקטריאלי (חיידקי *Beggiatoa*) תלוי בין שני סלעים בקומה התחתונה של מערת איילון בגובה 24 מ' מעל פני הים.



איור 52. עדויות למפלסים קדומים בדופן הצפון מערבית של אולם האגם. מעל גובה 1 מופיעה של שכבה חומה המכילה גפרית אלמנטרית; 2. שרידי מצע בקטריאלי בקו אופקי; 3. שינוי בגוון השכבה החומה והופעה של מעט שרידים מהמצע הבקטריאלי באותו מפלס.



איור 53. סלע באולם האגם עליו ניכרים שקעי המסה גליים מקבילים בכיוון הנטייה של הסלע.



איור 54. סימני המסה דמויי "חצי צינור" על פני פאה אנכית של סלע (במרכז התמונה מעל הפטיש; מבט מלמעלה).



איור 55. ציפוי שחור על גבי חלק מהסלעים מתחת פני המים בקרקעית האגם; מעל מפלס מי התהום הציפוי נעלם.

4.2.2.3 ארובות קרסטיות אנכיות

ארובות קרסטיות שנבחנו במערת איילון ובמחצבת נשר רמלה דומות מבחינה מיקרומורפולוגית למחילות בקמה העליונה של מערת איילון ורובן התפתחו על בסיס סדקים. הארובות מסתיימות כלפי מעלה בכיפות המסה חלקות ללא מוצא או סדק, או לחילופין בחיבור עם קומה אופקית כגון הקומה העליונה של מערת איילון, או בשכבה בלתי מסיסה כגון עדשות הצור שבגבהים 40-36 מ' מעל פני הים (איור 10) אשר נחשפות ברוב הפירים האנכיים שבמערה. פעמים רבות ניתן להבחין בארובה אנכית אשר מתפתחת כלפי מעלה עד המפגש עם שכבה בלתי מסיסה. בנקודת המפגש מפתחת הארובה רכיב אופקי לצדדים. הרכיב האופקי מסתיים, או לחילופין מגיע לסוף עדשת הצור וממשיך להתפתח בנקודה זו כלפי מעלה, או מתפתח לצדדים עד להתמוטטות שכבת הצור. בצידי הארובות ניתן להבחין לעיתים בכיסי המסה והרחבה של קו המגע בין סלע הגיר לעדשות הצור (איור 56). רוב הארובות סתומות בתחתיתן במפולות של הקומה התחתונה או שהן נעשות צרות ואין אפשרות לבדקן. הארובות מחברות במקרים רבים בין הקומות העקריות של המערה. לארובות האנכיות חתך עגול או אליפטי לאורך הסדק שעל בסיסו התפתחה הארובה (איור 57).

4.2.2.4 זרימת מים ואדוסית במערת איילון

בחלק הצפוני מזרחי של האולם בו נמצא האגם (אזורים 12, 13, נספח 2.3) מתקיים טפטוף מים קבוע, כל ימות השנה. עצמת הטפטוף ותפרושתו בתוך אזורים אלו משתנה במרחב ובזמן. לרוב מדובר בשינויים קלים, אך באירועים בהם האטמוספרה של המערה הייתה יבשה וקרה, הטפטוף היה מועט ומוגבל לנקודות בודדות. הטפטוף מתרחש מתקרת המערה שבאזור זה עשויה שכבת גיר חווארי עשירה בסימני נבירה ומסדקים בשכבת הגיר החווארי שתחתיה, וכן ניכרת זרימה דקה של מים על גבי קירות המערה באזור זה. זרימת מים זאת מתקיימת על גבי שכבת חוואר המונחת על גבי קירות ורצפת המערה באזור זה. בחלק מהמקרים זרימה זאת מותירה שכבה חומה-אדומה דקה על גבי שכבת החוואר (איור 58). ההרכב הכימי של מי הטפטוף מפורט בטבלאות 6.3, 6.4. בנוסף לטפטוף המים באזורים 12 ו- 13 (נספח 2.3), ישנם מספר מסלולי זרימה ואדוסיים נוספים במערה. הזרימה במסלולים אחרונים אלה התקיימה רק בשעת ירידת גשם על פני השטח באזור המערה. לא נמצאו סמני המסה ואדוסיים על מסלולים אלה. בקומה העליונה זרימה זאת מתאפיינת בשטיפה של שכבת הבלייה הרזידואלית מקירות המחילות אל רצפת המחילות ואל הקומה התחתונה (איור 59). לאחר גילוי המערה במרץ 2006 ניתן היה להבחין במסלול זרימה ואדוסי אחד. בחורפים שלאחר מכן החלו לפעול מסלולי הזרימה האחרים. חשוב לציין כי רוב שכבת הסלע שהיתה מעל המערה, לרבות תצורת מנוחה הקירטונית, הוסרה על ידי המחצבה בעשרות השנים האחרונות. מעל למערה נותרה כיום תקרת גיר דקה יחסית (חלק מתצורת בע'נה, איור 6). שמגבירה מאד את החדירות למי גשם, בניגוד למצב שקדם לחציבה.

4.2.3 התמוטטויות לתוך חללים קרסטיים והסטה של חללים – 'טקטונוקרסט'

4.2.3.1 תופעות של 'טקטונוקרסט' במחשופי מחצבת נשר רמלה

במחשופי המחצבה ובמחילות שנבדקו בסקר זה נצפו שרידי מפולות מלאכותיות. שתי הנסיבות בהן מתרחשות מפולות מלאכותיות רצנטיות במחצבת נשר רמלה הן פיצוצים יזומים לסתימת חללים המתגלים בקידוחי הסקר המבוצעים על ידי חברת נשר, וקריסות לא מתוכננות המתרחשות בעקבות תנועת כלים הנדסיים מעל חלל שתקרתו קרובה אל פני השטח. אירועים מהסוג האחרון מתרחשים לעיתים קרובות ומסתיימים לרוב ללא אסונות מאחר ומדובר בחללים קטנים שלא התגלו בקידוחי הסקר. ההבחנה בין מפולות טבעיות למפולות מלאכותיות בוצעה בנקל, בעיקר על פי שכבת האבק הקרבונאטי המכסה את סביבת המפולת המלאכותית.

במחשופי המחצבה זוהו מספר מקרים של חללים תת קרקעיים גדולים במיוחד (עד 60 מ') שהתמוטטו באופן טבעי והתמלאו בחלקי שכבות הסלע שהיו מעל המערה והתמוטטו לתוכה. במספר מקרים ניתן לראות בצידי האזור המרוסק בלוקים נטויים לכיוון הקריסה. שתי מערות שנבדקו במחצבה הובילו אל שרידי אולמות שקרסו בנסיבות טבעיות ועדיין לא נחשפו על ידי עבודות החציבה. בתקופה האחרונה נחשפו עדויות ארכיאולוגיות ומורפולוגיות לכך שלקריסות אלה היה ביטוי על פני השטח בצורת שקעים ודולינות התמוטטות, עדויות ארכיאולוגיות שנחשפו לאחרונה בקרבת המחצבה מצביעות על קיומן של דולינות בתקופה המוסטרית לפני יותר מ- 50000 שנה (Frumkin and Gvirtzman, 2006 ; י.זיידנר, תקשורת אישית). כמו כן זוהו מספר מקרים של קערים קרסטיים ובחלק מהמקרים ניתן היה לזהות מקבץ של מערות מתחת למרכז הקער (איור 7).

4.2.3.2 תופעות של 'טקטונוקרסט' במערת איילון

במקומות רבים בקומה התחתונה ניתן להבחין במקרים בהם המבנה ו/או צורת המחילות הופרו על ידי תנועות לאחר היווצרותן, תופעה המכונה כאן 'טקטונוקרסט'. לרוב, מדובר באירועים מקומיים בהם תקרת מחילה מוסטת קלות (איור 60) או ריסוק של שכבת סלע בקיר המחילה (איור 61. נספח 5, חתכים 'a-a', 'b-b', 'c-c'). אזור 14 (נספח 2.3) מצטיין בתופעות טקטונוקרסטיות חריפות מעט יותר ובצפיפות גבוהה יחסית. רוב המחילות באזור זה מקבילות וקרובות זו לזו, והן מתאחדות לסירוגין למחילה אחת, כאשר מהקיר שחצץ בין המחילות נותר לעיתים עמוד באמצע המחילה המאוחדת או 'סכין' (blade (Osborne 2007)) - קו חד הבולט מהרצפה ו\או מהתקרה מעל, המהווה שריד להפרדה בין שני חללים בעלי פרופיל עגול שהתאחדו. צורתן של כל המחילות באזור זה הושפעה על ידי תנועות טקטונוקרסטיות שהתרחשו לאחר שעיקר תהליכי ההמסה הסתיימו במחילות אלה. בין התופעות הניכרות באזור זה: תנועת "החלקה" על גבי מישור שיכוב (איור 62; נספח 5, חתכים 'a-a', 'b-b', 'c-c'), הסטה של שרידי קיר שחצץ בעבר בין מחילות (איור 63; נספח 5, חתך 'a-a'), עיוות של עמוד שנותר מקיר שכזה (איור 64) או הסטה של הסכין התחתונה לעומת הסכין העליונה. סוג ועוצמת הדפורמציה באזור זה משתנים בצורה משמעותית על פני מרחקים קצרים לאורך מחילה בודדת (חתכים 'a-a', 'b-b', 'c-c' צוירו לאורך אותה מחילה שאורכה כ- 15 מ').

מספר מחילות במערה נחסמות במפולות טבעיות. בנקודה הצפונית ביותר במערה (נספח 2.3 נקודה 15) המחילה נחסמת במפולת (איור 65); ניתן להבחין בקו המגע בין דופן ישרה של חלל לערימת המפולת שממלאת אותו (איור 66), הנמשך מספר מטרים למעלה, למטה ולצדדים וברור כי מדובר בחלל גדול שקרס בדומה לזה שבמערת המפולת (נספח 1.1). לעיתים מורגשת זרימת אוויר קלה אל\מ ערימת המפולת, כאשר האוויר היוצר מכיוון המפולת חם מהרגיל ודל בחמצן.



איור 56. המסה בקו המגע בין עדשת צור לסלע הסובב בדופן פיר אנכי.


איור 57. ארובת קרסט אנכית שהתפתחה על בסיס סדק ומחברת בין קומות המערה.



איור 58. דופן מחילה באזור 7 (איור 2). על גבי החוואר מונחת שכבה חומה-אדומה דקה.



איור 59. מסלול זרימה ואדוסי על קיר בקומה התחתונה. בקומה העליונה מעל נקודה זאת ניתן לזהות את המקום בו מסלול זה חוצה את הקומה העליונה וסוחף את שכבת הבלייה מדפנותיו.


איור 60. תקרת מחילה מוסטת לאורך סדק בקומה העליונה.


איור 61. שכבה מרוסקת בדופן מחילה בקומה העליונה.



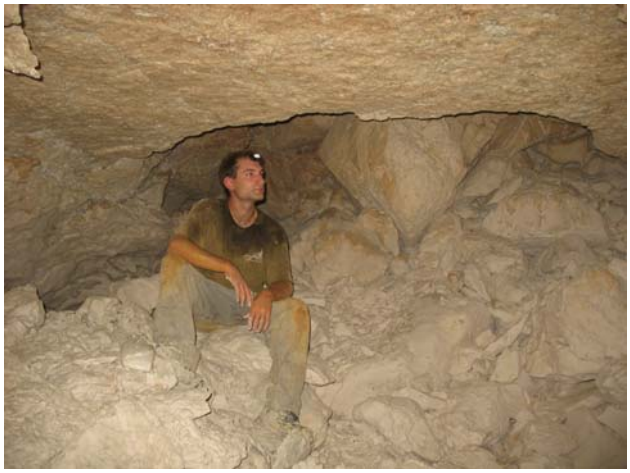
איור 62. "החלקה" על גבי מישור שיכוב בדופן מחילה באזור 9 (נספח 2.3) (צולם במיקום של חתך 'a - a, נספח 5). מידת ההסטה שנמדדה על גבי מישור זה היא 35 ס"מ.



איור 63. הסטה של שרידי קיר אשר חצץ בין שתי מחילות.



איור 64. הסטה של עמוד שהיה חלק מקיר שחצץ בין שתי מחילות ורובו הומס.



איור 65. מחילה חסומה במפולת. נקודה 17 (נספח 3).



איור 66. דופן של חלל (משמאל) עליה "נשענת" מפולת סלעים (מימין) אשר ממלאת את החלל.

4.3 המערכת האקולוגית

באגם ובסביבתו הקרובה מתקיימת מערכת אקולוגית הכוללת לפחות שבעה מינים של פרוקי רגליים (Defaye and Por, 2010. Ćurčić, 2008. Tsurnamal, 2008. Levy, 2007.), חד-תאיים משתי קבוצות וקבוצות שונות של חיידקים, ביניהם חיידקי *Beggiatoa* המתפקדים כיצרנים ראשוניים המשתמשים באנרגיה המתקבלת מחמצון הסולפיד כמקור אנרגיה לקיבוע פחמן (Engel, 2006). רוב פרוקי הרגליים שנחקרו הם מינים חדשים למדע.

4.3.1 בעלי החיים במערת איילון

4.3.1.1 הפאונה האקווטית

הפאונה האקווטית כוללת את החיידקים, שתי קבוצות של חד-תאיים וארבעה מיני סרטנים.

על פני המים מתקיים מצע בקטריאלי (filamentous) של אצות חוטיות כימואוטוטרופיות מסוג *Beggiatoa* (א. אורן, תקשורת אישית) (איור 67). חיידקי ה-*Beggiatoa* מחוברים בקצותיהם לסלעים שסביב האגם ויוצרים מעין שמיכה דקה המכסה שטח שבין 40% ל- 100% משטח האגם. כאמור בפרק 4.2.2.2, על המצע הבקטריאלי מתרחש גיבוש של משטחי קלציט דקים (רפסודות קלציט), כאשר רפסודות הקלציט מתעבות ומגיעות למאסה קריטית, מתרחשת שקיעה שלהן עם המצע הבקטריאלי לקרקעית האגם. אירועי השקיעה שבהם צפיתי התרחשו בחלקים שונים של האגם, אך לא זיהיתי שקיעה של כל המצע הבקטריאלי במקביל. לא נצפתה הצטברות של המצע הבקטריאלי ורפסודות הקלציט על קרקעית האגם.

במים, צמוד למצע הבקטריאלי חייה אוכלוסיה של חד-תאיים משתי קבוצות: ריסניות (*ciliates*) וכמות קטנה יותר של אמבואידים (*ameboids*) (ח. דימנטמן, תקשורת אישית).

אוכלוסיית הסרטנים באגם מונה ארבעה מינים של סרטנים חסרי עיניים וצבע. נמצאו שני מיני שטרגלים ציקלופואידים (Copepoda, Cyclopoida); *Metacyclops subdolus* ו- *Metacyclops longimaxillis* (Defaye and Por, 2010). גודלם של סרטנים אלה לא עולה על 0.1 מ"מ והם נצפו חיים במי האגם בעיקר בשכבה העליונה של המים, צמוד למצע הבקטריאלי. נצפו גם מספר פרטים בשלבים פגיים (larval stage) המכונים copepodite ואף שקי ביצים (Defaye and Por, 2010). נמצא גם מין אחד של סרטן מהסוג *Tethysbaena*; גודלם של הפרטים הבוגרים, של מין זה, הוא כ- 2 מ"מ ואף הם נצפו חיים בעיקר בחלק העליון של גוף המים. נצפו פרטים בוגרים, שלבים פגיים ואף נקבות נושאות שק ביצים.

סומית איילון - *Typhlocaris ayyaloni* (Tsurnamal, 2008) הוא הגדול שבסרטנים החיים במערת איילון. מדובר בסרטן ארוך בטן ממעשירי הרגליים, חסר פיגמנט ועיניים. הגודל השכיח הוא בין 2-3 ס"מ והפרט הגדול ביותר שנצפה היה בגודל 4.82 ס"מ. לא נמצאו פרטים קטנים מ 12 מ"מ או נקבות נושאות ביצים. פרטים של סרטן זה נצפו מגיחים מ \ שוחים אל החללים שבשכבת סלעי המפולת שבקרקעית האגם. בחלק ניכר מזמן השהיה שלהם באגם, סרטנים אלה שוהים צמוד למצע הבקטריאלי

כאשר גבם מופנה כלפי מטה (dorsal side down), בשהייה במקום אחד או באיסוף מזון תוך כדי שחייה. לא נצפתה תגובה של סרטנים אלה לאור אך הם הגיבו לתנועות במים כגון תנועה מהירה של סרטן בן מינם או תנועה של אדם על מצע הסלעים, שסביב האגם, גם במרחק של 80 ס"מ מהם. בבדיקת תכולת מערכת העיכול של הסרטנים (Tsurnamal, 2008), נמצא שהם ניזונים בעיקר מהמצע הבקטריאלי אך גם מסרטנים קטנים יותר.

4.3.1.2 הפאונה היבשתית

על גבי המצע הבקטריאלי ורפסודות הקלציט שעל פני המים וכן על הסלעים שסביב האגם חיים שני מיני פרוקי רגליים יבשתיים. הקטן בהם הוא מין חסר עיניים וצבע של קפזנב (Collembola) שגודלו מגיע לכ- 1 מ"מ. בעליי חיים אלה ניזונים מחומר אורגני מפורק (ח. דימנטמן, תקשורת אישית). בעל חיים יבשתי נוסף הינו דמוי העקרב *Ayyalonia dimentmani* (Ćurčić, 2008) (איור 68) שגודלם עד כ- 2 מ"מ והוגדרו כמין חדש, סוג חדש ואף כ-tribe חדש (רמת ביניים בין סוג למשפחה). כמו הקפזנבאים, גם דמויי העקרב נצפו על גבי המצע הבקטריאלי ועל הסלעים שסביב האגם.

בנוסף לששת המינים החיים באגם וסביבו, נמצאו בקומה התחתונה כמה עשרות שלדים של העקרב *Akrav-israchanani*. למרות שלא נמצאו פרטים חיים של עקרבים אלה, רמת השימור הגבוהה של קליפת הכיטין של העקרבים אפשרה את הגדרתם כמין חדש, סוג חדש ואף כמשפחה חדשה של עקרבים (Akravidae n. fam.) (Levi, 2007). שלדים, נשלים וחלקי שלדים של העקרבים נמצאו כמעט בכל שטח הקומה התחתונה של המערה. השלדים (איור 69) נמצאו חלולים והתפרקו בקלות לחלקיהם השונים (גפיים, "זנב", צבתות וכדו') אפילו כתוצאה מנשיפה קלה לעברם. 27 שלדים שלמים או כמעט שלמים ברמת שימור גבוהה נמצאו על גבי משטחים גבוהים מ- 24 מ' מעל פני הים בקומה התחתונה. בנוסף לשלדים אלו נמצאו 5 שלדי עקרבים ברמת שימור נמוכה יותר ובשלבי התפרקות. שלדים אלו נמצאו, בחלקי הקומה התחתונה הגבוהים מ-30 מ'. בסריקות בתאורת UV נמצאו חלקי שלדים של עקרבים צמודים לדפנות המחילות בקומה התחתונה, לעיתים בקו אופקי. חלקי שלדים אלה נמצאו גם בגבהים נמוכים מ-24 מ' מעל פני הים אך בהם לא נמצאו שלדים שלמים.

בנוסף לבעלי החיים היבשתיים, שפורטו לעיל, נמצאו במערה גם שלושה פרטים של צרצרים, עכביש וזנבזיף. לא התאפשרה הגדרה ודאית של הצרצרים. הצרצרים נמצאו במלכודות נפילה (pit falls) שהוצבו בקומה התחתונה במטרה ללכוד עקרבים חיים, הרחק מהאגם והמערכת האקולוגית שלו, היו בעלי עיניים והגיבו לאור. העכביש נמצא אף הוא בקומה התחתונה, הרחק מהאגם ובסמוך לאחד מקידוחי הסקר של מחצבת נשר ברמלה שחדרו למערה. העכביש זוהה על ידי ד"ר גרשום לוי ז"ל כאחד ממיני העכבישים החיים בפני השטח באזור. הזנבזיף נמצא בקומה העליונה של המערה סמוך לאחד מקידוחי הסקר שחדרו למערה.

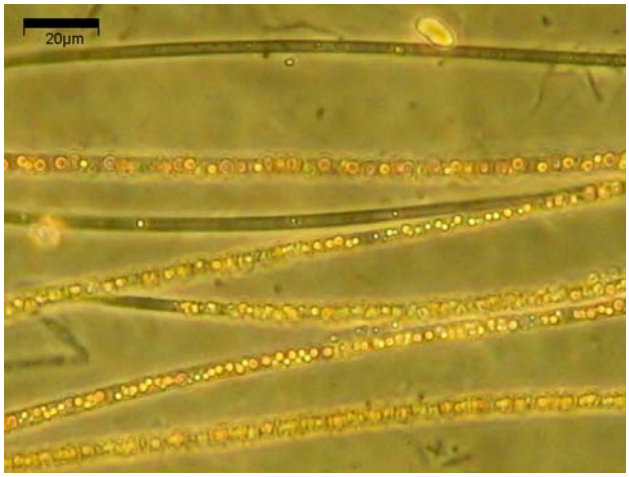
אזור 12 (נספח 2.3) נמצא ברובו מתחת למפלס מי התהום שהיה באזור בתנאים טבעיים, רוב רצפת האזור מכוסה בשכבה עבה (עד 30 ס"מ) של טין חווארי. על פני שכבה זאת נמצאו סימני נבירה של

בעלי חיים (איור 70). מבין בעלי החיים שנמצאו במערכת ותוארו לעיל, לא נמצא אף אחד שעשוי להיות קשור לסימני נבירה אלה.

כפי שתואר בפרק 4.2.2.2, נמצאו במקומות אחדים בקומה התחתונה שרידים של המצע הבקטריאלי פרושים על גבי סלעים או מקירות המערה בדומה לאלו שנצפו סביב האגם בעת ירידת מפלס מי התהום. בנוסף להם, נמצאו בשתי קומות המערה שרידים לבקטריות חוטיות תלויות מתקרת המערה (איור 71). לשרידים אלה יש מאפיינים דומים למשטחי המצע הבקטריאלי ועליהם גבישי קלציט. גבישים אלה דומים לקרומי הקלציט המכסים חלקים מדפנות החללים בקומה זו.

ההרכב האיזוטופי של פחמן וחנקן בחומר האורגני ממערת איילון ושל בעלי חיים מקבילים ככל הניתן, שנאספו בפני השטח באזור המערה, נתון בטבלה 6.10. בעלי החיים ממערת איילון מתאפיינים בערכי $\delta^{13}C$ ו- $\delta^{15}N$ שליליים ובסטיית תקן נמוכה של $\delta^{13}C$ יחסית לבעלי החיים האקווטיים והטרסטריאליים מפני השטח.

כל מיני הסרטנים החיים באגם של מערת איילון נמצאו במחקר זה גם במי התהום האנומליים בחלקים אחרים של מחצבת נשר רמלה. הם זוהו בחלק מקידוחי הסקר של חברת נשר אשר חודרים אל מתחת למי התהום שבהם נמדדו טמפרטורות גבוהות מ 25°C ומוליכות חשמלית גבוהה מ $1.7_{mS/cm}$ וכן בקידוח "איילון 1" הסמוך למחצבה (800 מ' מדרום למערה). למעט אתרים אלה, בשל קשיים טכניים, לא התאפשרה גישה לאקוויפר במקומות נוספים בתחומי אנומלית איילון.



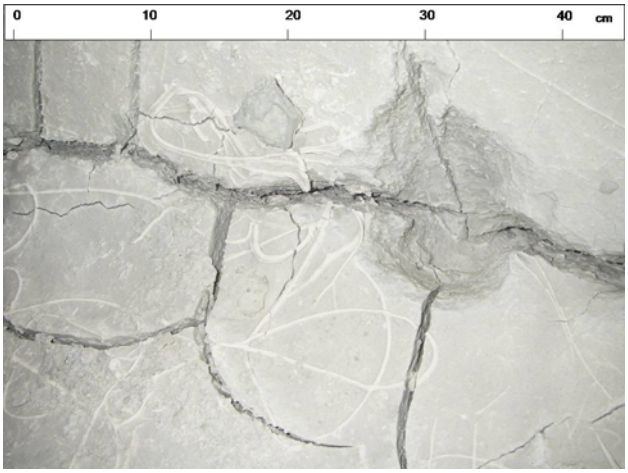
איור 67. חיידקי *Beggiatoa* מהמצע בקטריאלי שעל פני האגם. התרכיזים הצהובים שבגוף החיידקים הם ריכוזי גופרית הנמצאת בתהליך חמצון תוך תאי. צילום א. אורן.



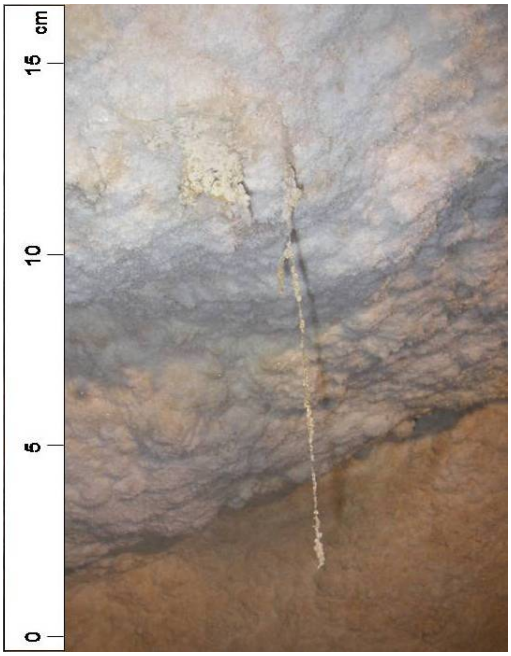
איור 68. דמוי העקרב *Ayyalonia dimentmani* על גב סלע סמוך לאגם



איור 69. שלד כיטין חלול של *Akrav-israchanani* בקומה התחתונה של מערת איילון.



איור 70. סימני נבירה על גבי שכבת טין חווארית על קרקעית המחילה באזור 12 (נספח 2.3).



איור 71. שריד של בקטריה חוטית תלוי מתקרת מחילה בקומה העליונה.

5 דיון

5.1 מי התהום

ערכי Eh שנמדדו באגם הינם הערכים השליליים ביותר שנמדדו באזור זה של האקוויפר (טבלה 6.6) (-326 mv – -269). יתכן שהשוני ב-Eh הוא תוצאה של המדידה IN SITU לעומת שאר המדידות שבוצעו במים שנשאבו מבארות. על אף העובדה שבאמצעים שלנו לא ניתן היה להבחין בשכבת מים מחומצנת, שיכבה דקה כזאת ככול הנראה קיימת סמוך לפני המים, מאחר והמים נמצאים במגע עם אויר שכולל חמצן ומאחר ושכבה כזאת הינה חיונית לקיום החיים במים. יש לציין שלא הייתה אפשרות לחקור שונות מרחבית בסקלה גדולה מהמקומית.

