



משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

מאמר בריכת רם

אורי שאנן

עבודת זו הוגשה כחיבור לקבלת תואר "מוסמך" (M.Sc.)
לסנאט האוניברסיטה העברית, ירושלים.

העבודה נעשתה בהדרכתם של:

פרופ' עודד נבון, המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

דר' ישי וינשטיין, המחלקה לגיאוגרפיה, אוניברסיטת בר-אילן.
דר' רם וינברגר, המכון הגיאולוגי, ירושלים.

לְאָחִי,
לממי, דני ונוני,
שנדע להמשיך ולהיות כמו שאנו תמיד.

...”מתוך הלוע עולה עמוד עננים שחור וכבד, מתאבך ומתמר בחפזון, מתפתל ופורץ השמימה, ושם יִהְפֹךְ והיה לענן לבן ובהיר. וחמרי עשן נדחפים אחריו עם גפרית רותחת, ומהם מתמלטים לרגעים ברקים לבנים. ופתאום ואבנים כבדות ולוהטות ומטילי מתכת נתכת וגושי סלעים גדולים מתעופפים כאבקות זיקים ומושלכים בכח איתן עד לגבה אשר אין לראות עוד. ושרביטי-אש בוקעים ופורחים מרגע לרגע, והיו כמו חכים שלוחות לצוד בהן את הכוכבים מן השמים. ופתאום והנה רגע אחד דממה איומה וכבדה מאד. אבל בעוד רגע והרעם מתגלגל בקול אחד ואדיר, אשר לפניו לא היה עוד כמוהו, ואלומת-אש, כמו שבלת גדולה, משתערת עד לשמים ומשליכה על סביבה ערמות שלהבות. והאש רוקדת ומחוללת, והמחולות מחולות נוראים, והרעמים יוצאים דחופים ודחוקים, וההר כלו היה למין בְּטָרְיָה נותנת אש, המורה יריות מכל עבר יחדו בפעם אחת”...

[מתוך 'במדבר', דויד פרישמן, 1923]

תודות:

לא הייתי מגיע להשלמת עבודה זו, אילולא קיבלתי עזרה אנושית ומקצועית מאנשים רבים. לכל אחד מהם, אני חב תודה לבבית:

לשלושת מדריכי אני מודה על ההנחיה, החשיבה והדרך המשותפת:

פרופ' עודד נבון, דר' ישי וינשטיין ודר' רמי וינברגר.

לרבים שסייעו לי בדרך-
דר' נעמי פורת מהמכון הגיאולוגי בירושלים - שפתחה לי את מעבדתה וערכה עימי את תיארוך הלומינסנציה,
סגל המחלקה והמכון הגיאולוגי, פרופ' אמוץ עגנון, פרופ' חגי רון, פרופ' אמיתי כץ, דר' אריאל היימן, מיכאל דיוויס, דר' רונית קסל, דר' ארי מטמון ופרופ' איתן שש - שפתחו בפני דלתות לרעיונות וכיוונים נוספים וחדשים בדרכי.
תמר שלו ויעקב (יקי) וייס, בהפעלת האלקטרון מיקרו פרוב.
דר' לודוויג הליץ ודר' שרה ארליך מן המכון הגיאולוגי בירושלים - על האנליזות הכימיות.
לירן ואיבצן הרון, ויוני וענבל וורטמן - שהלינו אותי בבתייהם הצפוניים בשבועות עבודת השדה.
תמי זילברמן, נועה יסלזון ונועה וויל - החברים שעזרו בעבודת השדה, במשרד ובקפה.

ואחרונים חביבים – לחברי הקהילה הדרוזית של צפון רמת הגולן - שפתחו בפני את שערי מטעיהם, מטבחם וליבם.

ותודה מיוחדת – שוב – לפרופ' עודד נבון –

על שבבקשי להתקבל ללימודי התואר הראשון במכון ללימודי כדור הארץ, בעודו ראש החוג, איפשר לי, לפנים משורת הדין, להשתלב בלימודים כתלמיד מן המניין ובכך לעשות את צעדי הראשונים בגיאולוגיה.

* * *

המחקר מומן, בחלקו, על ידי המנהל למדעי האדמה במשרד התשתיות הלאומיות (מס' 036-17-24)

לכולם תודה!



תקציר

בריכת רם הינה אגם-מאאר הממוקם בקצה הצפון מערבי של השדה הוולקני חראת א-שאם, סמוך למגע הבזלות הפלייסטוקניות של צפון רמת הגולן עם מדרונות החרמון. הבריכה הינה חלון הידרו-וולקני שנפתח בהתפרצויות פריאטומאגמטיות אל מפלס מי התהום של בקעת יעפורי. שולי הלוע סביב הבריכה מכוסים בטוף בריכת רם. הטוף מורכב משברי הסלעים שהיו מצויים בחלל הלוע (הדיאטרמה) בתוספת החומר היובנלי שגרם לפיצוצים.

התשתית הסדימנטרית באזור בריכת רם כוללת סלעים מגילי יורא, קרטיקון ואיאוקן. בריכת רם עצמה ממוקמת מעל עמק קדום (להלן: "עמק רם"), שהתמלא ברצפים וולקניים פלייסטוקניים. רוב הבזלות בעמק רם מוכרות ממחשופים, אולם נמצאו בפרגמנטים בטוף גם בזלות שאינן חשופות: בזלות 017, 015, ו-006. בזלת 017 מוכרת גם מקידוחים באזור. בזלות אלו מהוות את מילוי הראשוני של עמק רם, ועליהן קלחו בזלות עין-זיוון, כרמים תחתונה וכרמים עליונה. בדרום מערב המאאר נבנה על בזלת כרמים עליונה תל של סקוריה אודם, החדור אינטרוזיות של בזלת יעפורי. טוף בריכת רם מכסה את התל ואת קילוחי הבזלת. מערבית למאאר מכוסה הטוף בקילוח בזלת סער, המייצג את הארוע הוולקני הצעיר באזור והמצביע על חזרה לוולקניזם יבש וסיום הפעילות הפריאטומאגמטית באזור בריכת רם.

עבודה כימית ופטרולוגרפית על הליתולוגיות המצויות באזור ועל הפרגמנטים הבזלתיים בטוף, הראתה דמיון כימי בין הבזלות השונות, אשר כולן בתחום הבזניטי. הבדלים פטרולוגיים ברורים איפשרו חלוקת רוב הפרגמנטים הבזלתיים בטוף לשבעה פרטים: בזלות 017, 015, 006, עין זיוון, כרמים תחתונה, כרמים עליונה ויעפורי.

שבעה חתכים עמודיים של מחשופי טוף נמדדו מסביב לבריכה. בשלושה מהם נמצאו שכבות טוף קורלטיביות ועל פי התאמה בשדה, שאומתה בעבודה גרנולומטרית, הורכב חתך טוף של כ-46 מטר בדרום מזרח הבריכה (להלן: "החתך העיקרי").

העבודה הגרנולומטרית על החתך העיקרי הראתה שינויים מחזוריים בגודל הגרגר של המטריקס הטופי בנוכחות פרגמנטים גדולים (< 30 מילימטר). שינויים אלה מעידים על שינויים בעוצמות ההתפרצויות הפריאטומאגמטיות. בחתך העיקרי ניכרים לפחות שני מחזורים של עליה וירידה בעוצמת ההתפרצויות. נוכחות של פרגמנטים גדולים בשכבות המכילות סטרוקטורות זרימה מציעה קיום שני מנגנוני הובלה של חומר וולקניקלאסטי שפעלו במקביל, האחד - של מעוף בליסטי והשני - של נחשולים וולקניים (base surge).

בהנחה כי עומק הדיאטרמה שווה לקוטר בסיסה (כ-1 ק"מ), נמצא כי נפח חרוט הדיאטרמה הינו כ-0.26 ק"מ מעוקב. הדיאטרמה חודרת דרך חתך וולקני של מאות מטרים, עוברת את בסיס עמק רם וממשיכה אל תוך חתך הסלעים הסדימנטריים הקרטיקוניים. גרגרי קוורץ מתצורת קטיע מהקרטיקון התחתון שנמצאו בטוף מציעים, כי הדיאטרמה חדרה לפחות עד לתצורה זו בחתך הסדימנטרי.

גילים של קוורץ איאולי בפלאוסול קלקריטי (166 ± 15 Ka) ושל גרגרי קוורץ ממקור קרטיקוני בשכבת טוף עליה קלחה בזלת סער (115 ± 13 Ka) מגדירים חלון זמן של 80 אלף שנה בין 180 ל-100 אלף שנה, בו התרחשו ההתפרצויות הפריאטומאגמטיות. גילים אלה דומים לגילי Ar-Ar של התפרצות פריאטומאגמטית נוספת שארעה בקומפלקס האביטל-בנטל. ההתפרצויות התרחשו בפרק זמן קצר יחסית, של לא יותר מ-10-15 שנה.