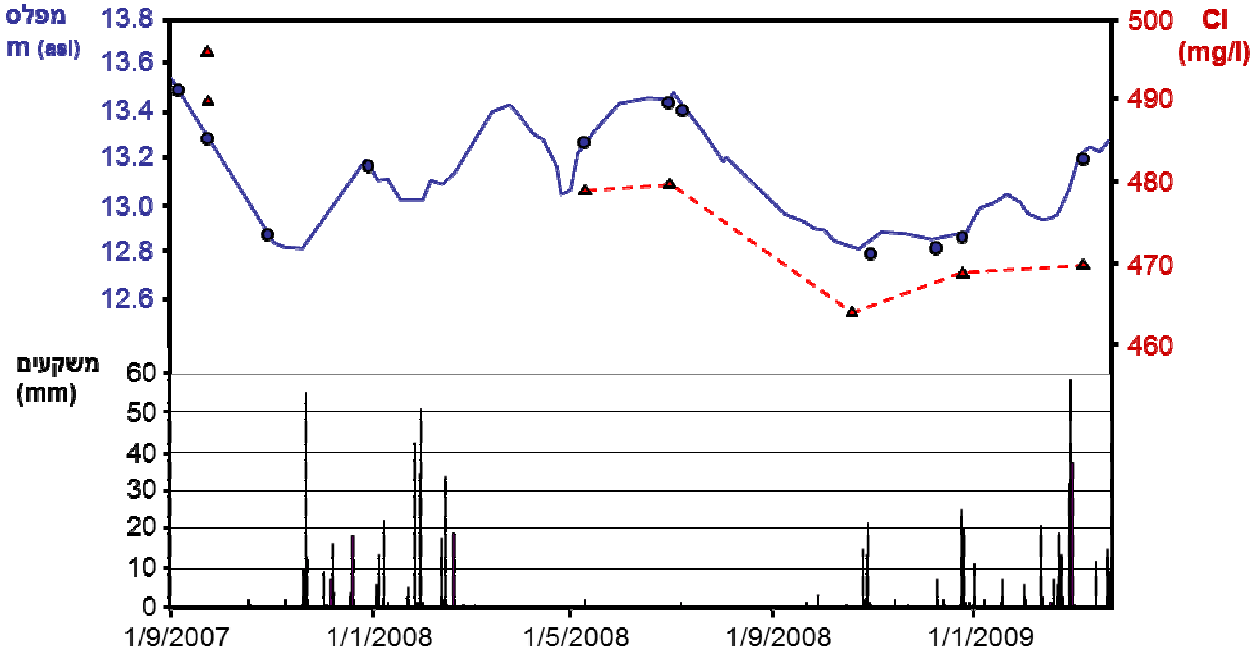
בתאריך 21/5/2006 נדגמו מים משני עומקים שונים באגם (מפני המים ומהעומק המירבי) לצורך אנליזה כימית. ונמצא כי ריכוז הכלורידים גבוה יותר בעומק האגם (טבלה 6.1). יתכן ששכבת המים העליונה באגם נמהלת על ידי מי הטפטוף. מאידך, יתכן והדבר נובע מהמלחה ממקור עמוק. השכבתיות מעידה על סטגננטיות מסויימת והעדר ערבוב של עמודת המים באגם. ירידת המפלס וצמצום גובה עמודת המים בתקופת הסקר לא אפשרו בדיקה מעמיקה יותר של שכבתיות מי האגם.

מי האגם במערת איילון נמצאו בדרך כלל מלוחים יותר ביחס לבארות באזור שבין ראש העין לכפר אוריה שיוצגו בעבודה זאת לצורך השוואה. ידוע על קידוחים לתת-האקוויפר העליון בהם נמצא בעבר ריכוז כלורידים גבוה מזה של מערת איילון (בקידוחים הנזכרים ב- Blake and Goldschmidt (1947): רמלה 1303 עם 715 מגכ"ל, נוטייה 1 ו-2 עם 720 מגכ"ל, וגם בקידוח כפר אוריה 7 – עד 1,510 מגכ"ל) אך קידוחים אלה נאטמו מבלי שבוצעו בהם בדיקות כימיות מלאות.

5.1.1 קשר בין מליחות למפלס

על פי איור 72, נראה כי קיים קשר ישר בין המפלס לרמת המליחות במי האגם וכי עליית המפלס, המתרחשת בדרך כלל במהלך אירועי הגשמים ומייד לאחריהם, מלווה בעלייה במליחות המים. ניכר גם כי רמת המליחות מגיבה לשינויים במפלס. קשר זה מחזק את ההשערה שמקור ההמלחה בתת האקוויפר התחתון (Frumkin and Gvirtzman, 2006). אמנם, עליית המליחות בקשר עם עליית המפלס (כתוצאה מהגדלת מילוי חוזר) יכולה להיגרם ע"י כניסת מים עם מליחות מוגדלת מהאזור הלא רווי. אבל, קצב טפטוף נמוך וכמעט קבוע בזמן שולל אפשרות זו. בנוסף, מדידות בודדות הציגו כי דווקא החלק העליון של עמודת המים באגם מתאפיין במליחות נמוכה יותר. פער בעומדים ההידראוליים בין שני תתי האקוויפרים לטובת תת האקוויפר התחתון קשור לכליאת תת האקוויפר התחתון במעלה הזרימה, באזור ההר: הגובה של קו הכליאה של תת האקוויפר התחתון באזור ההר הינו גבוה באופן משמעותי מזה של תת האקוויפר העליון. פער עומדים שכזה יכול להניע זרימה אנכית המוליכה מים מלוחים וחמים מתת האקוויפר התחתון אל תת האקוויפר העליון (אם כי, מים שכאלה לא נמצאו עדיין בקידוחים הבודדים החודרים לתת האקוויפר התחתון באזור (זילברברנד וחוב', 2006). העומד בתת האקוויפר התחתון יכול לעלות בעקבות אירועי גשם כתוצאה מהתנודתיות הרבה של המפלסים באזורי המילוי, ולהניע זרימה

אנכית מוגברת כלפי מעלה, שתתקיים מספר ימים או שבועות עד להשוואת העומדים בין שני תתי האקוויפרים.



איור 72. השתנות המפלס, וריכוז הכלוריד באגם שבמערת איילון ומשקעים שנמדדו בתחנת גימזו בתקופה שבין 25/09/07 ל- 27/12/08. —— מפלס המים בבאר איילון 1. ● מפלס המים במערת איילון.
ריכוז הכלוריד במערת איילון. ▮ גשם יומי מצטבר בתחנת גימזו.

בחלק מהנתונים בהם נעשה שימוש בעבודה זאת חסר מידע אודות ריכוז ה- HCO_3^-. לכן, בחלק מהמקרים שידונו בפרק זה, נבחר ה- Cl^- (אשר מתנהג בצורה קונסרבטיבית במערכת זאת) כמדד לרמת מליחות המים במקום ה- TDS.

5.1.2 הכימיה של המים במערת איילון והקשר למי תהום אחרים באזור האנומליה

המים של מערת איילון מוצגים להלן על ידי יחסים כימיים ואיזוטופיים (איורים 91-73) בהשוואה לנתונים מהספרות על גופי מים אחרים באזור. היחסים הכימיים מצביעים על כך שמי התהום במערת איילון הם האנומליים ביותר מבין הנתונים המוצגים, כלומר נמצאים מבחינת המליחות בדרך כלל בקצה המלוח של קו ערבוב שלאורכו מפוזרים מימי תת האקוויפר העליון.

הקשר בין Cl^- ל- TDS (איור 73) הינו ליניארי, וכך גם הקשר שבין Na ל- TDS. לעומת זאת הקשר בין B ל- Cl^- (איור 74) או בין Li ל- Cl, אשר נחשבים גם הם יסודות קונסרבטיביים, מראה שני קווי ערבוב. קו מתון בו נמצאות רוב הבארות ומערת איילון וקו תלול בו נמצאות הבארות כפר אוריה 3, 7, 8, ו- 9א, אשתאול 1, 2א, 4, 6, 8 ו- 9 הרטוב 4, זיכרון רוטשילד וראש העין 2. תמונה דומה מתקבלת גם מהקשר בין Rb ל- Cl. יתכן וגורם ההעשרה ב- B, Li ו- Rb מצביעיה על קיום של מספר

גופי מים שונים באזור אנומליית אילון, אך נושא זה חורג מתחום עבודה זאת. יחס rNa/rCl במערה דומה לבארות שבסביבה (איור 75) ולזה שדווח על ידי זילברברנד וחוב' (2006) ועל ידי כץ (2001).

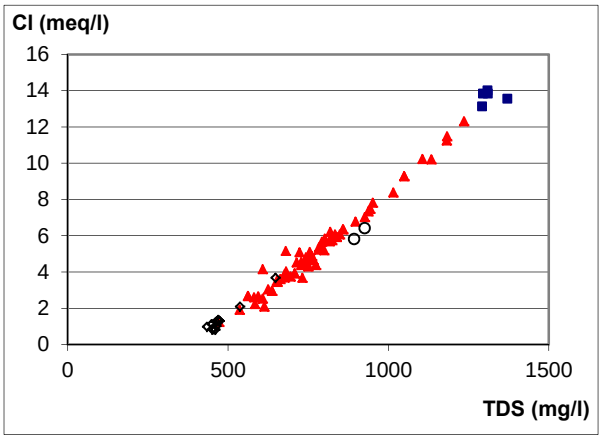
ריכוזי היונים SO_4^{2-}, Ba^{2+}, ו- Sr^{2+} ביחס ל- Cl^- (איורים 76-78) מראים עליה ליניארית בקרוב עד ל-TDS של כ-1,000 מג"ל. מעל ערך זה של TDS, עליית ריכוז ה- SO_4^{2-} מתמתנת, ריכוז ה- Sr^{2+} אינו משתנה וריכוז ה- Ba^{2+} אף מראה מגמה קלה של ירידה. גם ריכוז ה- Ca^{2+} יחסית ל- Cl^- (איור 79) מראה מגמה דומה לזאת של SO_4^{2-}, אם כי פחות מובהקת. לכאורה, ניתן לייחס מגמות אלה להשקעת $CaSO_4$, $BaSO_4$ ו- $SrSO_4$ כתוצאה מחמצון H_2S המתקיים במערת איילון ובבארות בהן תכולת המלחים גבוהה יותר ובהן נוכחות גבוהה יותר של סולפיד. אבל, חישוב מידות רוויה (זילברברנד וחוב', 2006) שולל אפשרות שקיעת המינרלים הנ"ל במי התהום באזור. יתכן והתנהגות היונים הנ"ל ניתנת להסבר ע"י עליה יחסית של תפקיד הכלורידים במים מלוחים יותר (ראה למטה). יתכן וההתמתנות בעליית ריכוז ה- SO_4^{2-} עם העלייה במליחות קשורה בחיזור בקטריאלי של ה- SO_4^{2-}. אפשרות זו נתמכת על ידי ריכוז הסולפיד הגבוה יחסית במים האנומליים, שחלקו נפלט כגז H_2S ממי התהום.

עיקר המומסים במרכיב הקצה המתוק (TDS ≈ 430 mg/l) הינם Ca^{2+}, Mg^{2+} ו- HCO_3^- המהווים עד 85% מה- TDI (באקוויוולנטים) ובמים המלוחים ביותר (מערת איילון) חלקם יורד ל 30%. ניכרת שונות גבוהה יחסית בריכוזי ה- Ca^{2+} (איור 79) וה- Mg^{2+} במרכיב הקצה המתוק; שונות זו ניתן להסביר במגוון הסלעים (גיר ודולומיט) שבאו במגע עם המים ובתגובות בין המים לסלע, לרבות השקעה אפשרית של קלציט, מהמילוי החוזר ועד שדות השאיבה. הגורמים העיקריים בהמלחת המים הינם Na^+ ו- Cl^- (ביחס $\overline{rNa/rCl} = 0.90$) אשר מהווים כ- 15% מה- TDI (באקוויוולנטים) במרכיב הקצה המתוק וחלקם עולה לכ- 65% במים המלוחים ביותר. ריכוזי היונים Ca^{2+} ו- SO_4^{2-} עולים בממוצע ב- 1.5 meq/l במרכיב הקצה המלוח יחסית לזה המתוק (איור 80).

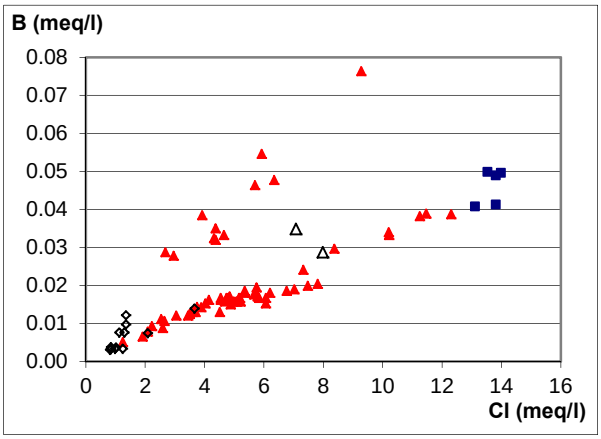
מבחינת ההרכב האיזוטופי של המים, $\delta^{18}O$ ו δD (שתי דגימות: (1) ‰5.12- ‰23.5-; (2) ‰5.23- , ‰23.0- בהתאמה) (טבלה 6.5, איור 81), מי התהום במערה דומים למי תת האקוויפר העליון של חבורת יהודה (זילברברנד וחוב', 2006). לעומת זאת, בהשוואה למי תת האקוויפר התחתון באזור, ההרכב האיזוטופי של מי האגם כבד יותר ב $\delta^{18}O$ וברוב המקרים גם ב δD. ניתן להסביר הכבדה ב $\delta^{18}O$ על ידי המסת סלע קרבונטי ועל ידי תהליכים ביולוגיים במערה.

ריכוז משמעותי של חומר אורגני מומס שנדגם בטפטוף המים שבמערה (8.6 ppm, טבלה 6.3) יכול להוות מקור חומר אורגני למערכת האקולוגית וליצירת תנאים מחזרים (כפי שהוצע על ידי בורג וחוב', 2001, 2008). מאידך, העדר פחמימני דלק (TPH) במי הטפטוף ובמי האגם שולל את האפשרות שמקורו של החומר האורגני בשכבות הוא בביטומן. התכונות הכימיות של מי הטפטוף (איורים 74, 75, 77, 78, 79, 80 ו-81) שוללות את האפשרות שמים אלה הם מקור המלחים לאנומלית איילון. יש לציין

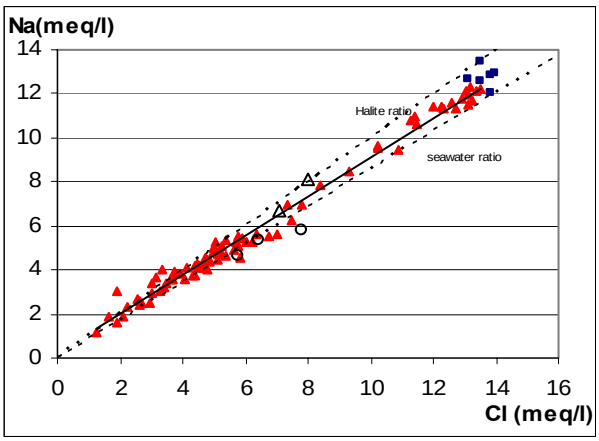
כי המליחות במי הטפטוף היא גבוהה מזאת שיכולה להיווצר תוך אידוי מי גשם באזור הלא רווי (ריכוז כלוריד במי גשם בירושלים – כ-9 מג"ל). ידוע, כי מקדם מילוי חוזר (החלק מנפח הגשם שמגיע למי תהום) מהווה בד"כ 20-40%, כלומר, ריכוז כלוריד במי טפטוף היה צריך להיות 23-45 מג"ל בלבד (לעומת ריכוז כלוריד של כ- 250 מג"ל במי הטפטוף). כנראה, קיים מקור המלחה נוסף בסלע הקרבונטי אשר מעל המערה. מקור זה יכול להיות במים שבתווך הנקבובי באזור הלא רווי. המרחק האופקי בין טפטוף המים לשולי המחצבה הינו כ 150 מ' (איור 6). אם מקור המים הוא בפני השטח הטבעיים (מחוץ לשטח המחצבה) אזי, מסלול הזרימה של המים מפני השטח ועד הטפטוף יהיה תת אופקי (בנטייה של עד - 37° מהאופק) ובטווח זה תתכן תרומה של מרכיבים אנתרופוגניים מפני השטח שבמחצבה למי הטפטוף.



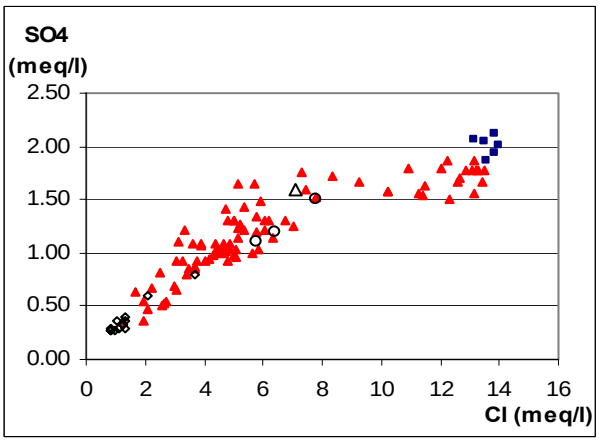
איור 73. הקשר בין Cl ל- TDS.



איור 74.הקשר בין B ל- Cl.



איור 75. הקשר בין Na ו- Cl. קו המגמה המתקבל מהנתונים שנאספו בתת האקוויפר העליון הוא $Na = 0.90Cl + 0.15$ עם $R^2 = 0.99$. הקוים המקווקווים מציינים את הקשר הנ"ל במי ים (למטה) והמסת הליט (למעלה)



איור 76. הקשר בין ריכוז הסולפאט ל- Cl.

מקרא:

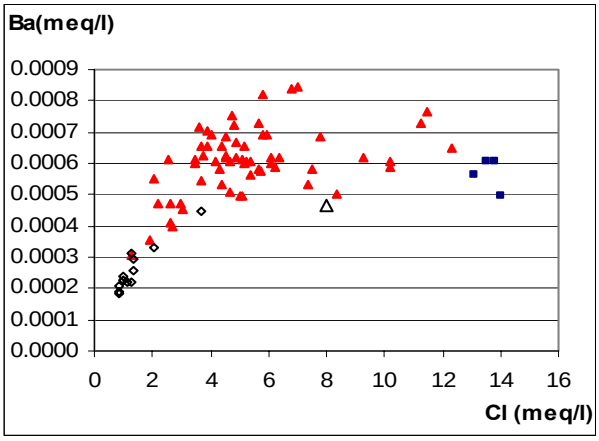
■ - מי תהום ממערת איילון.

▲ - תת האקוויפר העליון של אקוויפר ירת"ן באזור.

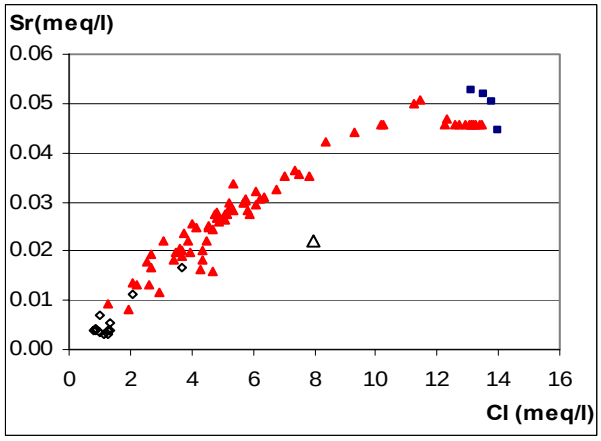
◊ - תת האקוויפר התחתון של אקוויפר ירת"ן באזור.

Δ - מי הטפטוף ממערת איילון.

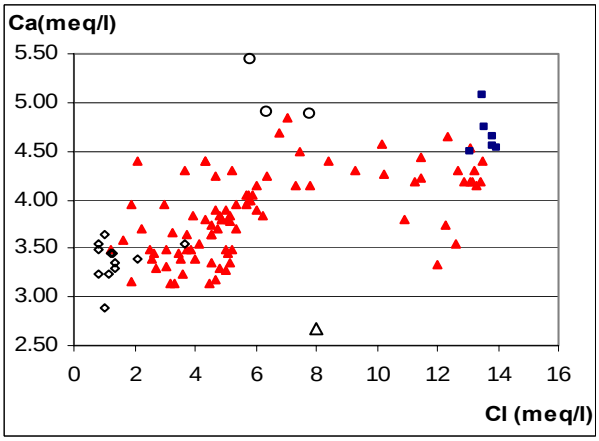
○ - מים מהאקוויפר הסנוני בקידוח כפר אוריה 9.



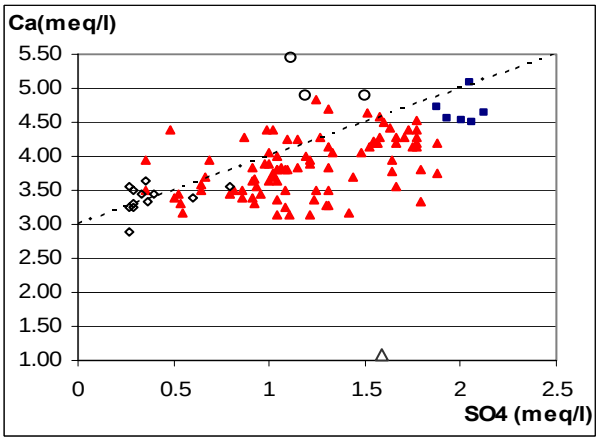
איור 77. הקשר בין ריכוז הבריום ל- Cl.



איור 78. הקשר בין ריכוז ה- Sr^{2+} ל- Cl.



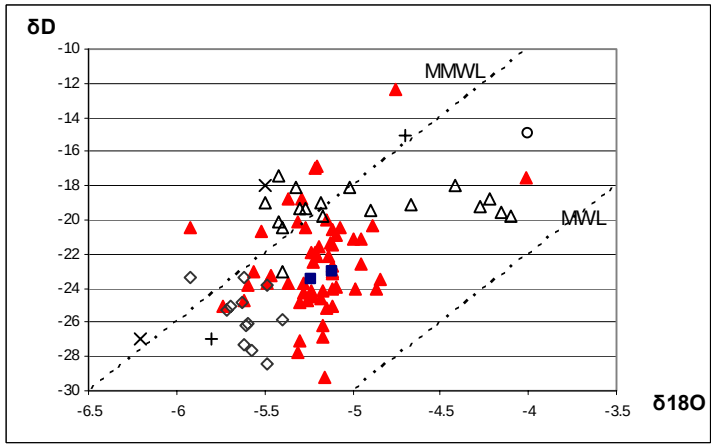
איור 79. הקשר בין ריכוז ה- Ca^{2+} ל- Cl.



איור 80. הקשר בין ריכוז ה- Ca^{2+} ל- SO_4^{2-}. (- - -) קו הגבס

מקרא:

■ - מי תהום ממערת איילון. ▲ - תת האקוויפר העליון של אקוויפר ירת"ן באזור. ◊ - תת האקוויפר התחתון של אקוויפר ירת"ן באזור. Δ - מי הטפטוף ממערת איילון. ○ - מים מהאקוויפר הסנוני בקידוח כפר אוריה 9.



איור 81. הקשר בין δD ל- $\delta^{18}O$ במים ממערת איילון (■), בבארות מתת האקוויפר העליון של אקוויפר ירת"ן באזור מזילברברנד וחוב' 2006 (▲) ומ- Kroitoru, 1987 (Δ), בבארות מתת האקוויפר התחתון של אקוויפר ירת"ן באזור (זילברברנד וחוב' 2006) (◊), במים מהאקוויפר הסנוני בקידוח כפר אוריה 9 (Kroitoru, 1987) (○), במי גשם באזור המילוי (Ayalon et al, 1998) (+) ובמים בתווך הבלתי רווי באזור המילוי (Ayalon et al, 1998) (x).

5.2 מערכת הקרסט

החתכים הסימטריים העגולים והאליפטיים האופייניים למחילות הקומה העליונה, הדימיון המורפולוגי בין תקרת המחילות, קירותיהן ורצפתן (כאשר האחרונה לא מכוסה בחרסיות) והעדר סימני זרימה טורבולנטית (כגון scallops) בקומה זו מצביעים על היוצרות קומה זו בתווך הפריאטי, מתחת למפלס מי התהום בתנאים של זרימה איטית מאד (Klimchouk, 2007; Hill, 1990; Brik et al, 2005).

העדר הקשר של מחילות קומה זו עם פני השטח בצורת פירים אנכיים או סדקים מורחבים, יחס אורך\רוחב גבוה במיוחד, מבנה של רשת דמוית מבוך, אפשרות לקיום קשר הידרולוגי כלפי מטה בצורת פירים אנכיים, סדקים מורחבים והמסה לאורך מישורי שיכוב (כמו בחלק התחתון של מערת המים), התרחבות של חללים וסדקים מורחבים מתחת לעדשות צור וריכוז של חללים מתחת לשכבת הקוורצוליט (מערות 2 ו- 3), הופעה של אלמנטים הקשורים בקונבקציה חופשית של מים כגון כיפות המסה ושרשראות כיפות המסה, הופעת הסולפיד במי התהום היום והטמפרטורה הגבוהה שלהם, מלמדים שהקומה העליונה של מערת איילון ומערות אחרות שנצפו במחשופי מחצבת נשר רמלה נוצרו בתנאים היפוגניים כלואים (Klimchouk, 2007; Hill, 1990; Palmer and Palmer, 2000).

האולמות הרחבים המאפיינים את הקומה התחתונה של מערת איילון, ההתמוטטויות הרבות, סימני ההמסה הניכרים בקירות ותקרת המחילות כגון: כיסי המסה, המסה על בסיס מישורי שיכוב וכן העדויות השונות למיקום מפלס מי התהום בתוך המחילות כגון: אולמות ההתמוטטות הרחבים מצביעים על תנאים פריאטיים במפלס מי התהום או קרוב למפלס מי התהום (Frumkin and Fischhendler, 2005). מאידך, יחס אורך\רוחב גבוה יחסית (L/W = 189) מציע שקומה זו נוצרה בשני שלבים, ספלאוגנזה ראשונית בתנאים היפוגניים כלואים בדומה לקומה העליונה. השלב השני מיוצג על ידי המצב שהתקיים עד שנות ה-60, שבו כ- 80% משטחו של הקומה התחתונה היה מוצף ופעיל. מאז מפלס המים נסוג ביותר מ- 10 מ' והשטח המוצף הצטמצם בכ- 95% עקב שאיבת יתר מהאקוויפר. אילולא הפעילות האנתרופוגנית, אם כן, הקומה התחתונה הייתה מוצפת ברובה עד היום, וממשיכה את השלב השני בהתפתחותה ש"יכולה להיחשב לשלב ההכחדה של הספלאוגנזה ההיפוגנית" (Klimchouk, 2007, 2009).

5.2.1 שלבים ותהליכים בהתפתחות מערכת הקרסט של מערת איילון ומערות נוספות באזור העבודה

בפרק זה יוצג תרחיש מוצע, המסביר באופן המיטבי את מגוון התצפיות והתוצאות שהוצגו בפרק 4. התצפיות המורפולוגיות וההידרולוגיאולוגיות (כמפורט להלן) מעידות כי לא ניתן לייחס את היווצרות המערה לחדירת מים אפיגניים מלמעלה, אלא רק למים היפוגניים שעלו מלמטה. לכן ניתן לאמץ את ההנחה שמי התהום המופיעים כיום במערה דומים למים שיצרו אותה, אם כי התרוממות האזור גרמה לשינוי בתנאים ההידרוגאולוגיים מאז תחילת ההיווצרות – בעיקר ירידת מפלס מי התהום.

שלב א': ספלאוגנזה היפוגנית בתנאים כלואים

בשלב זה, שררו באקוויפר תנאים כלואים, סלעי חבורת יהודה עדיין היו מכוסים בשכבה עבה ורציפה של סלעים מחבורת הר הצופים ואולי אף צעירים יותר והעומד ההידראלי היה גבוה מגג האקוויפר. אל תת האקוויפר העליון זרמו (discharged) מים הידרותרמלים, מלוחים ונושאי סולפיד ממקור עמוק שעלו בזרימה חוצת שכבות, יתכן שלאורך סדקים, העתקים ו\או ארובות קרסט אנכיות, דרך אזור יצירת המערה. כניסת המים ההידרותרמליים הביאה ליצירה נרחבת ויוצאת דופן של מערות באזור, הן מבחינת הכמות והן מבחינה מורפולוגית. מנגנוני ההמסה שיכלו לפעול באזור הם: חמצון סולפיד שמקורו במים ההידרותרמלים כתוצאה מערבוב עם מי האקוויפר המחומצנים, התקררות המים התרמלים וערבוב בין שתי תמיסות בעלות ריכוזים שונים של H_2S, CO_2, או של מלחים מומסים. הראשון הוא הגורם האגרסיבי ביותר שיכול לפעול בתנאים הקיימים היום באזור.

הצמידות הקיימת בין מחילות הקומה העליונה לאופק החרסית והתבדרות מחילות אלה במקומות בהם אופק החרסית נעדר מצביעים על כך, שהמיקום האנכי של מחילות הקומה העליונה הושפע מאופק החרסית ואף מהשינוי הליתולוגי המתלווה אליו (הופעת למינות החרסית בשכבת הסלע שמעל). Brik et al (2003, 2005) הראו שיש העדפה להיווצרות מערות מבוך היכן שיש הטרוגניות ברמת המוליכות ההידראולית האנכית של מערכות הסידוק. אופק החרסית והופעת למינות החרסית בשכבת הסלע שמעל מצביעים על שינוי שכזה. יתכן שמנגנון דומה קשור גם להיווצרות חללים מתחת לאופק הקוורצוליט ולעדשות הצור ואף להרחבה של סדקים וארובות הקרסט מתחת לעדשות הצור. המשותף בין הקומות השונות של המחילות הללו הוא, שהאופקים הפחות מסיסים/פרמאביליים ממקדים לאורכם זרימה לטראלית. זרימה כזו מועדפת ביחס לזרימה חוצת שכבות כלפי מעלה, המוגבלת על ידי השכבות הפחות קארסטיות.

ההבלטה של אופק החרסית אל מחילות הקומה העליונה וסימני ההחלקה בין הלווחים המרכיבים אותו מראים שבשלב ב', לאחר היווצרות החללים, אופק החרסית נדחס ונלחץ אל החללים תחת הלחץ הליתוסטאטי של הסלע שמעליו, כמו משחת שיניים הנלחצת החוצה מן השפופרת.

יתכן ואף סביר שבשלב ההיפוגני הכלוא נוצרו חללים נוספים במקביל כגון אלו שברום 43-48 ו-60-67 מ' מעל פני הים, מערת הסדק ומערות נוספות בעלות מאפיינים מורפולוגיים דומים שזוהו במחשופי המחצבה. בתנאים אלה ובהינתן קשר הידרולוגי בין הקומות, תתכן נדידה של חרסיות שהן שארית בלתי מסיסה מקומה אחת לקומה אחרת וסתימה מלאה או חלקית של חללים קיימים על ידי חרסיות.

שלב ב': ספלאוגנזה היפוגנית פריאטית במפלס מי התהום

תהליכי התרוממות ודנודציה הפועלים באזור במיליוני השנים האחרונות הביאו לירידת מפלס מי התהום מתחת לגג האקוויפר ולהדקקות של סלעי חבורת הר הצופים ואף לחשיפת סלעי חבורת יהודה בחלק מהאזור. העדר עדויות למפלס מי תהום במחילות הקומה העליונה של מערת איילון יכול להצביע על ירידה מהירה יחסית של המפלס על פני מחילות אלו או שסימנים שהיו טושטשו על ידי תהליכי המסה

בהתעבות אשר יידונו בהמשך פרק זה. העדר עדויות כאלה בקומה העליונה בולטת לאור הנוכחות שלהן בקומה התחתונה (דוגמת קווים אופקיים של משקעי מערות).

גם לאחר התייצבות מפלס מי התהום בגובה מחילות הקומה התחתונה של מערת איילון, המשיכה להתקיים אותה זרימה עולה של מים חמים, מלוחים ונושאי סולפיד ממקור עמוק, אך בתנאי אקוויפר חופשי. מים אלה נפרקו אל תת האקוויפר העליון של חבורת יהודה קרוב מאד למפלס מי התהום. שם, בסיוע של ערבוב המים האנומלים עם מי האקוויפר, התרחשה עיקר ההמסה. בתנאים אלה, כאשר מפלס מי התהום הוא שמכתיב את הגובה בו תתרחש ההמסה, המחילות מתפתחות אופקית לצדדים, ומתרחשת המסה לתוך מישורי שיכוב. כיסי המסה ו- spongework על קירות המחילות הן עדויות לשלבים בהתפתחות האופקית של החלל. התרחבות המחילות הביאה לקריסות רבות של תקרת המחילות, קריסות אשר יצרו את שכבת המפולת שבקרקעית המחילות.

תהליך זה של הרחבת המחילות לכדי אולמות וקריסות של תקרתן עיצב את הקומה התחתונה של מערת איילון ומחק את צורת המחילות הראשונית. אפשר גם שההתרחבות האופקית בראש הפיר הצפוני של מערת המים שבגובה 23.3 מ' מעל פני הים (קרוב מאד למפלס מי התהום שהיה קיים באזור עד שנת 1960) (נספח 1.2, היטל אנכי 'a-a) היא תוצאה של ספלאוגנזה במפלס מי תהום.

חוסר הודאות באשר לעובי שכבת המפולת הבונה את רצפת המחילות בקומה העליונה יוצר קושי להעריך את נפח הסלע שהומס בקומה זו. במקרים מסוימים, שכבת המפולת יוצרת מדרון שגובהו עולה על 10 מ' ובשום מקרה לא ניתן לזהות בקומה התחתונה את תחתית שכבת המפולת. מכאן ניתן להניח שעובי השכבה משמעותי ויתכן שהוא מגיע לעשרות מטרים. עובי זה ואחוז החללים הגבוה שבשכבת המפולת (שמרכיביה ארוזים פחות צפוף מאשר לפני התמוטותם) מצביעים על כך שנפח הסלע שהומס גבוה באופן משמעותי מנפח החלל הנראה לעין.

העובדה שמי התהום הנחשפים באולם האגם שבמערת איילון מהווים מרכיב קצה בקו הערבוב של המים האנומליים באזור, מציעה שהאולמות הגדולים שבמערת איילון וכן האולמות הממוטטים שנצפו במערת איילון, במערת המפולת ובמחשופי המחצבה נוצרו מעל "hot spots" (Frumkin and Gvirtzman, 2006), הנקודות בהן התרחשה עיקר חדירת המים האנומליים אל תת האקוויפר העליון. הצפיפות הגבוהה של מחילות במערת איילון, מעל ומעבר לצפיפות המחילות בשאר חלקי המחצבה (שגם היא גבוהה ביחס למקומות אחרים) מצביעה על כך שהמערה כולה קשורה לריכוז של "hot spots".

במקביל לתהליכים שהתרחשו בקומה התחתונה של המערה סביב מפלס מי התהום, נותרה הקומה העליונה בשלב ב' בתנאים ואדוסיים. התהליכים שהתרחשו שם ירידת מפלס מי התהום נידונים להלן.

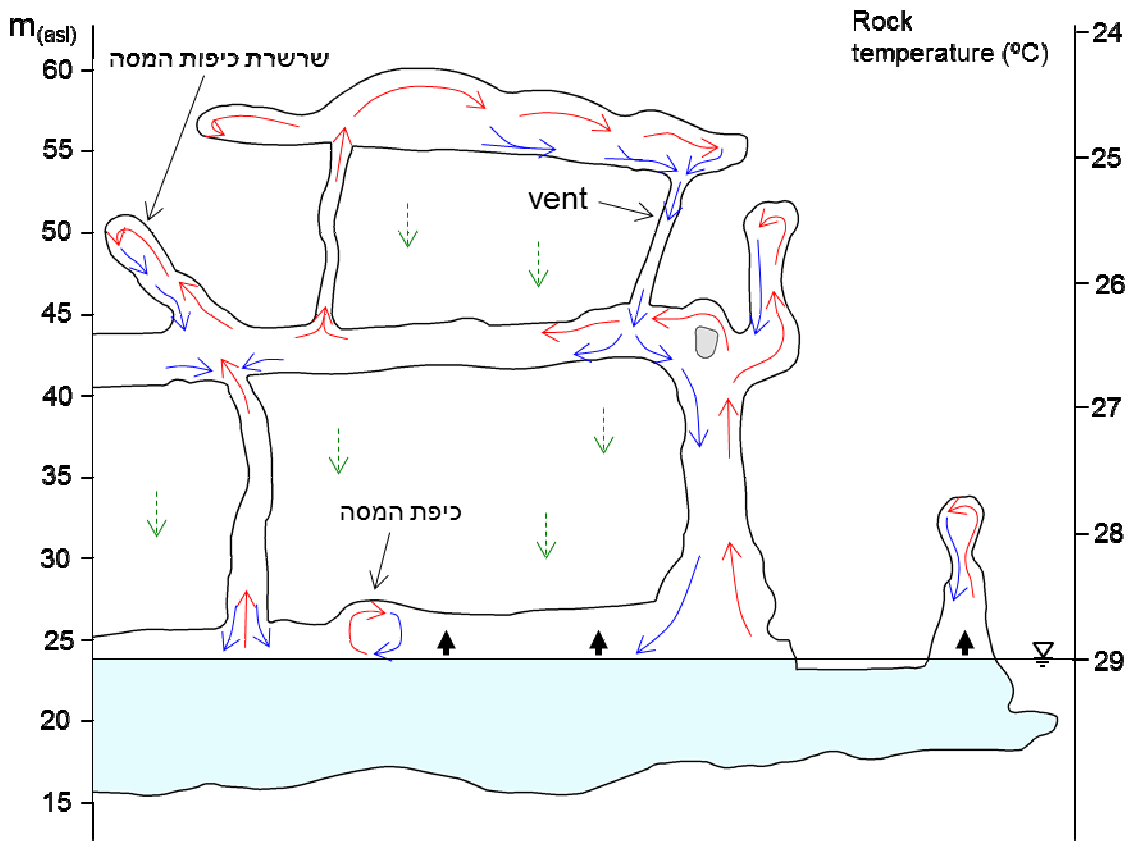
5.2.2 תהליכי הסעת חום, המסה בהתעבות והשקעה בתווך הואדוסי

שכבת הסלע הבלוי המצפה את דפנות הקומה העליונה והפירים האנכיים, וההבלטה של אלמנטים בלתי מסיסים בשכבת הסלע הבלוי, הם מאפיינים בולטים ביותר של תהליכי המסה בהתעבות (Condensation-Corrosion), המתרחשים בהעדר גוף מים שמסיר את השארית הבלתי מסיסה.

תהליכים אלה התרחשו בתווך הואדוסי, בחללים אשר יובשו בעקבות ירידת מפלס מי התהום אך נשארו בקשר ישיר או עקיף (דרך מוליכים קרסטיים) עם מי התהום.

במחילות הקומה התחתונה, אשר הכילו מי תהום ברובן עד לאחרונה, ניכרים סימנים קלים של המסה בהתעבות על תקרת המחילות ובחלק העליון של הקירות, רק היכן שתקרת החללים גבוהה ומתקרבת לגובה מחילות הקומה העליונה. המצב דומה גם בפירים האנכיים, המקשרים בין קומות המערה, בהם עובי שכבת הבלייה עולה בהדרגה עם הגובה עד למפגש עם מחילות הקומה העליונה.

בנוסף לפירים האנכיים, מתחברים אל מחילות הקומה העליונה גם מוליכים קרסטיים רבים וצרים אשר ברוב המקרים אינם עבירים ולכן לא קיבלו ביטוי במפת המערה. דפנות מוליכים אלה מתאפיינות אף הן בשכבת סלע בלוי ובמקרים רבים בגיבוש של שׂפות קלציט על דפנותיהם ובעיקר בנקודת החיבור בין מוליכים אלה למחילות הקומה העליונה. מצב דומה נצפה לעיתים בסדקים המורחבים שבתחתית מחילות הקומה העליונה. האוויר הקר והיבש (יחסית לשאר החלל) הזורם דרך פתחים בהם נצפו שׂפות קלציט (טבלה 6.7) מלמד שמוליכים קרסטיים אלה, הפירים האנכיים וכן סדקים מורחבים מתפקדים כ- Vents (פתחי אוורור) (Audra et al, 2007). צינורות אלה מוליכים זרמי קונבקציה של אוויר בין הקומות השונות, אדי מים ומים מעובים הזורמים חזרה אל מי התהום (condensation runoff). יתכן ש vents אלה מקשרים בין מחילות הקומה העליונה לקומות נוספות, גבוהים יותר אשר לא התאפשרה גישה אליהם. איור 82 מתאר באופן סכמתי את תהליך הסעת החום במערות באזור העבודה, מחזור המים והאוויר בתהליך זה.



איור 82. תהליכי הסעת החום בתוך הואדוזי במערות באזור העבודה. קונבקציה של אויר המתחמם במגע עם מי התהום זורם כלפי מעלה (↑) מתקרר במגע עם פני הסלע הקרים יחסית ושוקע (↓). אידוי מי תהום ונידוף סולפיד ממי התהום (⬆). חלחול המים המעובים אל מי התהום (↓).

5.2.2.1 תופעות עיקריות של מחזורי האוויר והמים, ההמסה והגיבוש בתוך הואדוסי

התופעות הבאות מתרחשות במקביל ובאופן מחזורי במערה בתנאים של גוף מי תהום חם בקומה התחתונה וחלל ואדוסי בקומה העליונה.

1. קונבקציה של אויר המתחמם במגע עם מי התהום; האויר החם זורם כלפי מעלה, מתקרר במגע עם פני הסלע הקרים יחסית ושוקע חזרה לקומה התחתונה. שטף החום דרך מאסת הסלע אל פני השטח משמר את הגרדיאנט התרמלי.

2. אידוי מי תהום ונידוף סולפיד ו-CO_2 ממי התהום ופיזורם בחללים גבוהים יותר על ידי זרמי הקונבקציה.

3. עיבוי מים על דפנות החללים בעת קירור האוויר. המים שמתעבים על דפנות החלל קולטים וממיסים סולפיד ו-CO_2 מחלל המערה וגורמים להמסת הסלע (המסה בהתעבות condensation corrosion), השארית הבלתי מסיסה של הסלע נשארת על דפנות החלל כשכבה בלוייה ורכה, או שנופלת ונערמת על רצפת המחילות.

4. המים המעובים זורמים על דפנות החללים כלפי מטה ומחלחלים דרך הסלע חזרה אל מי התהום (condensation runoff). בספרות מתוארים מקרים של משטחי זרימה של המים המעובים על דפנות החללים ודפוסי המסה אופייניים לזרימה זאת. בנוסף לנגר, מים מעובים יכולים לזרום במערת איילון בתווך הנקבובי המפותח שבסלע המקור או בזרימה קפילרית בשכבת הסלע הבלוי. נראה כי המים המטפטפים מתקרת הקומה התחתונה והזרימה על הקירות באזורים 12, 13 (נספח 2.3) הם מים מעובים הנמצאים במסלול הזרימה שלהם חזרה אל האקוויפר דרך התווך הנקבובי והגיעו אל תקרת הקומה התחתונה. זרימה זאת מתקיימת רק בחלק הצפוני ביותר של המערה כיוון שפני השטח (מדרגות החציבה) מעל אזור זה גבוהים יותר באופן משמעותי מפני השטח שמעל שאר חלקי המערה (איור 6) ולכן, באזור זה השתמרו חללים נוספים, גבוהים יותר, מחזור הקונבקציה גדול יותר, כמות המים המעובים גבוהה יותר ומספיקה ליצירת הטפטוף. סביר להניח אם כן, כי בתנאים טבעיים התקיים טפטוף דומה בכל מחילות ואולמות הקומה התחתונה.

5. מים מעובים מתאדים במגע של אוויר חם ולח עם אוויר קר ויבש. אידוי המים, המכילים תמיסות שמקורם בהמסת מינרלים (condensation corrosion) וסולפאט שמקורו בחמצון סולפיד, גורם לגיבוש משקעי קלציט וגבס. המקומות בהם מתרחש עיקר האידוי הם נקודות המפגש בין מסלול הזרימה של המים המעובים לזה של האוויר הקר והיבש השוקע אל האזורים הנמוכים של המערה כגון קרקעית המחילות וקצות פתחי האוורור. גיבוש בקרקעית המחילות הוא שיצר את חרבות הגבס באזור 7 (נספח 2.3) (אשר יידון בהמשך פרק זה), את מחטי הגבס אשר מופיעות בקרקעית מחילות ואת הציפוי הקלציטי המאפיין דפנות תחתונות של חלק ממחילות הקומה העליונה והבולטת שבהן היא זו שבאזור 5 (נספח 2.3) (אשר יידון בהמשך פרק זה). אידוי סביב פתחי האוורור הוא שיצר את שׂפות הקלציט המאפיינות את רוב פתחי האוורור. האוויר הקר והיבש היוצא מפתח האוורור ישקע כלפי מטה בחלל החם והלח, שקיעה זאת יכולה להסביר את צורתן של שׂפות קלציט בעלות כיוון מועדף כלפי מטה כגון אלו שבאיורים 26, 30, 31. בספרות מתוארים גם משקעי ארגוניט הקשורים באידוי מים מעובים. מבין המשקעים שנבדקו, לא נמצאו משקעי ארגוניט. יתכן שמשקעי ארגוניט שנוצרו במערת איילון עברו גיבוש מחדש לקלציט.

6. מנגנון גיבוש נוסף המתואר בספרות (Dublyansky and Pashenko, 1997) הינו מיון אירוסולים. מנגנון זה יכול להסביר יצירה של frostwork, משקעי "פופקורן", "אלמוגי מערות" ו"מחיצת" קלציט כגון זו המופיעה באיור 28.

5.2.2.2 השפעת האדם על תהליכי הסעת החום

ירידת מפלס מי התהום של אקוויפר ירת"ן מאז 1960 וצמצום היקף השטח המוצף שבעטיה הפחית את שטח המגע בין חלל המערה למי התהום וצמצם את אידוי המים אל זרמי הקונבקציה. ההרכב האיזוטופי של הפחמן באוויר המערה מלמד על גרדיינט: בחלקים העמוקים של המערה הוא דומה יותר להרכב האיזוטופי של הפחמן במי התהום, ואילו קרוב יותר לפתח המערה הוא דומה יותר לאוויר האטמוספרי.

האירועים בהם האקלים במערת איילון היה קר ויבש באופן חריג, וכן משבי אוויר המורגשים לעיתים על פני השטח בפתחים מלאכותיים של מערות ומוליכים קרסטיים ובקידוחי הסקר שמבצעת חברת נשר בשטח המחצבה מצביעים על כך שיש שחלוף אוויר בין האטמוספרה לבין חלל המערות שבקרבת מחשופי המחצבה. מכאן שהמצב בחללים הקרובים אל פני השטח החצובים כיום אינו בהכרח זהה לזה ששרר בתנאים טבעיים. הבעיה פחות חמורה או אינה קיימת בחלקים פנימיים של המערה.

5.2.2.3 שחזור מסלולי הסעת חום בתווך הוואדוסי

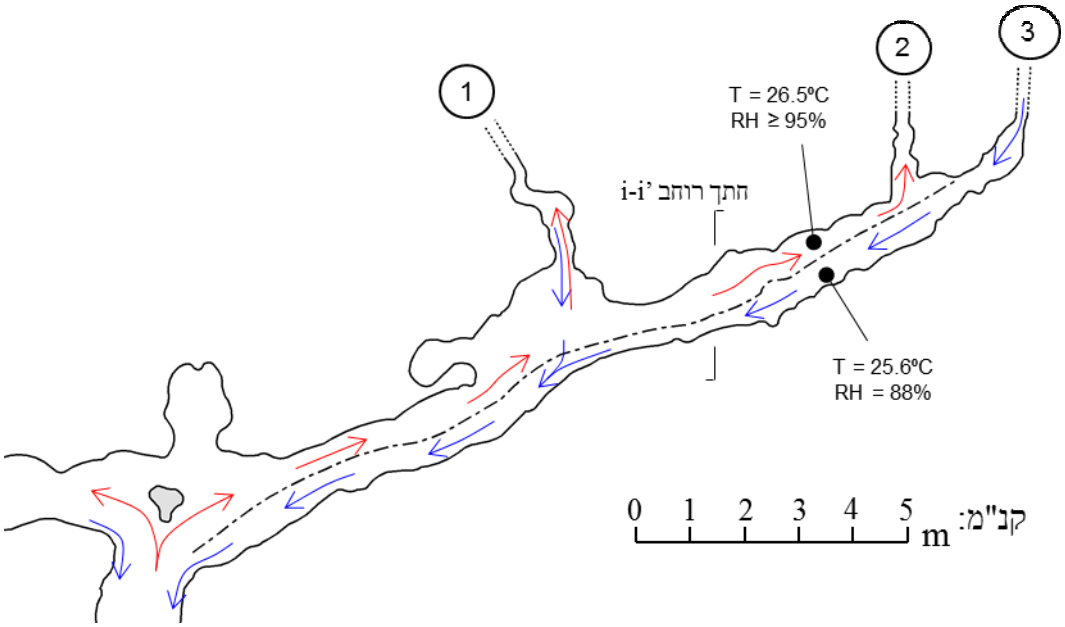
נצפתה התאמה ברורה בין תכונות האוויר (T, RH) לאופי דפנות המחילות (באזור 5 נספח 2.3): אוויר חם ולח בחלק העליון של המחילות המתאפיין בשכבת סלע בלוי לעומת אוויר קר ויבש בחלק התחתון של המחילות המתאפיין בציפוי קלציטי עבה (חתך 'i-i, נספח 5). מכאן ניתן להסיק שעדיין מתקיימים במערה זרמי קונבקציה של אוויר ותהליכים הנלווים אליה.

על פי מיקומם של משקעי המערות הקשורים בקונבקציה של אוויר וצורתם ניתן לשחזר את מסלולי הקונבקציה גם במערות שאינן פעילות או במערות בהן התנאים הטבעיים הופרו וזאת הודות לקשר הישיר בין מסלולי הזרימה למיקום וצורת המשקעים.

איור 83 מציג שחזור של מסלולי זרימת האוויר בקטע מאזור 5 (נספח 2.3) (היטל אנכי 8-8', המחילה העליונה) לאורך המחילה מתקיימת המסה בהתעבות בחצי העליון של דפנות המחילה וגיבוש קרום קלציטי על גבי חציה התחתון. אזור זה מהווה גם שלב מעבר בזרמי הקונבקציה של האוויר בין מי התהום מתחת, לבין חללים בקומות גבוהות יותר דרך פירים אנכיים וסדקים מורחבים המתפקדים כ- vents (ארובות 1,2,3). דרך ארובה 1, המאופיינת בעיקר על ידי שכבת סלע בלוי על דפנותיה ומעט ציפוי קלציטי, עברו זרמים עולים ויורדים של אוויר כאשר הזרם העולה הוא הדומיננטי. דרך ארובה 2, המאופיינת בשכבת סלע בלוי בלבד, עברו זרמים עולים של אוויר. דרך ארובה 3, המאופיינת במשקעי קלציט רבים, עבר זרם יורד של אוויר. הופעת משקעי frostwork בארובה 3 (איור 38), והתאמת כיוון הגדילה שלהם עם כיוון זרימת האוויר יכולה להצביע על גיבוש בתהליך של מיון אירוסולים. המעבר מדופן מצופה משקעי קלציט בחצי התחתון של המחילה לדופן המצופה בשכבת סלע בלוי ממעל, מאפשר לקבוע היכן עבר הגבול בין שני זרמי האוויר שעברו לאורך המחילה. הציפוי הקלציטי אשר נוצר ב-4 השנים האחרונות על גבי שכבת הבלייה באזור זה (איור 35) ובמקומות אחרים בהם נצפו קרומי קלציט על גבי שכבת הסלע הבלוי, הם ככול הנראה, תוצאה של הפרת שיווי המשקל הטבעי עקב החציבה סביב המערה. חדירת אוויר אטמוספרי, קר ויבש יחסית, אל המערכת גרמה לגיבוש קרומי קלציט על מקומות שעד לאחרונה התקיימה בהם המסה בהתעבות.

ההמסה בהתעבות יכולה ליצור חללים או לשנות חללים קיימים על ידי הרחבתם ויצירה של מבנים הקשורים בקונבקציה של אוויר (Audra et al, 2007). במערת איילון לא נמצאו ספירות גדולות (Audra et al, 2007) אך נמצאו עדויות רבות להמסה בהתעבות, דוגמת דפנות בלויות וכיפות המסה. לכן ניתן

להניח שכל חללי הקומה העליונה, הפירים האנכיים ופתחי האוורור הצרים יותר של מערת איילון נוצרו בשלב ההיפוגני הכלוא, ואילו בשלב הואדוסי עברו המחילות הרחבה נוספת ואף נוצרו כיפות המסה כתוצאה מהמסה בהתעבות.



איור 83. שחזור מסלולי זרימת האוויר במחילה העליונה באזור 5 (נספח 2.3). ↑ אוויר חם העולה ממפלס מי התהום דרך אזור החתך אל חלל/ים במפלסים גבוהים יותר. ↓ אוויר קר השוקע חזרה אל מפלס מי התהום. ·—·—· קו המעבר בין משקעי הקלציט המצפים את החלק התחתון של דפנות המחילה לשכבת סלע בלוי בחלק העליון של דפנות המחילה.