בדרום המאאר נמצא העתק, שכיוונו מקביל לשורת תלי הסקוריה הפלייסטוקניים, שלאורכה מצויה בריכת רם. מוצע כי מישור ההעתקה, כחלק מן המערכת ההידרולוגית של בקעת יעפורי, הוא שאיפשר את המפגש בין המאגמה ומי התהום, מפגש שגרם לאירועים הפריאטומאגמתיים.

בבזלת כרמים עליונה נמצאו גבישי אמפיבול, אשר ניכר כי גדלו מהנתך (פנוקריסטים). אמפיבול אינו מוכר כפנוקריסטי בבזלות הגולן ונוכחותו בבזלת זו הינה ייחודית. הדמיון בין אינקלוזיות אוליבין באמפיבול ומיקרופנוקריסטים של אוליבין בבזלת כרמים מחזק את הסברה, כי האמפיבולים של בזלת כרמים הינם פנוקריסטים, שגדלו בשיווי משקל עם המאגמה. נוכחות פנוקריסטים ומגקריסטים של אמפיבול בבזלת כרמים ובחומר היובנילי של הטוף, ושכיחות קסנוליתים בשניהם, מעידים על מאגמה בעלת ריאולוגיה שונה מזו של שאר בזלות הגולן. מוצע כי העושר היחסי במים הוביל לזיקולציה מוגברת של המאגמה ובכך לאינטראקציה טובה של הנתך עם מי התהום, ולמעבר מהתפרצויות סטרומבוליאניות וקילוחי בזלת, לפיצוצים הפריאטומאגמתיים שיצרו את המאאר.

תוכן העניינים

1	1	רקע
1	1.1	פריאטומאגמתיזם
3	1.2	וולקניזם בישראל
3	1.2.1	רקע
4	1.2.2	מבני סקוריה וטוף ברמת הגולן
5	1.2.3	הגיאוגרפיה והגיאולוגיה של בריכת רם
6	1.3	עבודות קודמות
6	1.3.1	כללי
8	1.3.2	קסנוליתים
9	2	מטרות המחקר
10	3	שיטות
10	3.1	עבודת השדה
10	3.2	אנליזות פטרוגרפיות וכימיות
10	3.3	גרנולומטריה
11	3.4	בדיקת תכולת הקרבונט
11	3.5	אלקטרון מיקרופרוב
12	3.6	תיארוך בשיטת הלומינסנציה (OSL)
13	4	תוצאות
13	4.1	מיפוי גיאולוגי, סטרטיגרפיה ותת-הקרקע
13	4.1.1	יחידות המסלע ויחסי שדה
15	4.1.2	תת-הקרקע באזור בריכת רם
18	4.2	הפטרוולוגיה והכימיה של הבזלות באזור בריכת רם
18	4.2.1	פטרוגרפיה
20	4.2.2	כימיה של הבזלות
21	4.2.3	הרכבי מינרלים
24	4.3	טוף בריכת רם
24	4.3.1	סטרטיגרפיה וחתכים
26	4.3.2	ליתולוגיה ופטרוגרפיה
31	4.3.3	תכולת קרבונט
32	4.3.4	גרנולומטריה
37	4.4	אמפיבול בבריכת רם
39	4.5	גילי החתך הוולקני בבריכת רם
39	4.5.1	רקע
39	4.5.2	דוגמאות וגילים
41	5	דיון
42	5.1	היסטוריה גיאולוגית
43	5.2	התשתית והטופוגרפיה הפרה-וולקנית
44	5.3	הוולקניזם הבזלתי- סטרומבוליאני והפליאוגיאוגרפיה ערב יצירת המאאר
45	5.4	גיל ההתפרצות הפריאטומאגמתית
46	5.5	הוולקנולוגיה של מאאר בריכת רם
46	5.5.1	טוף בריכת רם

47	.....	5.5.2	עוצמות התפרצות
48	.....	5.5.3	מנגנוני הובלה ואופי ההתפרצויות
49	.....	5.5.4	המאאר והדיאטרמה
52	.....	5.6	הסיבות לאירועים הפריאטומאגמתיים
52	.....	5.6.1	מקור המים בפיצוץ הפריאטומאגמתי
53	.....	5.6.2	העתק
53	.....	5.6.3	אמפיבולים, קסנוליטים ומעבר מוולקניזם סטרומבוליאני לפריאטומאגמתי
55	.....	6	מסקנות
56	.....	7	רשימה ביבליוגרפית
62	.....	8	נספחים

רשימת איורים

- איור 1 : יעילות ההמרה של אנרגיה תרמית באנרגיה מכאנית 2
- איור 2 : אזור העבודה..... 4
- איור 3 : המפה הגיאולוגית והטור הסטרטיגרפי של אזור בריכת רם (מתוך גליון הר אודם) 6
- איור 4 : מפה טופוגרפית של אזור בריכת רם 8
- איור 5 : מפה גיאולוגית של בריכת רם 13
- איור 6 : דייק של בזלת יעפורי חדור בסקוריה אודם 14
- איור 7 : מפת מיקום החתכים 15
- איור 8 : תאור ליתולוגי של הקידוחים בסביבת בריכת רם 16
- איור 9 : חתך בכיוון צפון מזרח – דרום מערב, דרך בריכת רם 17
- איור 10 : דיאגרמת Total alkalis – Silica (TAS) של הבזלות 20
- איור 11 : מספר המגנזיום מול סיליקה בבזלות 20
- איור 12 : הרכבי קלינופירוקסן מבזלות 017,006 ומקסנוליתים על משולש הגדרה של פירוקסנים 21
- איור 13 : מספר המגנזיום מול נתרן בפירוקסנים מבזלות 017,006 וקסנוליתים בטוף 22
- איור 14 : אלומיניום וטיטניום בקלינופירוקסן מבזלות 017,006 ומקסנוליתים 22
- איור 15 : ערכי פורסטריט בגבישי אוליבין 23
- איור 16 : סטרוקטורות סדימנטריות המאפיינות הרבדה על ידי base surge בטוף בריכת רם 24
- איור 17 : חתכים עמודיים המציגים מחשופי טוף סביב בריכת רם 25
- איור 18 : החתך העיקרי בדרום מזרח הבריכה 26
- איור 19 : זכוכית פלאגוניטית כמטריקס בטוף (צילומי מיקרוסקופ) 28
- איור 20 : זכוכית פלאגוניטית כ'צמנט' המצפה פרגמנטים בטוף (צילומי מיקרוסקופ) 28
- איור 21 : פרגמנט בזלת כרמים בתוך טוף (צילומי מיקרוסקופ) 29
- איור 22 : קסנולית בסלע טוף (צילומי מיקרוסקופ) 29
- איור 23 : גרגרי קוורץ בסלע טוף (צילומי מיקרוסקופ) 30
- איור 24 : אבן חול קרטיקונית מתצורת קטיע (צילומי מיקרוסקופ) 30
- איור 25 : פרקציה משקלית של הקרבונט בשכבות הטוף של החתכים המרכיבים את החתך העיקרי 31
- איור 26 : חלוקה משקלית של גדלי הגרגר בטוף 32
- איור 27 : קורלציה גרנולומטרית של חתכים H3, H4, ו-H5 34
- איור 28 : הפרקציה המשקלית של קלאסטים בגודל 30-4 מ"מ בשכבות השונות בטוף 35
- איור 29 : גרנולומטריה של החתך העיקרי 36
- איור 30 : מגקריסט של אמפיבול קרסוטיטי, טוף בריכת רם 37
- איור 31 : החתך העיקרי, עליו מסומנות השכבות בן נמצאו מגקריסטים של קרסוטיט או קסנוליתים 37
- איור 32 : מספר מגנזיום מול הסיליקה באמפיבולים מבזלת כרמים, קסנוליתים ומגקריסטים 38
- איור 33 : פלאוסולים בבריכת רם 39
- איור 34 : חתך הטוף העיקרי עם גילי הלומינסנסיה 40
- איור 35 : גילי OSL מבריכת רם, ב-Ka 40
- איור 36 : תאור סכימאתי של שלבי ההתפתחות של מאאר בריכת רם 42
- איור 37 : מפה סכימאטית של אלמנטים וולקניים וטופוגרפיים באזור בריכת רם 43
- איור 38 : בזלת כרמים עליונה ממלאת חללים קרסטיים מדרום למאאר בריכת רם 44