כיפות ההמסה המאפיינות את מחילות הקומה העליונה של מערת איילון יכלו להיווצר בשלב ההיפוגני הכלוא כתוצאה מתאי קונבקציה מקומיים ואף בשלב הואדוסי כתוצאה מהמסה בהתעבות. במקרים רבים, במערת איילון ובמערות נוספות בעולם, קשה ואף בלתי אפשרי לקבוע אילו מבנים נוצרו באיזה שלב. יוצאות דופן הן חלק מכיפות ההמסה במערת איילון אשר ניתן לקבוע בוודאות שהיווצרותן הייתה בתנאים ואדוסיים כתוצאה מהמסה בהתעבות, כדלהלן. בתנאים של חלל מלא במים, השארית הבלתי מסיסה של הסלע תורבד על קרקעית המחילה ככול סדימנט השוקע בגוף מים. כלומר, שקיעה מהירה של החומר הגס ושקיעה איטית של החומר הדק במהלכה תיתכן סחיפה ופיזור של החומר על ידי זרמים ולבסוף השקעתו בשכבות אופקיות בקרוב על פני שטח גדול יחסית. בתנאים ואדוסיים, חלק מן השארית הבלתי מסיסה של הסלע נשארת צמודה לדופן המחילה (שכבת הסלע הבלוי) וחלקה יתנתק וייפול ישירות לקרקעית המחילה. בתנאים אלה תתקבל בקרקעית המחילה שכבה של חומר מעורב באופיו שעוביה משתנה בהתאם לעומק ההמסה בתקרה שמעל. במחילות בודדות במערת איילון ניתן לזהות התאמה בין מיקום כיפות ההמסה בתקרה לתלוליות השארית הבלתי מסיסה שמתחתן, על הקרקעית (איור 22; נספח 5, חתך

רוחב 'j-j). בנוסף, ניתן לזהות בתלוליות אלה למינות חרסית אשר שמרו על צורתן המקורית ובהן מעורבים מאובנים (איור 21). מכאן שכיפות ההמסה הללו נוצרו (או לפחות התרחבו באופן משמעותי) בתחום הואדוסי על ידי המסה בהתעבות.

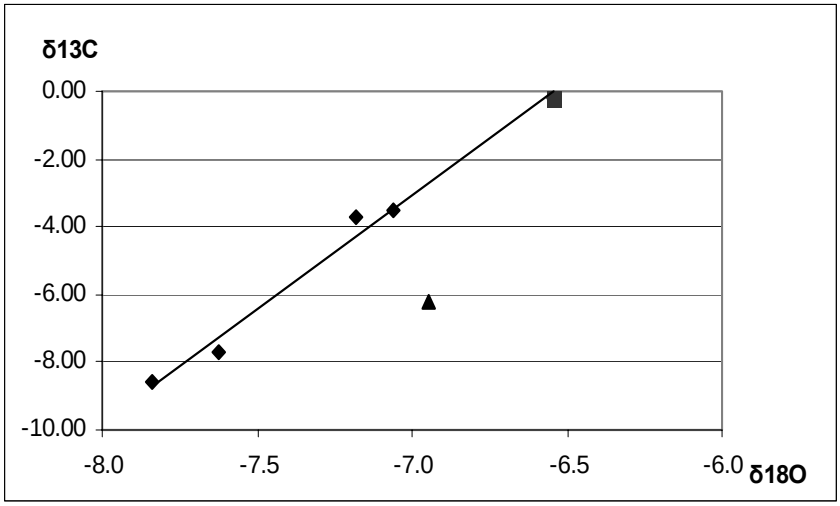
5.2.2.4 הרכב איזוטופי של פחמן וחמצן במשקעי קלציט ואדוסיים

ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחמצן במשקעי הקלציט המשניים במערת איילון (טבלה 6.9) מראה מגוון ערכים קלים מזה של סלע המקור. בהנחה שמשקעים אלה התגבשו כתוצאה מאידוי מים מעובים שהמסו מסלע המקור, $\delta^{18}O_{(calcite)}$ במשקעים מושפע מ- $\delta^{18}O_{(H_2O)}$ בתמיסה ממנה הושקע הקלציט ומהטמפרטורה בה התרחשה ההשקעה (במידה וקיים שיווי משקל קלציט-מים) (Hendy, 1971). $\delta^{18}O_{(H_2O)}$ במים המעובים הוא תוצאה של ההרכב האיזוטופי של מי התהום שהתאדו (כיום: $\delta^{18}O_{(water)}$ = -35.024‰$_{(PDB)}$ = -5.12$_{(SMOW)}$), וכן של פרקציונציה במהלך אידוי והתעבות.

$\delta^{13}C_{(calcite)}$ במים המעובים: בעת השקעת הקלציט מושפע מ- $\delta^{13}C_{(HCO_3^-)}$ של סלע המקור ומ- $\delta^{13}C_{(CO_2)}$ בחלל המערה. $\delta^{13}C_{(CO_2)}$ באוויר המערה (כיום -14.3‰) קל מזה של המשקעים וניתן להניח שבתנאים טבעיים הוא היה קל אף יותר שכן המערה מושפעת כיום מהחציבה בקרבתה המאפשרת כניסת פחמן אטמוספרי כבד יותר ($\delta^{13}C_{(atmosphere)} \approx$ -7‰). ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחמצן במשקעי הקלציט המשניים במערת איילון נופל על קו ישר עם סלע המקור (איור 84). להלן מוצעים שני מנגנונים אפשריים היכולים לפעול לקבלת הערכים שנצפו במשקעי הקלציט ממערת איילון.

1. מידת המיצוי של החומצה הפחמתית (שמקורה ב- CO_2). במצב בו "נוצלה" כל החומצה הפחמתית להמסת הסלע (תגובה 3), ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחמצן ב- HCO_3^- המומס יהיה באמצע הקו שבין הסלע ל- CO_2, ככל שחלק נמוך יותר מהחומצה הפחמתית "נוצל" להמסת הסלע כך "יתקרב" ההרכב האיזוטופי של ה- HCO_3^- המומס לזה של ה CO_2. זמן השהות של התמיסה בסלע עד לגיבוש המשקע הוא שיקבע את מידת ה"מיצוי" של החומצה הפחמתית.
2. במערת איילון יכול לפעול עוד מנגנון המסה (נוסף על החומצה הפחמתית) והוא חמצון הסולפיד היוצר חומצה גופרתית (תגובה 4). המסת הסלע על ידי חומצה גופרתית (תגובה 5) לא תשפיע על ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחמצן בתמיסה. לכן: ככל שחלקה של החומצה הגופרתית בהמסת הסלע יגדל לעומת חלקה של החומצה הפחמתית, כך תקטן השפעת ה- CO_2 על ההרכב האיזוטופי של המשקעים.

הדוגמה ממערה 3 שונה מאלו שנבדקו במערת איילון בהיותה "אלמוג" צפוף וקשה יחסית למשקעים הרכים שנבדק במערת איילון. קשה להעריך את ההרכב האיזוטופי של האוויר במערה 3 ובמערות נוספות בקומה זו לפני שנפרצו בחציבה, בגלל הריחוק היחסי ממי התהום. ניתן להניח שהטמפרטורה במערה 3 הייתה נמוכה יותר מזו של מערת איילון בשל הרום הגבוה יותר.



איור 84. ההרכב האיזוטופי (PDB) של פחמן וחמצן בסלע המארח (■) מקרבת פתח המערה בגובה 43 מ' (asl), במשקעי קלציט משניים בקומה העליונה של מערת איילון (♦) ובאלמוג מערות קלציטי ממערה 3 (▲). קו המגמה, בעל מתאם $R^2 = 0.9877$, כולל את הסלע המארח והמשקעים ממערת איילון.

5.2.2.5 אזור 6

אזור 6 (נספח 2.3) נמצא בראש שרשרת כיפות המסה המתפתחת מהקומה העליונה כלפי מעלה, בקרבת פיר המחבר בין קומות המערה. אזור זה מצטיין בשכבה עבה במיוחד של סלע בלוי על דפנות המחילות, בעובי רב של הצטברות שאריתית של חומר בלוי (weathering residue) על קרקעית החלל ובשכבות הגבס שבה. ההמסה בהתעבות באזור זה הייתה אם כן משמעותית במיוחד. אספקה יעילה של זרמי אוויר חמים ולחים התאפשרה דרך הפיר הקרוב. הגברת ההמסה בהתעבות יכולה להתרחש עקב גרדיאנט תרמלי מוגבר בגלל קרבה לפני השטח (אולי בגלל שקע טופוגרפי), מסלול זרימה קרוב של מים מטאורים או קרבה לחלל קרסטי אשר מקושר עם פני השטח.

5.2.2.6 אזור 7

אזור 7 (נספח 2.3) מצטיין בהחלפה של סלע המקור שבדפנות המחילה בגבס, במשקעי גבס נוספים רבים ובשרידים של גפרית אלמנטרית. האזור נמצא סמוך לאולם 8 (האולם הגדול במערכת בו נמצא האגם) ובקשר ישיר עימו. האולם שככל הנראה התפתח מעל hot spot היווה מקור מוגבר לסולפיד אשר תרם לאופי האזור. שימור דפוסי המאובנים בסלע המוחלף בגבס וגודל הגבישים מצביעים על תהליך הדרגתי של המסת גיר והשקעת גבס תחתיו עקב המסת סולפיד מחלל המערה במים המעובים שבתווך הנקבובי בדופן המחילה, והיווצרות חומצה גפרתית. "תפיחת" משקעי הגבס בחלק התחתון של המחילה, "ביקוע" קרומי הקלציט (איורים 42-41) והגבישים הקטנים מהם הם מורכבים וכן גיבוש "חרבות" הגבס (איור 44) מצביעים על גיבוש מהיר ובכמות גבוהה. ההבדלים בין החלק העליון והתחתון של המחילה קשורים ככל הנראה להבדל באופי האוויר בחלל, אוויר חם ולח בחלקו העליון ואוויר קר ויבש בחלקו התחתון. המים המעובים שבתווך הנקבובי סמוך לדופן התחתונה של החלל התאדו במגע עם האוויר היבש, יחסית. כמו כן, גבס שנוצר על גבי הקיר בחלק העליון של המחילה נפל לקרקעיתה והצטבר שם כ"דרגשי גבס" (איור 40).

משקעים פריאטיים נדירים במערת איילון. הציפוי הקלציטי הדרוזי שעל קירות החלל באזור 11 (נספח 2.3) החריג בעוביו, בצפיפותו ובגיבושו הדרוזי ביחס לקרומי קלציט אחרים נוצר כנראה בתנאים פריאטים. רפסודות הקלציט בקומה התחתונה נוצרו בפני מי התהום. מלבדם לא נמצאו מינרלים פריאטיים משניים בחלקי המערה שהיו תחת מפלס מי התהום בתנאים שקדמו לשאיבה מהאקוויפר.

אופי המשקעים השכיחים בתווך הואדוסי והרכבם האיזוטופי מצביע על היווצרותם בשלב הואדוסי כתוצאה מהתהליכים הקשורים בקונבקציה של אוויר. ההרכב האיזוטופי של הסולפאט בגבס המחליף גיר באזור 6 (טבלה 6.8) ($\delta^{34}S$ = -9.2‰ , $\delta^{18}O$ = -0.2‰) ושל מחטי גבס ($\delta^{34}S$ = -12.4‰ , $\delta^{18}O$ = -1.6‰) שונה באופן מהותי מזה של הסולפאט במי התהום ($\delta^{34}S$ = 8.9‰ , $\delta^{18}O$ = -5.7‰). ההרכב האיזוטופי של הגפרית בגבס קרוב יותר לזה של ההרכב האיזוטופי של סולפיד בדגימות מים שנבדקו בעבר בקידוחי אנומליית איילון (-13.9‰, -15.5, -21.4 = $\delta^{34}S$) (בורג וחובריו, 2001 , טבלה 3 שלהם). מכאן נובע כי משקעי הגבס לא הושקעו באופן ישיר מן הסולפט שבגוף המים. המנגנון המוצע הינו נידוף גז H_2S ממי התהום, חמצונו והמסתו במים המעובים על דפנות האולם מעל פני מי התהום (Ford & Williams, 1989; Audra et al. 2007).

הצבעים העזים של למינות החרסית המובלטות בשכבת הסלע הבלוי והחרסיות המצטברות על קרקעית המחילות עשויים להיות תוצאה של פעילות בקטריאלית המתרחשת בסביבת הסדימנט הלח ובנוכחות הסולפיד באוויר (Boston et al, 2001).

5.2.3 תהליכי הסעת חום, השקעה והמסה בתוך הפריאטי

שני מנגנונים מוצעים לגיבוש רפסודות הקלציט על פני המים. 1. הורדת ריכוז הביקרבונט בשכבה העליונה של המים כתוצאה מנידוף (degassing) CO_2 מהמים ו\או הכימוסינתזה אשר מתבצעת על ידי בקטריות ה- *Beggiatoa* אשר על פני המים. כתוצאה מכך עולה דרגת הרוויה של שכבת המים העליונה יחסית לקלציט וגורמת לגיבוש הרפסודות (Taylor et al, 2004; Koschel et al, 1983). 2. גיבוש כתוצאה מאידוי מוגבר בפני מי התהום (Davis, 2000). כתוצאה מגיבוש רפסודות הקלציט מתקבלת שכבה עליונה מעורבת של הבקטריה החוטית (Filamentous) עם רפסודות הקלציט. עם התעבות רפסודות הקלציט והגעת הקרום למשקל קריטי, מתרחשת שקיעה של הקרום. העדר שרידים של הקרום על הקרקעית מעידה על המסה של רפסודות הקלציט בעומק ופרוק ביולוגי של הבקטריה. הופעת שכבות כהות בסדימנט החווארי שבקרקעית האגם יכולה להיות תוצאה של הצטברות חומר אורגני בקרקעית או של שקיעת מינרלים מונוסולפידים בתנאים מחזרים. השכבה הכהה אשר מופיעה לעיתים על פני הסלעים מתחת למפלס מי התהום (איור 54) יכולה להיות אף היא תוצאה של שקיעת מינרלים מונוסולפידים של ברזל, מנגן ומתכות נוספות ו/או שקיעת תחמוצות ברזל כתוצאה מחמצון בשכבת המים העליונה (Brener et al, 1979 ; בורג וחוב', 2003).

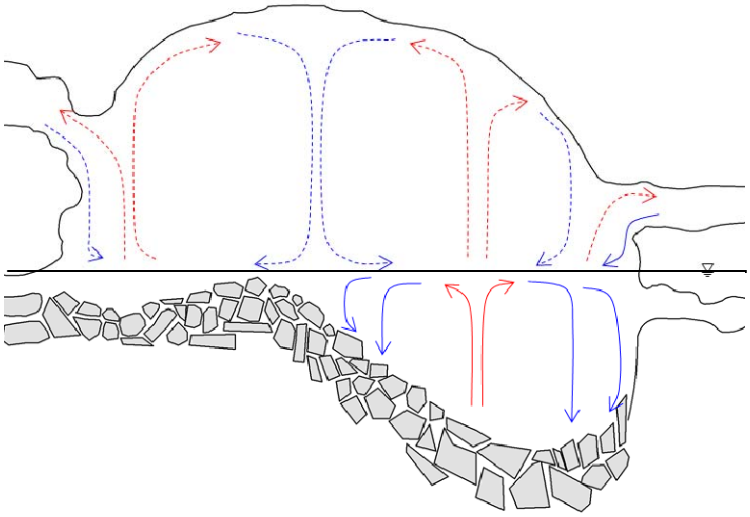
5.2.3.1 קונבקציה במי התהום והיווצרות ה- flutes

ה-flutes על סלעים באגם וסביבו מכוונים למורד שיפוע הסלע, לרבות אלה שעל סלעי מפולת שהתמוטטו מהתקרה. מכאן שדפוסים אלה נוצרו in situ במקומם הנוכחי, בערימת המפולת. בעבודות שנעשו במערות שונות בעולם יוחסו תופעות דומות של karren או flutes להמסה על ידי זרימה או טפטוף של מים ואדוסיים (למשל Lundberg, 2005). תפוצת הדפוסים בגבהים שבין 22 – 11.3 מ' מעל פני הים (הנמוכים בהם לא נחשפו לאוויר לפחות מאז 1951 והגבוהים בהם נחשפו לאוויר רק בעשורים האחרונים) מלמדת שדפוסים אלה נוצרו מתחת למפלס מי התהום ושוללת את האפשרות שדפוסים אלה נוצרו על ידי זרימה ואדוסית.

להלן מוצע מנגנון קונספטואלי להיווצרות ה- flutes בשולי האגם.

ערכי ORP נמוכים (טבלה 6.6) מדגישים את חוסר החמצן בגוף המים עקב צריכת החמצן על ידי נשימה אירובית וחמצון סולפיד ספונטני ובקטריאלי. תנאים אלה מחייבים ספיחה של חמצן מהאוויר על ידי המים. בתנאים של אוויר סטגננטי, הייתה נוצרת שכבת אוויר חסרת חמצן מעל המים. קונבקציה של אוויר בתווך הואדוסי מחליפה את האוויר מעל המים ומספקת חמצן לשכבת המים העליונה ובכך מאפשרת את קיום החיים במים. בנוסף לכך, קונבקציה של אוויר מעל פני המים מקררת את שכבת המים העליונה ויוצרת זרמי קונבקציה בתוך גוף המים (איור 85). המים העליונים מתקררים במגע עם האוויר הקר, מתחמצנים במידה מסוימת, שוקעים, ותחתיהם עולים מים חמים ומחוזרים מהעומק. ככל שגוף המים יותר גדול ורצוף ושטח המגע בין המים לאוויר גדול כך זרמי הקונבקציה של המים יהיו משמעותיים יותר.

יתכן כי היווצרות דפוסי המסה אלה קשורה בזרמי הקונבקציה שבגוף המים. מים חמים שעלו מהעומק מתקררים וסופחים חמצן במגע עם האוויר. הם נעשים אגרסיביים יותר כלפי הסלע הקרבונטי עקב חמצון סולפיד ויצירת חומצה גופרתית (תגובה 4). עקב התקררותם במגע עם האוויר מים אלה צפופים וכבדים יותר ביחס למים החמים העולים במרכז האגם. המים זורמים לשולי האגם ושוקעים. תוך כדי שקיעה מים אלה באים במגע עם סלעי המפולת שבקרקעית. פני סלע אופקיים מונעים זרימה אנכית של מים על גבם ומכוסים לרוב בשכבה חוואריתית המגנה עליהם מפני המסה. כאשר פני הסלע נטויים, פילם של מים אגרסיביים "מחליק" על פני הסלע תוך כדי המסה (איור 86). במקום בו נוצר שקע ראשוני על משטח הסלע הנטוי, מתגברת הזרימה ואיתה ההמסה, ונוצר משוב חיובי המחזק את תופעת ה-flutes. תופעה זו דומה להיווצרות flutes ואדוסיים (למשל Lundberg, 2005). התעלות העמוקות "דמויות חצי הצינור" (איור 53) הן מסלולי זרימה של מים ששקעו על גב הסלע האופקי וגלשו ממנו אל דופן הסלע האנכית בקירוב והחשופה להמסה.



איור 85. קונבקציה בטי התהום. קונבקציה של אוויר (↓↑) מקררת את שכבת המים העליונה של טי התהום אשר שוקעים (↓) ותחתיהם עולים מים חמים ומחוררים מהעומק (↑).



איור 86. יצירת ה-flutes. החיצים מתארים זרם שוקע של מים אגרסיביים המחליק בצורת פילם על גבי דופן משופעת של סלע.

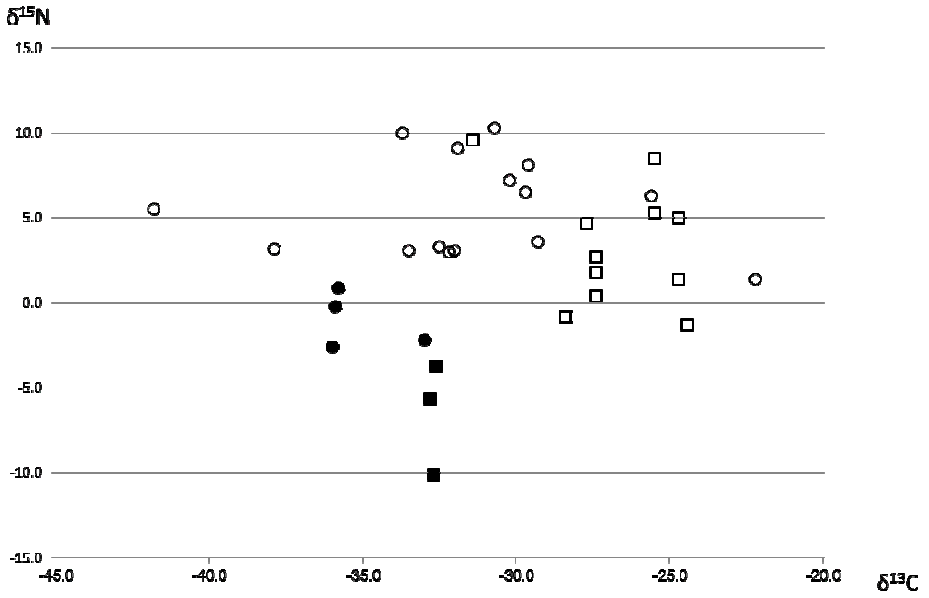
העדר ה- flutes בשאר חלקי הקומה התחתונה, כולל אזורים שהיו מוצפים עד שנות ה- 60 של המאה ה-20 יכול לנבוע מכך שבשאר האזורים המוצפים גוף המים היה רדוד יחסית (עד 2 מ') לעומת גוף מים עמוק שהתקיים באולם האגם (כ-13 מ') ומהריחוק בין שאר חלקי הקומה התחתונה ל hot spot שיצר גרדיאנט תרמלי מקסימלי בגוף המים שבאולם האגם.

5.3 המערכת האקולוגית

5.3.1 מקור המזון

ההרכב האיזוטופי של פחמן וחנקן בבעלי החיים במערת איילון לעומת זה של בעלי חיים שנאספו בפני השטח נתון בטבלה 6.10 ובאיור 87. סטיית התקן הגבוהה של $\delta^{13}C$ בבעלי החיים האקווטיים בפני השטח (STDEV = 4.6, טבלה 6.10) היא חריגה בהשוואה למערכות אקולוגיות אחרות (Sarbu et al, 1996). הקרבה (כ-300 מ') בין מקווי המים בהם בעלי החיים נדגמו למתקן טיהור שפכים (מט"ש איילון), מרמזת על כך שההרכב האיזוטופי של הפחמן בחלק מבעלי החיים ממקווי מים אלה הושפע מזיהום (י. ארז, תקשורת אישית).

ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחנקן בבעלי חיים מייצג את מזונם. בעלי החיים היבשתיים שנדגמו על פני השטח ניזונים באופן ישיר או עקיף מיצרנות ראשונית פוטואוטוטרופית (כלומר מצמחים). ההרכב האיזוטופי של הפחמן והחנקן בבעלי החיים במערת איילון מתאפיין בערכים שליליים באופן משמעותי מזה של בעלי החיים היבשתיים הניזונים מיצרנות ראשונית פוטואוטוטרופית שנדגמו על פני השטח. אין כל חפיפה בין תחומי הערכים של שתי הקבוצות (איור 87). לעומת זאת קיימת חפיפה חלקית בין הערכים האיזוטופיים של בעלי החיים ממערת איילון לבעלי החיים האקווטיים שנדגמו בפני השטח. הערכים האיזוטופיים השליליים מאד של אקוסיסטמת מערת איילון מוסברים בפרקציונציות שליליות משמעותיות בתהליך הכימוסינתזה (Rouby et al, 1987; Sarbu et al, 1996). אפקט המקור תורם אף הוא לערכים הנמוכים של $\delta^{13}C$ באקוסיסטמת מערת איילון, שכן $\delta^{13}C$ (של הפחמן האנאורגני) במי התהום במערת איילון הינו ‰12.4- (טבלה 6.5) לעומת ‰7- באטמוספירה. פחמן זה משמש את הבקטריות לבניית תאיהן, והוא עובר מהן אל שרשרת המזון של המערה ומטביע עליה את חותם ההרכב האיזוטופי השלילי.



איור 87. ההרכב האיזוטופי של פחמן וחנקן בביוטה האקווטית ממערת איילון (●), בעלי חיים יבשתיים ממערת איילון (■), בביוטה אקווטית מפני השטח (○) ובבעלי חיים יבשתיים בפני השטח (□).

הבקטריות החוטיות שנמצאו תלויות על תקרת הקומה העליונה הן, ככל הנראה, שרידי "Snottites" (Hose and Pisarowicz (1999), figure 5), בקטריות כימואוטוטרופיות מחמצנות סולפיד, שהתקיימו בתווך הוואדוסי ואשר תהליכי הסעת החום וההתעבות אפשרו את קיומם. בקטריות דומות מתקיימות במערת וייה-לוז (מקסיקו) בנקודות טפטוף של מים מעובים בהם מומס H_2S מאטמוספירת המערה. אותו סולפיד מחומצן על ידי הבקטריה לחומצה גופרתית (תגובה 4) ללא מגע עם הסלע הקרבונטי וכתוצאה מכך ה- pH במים המטפטפים מה- Snottites נמוך מ- 1 (Hose and Pisarowicz, 1999). גיבוש הקלציט על שרידי ה Snottites במערת איילון התרחש, ככל הנראה, בשלב מאוחר יותר על שרידים מתים של הבקטריה.

5.3.2 השתרעות המערכת האקולוגית האקוואטית

המצאות סרטנים מהסוגים: *Tethysbaena* ו- *Metacyclops* בשלבים פגיים ושקי הביצים שלהם לצד פרטים בוגרים מלמדים כי סרטנים אלה מתרבים בסביבת המערה ויכולים להשלים את מחזור חייהם במערה. לעומת זאת, לא נצפו סרטני סוּמית איילון (*Typhlocaris ayyaloni*) קטנים מ-12 מ"מ ולא נצפו נקבות סוּמית נושאת ביצים. מחקרים קודמים מראים שסרטנים מהמין סומית הגליל בעין נור (טבחה) מתרבים בסביבה של מים קרים מ-20°C (Tsurnamal, 1968, 1978). ידוע גם כי ישנה באזור שסביב המערה שוֹנוּת מרחבית גבוהה במליחות ובטמפרטורת מי התהום (Frumkin and Gvirtzman, 2006) כך שקרוב לודאי שרבּיית הסומית מתבצעת בחללים פריאטיים המקושרים לאגם שבמערת איילון, בהם טמפרטורת המים והמליחות נמוכות יותר.

ההתאמה בין התנודות במפלס מי התהום באגם לבין התנודות שנמדדו בקידוח איילון 1 (איור 5) ומציאת הפאונה האקווטית של מערת איילון בקידוחי הסקר שמבצעת חברת נשר, בקידוח איילון 1 ובמערת המים (ראה פרק 4.2.1.1) מלמדות כי האגם שבמערת איילון הינו חלק ממערכת אקולוגית אקוואטית רחבה יותר המשתרעת על שטח נרחב באנומליית איילון. בשטח זה מתקיימים התנאים הנחוצים לקיום המערכת האקולוגית, תנאים אשר יידונו בהמשך פרק זה, ובשל כך ניתן להגדיר את המערכת האקולוגית שהתגלתה במערת איילון בתור "האקוסיסטמה של אנומליית איילון".