- איור 39 : עבודות תיארוך בבריכת רם..... 46
- איור 40 : שרטוט סכימאתי של מבנה מאאר-דיאטרמה..... 47
- איור 41 : אילוסטרציה של שילוב מנגנוני הובלה של fall ו-surge בהתפרצות פריאטומאגמטית..... 49
- איור 42 : אילוסטרצית דיאטרמות בעלות שיפועים שונים..... 51

רשימת טבלאות

- טבלה 1 : סיכום המאפיינים הפטרוגרפיים הבולטים של הבזלות בסביבת בריכת רם..... 19
- טבלה 2 : תוצאות מיון פרגמנטים בטוף למקורותיהם השונים..... 27

רשימת נספחים

- נספח 1 : תאור פטרוגרפי של שמונה פרטי הבזלת, בצירוף תמונות אופייניות שצולמו במיקרוסקופ אופטי..... 62
- נספח 2 : הרכבים כימיים של דוגמאות בזלת מסביבת בריכת רם באחוזים משקליים..... 69
- נספח 3 : הרכבי פירוקסנים..... 70
- נספח 4 : הרכבי אוליבינים..... 71
- נספח 5 : הרכבי גבישי אמפיבול מבריכת רם..... 72
- נספח 6 : פרטי המדידה של גילי ה OSL..... 73

1. רקע

1.1. פריאטומאגמתיזם

המונחים הידרו-וולקניזם ופריאטומאגמתיזם מיוחסים לכלל התופעות הוולקניות הכרוכות באינטראקציה של מאגמה עם מים חיצוניים, כגון מי תהום (אקוויפר בתווך נקבובי ומים הממלאים חללי קרסט או סדקים), או מים עיליים (מי אגם או ים). אופי וקצב העברת החום וערבוב המים והמאגמה, הם שמכתיבים את סוג התופעה הפריאטומאגמטית ואת עוצמתה וקיים טווח רחב היוצר מגוון תופעות הנעות בין 'צינון' (quenching) פאסיבי לפרגמנטציה אקספלוזיבית (Sheridan and Wohletz, 1981, 1983; Wohletz, 2002; Wohletz and McQueen, 1984; Francis, 1993).

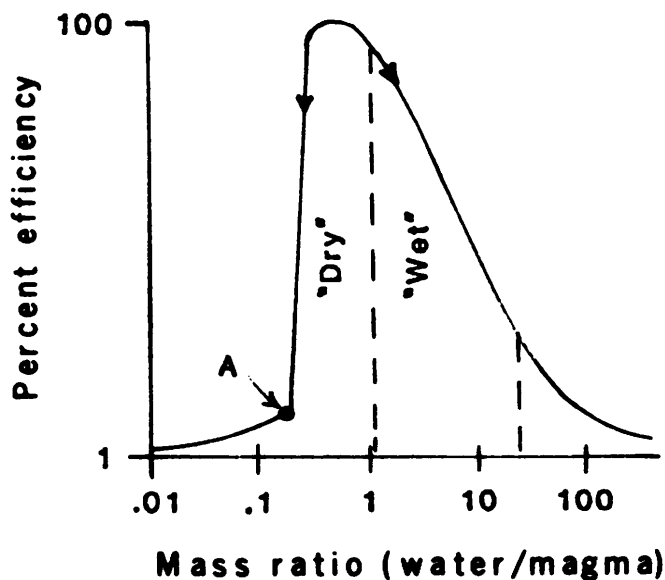
וולקניזם פריאטומאגמתי מצוי באתרים מכילי מים, בהם מפלס מי התהום סמוך אל פני השטח, או לפני השטח מכוסים במים. התפרצויות וולקניות המתרחשות באתרים 'יבשים' או מנוקזים היטב מייצרות, לרוב, חרוטי סקוריה (Solgevik et al., 2007; Martin et al., 2007). וולקניזם פריאטומאגמתי יכול אף להוות כלי פלאואקלימי ופלאוגיאוגרפי, המעיד על נוכחות מים, בעזרתו שוחזרו תנאי סביבה, למשל ב-'Snake River Plain' שבאיידהו, ארה"ב (Nemeth and White, 2005).

פיצוצים פריאטומאגמתיים מונעים על ידי ערבוב מהיר של מאגמה עם מים חיצוניים והמרת אנרגיה תרמית באנרגיה מכאנית על ידי הגדלת נפח המים. הפיצוץ נובע מאינטראקציה של המים עם המאגמה ביחס, המאפשר למאגמה לאדות את המים בפתאומיות ובכך ליצור לחץ אדים (קיטור), הקורע את פני השטח ומוביל לפיצוץ (Francis, 1993). פיצוץ פריאטומאגמתי נבדל מן הפיצוץ הפריאטי בכך, שבעת הפיצוץ קורעים האדים לא רק את סלעי הסביבה, אלא גם את המאגמה העולה ולכן באפר המאגמתי ימצאו, בנוסף לשברי סלע הסביבה, גם פרגמנטים של חומר חדש (יובנילי), שנגזר מהמאגמה שלקחה חלק ביצירת הפיצוץ.

המים החיצוניים המעורבים בתהליך הפיצוץ מכונים 'מים אינטראקטיביים' (interactive water). תנאי הכרחי להיווצרות הפיצוץ הוא שהיחס המשקלי בין המים האינטראקטיביים לבין המאגמה יהיה בטווח מסוים: עודף מים יוביל לצינון המאגמה, לגיבושה ולהפסקת התנועה בה, ואילו חוסר במים - לאנרגיית פיצוץ נמוכה ולהתפרצות וולקנית רגילה (Zimanowski et al., 1991). חשובה גם סמיכות הערבוב אל פני השטח, מכיוון שמידת גידול הנפח ועוצמת הפיצוץ מוגבלים כאשר הלחץ הליתוסטטי גבוה מ-20-30 bar (Lorenz, 1986, 2007).

ניסויים שמכמתים את אפקטיביות יחסי המסות בערבוב של מים ומאגמה (איור 1) הראו כי פרגמנטציה מוגברת של המאגמה משפרת את העברת החום ומביאה לספיגה מרבית של האנרגיה של המאגמה במים עוד בטרם הגעתם לרתיחה ספונטאנית (או למצב סופר-קריטי בלחץ מקיף גבוה) (Sheridan and Wohletz, 1981, 1983). ביחסי מיסומאגמה נמוכים (מתחת לנקודה A באיור 1) תהיה למים השפעה משנית על אופי ההתפרצות. יחסים גבוהים מאלה שבנקודה A, מושפעים מפרגמנטציה של המאגמה ומובילים להמרה מוגברת של האנרגיה התרמית של המאגמה לאנרגיה מכאנית וליצירת פיצוצים אלימים במיוחד. יחסי מיסומאגמה העולים על 1:1 יביאו לירידה באנרגיה המכאנית ועימה לירידה בעוצמת ההתפרצות. לפי Sheridan and Wohletz (1983) היחסים האופטימליים של מיסומאגמה ליצירת פיצוץ הם בין 1:1 ל-3:1. לפי Wohletz and McQueen (1984) התפתחות מאר נובעת מיחסי ערבוב מיסומאגמה של 1:3 (יחסים משקליים), בעוד שהתפרצות היוצרת 'טבעת-טוף' נובעת מערבוב מים ומאגמה ביחסים של 1:1 (ע"פ

Lorenz, 1986). Kokelaar (1986) טוען, כי הן מנסויים והן מתאוריה, עולה שיחס הערבוב האופטימלי ליצירת פיצוץ הוא קרוב ל-0.35. Zimanowski et al. (1991) מיחסים גם הם כמות מים קטנה יותר מיחס מים/מאגמה של 0.3 ליצירת פיצוץ בעוצמה מקסימאלית וחשיבות רבה לטמפרטורת הנתך ועוצמת ערבובו עם המים. Morrissey et al. (2000) ערכו ניסויים בנסיון לכמת את היחס הנפחי של מים/מאגמה, בו המרת האנרגיה התרמית למכנית מיטבית, וקבעו אותו ב-11% מים, עבור מאגמה אולטרבסיסית עם וזיקולריות נמוכה. המרת הערך המוצע ליחסי מסה נותנת ערכים גבוהים מהמקובל.



איור 1: יעילות ההמרה של אנרגיה תרמית באנרגיה מכאנית כפונקציה של יחסי מסות של מים ומאגמה. האנרגיה התרמית עבור יחידת מסה של הנתך בניסוי הכיול היא בקירוב פי שלוש משל בזלת, משמע את היחס המתקבל מן הניסוי (מהגרף) יש לכפול בפקטור של 3-4 בכדי למדל מערכת וולקנית. עם עליית יחס המים למאגמה, התנהגות אקספלוזיבית מתחילה להופיע בנקודה A. מתוך (Sheridan and Wohletz, 1981).