האקוסיסטמה של אנומליית איילון מתקיימת הודות לשילוב בין התנאים הבאים: עליית מים חמים, מליחים ונושאי סולפיד ממקור עמוק אל תת האקוויפר העליון של חבורת יהודה, עלייה היוצרת נקודות חמות (hot spots); שוֹנוּת מרחבית גבוהה במליחות ובטמפרטורת מי התהום כתוצאה מרמות ערבוב שונות בין מי האקוויפר למים המליחים (Frumkin and Gvirtzman, 2006); התפתחות מערכת קרסטית מפותחת במפלס מי התהום ותחתיו. החלק הפריאטי של החללים מהווה בית גידול עבור בעלי החיים האקווטיים והחלק הואדוסי של החללים מהווה את בית הגידול של בעליי החיים היבשתיים. הממשק בין מי התהום לבין התווך הואדוסי מאפשר את היצרנות הראשונית המתקיימת בפני המים, במגע בין מי התהום לאוויר המחומצן. יצרנות בקטריאלית זו מאפשרת לקפזנבאים (הצרכנים הראשוניים של המערכת היבשתית) גישה לפני המים ולסביבתם כדי להיזון מהמצע הבקטריאלי. רציפות החללים הקארסטיים

והסדקים שבתווך הפריאטי מאפשרת לסרטנים מהסוג סומית גישה לאזורים קרים יותר של האקוויפר לצורך התרבות.

כאמור, אולם 8 בו נמצא האגם התפתח מעל hot spot (פרק 5.2.1), נקודת עלייה של מים חמים ומליחים ממקור עמוק. יתכן כי מגה-חללים נוספים שקרסו בסביבת המחצבה התפתחו אף הם בנקודות החמות. בשולי הנקודות החמות מתקיים הערבוב בין רכיב הזרימה ההיפוגני לזה של החלק הרדוד, הבלתי אנומלי באקוויפר חבורת יהודה. באזורי ביניים אלה תיתכן התפתחות של מערכת אקולוגית כימואוטוטרופית נוספת בעלת מאפיינים שונים מאלו של מערת איילון (ח. דימנטמן, תקשורת אישית). ניתן לשייך מערכת היפוטטית זו לאקוסיסטמה של אנומליית איילון.

5.3.3 בעלי החיים היבשתיים

הקפזנבאים (Collembola) שהינם מפרקים, ניזונים מהמצע הבקטריאלי על פני המים ובשולי האגם (שם ננטשים חלקים מהמצע הבקטריאלי על פני הסלעים בעת ירידת מפלס) ומתפקדים בתור צרכנים ראשוניים במארג המזון היבשתי. דמויי העקרבים והעקרבים שהינם טורפים מתפקדים כצרכנים מדרגה שנייה או שלישית, וקיומם תלוי באוכלוסיית הקפזנבאים (ח. דימנטמן, ג. לוי, V. Fet, תקשורת אישית).

כאמור לעיל, נמצאו במערה שלדים שלמים של העקרב *Akrav-israchanani* בשטחי C (איור 89) ושברי שלדים באזורים C ו-A. במשך 4.5 שנות עבודה במערה הושקעו מאמצים רבים לאיתור עקרבים חיים, כולל סריקות בתאורת UV והצבת מלכודות נפילה (pit falls) עם סוגים שונים של פתיונות. העובדה כי למרות המאמצים לא נמצאו פרטים חיים של עקרבים מחזקת את ההערכה שהעקרבים נכחדו ממערת איילון ואף יתכן כי הם נכחדו כליל מהאקוסיסטמה של אנומליית איילון מסיבות אשר יפורטו בהמשך פרק זה.

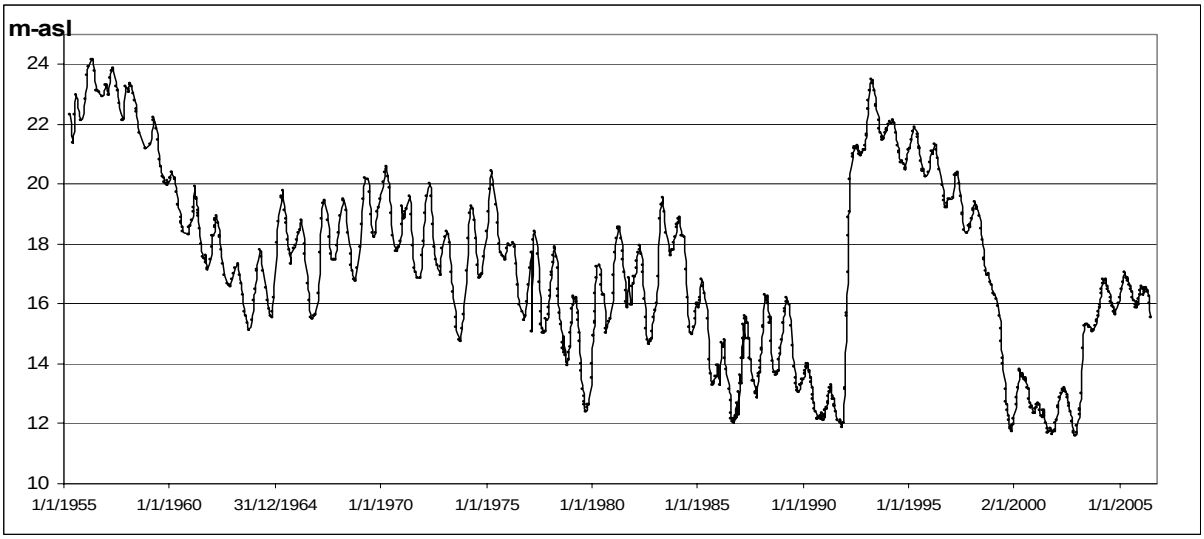
5.3.4 השפעת השאיבה מהאקוויפר על המערכת האקולוגית

מפלס מי התהום, שבתנאים טבעיים היה כ-24 מ' מעל פני הים, ירד מאז סוף שנות ה 50 ועד תחילת שנות ה-90 של המאה ה-20 לגובה 12 מ' מעל פני הים (איור 88). השילוב בין נתוני המיפוי של המערה לנתוני מפלס מי התהום בקידוח "איילון 1" מאפשר למפות את השטח שהיה מוצף במערה בכל שלב מאז תחילת המדידות ב-1951. השטח שהיה מוצף בקומה התחתונה של מערת איילון מוערך בכ-3100 מ"ר. בעקבות ירידת המפלס, השטח שהיה מוצף בנובמבר 1991 מוערך בכ-22 מ"ר (איור 89).

שאיבת היתר מהאקוויפר השפיעה על כמה מהגורמים המשמעותיים ביותר המגבילים את אורך שרשרת המזון, זמינות המשאבים (אנרגיה) וגודל המערכת האקולוגית (Post, 2000). "היפותזת המרחב היצרני" (productive space hypothesis. Schoener, 1989) מתייחסת לקשר שבין גודל המערכת האקולוגית לכמות המשאבים הזמינים ולהשפעתו על אורך שרשרת המזון, ומציעה שיש יחס ישר בין אורך שרשרת המזון למכפלת גודל המערכת האקולוגית (נפח או שטח) ביצרנות ליחידת שטח. בשרשרת מזון, עם העלייה ברמה הטרופית (trophic level) יורדת יעילות מעברי האנרגיה בין הרמות (Slobodkin,

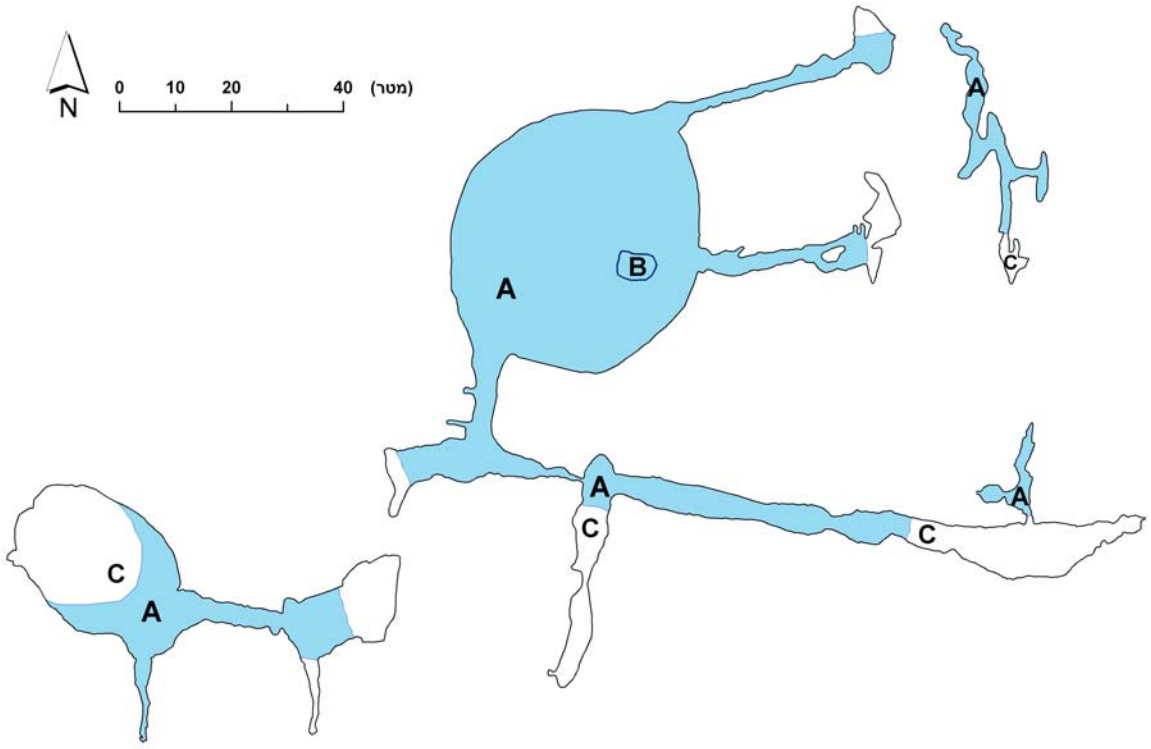
1961). לכן, עם העלייה ברמה הטרופית תפחת כמות האנרגיה הזמינה לתמיכה ברמה הטרופית הבאה וטורפי העל הם שיושפעו ראשונים מהשינוי בזמינות המשאבים (Post, 2002).

על פי רמת השימור הגבוהה של שלדי העקרבים (Levi, 2007) והתפוצה של השלדים וחלקי השלדים ניתן להסיק כי הכחדת העקרבים התרחשה בעשורים האחרונים כתוצאה משאיבת יתר וירידת מפלס המים באקוויפר בתקופה שבין השנים 1960 ל-1991. מציאת חלקי שלדים של העקרבים בשטחי A (איור 89), צמודים לקירות המערה ובקווים אופקיים מצביעה על כך שעקרבים אלו חיו ומתו באזור זה לאחר ירידת מפלס מי התהום אך לפני 1992. עד סוף שנת 1991 שלדי העקרבים היו כנראה שלמים וחלולים בדומה לאלו שנדגמו בשטחי C (איור 89). בשנים 3-1992 השלדים הללו הוצפו והתפרקו לחלקים שנותרו צמודים לדופן כסמנים למפלס שהגיע לשיאו במאי 1993, ומאז נמצא שוב בנסיגה.



איור 88. מפלס מי התהום בקידוח איילון 1 בשנים 1955-2006.

מפלס מי התהום באזור הגיע באוקטובר 2010 לגובה של כ- 11.3 מ' מעל פני הים; במפלס זה האגם במערת איילון נמצא על סף ייבוש מוחלט. קיים שטח אפסי של פני מים זמינים להתפתחות בקטריאלית. בתנאים אלה, קיומם של בעלי החיים האקווטיים תלוי בקיומו של רצף בין החללים שבשכבת המפולת בקרקעית האגם לחללים קרסטיים נוספים מתחת למפלס מי התהום הנוכחי ובקיומו של מקור אנרגיה נוסף כדוגמת יצרנות ראשונית כימואוטוטרופית באזור הערבוב בין מי אקוויפר ירת"ן למים האנומליים, בשולי האזורים החמים. ניתן להניח שבמצב זה קיימת סכנת הכחדה ממשית של בעלי החיים היבשתיים.



איור 89. מפוי השטח המוצף בקומה התחתונה של מערת איילון. שטחי A, היו מוצפים במפלס מי התהום שקדם לשאיבה מהאקוויפר והוצפו שוב בעקבות גשמי 1991-3; שטח B מייצג את האגם בנקודת שפל, בנובמבר 1991; בשטחי C נמצאו שלדי עקרבים שלמים.

ביתר שטח האנומליה, המשך קיומם של בעלי החיים היבשתיים תלוי במידת הימצאותם של חללים עמוקים דיים כדי לאפשר ממשק בין מי התהום לאוויר שבחללים גם במפלסים הנמוכים המאפיינים את השנים האחרונות. ככל שיתקיים ממשק רחב יותר כך גדל הסיכוי ש *Akrav israchanani* שרד בחללים אלה. השפעה נוספת של ירידת מפלס מי התהום ברמה אזורית היא נתקים (קיטוע ,fragmentation) בתוך המערכת האקולוגית של אנומליית איילון ויצירת אוכלוסיות קטנות ופגיעות להכחדה.

5.3.5 סכנות עתידיות למערכת האקולוגית במערת איילון

בתנאים טבעיים, לפני החציבה, מערת איילון שכנה כ-100 מ' מתחת לפני השטח. בפני השטח, בדומה לסביבה הנוכחית, הייתה שכבת קרקע ומערכת ניקוז מפותחת, ובעומק רדוד מתחת לפני השטח הייתה שכבת סלעי קרטון מחבורת הר הצופים בעובי של עד 20 מ'. כיום המערה סמוכה למדרגות החציבה של מחצבת נשר רמלה ובעתיד המערה מתוכננת להישאר כ"גבעה" במרכז המחצבה. המשך החציבה סביב המערה עשויה לחשוף סדקים ומוליכים קרסטיים שיקלו על חדירת בעלי חיים "פולשים" למערה. כעבור זמן, צפויה התפתחות צמחייה מעל המערה ובעקבותיה התפתחות של אוכלוסיית חרקים שחלקם עשויים לחדור ולאכלס את המערה. מי הגשמים בשטח המחצבה מתנקזים לקומה התחתונה של המחצבה ומשם חודרים בקלות אל האקוויפר, עם הגדלת שטח המחצבה גדלה הסכנה שמי האקוויפר סביב המערה ימהלו

במים המטאורים. כל חדירה זרה לתוך האקוסיסטמה של מערת איילון עלולה להפר את האיזון העדין הקיים בה ואף לגרום להכחדת חלק מהאלמנטים שבה.

5.3.6 מקור הפאונה של אנומלית איילון

המצאותו של דמוי העקרב *Ayyalonia dimentmani* שהוא רליקט של אקלים טרופי, מהווה חריג. גם עקרבים טרוגלוביטים חיים בדרך כלל באזורים טרופיים ולכן משפחה של עקרבים טרוגלוביטים בישראל היא יוצאת מן הכלל. התפוצה של הסרטנים החיים במערת איילון נחשבת לשריד של ים הטתיס הצירקום טרופי (Por, 1986) או אפילו שריד עתיק יותר. יתכן כי המצאות העקרב ודמוי העקרב הטרוגלוביטים בתת הקרקע של ישראל משמרת את המצב העתיק ולכן עולה בקנה אחד עם התצפיות הכלל עולמיות בנות זמננו (Ćurčić, 2008).

5.4 סיכום

מבנה המערה ומגוון התופעות שבתוכה מצביעים על שני שלבים עיקריים בהתפתחותה. היווצרות ראשונית בתנאים כלואים על ידי מערכת זרימה היפוגנית שהזרימה מים מליחים ומחוזרים דרך אזור יצירת המערה, ובשלב שני, ספלאוגנזה פריאטית היפוגנית במפלס מי התהום. השלב השני נמשך עד היום, אולם האזור הפעיל צומצם באופן ניכר עקב השאיבה מהאקוויפר וירידת המפלס.

לתהליכי הסעת חום, המסה בהתעבות והשקעה בתווך הואדוסי תפקיד באספקת החמצן לשכבת המים העליונה, בקיום המערכת האקולוגית ובעיצוב הקומה העליונה של המערה. התרבות המקרים של חדירת מים מטאורים למערה מעמיד בסכנה את המאפיינים הייחודיים של הקומה העליונה אשר נוצרו בתהליכים אלה.

המערכת האקולוגית שבמערה מייצגת מערכת אקולוגית בעלת השתרעות רחבה יותר אשר מאפיינת את אנומליית איילון. המערכת האקולוגית נפגעה מהירידה במפלס מי התהום, מהחציבה בקרבתה ומחשיפתה, ונמצאת בסכנה עקב המשך המגמות הנ"ל.

קיום המערכת האקולוגית תלוי במערכת ההידרולוגית שהיא הגורם ליצירת החללים והגורם המספק את הסולפיד הנחוץ לחיים במערה. מערכות הזרימה ההיפוגניות מאופיינות במשטר יציב של זרימה איטית למשך זמן ארוך (Klimchouk, 2007) לעומת חלחול מפני השטח אשר נתון להשפעת שינויי אקלים והתפתחות הנוף. לכן, סביר להניח כי מערכת זרימה היפוגנית, אשר פועלת באזור ויוצרת את אנומליית איילון, היא שאפשרה את קיום המערכת ברציפות למשך הזמן הדרוש להתפתחות הטרוגלוביטים עד לרמה של משפחה חדשה.

המשך המחקר במערכת הקרסט של אנומלית איילון

עבודה זו היא בבחינת סריקה ראשונה ומיפוי חלקי של מערכת קרסטית ואקולוגית המשתרעת על פני שטח רחב. המלצתי היא כי המשך המחקר יתמקד בנושאים הבאים:

1. אפיון האוכלוסיות המיקרוביאליות במערכת.
2. אפיון המחזורים הביוגיאוכימיים של פחמן, גפרית וחנקן.
3. אפיון מדויק של מארגי המזון היבשתיים והמיימיים.
4. איתור ואפיון של שרידים לפעילות ביולוגית בחלקים הלא פעילים של המערה.
5. אפיון גיאוכימי ופטרוגרפי של המשקעים המשניים ממערת איילון ומחללים נוספים באזור.
6. מיפוי התפרוסת, ההרכב הביולוגי והתנאים הסביבתיים של המערכת האקולוגית בשטח של אנומליית איילון.

הכרת הגורמים הנ"ל תסייע להבנת יחסי הגומלין ביניהם, להבנה מעמיקה יותר של זמן ותנאי ההיווצרות של החלקים השונים במערכת הקרסט, מנגנוני ההמסה וקצב ההמסה, סדר האכלוס של הנישות האקולוגיות השונות, מקור המים האנומליים, תהליכי המסה\השקעה בתווך לא רווי, להעריך את הזמן והסיבות להכחדת העקרבים ומינים נוספים ממערת איילון ואת הסיכוי שבעלי חיים אלו שרדו במערות אחרות במערכת ואת סיכוייה של המערכת האקולוגית לשרוד את השינויים במפלס מי התהום ובהרכבם עקב שאיבת היתר.

6 רשימה ביבליוגרפית

ארקין, י., 1976. מפה גאולוגית של ירושלים וסביבתה. המכון הגאולוגי 1976.

בורג, א., גבריאלי, א., גוטמן, י., 2001. הגורמים להתפתחות תנאים מחזרים באקוויפר חבורת יהודה בשפלת יהודה והמלצות תפעוליות. המכון הגיאולוגי דו"ח מס' GSI/9/2001.

בורג, א., גבריאלי, א., גוטמן, י., 2003. ההידרוגיאולוגיה והגיאוכימיה של גוף המים המלוח בדרום אגן באר שבע והקשר להיאטמות קידוחים. המכון הגיאולוגי דו"ח מס' GSI/35/2003.

גבירצמן, ח., 2002. משאבי המים בישראל. יד בן צבי, ירושלים.

גוטמן, י., רוזנטל, א., גבריאלי, א., בורג, א., 2001. המצאות גבס ומים מלוחים בקדוח כפר אוריה 11 וההשלכות על פיתוח ותפעול מקורות המים במרכז אגן ירקון תנינים. אגודה ישראלית למשאבי מים. הכינוס השנתי, ים המלח – 2001.

דימנטמן, ח., פור, פ. ד., נעמן, י., אורן, א., פרומקין, ע., 2007. הפאונה של מערת איילון. כנס החברה הזואולוגית, 2007.

דפני, א., גבירצמן, ח., בורג, א., 2008. מודל ספרתי ממוחשב לזרימה והסעה באגן ירקון תנינים. המכון הגיאולוגי דו"ח מס' GSI/18/2008.

דפני, א., 2009. שדה הזרימה של מי התהום השפירים והמלוחים באגן ירקון -תנינים, ישראל. עבודת דוקטורט. האוניברסיטה העברית ירושלים.

זילברברנד, מ., רוזנטל, א., וינברגר, ג., 2007. סקר ההרכב הכימי של מי התהום באקוויפר חבורת יהודה באגן ירת"ן. נציבות המים, השרות ההידרולוגי. דו"ח הידרו/2006/1.

כץ, א., 2001. זיהוי מקורות ההמלחה של אקויפר ירקון-תנינים לפי קריטריונים גיאוכימיים חדישים. דו"ח סופי לנציבות המים, משרד התשתיות הלאומיות. מחקר מס' 702/96. 2001.

פור, פ.ד., 1984 . סרטנים במי מערות. נקרות צורים, עלון המרכז לחקר מערות, מס' 9. עמ' 23-20. יוני 1984.

פרומקין, ע., 1984 א. קמינים קרסטיים בסובב ים תיכוני (עפרה, ישראל). חיבור לשם קבלת תואר מוסמך בגיאוגרפיה פיסית, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

פרומקין, ע., 1984 ב. מיפוי מערות. נקרות צורים, עלון המרכז לחקר מערות, מס' 10. עמ' 124-113. דצמבר 1984.

פרומקין, ע., ארזי, א., 1999. סקר גיאומורפולוגי וגיאוהידרולוגי ראשוני להבנת התפתחות מערות במחצבת נשר רמלה. דוח מלח"מ 3/99, 30 ע'.

Andre, B.J., Rajaram, H., 2005. Dissolution of limestone fractures by cooling waters: Early development of hypogene karst systems. *Water Resour. Res.*, 41, doi:10.1029/2004WR003331.

Audra, P., Hoble´a, F., Bigot, J.Y., and Nobe´court, J.C., 2007. The role of condensation-corrosion in thermal speleogenesis: Study of a hypogenic sulfidic cave in Aix-les-Bains, France: *Acta Carsologica* 36/2, 185–94, Postojna 2007.

Audra, P., Mocochain, L., Bigot, J., Nobécourt, J., 2009. Morphological indicators of speleogenesis: Hypogene speleogenesis. Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins. Ukrainian institute of speleology and karstology, special paper 1, 2009. p. 23-32.

Avisar, D., Rosenthal, E., Flexer, A., Shulman, H., Ben-Avraham, Z., Guttman, J., 2003. Salinity sources of Kefar Uriya wells in the Judea Group aquifer of Israel. Part 1-conceptual hydrogeological model. *Journal of Hydrology* 270 (2003) 27–38.

Ayalon, A., Bar-Matthews, M., Sass, E., 1998. Rainfall-recharge relationships within a karstic terrain in the Eastern Mediterranean semi-arid region, Israel: $\delta^{18}O$ and δD characteristics. Journal of Hydrology 207 (1998) 18–31.

Berner, R.A., Baldwin, T., Holdren, G.R., 1979. Authigenic iron sulfides as paleosalinity indicators. *Journal of Sedimentary Petrology* 49, 1345–1350.

Birk, S., Liedl, R., Sauter, M., Teutsch, G., 2003. Hydraulic boundary conditions as a controlling factor in karst genesis: A numerical modeling study on artesian conduit development in gypsum. *Water Resour. Res*., 39:1, 1004, doi:10.1029/2002WR001308.

Birk, S., Liedl, R., Sauter, M., Teutsch, G., 2005. Simulation of the development of gypsum maze caves. *Environ. Geol*., 48:3, 296-306.

Blake, R.E., Surkov, A.V., Böttcher, M.E., Ferdelman, T.G., Jørgensen, B. B., 2006. Oxygen isotope composition of dissolved sulfate in deep-Sea sediments: eastern equatoria pacific ocean. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* Volume 201.

Blake, G. S., Goldschmidt, M., 1947. Geology and Water Resources of Palestine. Government Printer, Jerusalem.

Boston, P.J., Splide, M.N., Northup, D.E., Melim, L.A., Soroka, D.S., Kleina, L.G., Lavoie, K.H., Hose, L.D., Mallory L.M., Dahm, C.N., Crossey, L.J., Schelble, R.T., 2001. Cave Biosignature Suites: Microbes, Minerals, and Mars. *Astrobiology* volume 1, Number 1, 2001.

Chapman. p., 1982. The origin of troglobites. *Proceedings of the University of Bristol Speleological Society* 16 (2): 133–141.

Cigna, A. A. & Forti, P. 1986: The speleogenetic role of air flow caused by convection. 1st contribution.- *International Journal of Speleology*, 15, 41-52, Bologna.

Corliss, J. B., Dymond, J., 1979. Submarine thermal springs on the Galápagos Rift. *Science* 203: 1073-1083.

Ćurčić, B. M. P., 2008. Ayyalonia dimentmani n. g., n. s. (Ayyaloniini n. trib., Chthoniidae, Pseuduscorpiones) from a cave in Israel. *Arch. Biol. Sci*., Belgrade, 60 (3), 331-339, 2008

Davis, D. G., 2000. Extraordinary features of Lechuguilla cave, Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 62(2): 147-157.

Defaye, D., Por, F. D., 2010. Metacyclops (Copepoda, Cyclopidae) from Ayyalon cave, Israel. *Crustaceana* 83 (4): 399-423.

Dimentman, Ch., Por, F. D., 1991. The origin of the subterranean fauna of the Jordan-Dead Sea Rift Valley: new data. *Stygologia*, 6 (3) 155-164 (1991).

Dreybrodt, W., Gabrovšek, F. & Perne, M. 2005: Condensation corrosion: a theoretical approach.- *Acta carsologica*, XXXIV/II, 317-348. Ljubljana.

Dublyansky, Y.V. & Pashenko, S.E. 1997: Cave popcorn - an aerosol Speleothem?- Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, La Chaux-de-Fonds, 1 (Physical speleology and karst geomorphology), 271-274. Union internationale de spéléologie & Société suisse de spéléologie, Genève.

Engel, A.S., 2006. Observations on the Biodiversity of Sulfidic Karst Habitats. *Journal of cave and karst studies* v. 69, no. 1, p. 187–206.

Erhlich H.L. (2002) *Geomicrobiology* 4th edn. New York, NY, Marcel Dekker Inc.

Fleischer, L., 2002. Stratigraphic table of Israel, outcrops and subsurface. In Fleischer, L. and Varshavsky, A., 2002. A lithostratigraphic data base of oil and gas wells drilled in Israel. Geophysical institute of Israel report 872/202/02.