התפרצויות פריאטומאגמתיות אלימות מתאפיינות בפעילות הנמשכת זמן קצר ובאנרגיה התפרצות גבוהה. כמו כן הן מתאפיינות בפולסים, המיוחסים לאי סדירות בעלית המאגמה אל אזור המגע עם המים. אי סדירות זו מקובלת כמקור לשיכוב הדק והבולט, המאפיין את הסדימנטים הפירוקלאסטיים של התפרצויות אלו (Schmincke, 2004). פעילות פריאטומאגמתית מלווה בתופעות נוספות, כגון רעשי אדמה וענני התפרצות (eruption clouds) של גזים וולקניים הנושאים חומר וולקניקלאסטי. ענני התפרצויות של מאארים יכולים להגיע לרום של 20 ק"מ (Lorenz, 2007; Moore et al., 1966). החומר של ענני ההתפרצות יוצר שכבות של טוף (או tephra fall), הפרושות בעובי אחיד על גבי הטופוגרפיה הקיימת. החומר הוולקניקלאסטי יכול להיות דק (טוף), גס מעט מחול (לפילי), או בגדלים של מספר סנטימטרים עד מטרים (בלוקים ושברי סלע). נחשולים וולקניים (base surges) מאופיינים בתנועה מהירה מקבילת קרקע של חומר וולקניקלאסטי עתיר גז. תופעות נוספות המתרחשות בהתפרצויות פריאטומאגמתיות כוללות זרמי בוץ פירוקלאסטי (lahars), שהן גלישות או זרימה של חומר פירוקלאסטי בתווך רטוב, ונביעת גזים וולקניים (Sheridan and Wohletz, 1981; Lorenz, 2007).

הסדימנט הפריאטומאגמתי מתאפיין במיון גרוע וסטרוקטורות סדימנטריות, כגון אנטי-דיונות ושיכוב צולב, המעידים על הרבדה על ידי זרמים פירוקלאסטיים ונחשולים וולקניים (Lorenz, 1970; Fisher and Waters, 1970), כמו גם בשכבות המכסות את הטופוגרפיה בעובי אחיד שמקורן ב-fall. סטרוקטורה אופיינית נוספת היא בלוקים של סלעי סביבה, הפוגעים ומעוותים דוקטילית את החומר תחתם ליצירת impact sags. הסדימנטים הפריאטומאגמתיים מראים, בנוסף לסטרוקטורות האופייניות, מאפיינים של

הרבדה בטמפרטורות נמוכות (פרגמנטים זכוכיתיים המעידים על קירור מהיר). הסיבה לכך היא, שבאירועים פריאטיים ופריאטומאגמטיים, חלק גדול מהאנרגיה התרמית מושקע בחימום המים, באיודם ובריסקוק הסלע. הסדימנט הפריאטומאגמטי מתאפיין הן בחומר יובנלי, המורכב בדרך כלל מחלקיקי זכוכית מזוותים וחסרי וזיקולות (עדות לשוק תרמי, ו-'quenching' של המאגמה) והן בעושר בשברים של סלעי הסביבה (Schmincke, 2004; Sheridan and Wohletz, 1983). שברים אלו, מהווים מרכיב עיקרי בפליטה הפריאטומאגמטית, ומקורם בסלע שהיה קר בעת הפיצוץ. דרגת הריסקוק הגבוהה מביאה גם היא לקירור מהיר במגע המאגמה והגזים החמים עם האוויר במהלך תעופת החומר.

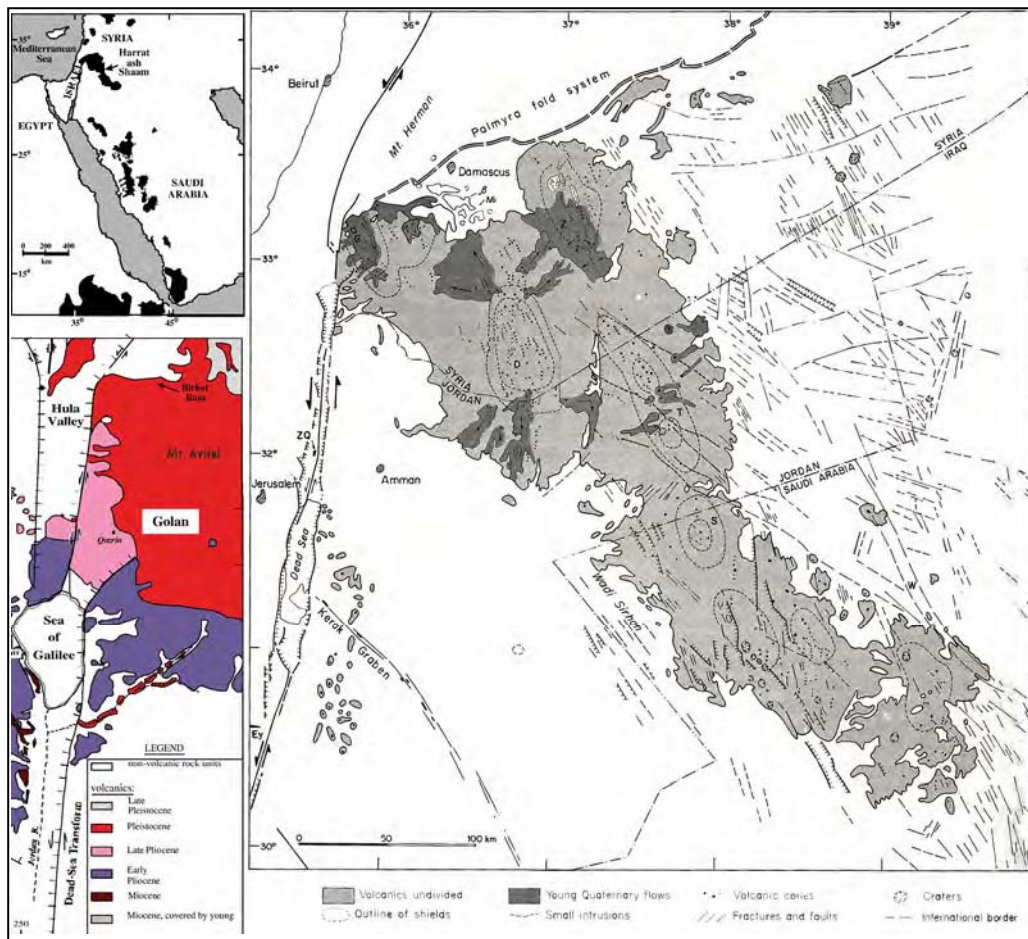
המבנים השכיחים הקשורים להתפרצויות פריאטיות ופריאטומאגמטיות הם מאארים ו'טבעות-טוף'. מאאר (maar) הוא מכתש התפוצצות, החודר את פני השטח אל סלעי הסביבה שקדמו להתפרצות הוולקנית שיצרה אותו. במדרונות הפנימיים והחיצוניים של דפנות המאאר משוכבים סדימנטים וולקנו-קלאסטיים, שהם תוצרי פליטת ההתפרצות שיצרה את המכתש. טבעות-טוף (tuff rings) נוצרות גם הן, בדומה למאארים, בהתפרצות פריאטומאגמטית, אולם השקע במרכזם גבוה מפני הסביבה (Lorenz, 1986, 2007). היווצרות מאאר הינה תהליך מונוגנטי האורך מספר ימים ועד כ-15 שנים (Lorenz, 2007). השורש החרוטי של מכתש ההתפרצות שמתחת למאאר הוא הדיאטרמה (diatreme). בתוך הדיאטרמה מצויים פרגמנטים שנקרעו בעת הפיצוץ (הן מסלעי הסביבה והן מהמאגמה) וסלעי סביבה שהתמוטטו אל הבור. מידות הדיאטרמה פרופורציונאליות למידות המאאר ושניהם גדלים יחד עם התפתחות המבנה הפריאטומאגמטי. עומקה של דיאטרמה עשוי להגיע לכ-2.5 ק"מ. (Lorenz, 1986; Martin et al., 2007).

1.2. וולקניזם בישראל

1.2.1. רקע

באזור ישראל מוכרות תקופות גיאולוגיות המתאפיינות בוולקניזם ממספר טיפוסים. סלעי הפרוטרוזואיקון בדרום חושפים עדויות לוולקניזם אורוגני ופוסט-אורוגני מן הניאופרוטרוזואיקון. בפליאוזואואיקון ובמזוזואואיקון יש תקופות שקטות (מבחינה וולקנית), בין תקופות המאופיינות בוולקניזם פנים לוחי (Segev, 2005). הוולקניזם הקנוזואי בחצי האי ערב גם הוא פנים לוחי. הוא מורכב מכ-20 שדות וולקניים, המכסים שטח של כמאתיים אלף קמ"ר, והוא מקושר טקטוניית לביקוע של מפרץ עדן וים סוף (Camp and Roobol, 1989; Shaw et al., 2003).