Ford, D. & Williams, P. (1989). Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, London: 601 p.

Ford, D.C., 2006. Karst geomorphology, caves and cave deposits: A review of North American contributions during the past half century: *in* Harmon, R.S. and Wicks, C.W., eds., Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry, Geological Society of America special paper 404, p.1-14.

Frumkin, A., Fischhendler, I., 2005. Morphometry and distribution of isolated caves as a guide for phreatic and confined paleohydrological conditions. *Geomorphology* 67 (2005) 457-471.

Frumkin, A., Gvirtzman, H., 2006. Cross-formational rising groundwater at an artesian karstic basin: the Ayalon Saline Anomaly, Israel. *Journal of Hydrology* 318 (2006) 316–333.

Goldschmidt, M. J.,1935. Zur Hydrologie der Küstenebene Palästinas. *Zeitschrift für den Aufbau Palästinas*. Nr12. Dezember 1935.

Hendy, C. H. (1971). The isotopic geochemistry of speleothems—The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **35,** 801–824.

Hill, A. C., (1987). Geology of Carlsbad Cavern and other caves in the Guadalupe Mountains, New Mexico and Texas. New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources, Bulletin 117: 150 pp.

Hill, A. C., 1990. Sulfuric acid speleogenesis of Carlsbad Cavern and its relationship to hydrocarbons, Delaware Basin, New Mexico and Texas. *American association of petroleum geologists Bulletin* 74: 1685-1694.

Hill, A. C., 2000 A. Sulfuric acid, Hypogene karst in the Guadalupe Mountains of New Mexico and the west texas, U.S.A. Speleogenesis: evolution of karst aquifers (2000) p. 309-316.

Hill, A. C., 2000 B. Overview of the geologic history of cave development in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 62(2): 60-71.

Holmes, J.D., Ziegler, K.J., Audriani, M., Lee, C.T., Bhargava, P.A., Steytler, D.C., Johnston, K.P. 1999. Buffering the Aqueous Phase pH in Water-in-CO2 Microemulsions" *J. Phys. Chem.* B. 1999, 103, 5703.

Hose, L. D., Pisarowicz, J. A., 1999. Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico: reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosystem. *Journal of Cave and Karst Studies* 61(1): 13-21.

Hurtgen, M. T., Arthur, M. A., Suits, N. S., Kaufman, A. J., 2002. The sulfur isotopic composition of Neoproterozoic seawater sulfate: implications for a snowball Earth? Earth and Planetary Science Letters 203 (2002) 413-429.

Klang, A., Gvirtzman, G., 1988. Structural Map of the Top of the Judea Group and the Talme Yafe Formation in the Southern Coastal plain and the Shephela region, Israel. Geological Survey of Israel, Jerusalem p. 40.

Klimchouk, A., Ford, D., Palmer, A., Dreybrodt, W., 2000. speleogenesis, evolution of karst aquifers. National Speleological Society.

Klimchouk, A., 2007. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute Special Paper no. 1. 2007.

Klimchouk, A., 2009. Principal features of hypogene speleogenesis. Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins. Ukrainian institute of speleology and karstology, special paper 1, 2009. p. 7-15.

Koschel, R., Benndorf, J., Proft, G., Recknagel, F., 1983. Calcite precipitation as a natural control mechanism of eutrophication. *Arch. Hydrobiol*. Vol. 98, no. 3, pp. 380-408. 1983.

Kroitoru, L., 1987. The characterization of flow systems in carbonatic rocks defined by the ground water parameters: central Israel. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Weizmann institute of science, Rehovot, Israel. 1987.

Kronfeld, J. 1997. The geochemistry and geochronology of the Beer Sheva – Yarkon-Taninim aquifer. The final report to water Commission, 21 pp.

Lascu, C., 2004. Movile cave, Romania. Encyclopedia of cave and carst science: London, Routledge. p. 528-530.

Levy, G., 2007. The first troglobite scorpion from Israel a new chactoid family (Arachnida : Scorpion). *Zoology in the Middle East* 40, 2007: 91-96.

Lismonde, B., 2003. Limestone wall retreat in a ceiling cupola controlled by hydrothermal degassing with wall condensation (Szunyogh model) (Comments to Wolfgang Dreybrodt remark "On feasibility of condensation processes in caves". Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers (www.speleogenesis.info), 1, 4, 3p.

Longley, G., 1981. The Edwards aquifer: earth's most diverse groundwater ecosystem? *International Journal of Speleology* 11: 123–128.

Lundberg, J., 2005. Karren. In Culvier, D. C. – White, W. B. Eds. Encyclopedia of Caves. Elsevier Academic Press, Burlington – San Diego – London, 315–321.

Mucke, B., Vicker, V., Wadewitz, S., 1983. Cupola formation in occasionally inundated cave roofs. European Regional Conference on Speleology, Sofia 1980, 2, 129-132, Bulgarian Federation of Speleology.

Nriagu, J.O., Rees, C.E., Mekhtiyeva, V.L., Yu Lein, A., Fritz, P., Drimmie, R.J., Pankina, R.G., Robinson, B.W., Krouse, H.R., 1991. Hydrosphere. In: Krouse, H.R., Grinenko, V.A. (Eds.), STable Isotopes: Natural and Anthropogenic Sulfur in the Environment. John Wiley and Sons, Chichester, pp.177–266.

Osborne, R.A.L., 2007. Cathedral cave, Wellington cave, New south Wales Australia. A multiphase, non-fluvial cave. *Earth surface processes and landforms*, 32:14, p. 2075-2103.

Palmer, A. N., Palmer, M. V., 2000. Hydrochemical interperetation of cave patterns in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 62(2): 91-108.

Picard, L., 1943. Structure and evolution of Palestine. Bull. Geol. Dep. Hebrew Univ. Jerusalem 187 pp.

Poulson, T. L., White, W. B., 1969. The cave environment. *Science*. 165 (3898): 971–981; 1969.

Polyak, V. J., Provencio, P., 2001. By-product materials related to H_2S-H_2SO_4 influenced speleogenesis of Carlsbad, Lachugilla, and other caves of tha Guadalupe mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 63(1): 23-32.

Por, F. D., 1986. Crustacean biogeography of the Late Miocene Middle Eastern Landbridge. In Gore, R. H. & K. L. Heck (eds), Crustacean biogeography. A.A. Balkema: 69–84.

Por, F. D., Dimentman, Ch., Frumkin, A., 2001. Israel. *Encyclopedia Biospeologica* 3, 1839-1849.

Post, D. M., 2002. The long and short of food-chain length. *TRENDS in Ecology & Evolution* Vol.17 No.6 June. p. 269–277.

Post, D. M., Pace, M. L., Hairston Jr, N. G., 2000. Ecosystem size determines food-chain length in lakes. *Nature*. vol 405. p. 1047–1049.

Rossak, A., Sivan, O., 2010. Hydrogeochemical Tool to Identify Salinization or Freshening of Coastal Aquifers Determined from Combined Field Work, Experiments, and Modeling. *Environ. Sci. Technol.* 2010**,** *44,* 4096–4102.

Ruby, E. G., Jannasch, H. W., Deuser, W. G., 1987. Fractionation of Stable Carbon Isotopes during Chemoautotrophic Growth of Sulfur-Oxidizing Bacteria. *Appl Environ Microbiol*. 1987 August; 53(8): 1940-1943.

Sarbu, S. M., 2000. Movile cave: A chemoautotrophically based groundwater ecosystem. In Wilkens, H., D. C. Culver & W. F. Humphreys (eds), *Subterranean ecosystems, Elsevier*: 319–344.

Sarbu, S. M., Lascu, C., 1997. Condensation corrosion in Movile cave, Romania**.** *Journal of Cave and Karst Studies*, December 1997.

Sarbu, S. M., Kane, T. C., Kinkle, B.K., 1996. A Chemoautotrophically Based Cave Ecosystem. *Science* 28 June 1996: Vol. 272. no. 5270, pp. 1953 - 1955.

Schoener, T. W., 1989. Food webs from the small to the large. *Ecology* 70, 1559–1589.

Shakur, M.A., 1982. $\delta^{34}S$ and $\delta^{18}O$ Variations in Terrestrial Sulfates. PhD thesis, Univ. Calgary, Canada.

Slobodkin, L. B., 1961. Growth and regulation of animal populations. Holt, Rinehart and Wilson.

Stumm W. and Morgan J. J. (1996) *Aquatic Chemistry.* Wiley.

Taylor, M. P., Drysdale, R. N., Carthew. K. F., 2004. The formation and environmental significance of calcite rafts in tropical tufa-depositing rivers of northern Australia. *Sedimentology*. Volume 51, Issue 5, pages 1089–1101, October 2004.

Tsurnamal, m., Por, F. D., 1968. The subterranean fauna associated with the blind palaemonid prawn of Typhlocaris galilea Calman. *Int. J. Speleol*., 3(3-4):219-223.

Tsurnamal, m., 1978. The biology and ecology of the blind prawn, Typhlocaris galilea calman (Decapoda, Caridea). *Crustaceana* 34 (2) 1978.

Tsurnamal, m., 2008. A new species of the stigobiotic blind prown Typhlocaris calman, 1909 (decapoda, palaemmonide, Tiphlocaridinae) from Israel. *Crustaceana* 81 (4): 487-501.

Tunnicliffe, V., 1992. Hydrothermal-vent communities of the deep sea. *American Scientist*, v. 80, p. 336-349.

Zak, I., Sakai, H., and Kaplan, I.R., 1980. Factors controlling the $^{18}O/^{16}O$ and $^{34}S/^{32}S$ isotope ratios of ocean sulfates, evaporates and interstitialsulfates from modern deep sea sediments. In Goldberg, E.D., Horibe, Y., and Saruhashi, K., (Eds.), Isotope Marine Chemistry: Tokyo (Rokakuho), 339-373.

7 נספחים

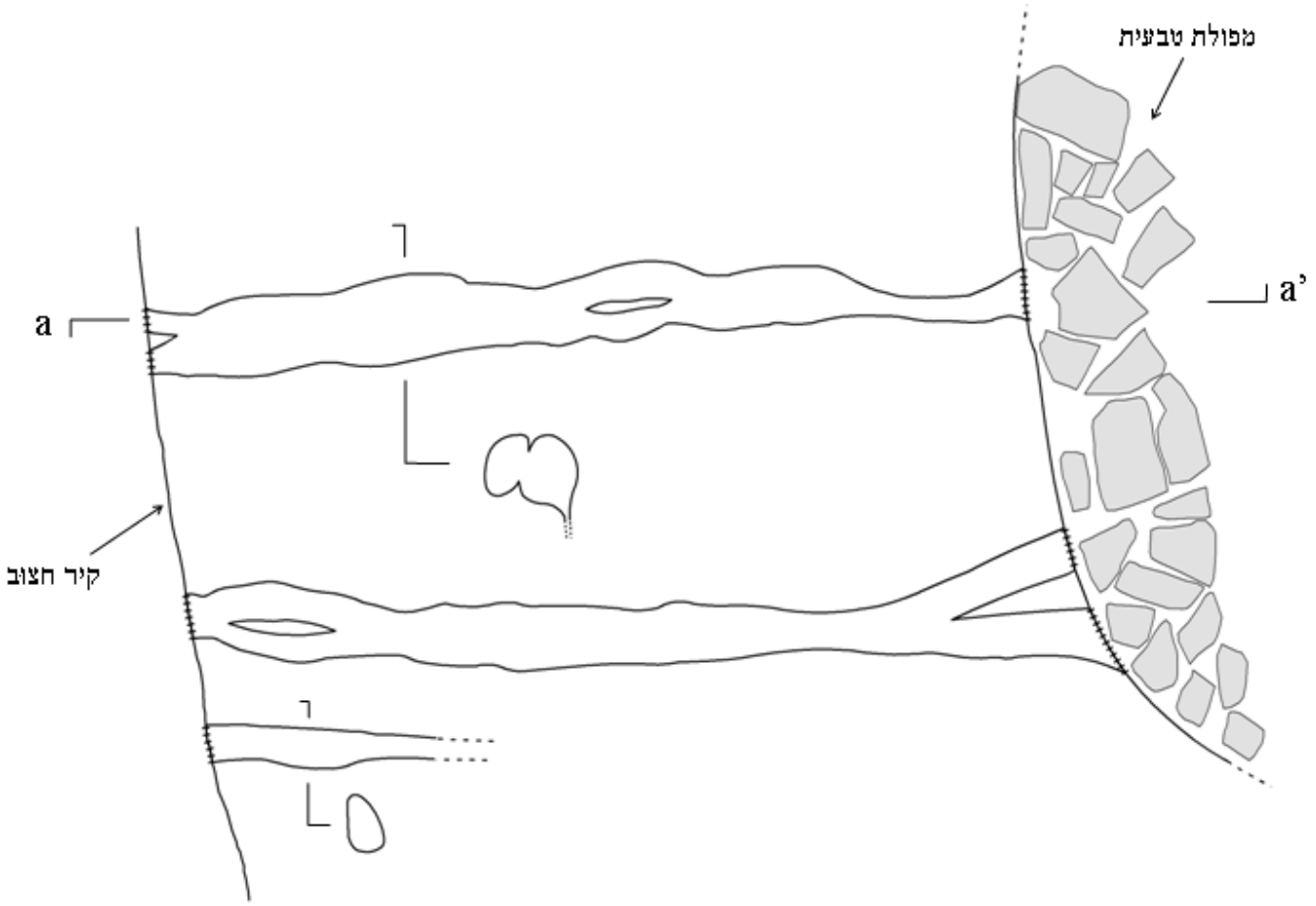
נספח 1.1 מערת המפולת

נ"צ: 193392/645846
דרגה: 2B
מיפוי: ישראל נעמן
רז בן יאיר
מרץ 2007

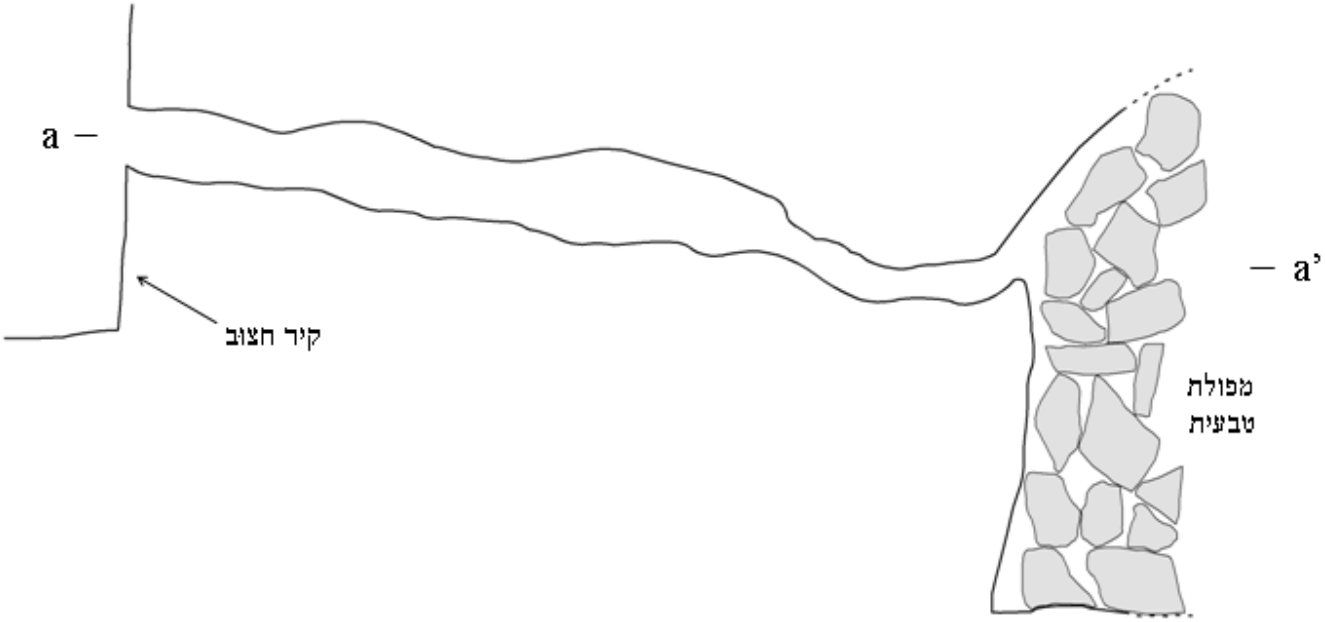
קנ"מ:
0 1 2 3 4 5 m

צ

מפה



היטל אנכי a-a'



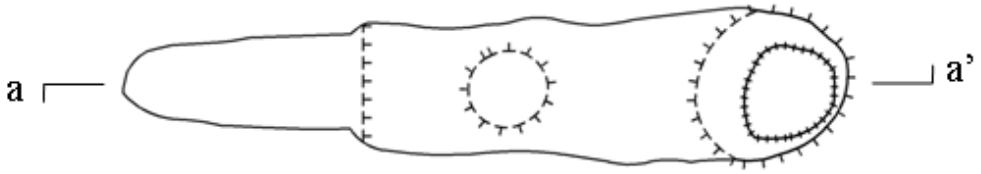
נספח 1.2 מערת המים

קנ"מ:
0 1 2 3 4 5 m

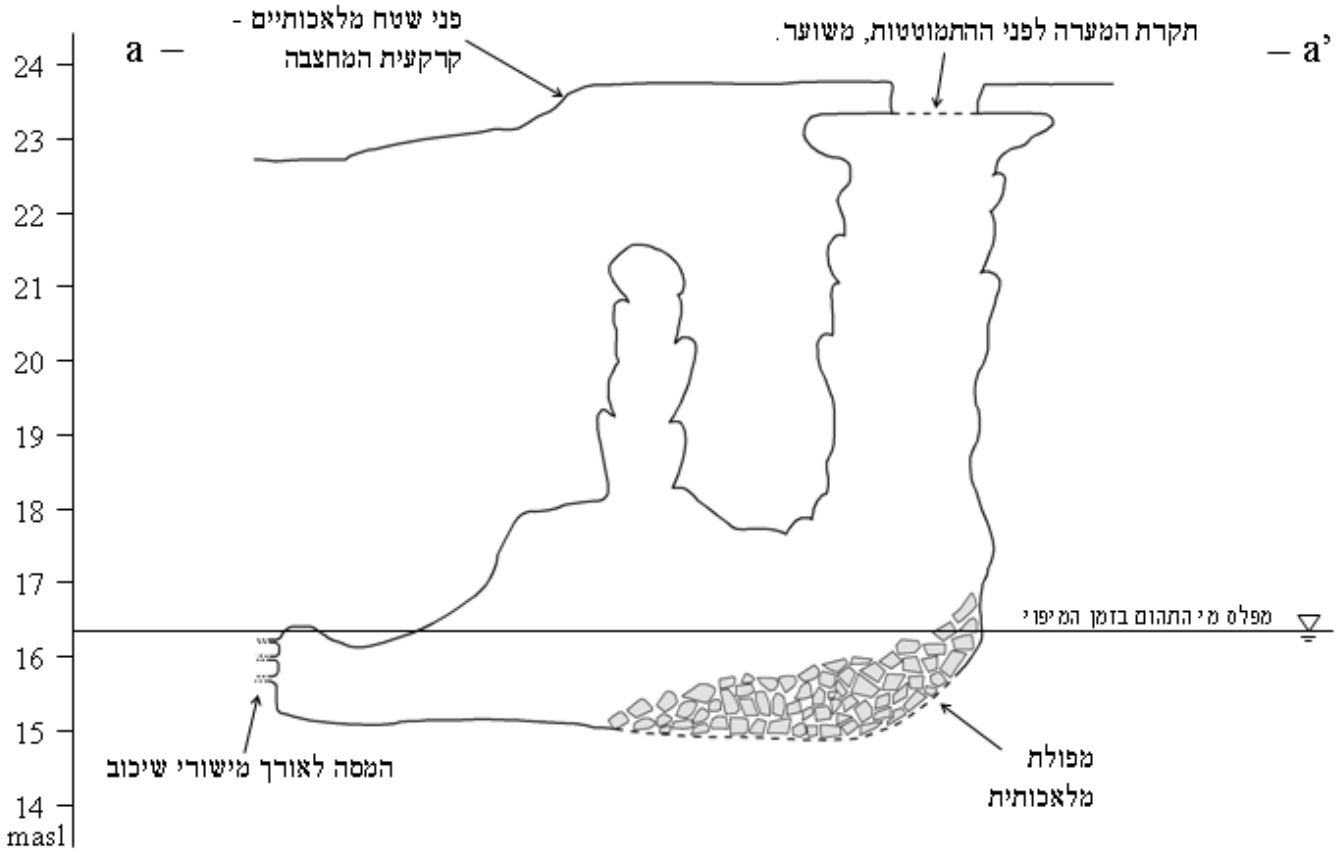
צ

נ"צ: 193218/646226
דרגה: 5C
מיפוי : אחיקם עמיחי הי"ד
ישראל נעמן
ינואר 2006

מפה



היטל אנכי a-a'