הוולקניזם הקנוזואי בתחומי ישראל מרוכז ברובו ברמת הגולן ובמזרח הגליל, אשר בקצהו הצפון מערבי של השדה הוולקני חארת א-שאם (איור 2). 'חארה' היא המלה הערבית לשדה וולקני ויא-שאם משמעו 'שאמי' כלומר דמשקאי או של דמשק (דאוטי, 1921). שדה זה הוא השדה הגדול בפרובינציית ערב והוא משתרע מערב הסעודית בדרום, דרך ירדן ועד סוריה וישראל ומכסה שטח של כ-43,000 קמ"ר. כיוונו הכללי של השדה מקביל לבקע ים סוף (N25W). גילי הבזלות בחארת א-שאם נעים בין האוליגוקן להולוקן (Weinberger et al., 2001; Hani et al., 2001). בצפון חארת א-שאם מכסים הסלעים הוולקניים הנאוגניים באי-התאמה על סינקלינה של סלעי תשתית סדימנטריים קרטיקוניים ופלאוגניים (Tarawneh et al., 2000; Michelson 1979). הסינקלינה נמשכת אל תוך רמת הגולן, ובתוכה מכסים קילוחי בזלת על השכבות הנטויות באי-התאמה ארוזיבית וזוויתית.



איור 2: אזור העבודה. ימין - מפת אלמנטים וולקניים וסטרוקטורליים בהשדה הוולקני, חארת א-שאם (מתוך: Garfunkel, 1989). שמאל - השדות הוולקניים הקנוזואיים בערב ובצפון-מזרח אפריקה ומפה גיאולוגית של הסלעים הוולקניים בגולן (מתוך: Weinstein, 2007)

בזלת הכיסוי (פליוקן) משתרעת על פני דרום מערב סוריה, רמת אירביד, דרום הגולן, רמת כורזים ומזרח הגליל התחתון. בפליוקן העליון קלחו בזלות משכי וחצבני בדרום לבנון. בגליל וברמת כורזים קלחו בזלות דלתון ורומן (היימן 1990). בפלייסטוקן נדד הוולקניזם באזור מן הגליל ודרום רמת הגולן אל צפון רמת הגולן ומזרחה, והוא מופיע בשתי יחידות: התחתונה היא בזלת אורטל מן הפלייסטוקן התחתון, והעליונה היא בזלת גולן מהפלייסטוקן העליון (Mor, 1993). ככלל, גילי הסלעים הוולקניים בגולן הם צעירים יותר עם התנועה לכוון צפון-מזרח, כאשר הסלעים בדרום הרמה הם מהפליוקן המוקדם, ואלו של צפון ומזרח הגולן הם פלייסטוקניים (איורים 2, 3). כמו כן, הסלעים הוולקניים מדרום הגולן הם מטיפוס אלקלי-בזלת, בעוד שהסלעים הפלייסטוקניים מצפון ומזרח הרמה הם בעיקר בזניטים (עשירים ביסודות אלקליים, ביסודות קורט אינקומפטבילים, ודלים יחסית בסיליקה) (Weinstein et al., 2006).

1.2.2. מבני סקוריה וטוף ברמת הגולן

רוב הוולקניזם הקנוזואי בארץ הוא של לבות בזלתיות. מצויים, אך שכיחים פחות, מופעים של סקוריה וטוף. בניגוד לקילוחי הבזלת המכסים שטחים נרחבים, מבני הסקוריה והטוף מוגבלים בתפוצתם למרכזי ההתפרצות, ולהם עמידות נמוכה יחסית בפני בליה. הבדלים אלו אחראים, חלקית לפחות, לשכיחותם הנמוכה בהשוואה לבזלות. חרוטי הסקוריה במזרח רמת הגולן, סדורים בשתי שורות תת-מקבילות לבקע ים המלח (בערך צפון-דרום). ליניאמנטים בעלי כיוון דומה נפוצים בשדה א-שאם ומצויים גם בשדות האחרים בערב (מור, 1986; Camp and Roobol, 1989; 1989) (איור 2). בריכת רם מהווה את קצהו הצפוני של

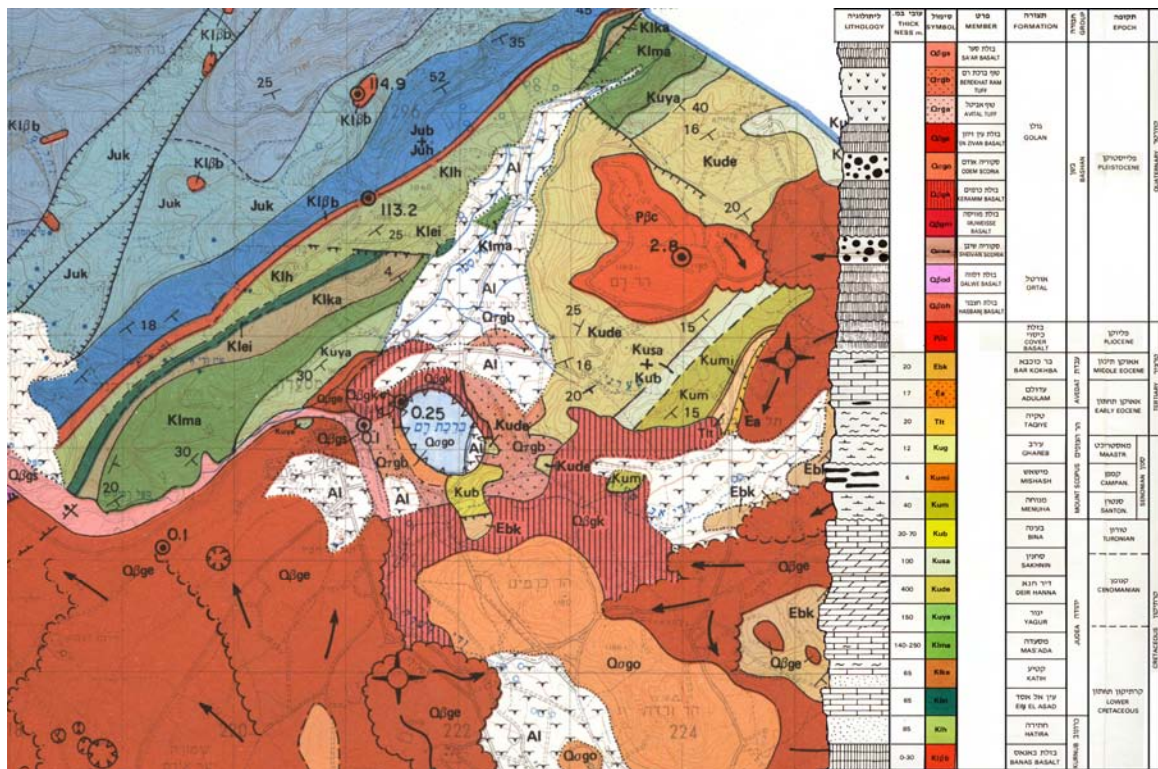
הליניאמנט המזרחי, שמשתרע מהר פרס בדרום ונמשך דרך חרוטי הסקוריה של הר חרמונית, ורדה וכרמים (איור 3), עד לבריכת רם.

טוף מצוי רק בשני מבנים, ברמת הגולן, החולקים מספר מאפיינים משותפים: קומפלקס האביטל-בנטל ובריכת רם (איור 2). בשני המבנים מורבד טוף על סקוריה ובזלות פלייסטוקניות, עובדה המתארת מעבר מהתפרצויות סטרומבוליאניות לפיצוצים הידרו-וולקניים.

במרכז קומפלקס האביטל-בנטל מצוי שקע, המוגבל מצפון בחרוט הסקוריה של הר בנטל ומדרום בזה של הר אביטל. ממזרח ומערב לשקע המרכזי מצויים מחשופים של טוף אביטל. הקומפלקס חווה שינוי באופי הפעילות הוולקנית. Weinstein and Weinberger (2007) ו Weinstein (2007) הציעו כי המעבר מפעילות של קילוחי בזלת והתפרצויות סטרומבוליאניות של בנית חרוטי סקוריה, להתפרצויות הפריאטומאגמתיות שהביאו להרבדת טוף נגרם כתוצאה משינויים באגן הניקוז של בקעת קוניטרה ויצירת אגם בבקעה, או שינוי ועלית מפלס המים של אגם שהיה קיים באתר. יתכן גם שפעילות וולקנית 'טרם-פריאטית' הורידה את הלחץ ואיפשרה חדירת מים אל צינור המאגמה ומגע של המים עם המאגמה.

1.2.3. הגיאוגרפיה והגיאולוגיה של בריכת רם

מאאר בריכת רם הינו שקע טופוגרפי אליפטי (1200×1000 מטר) (איורים 3, 4, 5). הבריכה שעומקה מספר מטרים נמצאת ברום של 940 מטר מעל פני הים, כ-20 מטר מתחת לבקעת יעפורי ומסעדה. שולי המאאר מתנשאים כ-30 עד 100 מטר מעל מפלס הבריכה. בקרקעית הבריכה נמצא סדימנט אגמי בעובי של כ-80 מטר, המכסה על חתך וולקני. מצפון מערב למבנה המאאר עובר נחל סער, בין המאאר ומדרונות החרמון הבונים את גדתו הצפונית לבין הסלעים הוולקניים של הגולן המצויים בגדתו הדרומית. מדרונות החרמון באזור מורכבים מסלעים מן הקנומן ועד והיורא, הנטויים לכוון דרום מזרח. מצפון מזרח לבריכת רם מצוי הר רם, המורכב מתצורת דיר חנא הקנומנית ומעליה בזלת פליוקנית. מצפון מערב להר רם, בינו לבין מדרונות החרמון, באגן סער, מצויה בקעת יעפורי, שקרקעיתה מורכבת טוף ואלוביום. מדרום למאאר מצוי חרוט הסקוריה של הר כרמים. בין הר כרמים ומדרונות המאאר חשופים קילוחי בזלת כרמים הפלייסטוקנית. בדרום מערב המאאר, על הקילוח העליון של בזלת כרמים (להלן: "כרמים עליונה") מצוי חרוט של סקוריה אודם, בו משולבים מחדרים של בזלת יעפורי (איור 6). חרוט הסקוריה קטום על ידי המאאר. ממערב למאאר, ומעבר לחרוט הסקוריה, מצויה רמה בזלתית המורכבת מקילוחי בזלת עין זיון ומבזלת סער, המאוחרת למאאר, אשר זרמה לאורך גבולו המערבי של המאאר לכוון צפון ונשפכה לנחל סער. מדרונותיו הפנימיים של המאאר מורכבים מסלעי הסביבה, אותם הוא חודר ומטוף המכסה אותם. בדרום מערב גודע המאאר את חרוט הסקוריה (איור 5). לאורך חציו הצפוני של המאאר נחשפים קילוחי בזלת כרמים ובדרום מזרח הבריכה חשופים סלעים סדימנטריים מתצורות בעינה הטורונית ודיר חנא הקנומנית (מור, 1986; היימן 1982; היימן, 1993).



איור 3: המפה הגיאולוגית והטור הסטרטיגרפי של אזור בריכת רם (מתוך גליון הר אודם. Mor, 1987)

1.3. עבודות קודמות

1.3.1. כללי

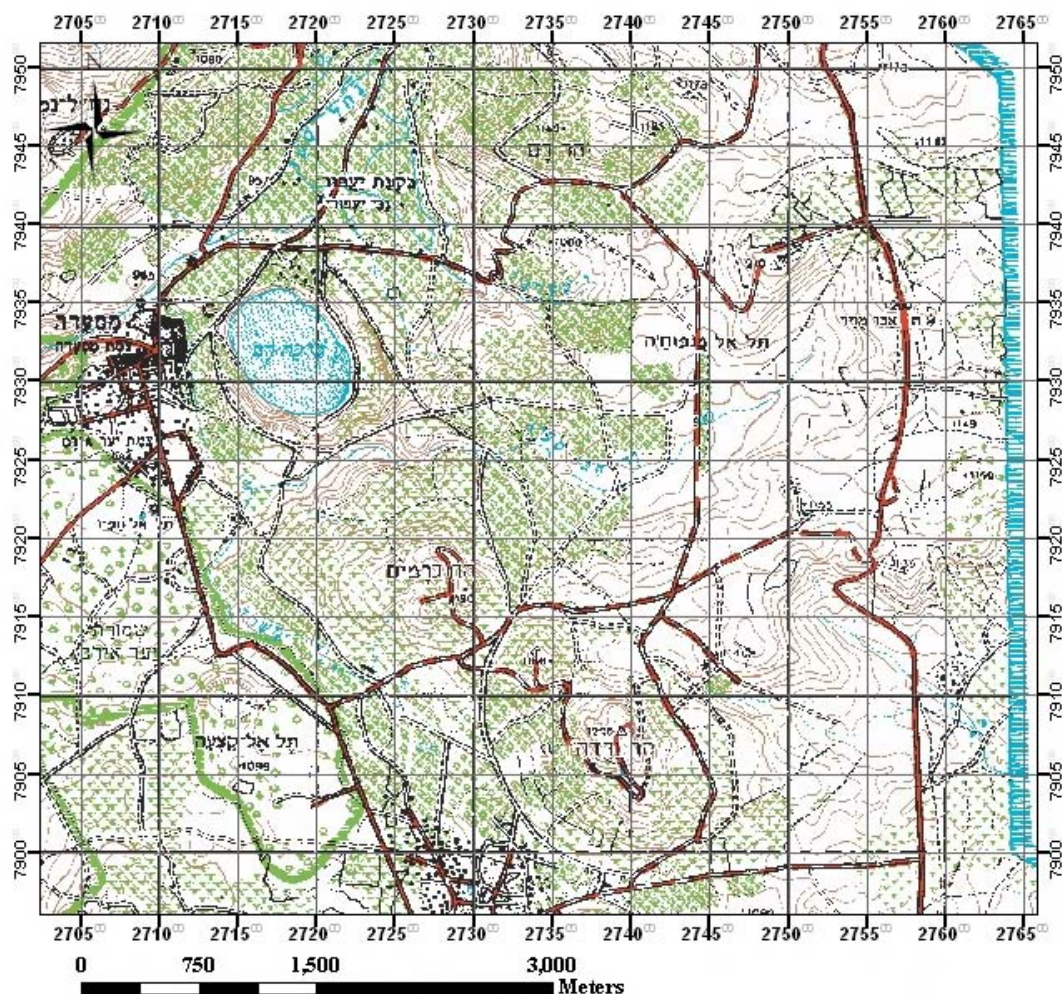
בריכת רם הינה מופע חריג בנוף הגולן וככזו, משכה במהלך ההיסטוריה תשומת לב רבה. באתר נערכו מחקרים שונים, עיקרם הידרולוגיים, אך נערכו גם עבודות ארכיאולוגיות, פלאו-אקלימיות, מיפויים גיאולוגיים, עבודות וולקנולוגיות וגיאוכימיות.

דיווח ראשון על מחקר בבריכת רם מופיע בכתבי יוספוס פלביוס, הוא יוסף בן מתתיהו, בו מתואר ניסוי הידרולוגי שערך פיליפוס (בנו של המלך הורדוס וטרארדך הבשן) "...ואיש לא ידע לפנים, כי מן הבריכה הזו יוצא הירדן, עד אשר בא פיליפוס נסיך ארץ טרוכונ וגלה את הדבר במופת. הוא זרה מוץ על-פני הקערה [הכוונה לבריכת רם], ואחרי-כן מצא, כי נסחף המוץ אל פניאס, אשר שם בקשו הראשונים את מקורות הירדן, ובמקום ההוא צף על פני המים." (יתולדות מלחמת היהודים עם הרומאים', ספר ג' פרק י' פסקה ז'). קדרון (1971, לפי היימן, 1982) סיכם דוחות של קידוחי תה"ל מן האזור ומצא תחת קרקעית הבריכה עשרות מטרים של סלעים וולקניים. עבודות נוספות שנעשו בניסיון להבין את משטר מי התהום באזור ולאפינו, נערכו על ידי: כרמי ומירו (1969), מירו וכהנוביץ (1969), מיכלסון (1975), קדרון (1971, 1974, 1977, 1978) ו- Dafny et al. (2003). Weinstein (1976) בחנה פולן מקידוח P/8 והציעה שתחילת הסדימנטציה הייתה ב- Würmian (18–60 Ka). Ehrlich and singer (1976) חקרו את תולדות האגם ותארכו את תחילת השקעת הסדימנט ל-108 Ka (ראה פרק גילי בריכת רם). Frank et al. (2002) חקרו את הפלאו-מגנטיות בסדימנט בבריכה, וכן Schwab et al. (2004). בחנו פולן של אלונים וזיתים בסדימנטים לצורך שחזור פלאו-אקולוגי. Goren-Inbar (1985) חשפה, בעבודה ארכיאולוגית כלים פליאוליתיים, מהפליאוסול שבין שני קילוחי בזלת כרמים, ובמהלך העבודה על האתר, Feraud et al. (1983) תארכו את שני הקילוחים

(ראה פרק גילי בריכת רם). בהמשך לעבודה הארכיאולוגית ערכו Goren-Inbar et al. (1986) אנליזות כימיות של התצורות הוולקניות באזור, אפיינו את חלקן ואיששו את החלוקה הסטרטיגרפית ביניהן.