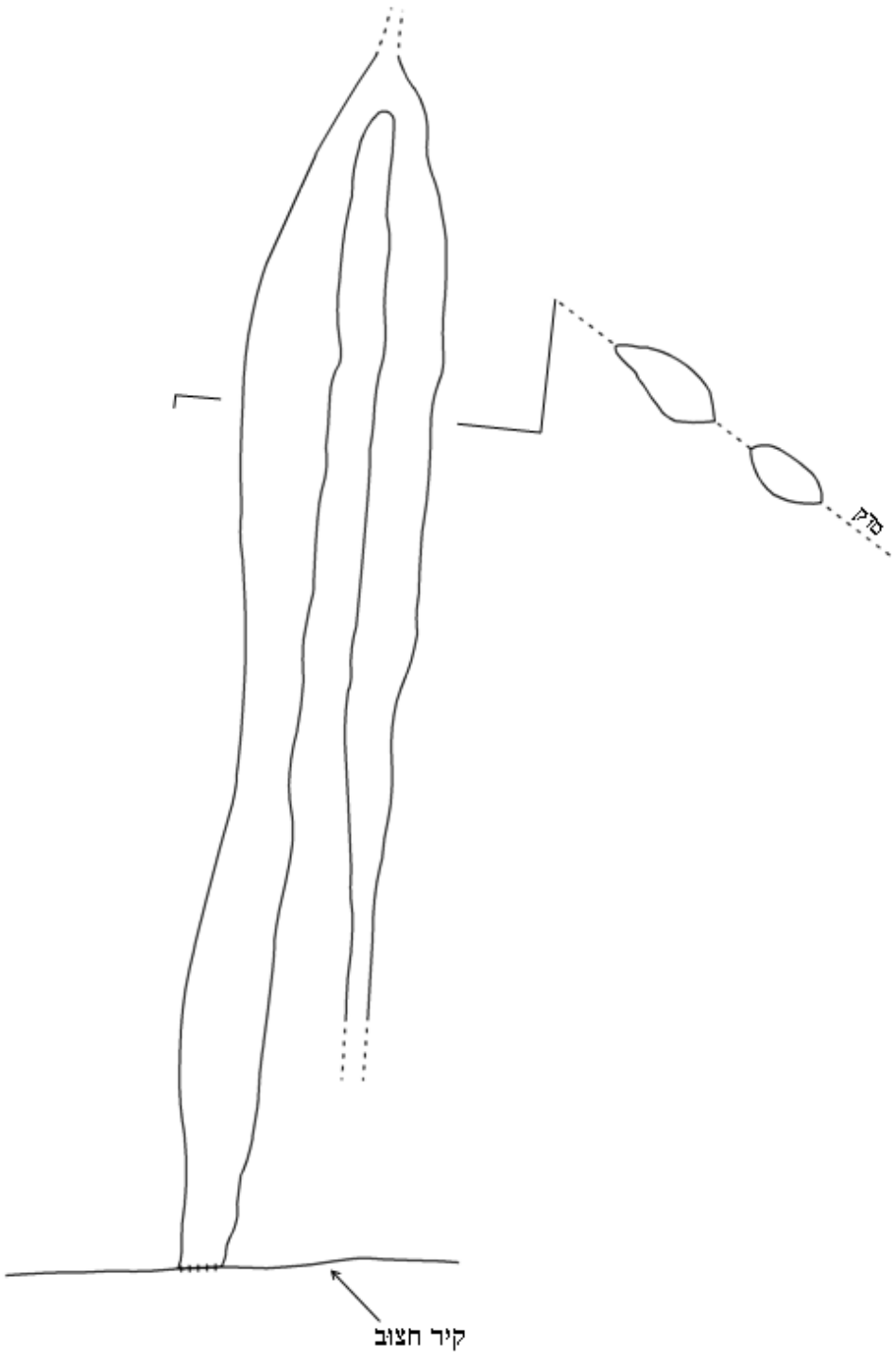
נספח 1.3 מערת הסדק

ג"צ: 193642/646226
דרגה: 2B
מיפוי : ישראל נעמן
יוני 2006

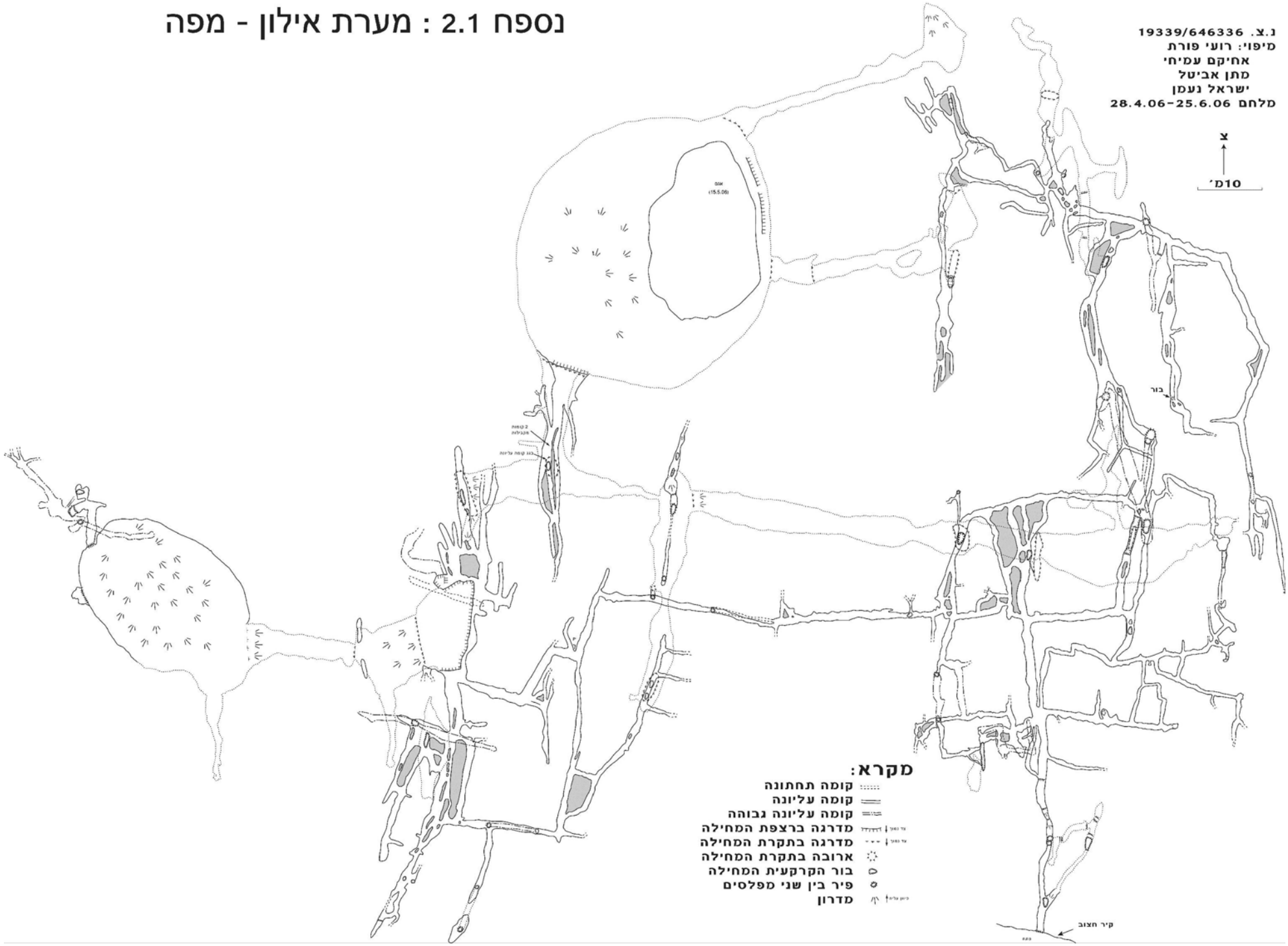
קנ"מ:
0 1 2 3 4 5 m

צ

מפה



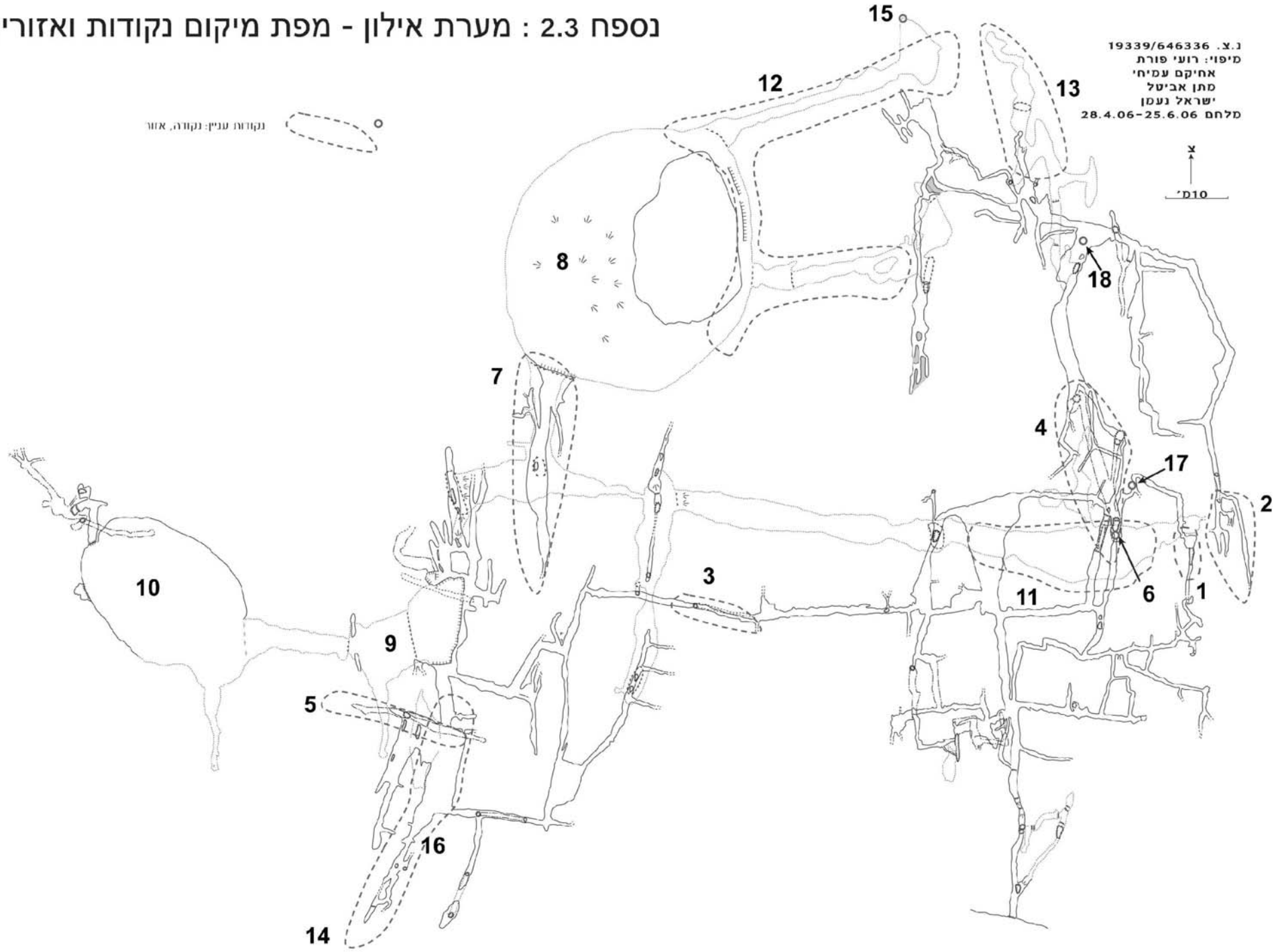
נספח 2.1 : מערת אילון - מפה



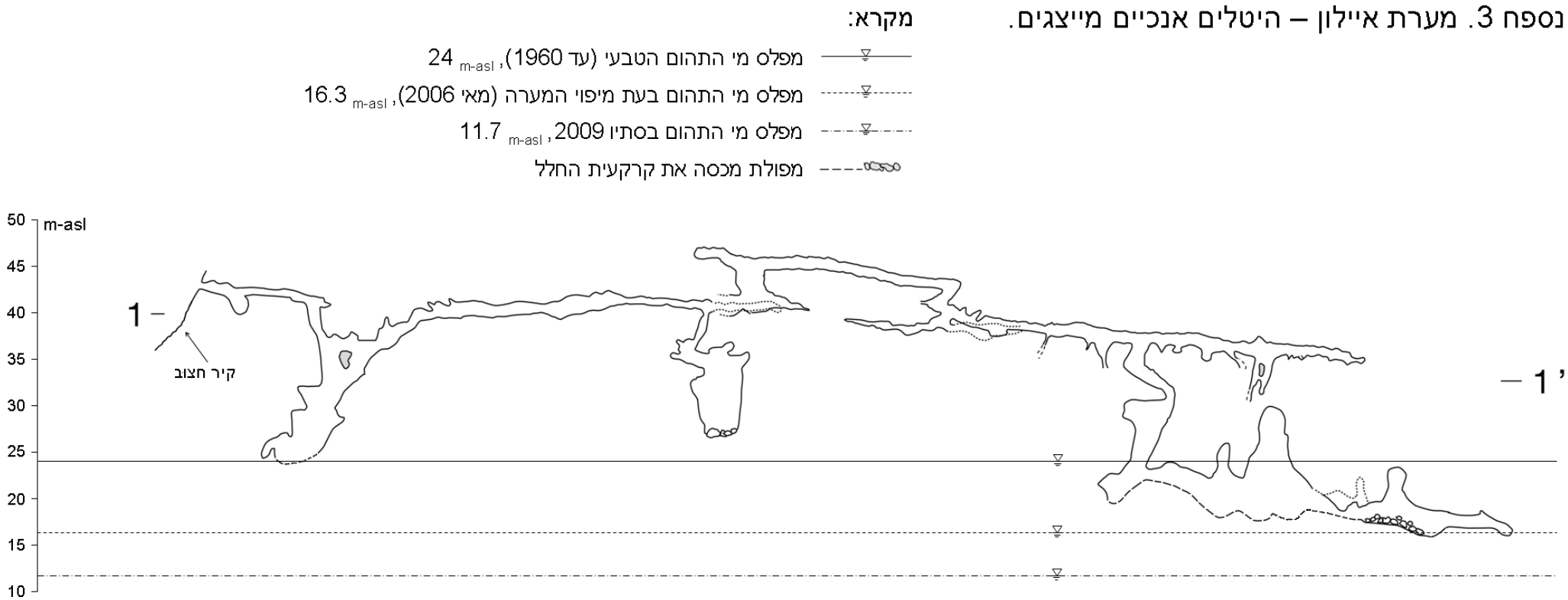
נספח 2.2 : מערת אילון - מפת מיקום היטלים וחתכי רוחב



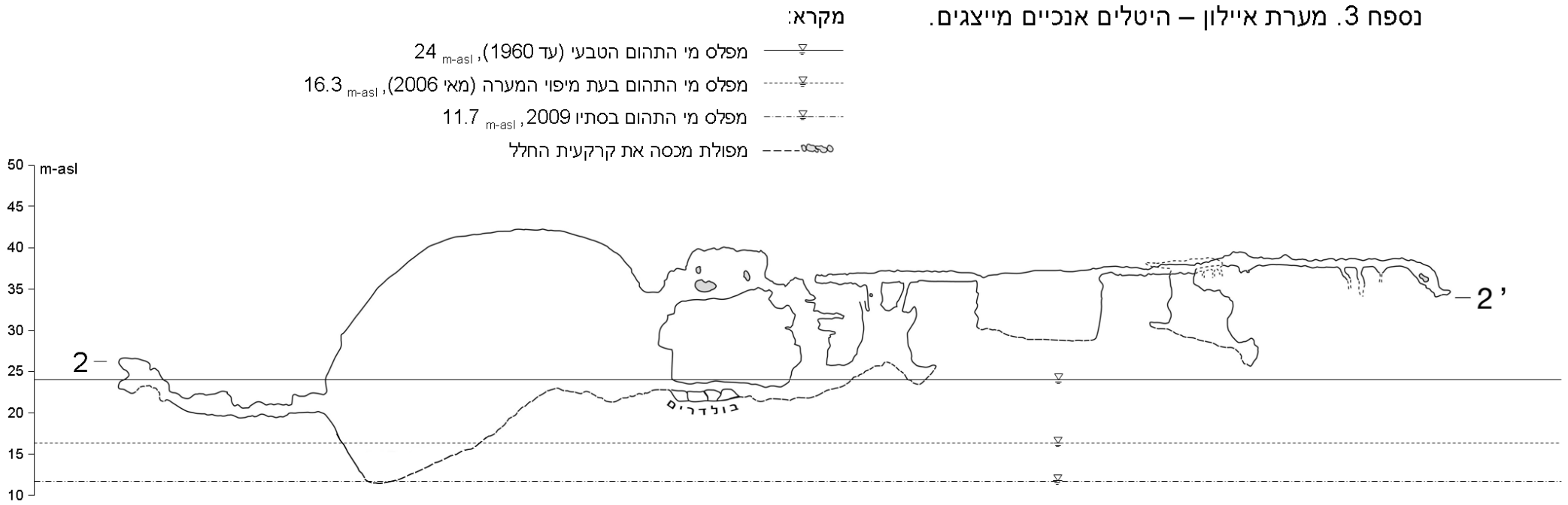
נספח 2.3 : מערת אילון - מפת מיקום נקודות ואזורים



נספח 3. מערת איילון – היטלים אנכיים מייצגים.



נספח 3. מערת איילון – היטלים אנכיים מייצגים.

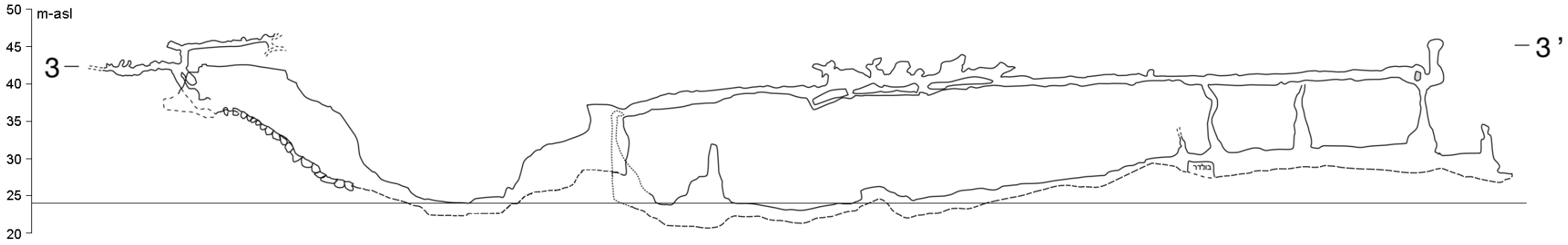


נספח 3. מערת איילון – היטלים אנכיים מייצגים.

מקרא:

מפלס מי התהום הטבעי (עד 1960), 24 m-asl

מפולת מכסה את קרקעית החלל



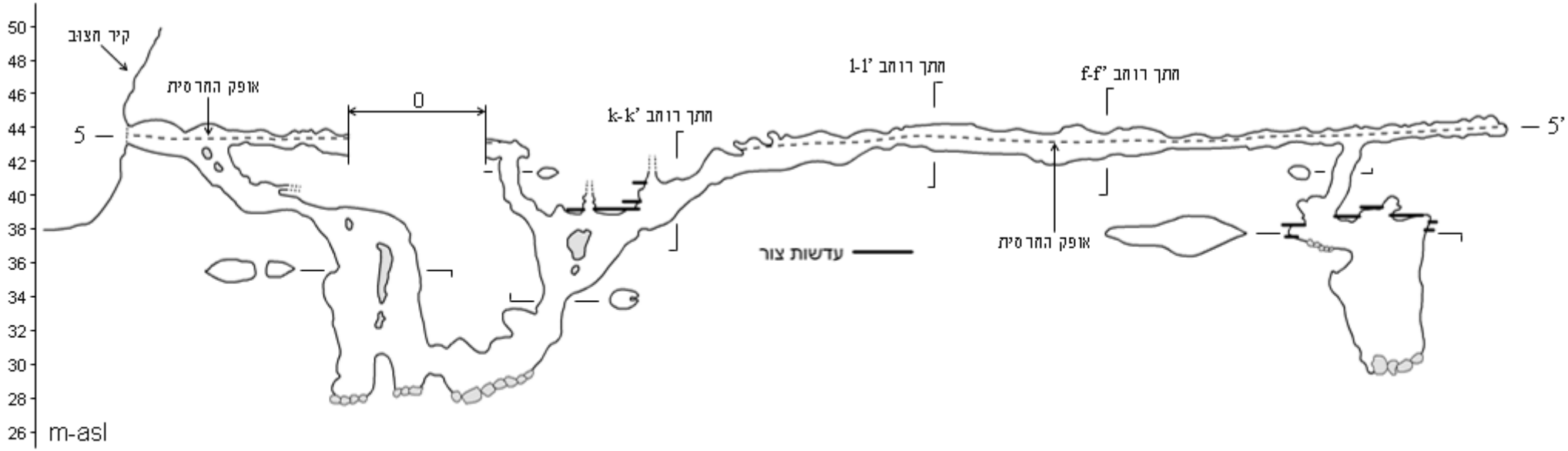
נספח 4. מערת איילון, היטלים אנכיים פרושים

קנ"מ: 0 2 4 6 8 10 m

היטל אנכי פרוש 4-4'

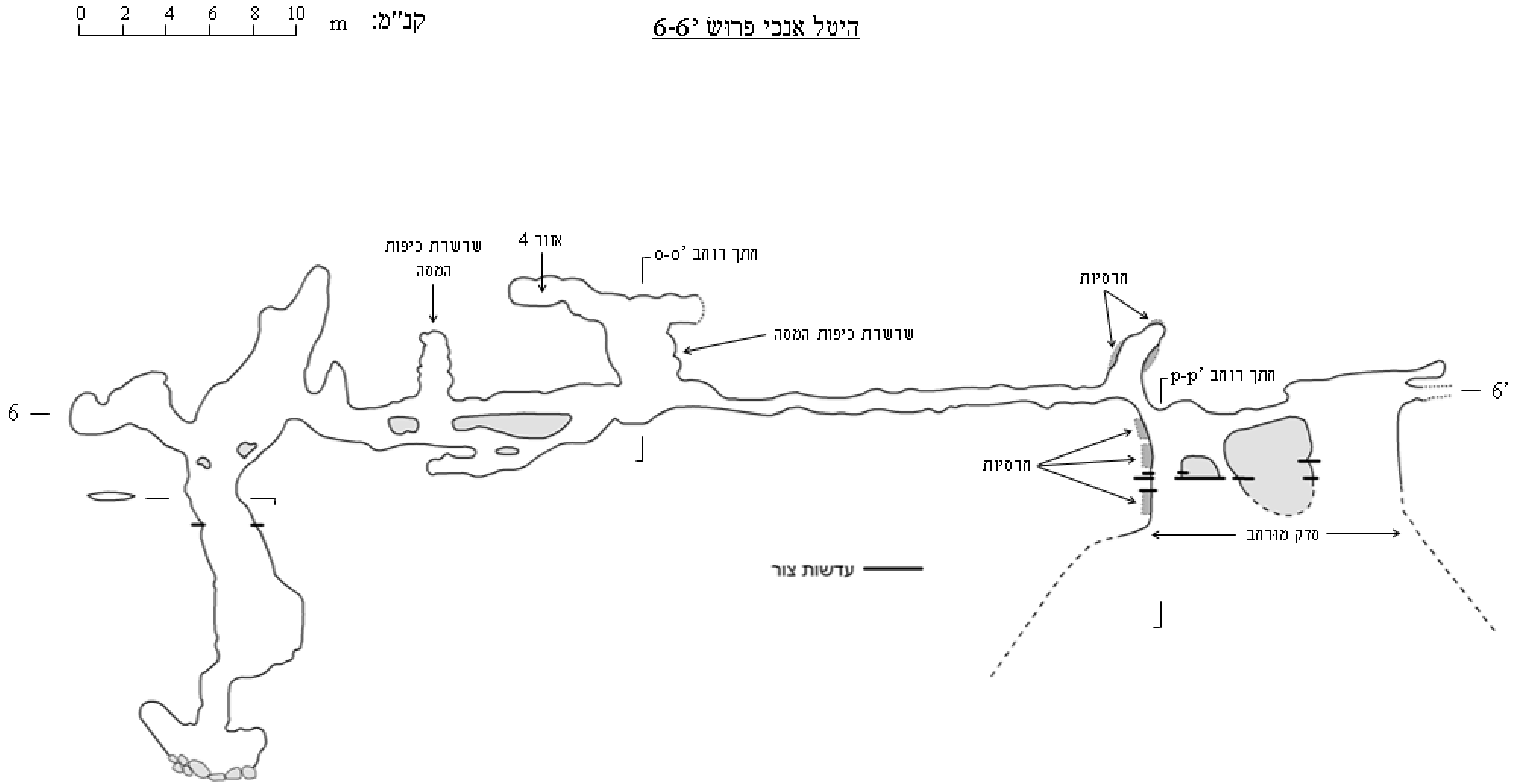


היטל אנכי פרוש 5-5'



נספח 4. מערת איילון, היטלים אנכיים פרושׂים

היטל אנכי פרושׂ '6-6



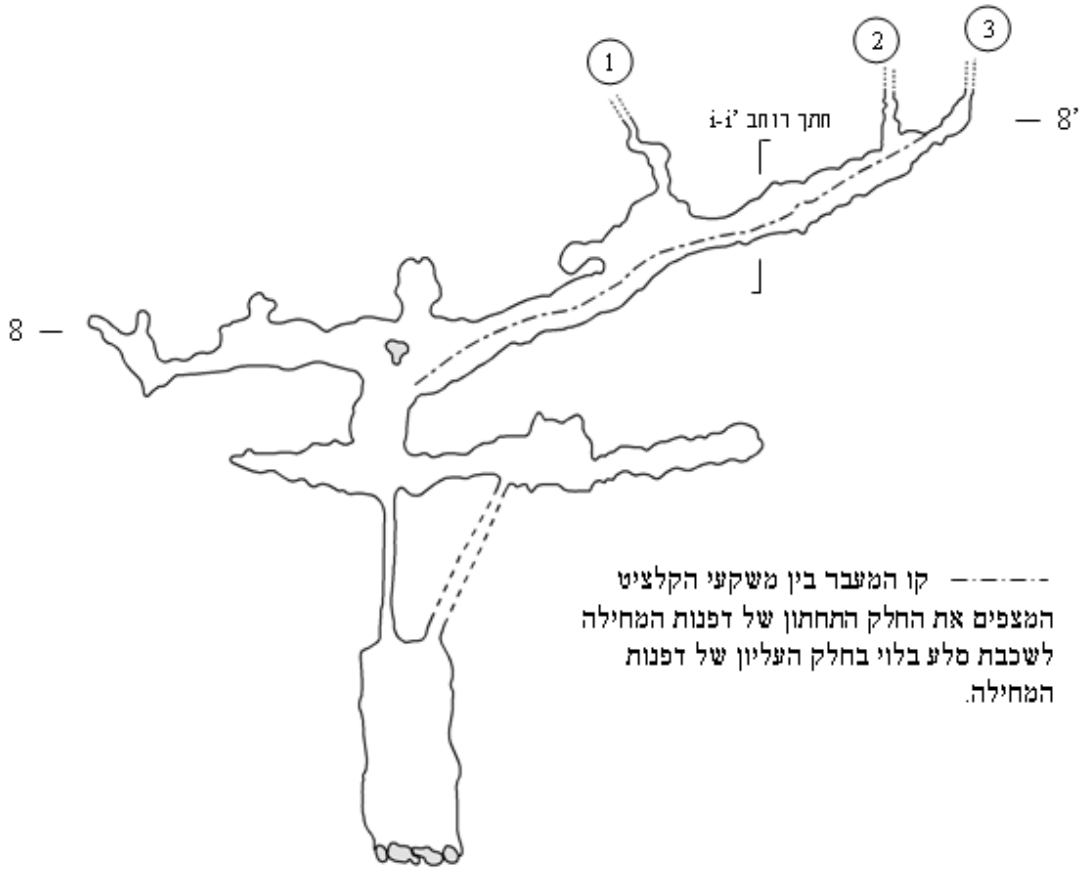
נספח 4. מערת איילון, היטלים אנכיים פרושים

קנ"מ: 0 2 4 6 8 10 m

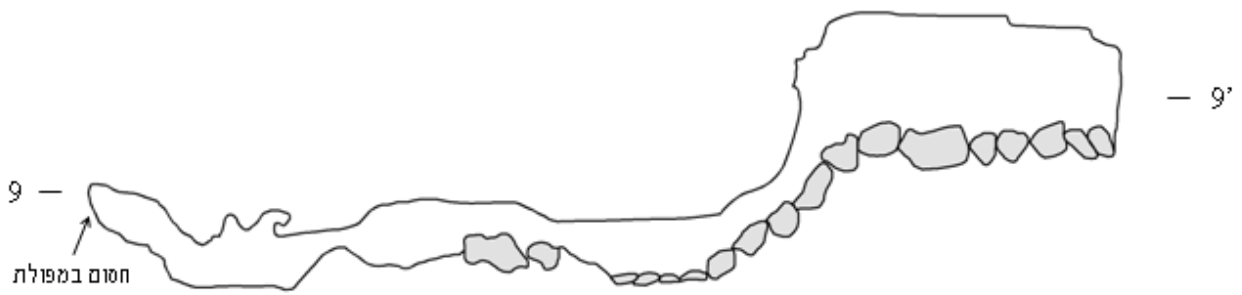
היטל אנכי פרוש 7-7'



היטל אנכי פרוש 8-8'



היטל אנכי פרוש 9-9'



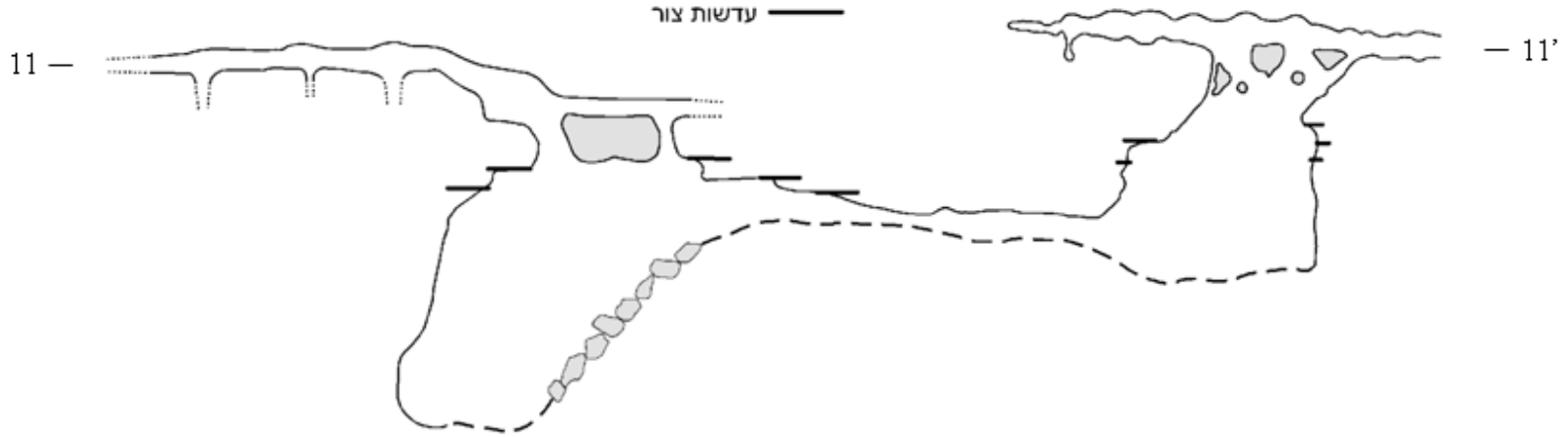
נספח 4. מערת איילון, היטלים אנכיים פרושים

קנ"מ: 0 2 4 6 8 10 m

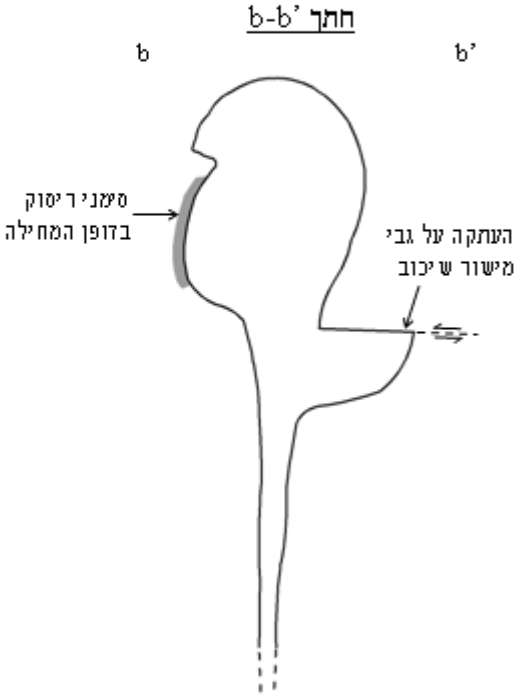
היטל אנכי פרוש 10-10'