אזור הבריכה נכלל במפה הגיאולוגית של Dubertret (1954). היימן (1982) הכין מפה בקנה מידה 1:10,000 של האזור סביב הבריכה. מור (Mor, 1987) מיפה את התצורות הגיאולוגיות באזור במסגרת עריכת גיליון הר אודם של המפה הגיאולוגית של ישראל (1:50,000).

להיווצרות בריכת רם הוצעו מספר מנגנונים. Schumacher (1888, לפי היימן, 1982) בהמשך לפיליפוס, הציע כי הבריכה היא תוצר וולקני. פלכסר (1969) הציע כי מדובר במכתש ממוצא קרסטי, ומזור (1969), טען כי מקורה של מורפולוגית האתר הוא בהתפוצצות וולקנית גדולה. מור (1986) הציע כי בריכת רם היא חרוט געש שהתמוטט אל בטן האדמה והינו קלדרה קטנה. הוא מחלק את התפתחות המבנה לחמישה שלבים וולקניים עיקריים. שלב ראשון הוא של קילוחי בזלת כרמים אל דרום עמק יעפורי. אחריו בנית חרוט סקורית אודם הבונה את 'הר רם' (חרוט שהתנשא במקום בו מצויה כיום הבריכה). שלב שלישי הוא שלב התפרצויות טוף בריכת רם, מתוך 'חרוט געשי', והרבדתו על מורדות החרוט. מאוחר להרבדת הטוף קולחת בזלת סער, מהר הגעש, מקיפה אותו ממערב, ויורדת בערוץ נחל סער הקדום. עם התרוקנות תא המאגמה תחת ההר, יורד הלחץ בו והוא קורס ולתוכו מתמוטט מרכז הר הגעש. היימן (1982) תמך בהצעתו של מור אך הציע שינוי במקורן של הבזלות. לטענתו בזלת כרמים הגיעה מהר כרמים ולא מתל מנפוחה, ובזלת סער הגיעה מתל קצעה או מהר אודם (איורים 3, 4), כמו כן הוסיף היימן (1982) למיפוי את בזלת יעפורי. בלדריג' (1984, דברים בעל-פה על פי מור, 1986) ווינשטיין וחובריו (2004) הציעו כי הבריכה הינה מאאר, שנוצר בתהליך פריאטומאגמתי.



איור 4: מפה טופוגרפית של אזור בריכת רם (המרכז למיפוי ישראל).

1.3.2. קסנוליתים

הטוף של בריכת רם עשיר במגקריסטים של אמפיבול קרסוטיטי ובקסנוליתים של קרום תחתון וגבול קרום-מעטפת. מאסף הקסנוליתים של בריכת רם מורכב מגרנוליטים מאפיים ומפירוקסניטים ואמפיבול-פירוקסניטים (Mittlefehldt, 1984). נוכחות קסנוליטים בשכיחות כה גבוהה חריגה בוולקניזם של רמת הגולן. כמו כן, גם מאסף הקסנוליתים של בריכת רם שונה מהמאסף הפרידוטיטי, שבדרך כלל נמצא בבסניטים הפלייסטוקניים של הגולן. Mittlefehldt (1984, 1982) הראה כי ניתן להבין את הפטרורגפיה והרכב יסודות הקורט של הקסנוליתים של בריכת רם, כתוצאה של ערבוב מאגמות בזלתיות של הגולן וכי הקסנוליטים מכילי האמפיבול מבריכת רם הם קומולטים של נתך בהרכב בזלתי. הוא גם קבע כי מקור הקסנוליתים הגרנוליטים הוא בקרום התחתון (לחצים של 550-800 MPa). Weinstein et al. (2006) מציעים, שחלק מהפירוקסניטים של בריכת רם עשויים להיות נתך אלקלי-בזלתי קפוא. עבודות נוספות על הגיאוכימיה של קסנוליתים מבריכת רם נערכו על ידי Stein et al. (1993) ו-Downes et al. (2004).

2. מטרות המחקר

העבודה נועדה לאיתור השלבים בהתפתחות הוולקנית של אתר בריכת רם, ולאיפיון ההתפרצויות שיצרו את המבנה הנוכחי, תוך התייחסות אל הזמן וסיבת המעבר מוולקניזם יבש (קילוחי בזלת והתפרצויות סטרומבוליאניות) להתפרצויות הפריאטומאגמתיות שיצרו את המאאר. העבודה כוללת לימוד הסטרטיגרפיה האזורית והתמקדות במשקעי הטוף שנוצרו בהתפרצויות הפריאטומאגמתיות, בפיזורם, בגילם, בליתולוגיה ובגודלי הפרגמנטים המצויים בהם. במסגרת העבודה מוצע גם הסבר לעושר בחלקי סלע עמוקים (בקסנוליתים ומגקריסטים) בטוף, ומוצבים הקשרים לתהליכים ההידרוולקניים.

3. שיטות

3.1. עבודת השדה

מיפוי יחידות הסלע השונות, התבצע בשדה על גבי אורתו-פוטו בקנה מידה של 1:5,000 (איור 5). הסלעים זוהו בשדה ודוגמאות שנאספו נאטמו באתרן, בניילון קשיח או נצמד, או שנאספו אל מבחנות אטומות. החתכים הסטרטיגרפיים ונטיית שכבות נמדדו באמצעות ברנטון, סרט מדידה ו-GPS. אתרי החתכים ונקודות הדיגום סומנו על גבי האורתו-פוטו. נקודות בן ההתמצאות קשה סומנו גם בשדה, ביתדות עם לוחות נחושת, הנושאים עליהם אות לטינית ומספר. בעיבוד הנתונים המרחביים ועריכת המפה הגיאולוגית נעשה שימוש בתוכנת G.I.S. Arcview, מגרסא: 6.5.20.0 (איורים 4, 5, 7).

3.2. אנליזות פטרוגרפיות וכימיות

148 שקפים של דוגמאות משכבות טוף ושל שברי סלע שנמצאו בהן, שימשו לאיפיון מרכיבי הטוף והכרתם. כמו כן הוכנו שקפים מסלעי המחשופים סביב בריכת רם ומלוגים של קידוחים מהאזור, לצורך הכרת החתך הליתולוגי המקומי ולזיהוי מקורם של פרגמנטים שנמצאו בטוף. השקפים הוכנו במכון הגיאולוגי בירושלים, במחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה באוניברסיטת בן-גוריון בנגב וב-Spectrum Petrographics, Inc שבוונקובר, קנדה, ונלמדו באמצעות מיקרוסקופים-אופטיים-מקטבים תוצרת Nikon, מדגמי Eclipse E400 POL ו-Labophot-pol. בחלק משקפי הטוף נקבע אחוז המרכיבים השונים תוך שימוש ב-Pick-pointer, במת מיקרוסקופ המסיטה את השקף במרווחים קבועים ומאפשרת מנייה של מרכיבי השקף.

בדיקה כימית של יסודות עיקריים בשבע דוגמאות בזלת שונות, וכן של ^{238}U , ^{232}Th ו- ^{40}K עבור דוגמאות הלומיניסציה, נערכה במכון הגיאולוגי. כ-100 גרם של דוגמת סלע נטחנו במטחנת כדורים. עבור היסודות העיקריים, רבע גרם דוגמה, עורבב עם 1.25 g של LiBO_2 והותך בכורית פלטינה בטמפרטורה של כ- 800°C . לאחר רבע שעה, קוררה הדוגמה במהירות לזכוכית שהומסה ב-8 מיליליטר חומצה חנקתית (60%). לאחר מהילה ב-150 מיליליטר מים מזוקקים, נבדקו היסודות העיקריים ב-Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (AES-ICP). אובדן המשקל בחימום (Loss On Ignition L.O.I.) נקבע על ידי חימום הדוגמה לטמפרטורה של 1050°C בכורית צירקון. ^{238}U ו- ^{232}Th , נבדקו ב-ICP-MS, בתהליך בו דוגמה במשקל חצי גרם, עורבה בכורית צירקון עם 2 g Na_2O_2 , וחוממה למשך ארבעים דקות ב- 500°C . אחר צינון הומסה הדוגמה במים מזוקקים ולתמיסה הוספו 20 מיליליטר HNO_3 . מהתמיסות המוכנות נעשה שימוש ב-100 מיליליטר.