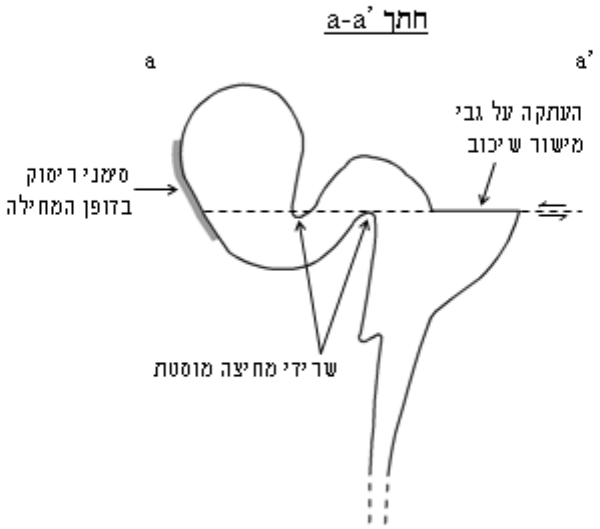


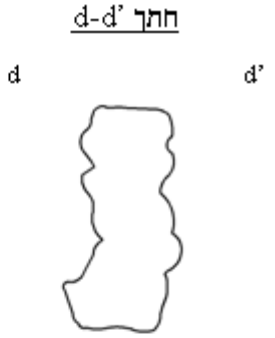
היטל אנכי פרוש 11-11'

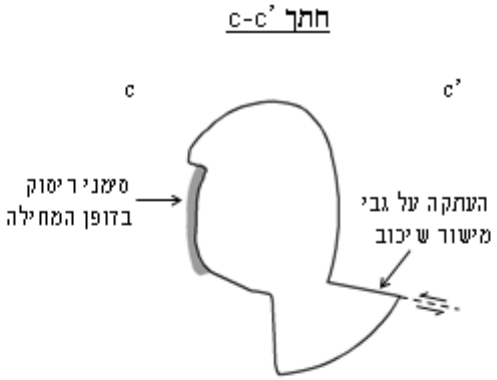


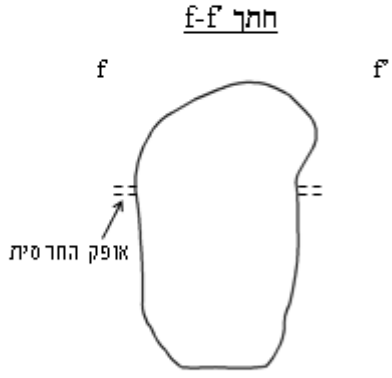
נספח 5. מערת איילון, חתכי רוחב של מחילות. קנ"מ: 0 20 40 60 80 100 cm

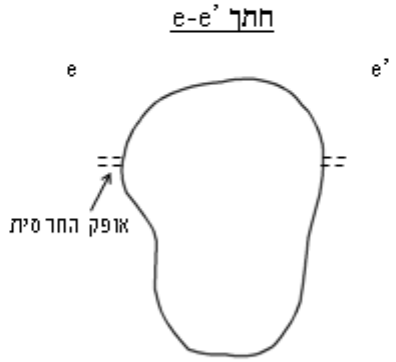




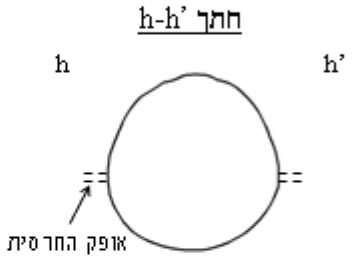


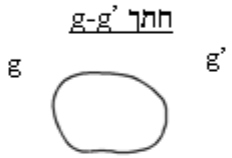


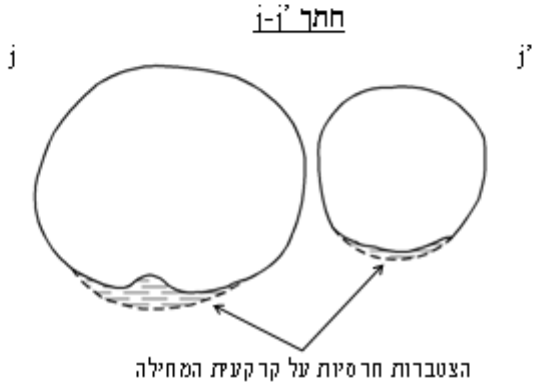


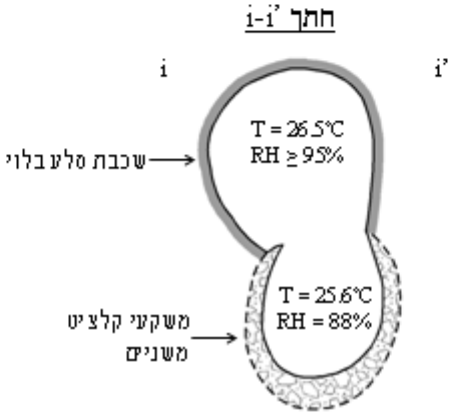


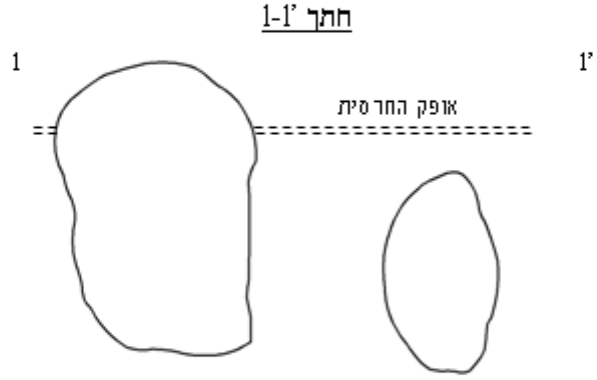
נספח 5. מערת איילון, חתכי רוחב של מחילות. קנ"מ: 0 20 40 60 80 100 cm

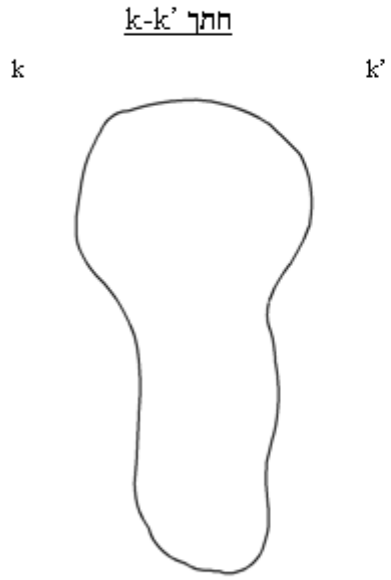








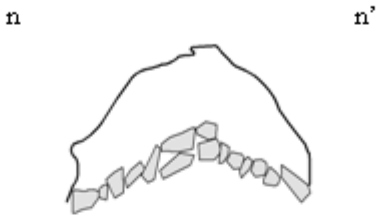




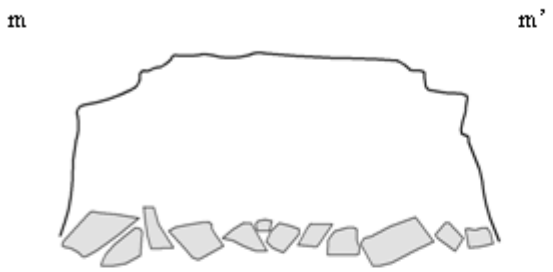
נספח 5. מערת איילון, חתכי רוחב של מחילות.

קנ"מ: 0 1 2 3 4 5 m

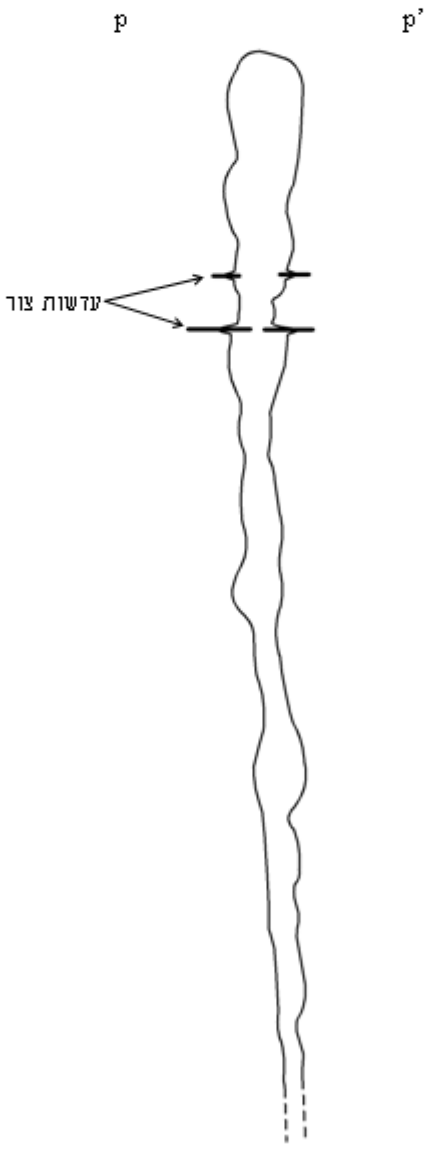
חתך n-n'



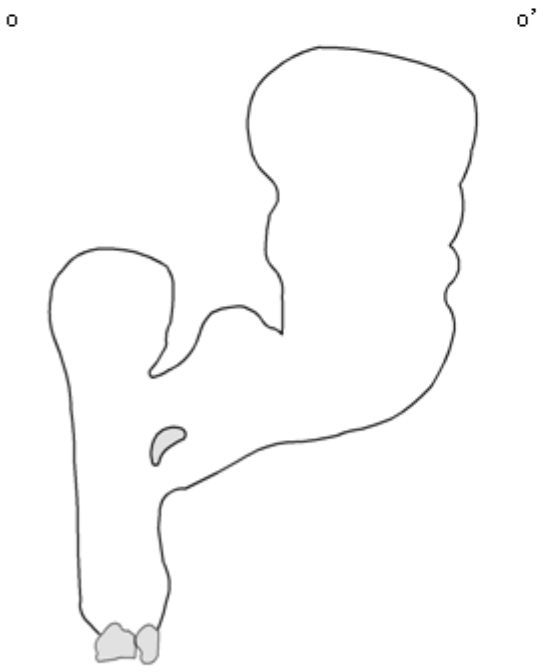
חתך m-m'



חתך p-p'



חתך o-o'



נספח 6. טבלאות

מספר דגימה	תאריך	עומק (m)	Na	K	Ca	Mg	SO_4	Cl	HCO_3	Sr	B	Br	H_2S	F	Si	TDS	TOC לא מסונן	TOC מסונן	R.E.
			mg/l																%
AC-300	21.05.06	0.05	291	7.3	90	41	99	465	296	2.3	0.440	1.1	4.7			1292			1.6
AC-302	21.05.06	4.5	276	7.0	93	39	102	490	300	2.2	0.445	1.1	4.4			1308			-2.1
ACW-102	25/03/07	0.05	300	10	88	36		524		2.2	0.500				6.9				2.2
ACW-105	25.09.07	0.05	295	8.9	91.1	43.4	93.0	490	274		0.528					1297	57.93	16.64	-2.3
ACW-106	25.09.07	1.1	297	9.0	90.7	43.2	96.3	496	276	1.95	0.535					1313	25.94	22.51	
ACW-110	11.05.08	0.05	289	7.0	101.6	46.2	98.6	479											
ACW-111	02.07.08	0.05	310	8.2	94.9	47.3	90	480	338	2.28	0.538	0.54				1371			
ACW-113	21.10.08	0.05					81	464	316			1.54							
ACW-116	27.12.08	0.05					94.8	469						0.6					
ACW-117	12.03.09	0.05		8.2		44.9	95.3	470		>0.5	>0.5			0.60					

טבלה 6.1. ההרכב הכימי של מי תהום באגם במערת איילון, יונים ראשיים.

מספר דגימה	תאריך	Ag	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	U	Li	NH_4	NO_2	NO_3
		ppb																		ppm		
AC-300	21.05.06	<0.1	7	<1	77	<0.1	<5	<10	<5	<10	<2	0.4	<5	<0.1	<0.1	<2	<0.5	0.1				
AC-302	21.05.06	<0.1	7	<1	83	<0.1	<5	<10	<5	<10	<2	0.1	<5	0.1	<0.1	<2	<0.5	0.1				
ACW-102	25/03/07	<10	<25	<20	75	<5	<5	<5	<5	<60	<10	<10	<10	<10	<20	<10	<10		<20	0.7	<2E-3	0.39
ACW-106	25.09.07				68	<5	<5	<5	<5	<10	<5		<5	<5								
ACW-110	11.05.08		7.1	<1			<0.1	0.7	3.3		1.1		1.1			3.6		0.2				<5
ACW-111	02.07.08		4.8	<1	83		<0.1	3.3	1.4				<1			2.9		0.14	26.2	4.7E-3		<5
ACW-116	27.12.08																					3.8
ACW-117	12.03.09		16.7	<1	86	<0.1	<0.1	2.2	<1		4.5		<1	1.1	<0.1	<1		<0.1				<0.25

טבלה 6.2. ההרכב הכימי של מי תהום באגם במערת איילון, יסודות קורט.

מספר דגימה	תאריך	אתר	Na	K	Ca	Mg	SO_4	Cl	HCO_3	B	Br	S	Sr	Si	TDS	TOC לא מסונן	R.E.
			mg/l														%
ACW-103	25/03/07	טפטוף	187	2.5	53.7	15.7		283		0.310		25.8	0.96	4.7			1.8
ACW-107	25.09.07	טפטוף	154	1.9	21.8	34.6	76.2	251	154	0.376					696	8.6	

טבלה 6.3. ההרכב הכימי של מי טפטוף במערת איילון, יונים ראשיים.

מספר דגימה	תאריך	אתר	Ag	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	U	Li	NO_2	NO_3
			ppb																		ppm	
ACW-103	25/03/07	טפטוף	<10	25	<20	64	<5	<5	<5	<5	<50	<10	<10	<10	<10	<20	<10	<20		<20		

טבלה 6.4. ההרכב הכימי של מי טפטוף במערת איילון, יסודות קורט.

מספר דגימה	תאריך	אתר	Na/Cl	SO_4/Cl	Mg/Ca	SO_4/Ca	Cl/Br	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{13}C_{(DIC)}$	d-excess
			eqv. Ratio				weight. Ratio	‰ SMOW		‰ PDB	
AC-300	21.05.06	אגם, עומק 5 ס"מ	0.97	0.16	0.75	0.46	422.73	-5.12	-23.0		18
AC-302	21.05.06	אגם, עומק 4.5 מ'	0.87	0.15	0.69	0.46	445.45	-5.23	-23.5		18
ACW-102	25/03/07	אגם, עומק 5 ס"מ	0.88		0.67						
ACW-103	25/03/07	מערה, טפטוף	1.02		0.48						
ACW-105	25.09.07	אגם, עומק 5 ס"מ	0.93	0.14	0.79	0.43					
ACW-106	25.09.07	אגם, עומק 1.1 מ'	0.92	0.14	0.79	0.44					
ACW-107	25.09.07	מערה, טפטוף	0.95	0.22	2.62	1.46					
ACW-110	11.05.08	אגם, עומק 5 ס"מ	0.93	0.15	0.75	0.40					
ACW-111	02.07.08	אגם, עומק 5 ס"מ	1.00	0.14	0.82	0.40	888.89				
ACW-113	21.10.08	אגם, עומק 5 ס"מ		0.13			301.30	-5.05		-12.4	
ACW-116	27.12.08	אגם, עומק 5 ס"מ		0.15							
ACW-117	12.03.09	אגם, עומק 5 ס"מ		0.15							

טבלה 6.5. יחסים כימיים וערכים איזוטופיים במי מערת איילון.

date	Watertable (m, asl)	Temp (°C)	pH	O_2 (mg/l)	EC (ms/cm)	ORP
14/05/2007	15.11	28.7	6.93	1.10	2.27	
19/06/2007	14.68	29	6.95	0.11	2.25	
26/07/2007	14.15	29	6.92	0.12	2.23	
06/09/2007	13.49	29	6.93	0.13	2.22	
25/09/2007	13.265	29.6	6.93	0.08	2.23	
01/11/2007	12.86	28.6	6.92	0.07	2.25	
31/12/2007	13.16	28.7	6.93	0.4	2.27	
11/05/2008	13.26	29.6	6.92	0	2.25	-269
02/07/2008	13.43	28.9	6.96	0	2.25	-280
21/10/2008	12.76	28.6	6.94	0	2.24	-285
02/11/2008	12.76	28.6	6.91	0	2.26	-285
26/12/2008	12.84	29.0	6.96	0	2.28	-309
12/03/2009	13.19	28.7	6.91	0	2.24	326-

טבלה 6.6. מדידות שדה שבוצעו במימי אגם במערת איילון בעומק 10 ס"מ מפני המים. השינוי בנתוני החמצן המומס החל מ 11/05/2008 הינו תוצאה של החלפת מכשיר המדידה.

מיקום (על פי נספח 2.3)	טמפרטורה (ºC) בפתח האוורור	טמפרטורה (ºC) בחלל המערה	RH (%) בפתח האוורור	RH (%) בחלל המערה
16	24.3	27.9	87	≥95
17	25.2	27.2	91	≥95
18	23.6	24.7	86	92

טבלה 6.7. טמפרטורה ולחות יחסית באוויר בפתחי מובילים קרסטיים צרים אל הקומה העליונה ובקרבתם.

מקור	$\delta^{34}S$ (‰, CDT)	$\delta^{18}O_{(sulfate)}$ (‰, V-SMOW)
סולפאט במים 1	8.25	
סולפאט במים 2	8.9	-5.7
סולפיד במים	-8.4	
בקטריה רצנטית	-9	
גבס מחליף גיר	9.2-	-0.2
מחטי גבס	12.4-	-1.6

טבלה 6.8. ההרכב האיזוטופי של גפרית וחמצן בסולפאט שבמי האגם, במצע הבקטריאלי שעל פני המים ובמשקעי גבס ממערת איילון.

שם	אתר	החומר הנבדק	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$
AC107	מערת איילון	גיבוש קלציט בין למינות החרסית	-7.62	-7.69
AC205	מערה 3	אלמוג מערות, מעל VENT	-6.94	-6.23
AC180	מערת איילון	שפת קלציט, קומה העליונה (נקודה 16)	-7.84	-8.61
AC109	מערת איילון	שפת קלציט, קומה העליונה (נקודה 17)	-7.06	-3.54
AC104	מערת איילון	שפת קלציט עבה סמוך לפתח המערה	-7.18	-3.70
AC215	מערת איילון	סלע מארח	-6.55	-0.21

טבלה 6.9. ההרכב האיזוטופי של פחמן וחמצן (PDB) בסלע גיר קירטוני סמוך לפתח מערת איילון, במשקעי קלציט משניים במערת איילון ובמערה 3.

Sample	source	$\delta^{13}C$ (‰,PDB)	$\delta^{15}N$ (‰, air N_2)	C:N	Taxa
B1	1	-35.8	0.9	5.5	Bacterial mat
A10	1	-33.0	-2.2	4.2	Cyclopoidae
A8	1	-36.0	-2.6	4.7	*Tethysbaena* sp.
B5	1	-35.9	-0.2	5.1	*Typhlocaris ayyaloni*
ממוצע	1	-35.2	-1.0	4.9	
סטיית תקן	1	1.5	1.7	0.6	
B7	2	-32.7	-10.1	5.0	Collembola
B6	2	-32.6	-3.7	4.4	*Ayyalonia dimentmani*
A12	2	-32.8	-5.6	5.1	*Akrav israchanani*
ממוצע	2	-32.7	-6.5	4.8	
סטיית תקן	2	0.1	3.3	0.4	
B8	3	-41.8	5.5	27.4	Chlorophyta
A3	3	-22.2	1.4	9.8	Ostracoda
D10	3	-29.6	8.1	4.5	Corixidae
C3	3	-32.0	3.1	4.8	Coleoptera
C4	3	-32.2	3.0	4.1	Coleoptera
C5	3	-29.7	6.5	4.9	Coleoptera
C6	3	-31.9	9.1	5.7	Cyclopoidae
C7	3	-33.7	10.0	5.4	Cyclopoidae
C8	3	-30.7	10.3	4.4	Chironomidae
C9	3	-25.6	6.3	4.2	Coleoptera
C10	3	-30.2	7.2	3.6	Zygoptera
C11	3	-29.3	3.6	3.7	*Hyla* (tadpole)
C12	3	-32.5	3.3	3.8	*Triturus* (tadpole)
D2	3	-37.9	3.2	6.1	Hydracarina
D11	3	-33.5	3.1	3.4	Notonectidae
ממוצע	3	-31.5	5.6	6.4	
סטיית תקן	3	4.6	2.9	6.0	
B9	4	-28.4	-0.8	3.4	Acrididae
D3	4	-27.4	0.4	3.3	Grylloidea
B4	4	-31.4	9.6	4.3	Gryllotalpidae
A4	4	-27.7	4.7	4.7	Aranae
B10	4	-24.4	-1.3	7.0	Chilopoda
B11	4	-25.5	5.3	3.7	Scorpiones
C1	4	-27.4	2.7	4.3	Aranae
D1	4	-24.7	1.4	6.0	Coleoptera
D7	4	-27.4	1.8	6.0	*Limacus*
D8	4	-25.5	8.5	4.2	Aranae
D9	4	-24.7	5.0	5.1	Coleoptera
ממוצע	4	-26.8	3.4	4.7	
סטיית תקן	4	2.1	3.6	1.2	

טבלה 6.10. ההרכב האיזוטופי של פחמן **(‰, PDB)** וחנקן **(‰, air N_2)** בחומר אורגני במערת איילון ובסביבתה הקרובה על פני השטח. מקור הדגימות: 1, מערת איילון, בעלי חיים אקווטיים. 2, מערת איילון, בעלי חיים יבשתיים 3, בעלי חיים אקווטיים ממקווי מים עונתיים בקרבת המערה. 4, בעלי חיים טרסטריאלים מפני השטח באזור המערה.

The karst system and the ecology of Ayalon Cave, Israel

Thesis for the Degree of Master of Science

submitted by:

Israel Naaman

Under the supervision of:

Prof. Amos Frumkin

Prof. Haim Gvirtzman

June 2011

Department of Geology

Division of Earth Sciences

Faculty of Mathematics and Natural Sciences

The Hebrew University of Jerusalem

This thesis is dedicated to the Memory of Achikam Amichai



Photo: Boaz Langford

Achikam volunteered in the Hebrew University's cave research team for two years while he appealed to overturn a medical exemption from the IDF. During this period he discovered and mapped dozens of caves with endless enthusiasm and dedication, showing thoroughness and precision. He always sought to get to the bottom of things, seldom hesitating to question what other thought obvious. Behind his quiet, modest appearance laid a humorous, friendly and observing personality. Achikam accompanied me from the discovery of the Ayalon Cave onwards, taking part in the complicated mapping work and the ensuing research phases, and contributed greatly to their success.

Achikam love of Israel was evident in his numerous hikes along its trails.

On Friday, 28th December 2007, Achikam and his friend David Rubin were murdered by terrorists as they hiked the Telem stream in the Judean hillsides.

Abstract

The current research deals with the hydrology, the karst system and the ecosystem of the Ayalon cave. We aimed for understanding the processes that created the cave, the changes that occurred in the hydrologic system through time, understanding the structure and the general functioning of the ecosystem and its reaction to changes in the hydrological system. For that purpose, the cave was mapped and vertical & lateral cross-sections were plotted; the physical and chemical properties of the groundwater exposed in the cave were monitored; the speleological patterns and secondary depositions were examined. New species of organisms in the cave were defined and researched.

The Ayalon cave is located in the inner costal plane of Israel, 21 km from the Mediterranean sea, near the city of Ramla. In this location the groundwater of the Judea Group aquifer is warmer and more brackish than the surrounding groundwater, has reduced conditions and contains hydrogen sulfide. This phenomenon was recently referred to as "Ayalon Saline Anomaly" (ASA). The location of an open quarry in the center of ASA has exposed a karstic anomaly with numerous cavities, with distinct characteristics.

The ground water exposed in the cave is highly representative of the ASA, with chloride concentration of 524 mg/L and total dissolved solids of 1371 mg/L. the sulfide concentration is 5 mg/L and the water temperature (29°C) is 5°C higher than the average temperature in the aquifer. No presence of dissolved oxygen was measured in the water, but we assumed its presence since it is crucial for the aquatic organisms. The water table in the area dropped by 13 meters since 1951. During the research period alone, the groundwater level dropped by 5.2 meters. However, there were no significant changes in the water chemical composition, and no significant correlation between the water properties and the groundwater level. Comparison of ionic ratios of the water in the cave and water wells in the vicinity reveals a mixture of two different salinity sources of water, and shows that the water in the Ayalon cave is closest to the saline end-member.

The cave comprises two stories of horizontal passages, each with distinct characteristics. The upper story is a network maze cave. The passages have well rounded smooth walls and the ceiling is rich with cupolas and rising cupolas chains.

The cave morphology and water properties show that the cave was formed by aggressive water that penetrated upwards through vertical shafts and fractures in the bottom of the passages. The findings suggest that the cave was formed is the phreatic zone, beneath the water table, by slow water flow from a deep source into the cave formation zone.

A layer of soft weathered rock on the walls and secondary gypsum and calcite deposits in the upper stories passages, indicate condensation corrosion and associated deposition. These processes are an outcome of air convection that took place under vadose conditions, after the water table dropped. The nature and distribution of these deposits allowed us to estimate the tracks of the air convection currents. These currents of air convection supplied oxygen to and received heat from the surface of the groundwater and resulted in secondary convection in the groundwater and distinctive dissolution pattern of vertical water flow.

The lower story is characterized by large collapse halls and debris piles covering the bottom of the passages and halls. The morphology of this story indicates phreatic speleogenesis. Until recently, speleogenesis activity occurred on most of this story surface, but anthropogenic over-use of the regional aquifer since mid 20th century lowered the water-table to the point that this story has almost dried out. Consequently, the "wetland" was reduced to a fraction of its original size.

The Ayalon cave allows a rare un-obstructed look into the typical ecosystem in the region's groundwater. Lacking sunlight and a constant supply of organic material, the ecosystem is based on chemoautotrophic primary production, by *Beggiatoa* bacteria that creates a bacterial mat on the water surface. The isotopic composition of carbon and oxygen in the fauna and the bacteria shows that the latter are the energy source for the system. The cave groundwater contains four new species of eyeless, pigment-less troglobite Crustaceans. Two troglobite terrestrial Arthropods were found in the adjacent area within the cave.

At least two other species were part of the ecosystem until the last decades, when they apparently became extinct, probably due to the massive phreatic surface drop and the resulting reduction in primary production at the water surface. Continuation of groundwater over-use and the quarrying near the cave places the survival of the ecosystem in grave danger.