3.3. גרנולומטריה

הפרגמנטים הגדולים מ-30 מ"מ נמנו ונמדדו בשדה בעזרת סרט מדידה. הפרגמנטים הדקים מ-30 מ"מ מוינו במעבדת הסטודנטים שבמכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית. דוגמאות טוף בלתי מלוכד של כ-100-300 גרם יובשו בתנור ב- 107°C במשך עשרים וארבע שעות או יותר והופרדו לפרגמנטים בעזרת עלי ומכתש (שיטה שאיפשרה הפרדה תוך הימנעות משבירה וריסוק הפרגמנטים). הדוגמה המפוררת נפתה בנפות של 4000, 2000, 1000, 500 ו-125 מיקרומטר. הפרקציות השונות של גדלי הגרגר נשקלו במאזניים דיגיטאליים מסוג Precision Balances, BBA-600 עם שגיאה של 0.01 g. הפרקציות השונות היו

במשקל גדול מגרם, כך שהשגיאה היחסית נמוכה מ-1%. שיטה זו ישימה לסלעים פריכים בלבד, ועל כן לא יושמה על שכבות טוף מלוכד היטב.

3.4. בדיקת תכולת הקרבונט

תכולת הקרבונט נקבעה ב-66 שכבות טוף, על פי חלקו המשקלי של החומר המומס בחומצה הידרו-כלורית. החומר המומס הופרד במסנן נייר, או במסנן קרמי. תהליך הבדיקה במסנן הנייר (Whatman & Balston, GF/A 5.5cm) כלל שקילת המשפך ונייר הסינון, מילוי המשפך בכ-50 גרם טוף וייבוש הדוגמה במשך 24 שעות ב-80°C. לאחר שקילת המשפך המלא, הומסה הדוגמה פעמיים ב-200 מיליליטר של חומצה מלחית (HCl 9.25%, מיהול של 4:1), נשטפה ב-200 מיליליטר נוספים של מים מזוקקים, ויובשה במשך 24 שעות ב-80°C. שקילת כלי הסינון עם הדוגמה היבשה לאחר ההמסה איפשרה חישוב הכמות שהומסה.

בתהליך הבדיקה במסנן הקראמי (תוצרת Duran, West Germany) נשקל המסנן כשהוא נקי וריק ושוב לאחר הטענתו בכ-24 גרם טוף וייבוש במשך 24 שעות ב-80°C. לאחר השקילה הוצף המשפך ב-50 מיליליטר חומצה. לאחר כחצי שעה סוננה הדוגמה בעזרת משאבת וואקום, נשטפה בכ-50 מיליליטר מים מזוקקים, יובשה במשך 24 שעות ב-80°C ונשקלה. הדוגמאות נשקלו במשקל PLS 360-3 של חברת KERN בדיוק של 0.001 גרם.

שגיאת המדידה נקבעה בשני אופנים:

1. מדידות בארבע דוגמאות מאותה שכבה עבור ארבע שכבות טוף שונות הראו התאמה טובה, עם סטית תקן ממוצעת של 0.22 גרם עבור ארבע השכבות. הסטייה הגבוהה ביותר לא עלתה על 0.33 גרם [שהם 4.7% יחסי]. בנוסף, שישה צמדים של דוגמאות משש שכבות טוף שונות, כל צמד מאותה שכבה, הראו גם הם התאמה טובה בתוצאות ביניהם, עם הפרש ממוצע של 0.48 גרם, להוציא צמד אחד, שהטווח בו הוא של 3.6 גרם וזאת משום היותו משכבה H3-10, המכילה אנומליה בריכוז הקרבונט (ראה פרק תוצאות).

2. המסה חוזרת של 11 דוגמאות, במחזור נוסף של חומצה ושטיפה, הראתה המשך המסה של חומר אך בכמות קטנה בערך בסדר-גודל מזו שהומסה בהמסה הראשונה. פרקצית החומר שהומס במחזור המסה שני מתוך כלל החומר שהומס אינה עולה על 0.21 גרם, וערכה הממוצע הוא 0.09 גרם.

3.5. אלקטרון מיקרופרוב

אנליזה כימית של מינרלים בשקפים ובלטשים של בזלות ושברי סלע מהטופים, נערכה באמצעות אלקטרון מיקרופרוב מסוג Jeol JXA 8600 במכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית. השקפים והלטשים (דוגמאות סלע שהוקשו ביציקת אפוקסי) לוטשו באבקות יהלום, וצופו פחמן. הדוגמאות הוקרנו בקרן אלקטרוני שהוצאו במתח של 15 keV (Accelerating Voltage) בזרם של 10~ nA. קרני ה-X נמדדו במשך 60 שניות באמצעות Energy Dispersive Spectrometry (E.D.S.). יחסי היסודות בדוגמה חושבו בתוכנת ZAF/Proza לאחר כיוול באמצעות סטנדרטים טבעיים של S.P.I.

3.6. תיארוך בשיטת הלומינסנציה (OSL)

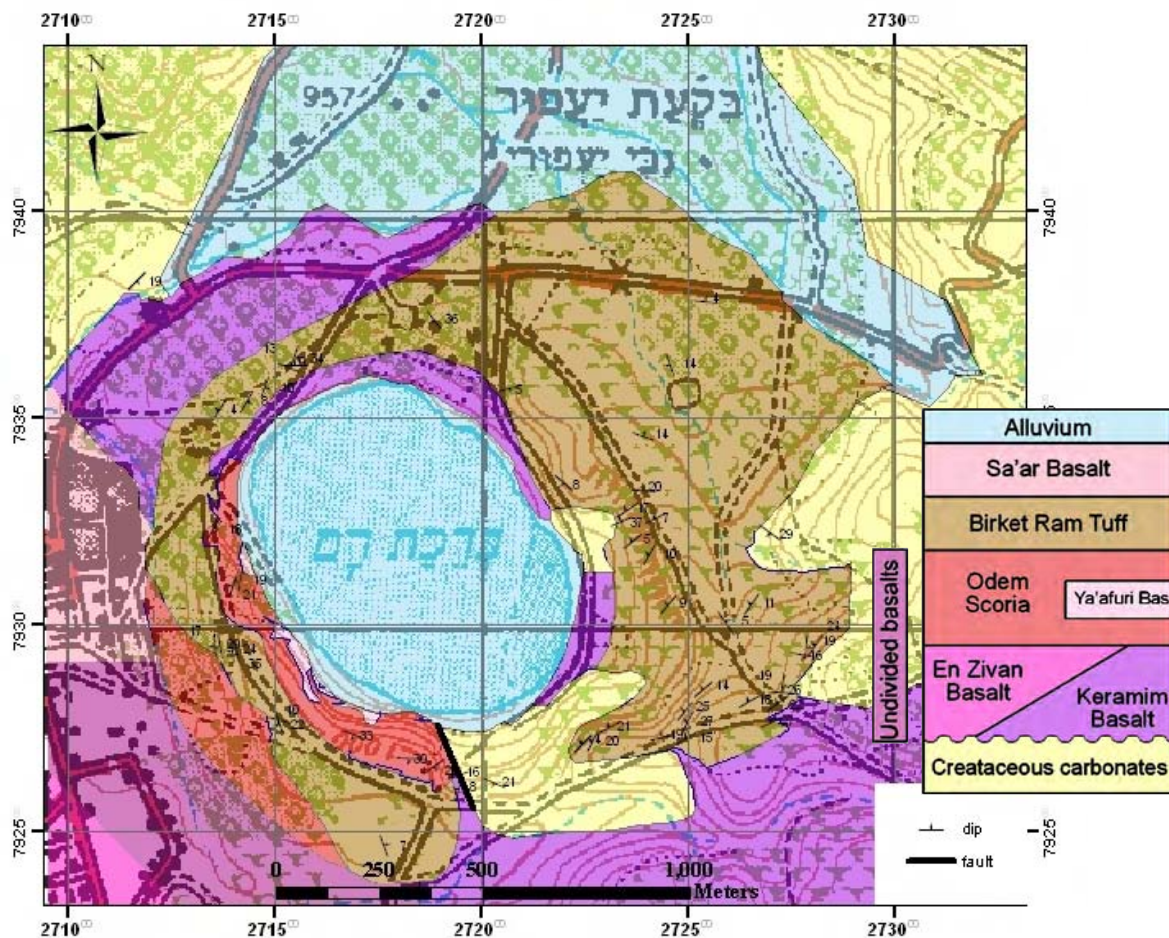
תיארוך בשיטות הלומינסנציה מאפשר קביעת הזמן בו קוורץ ופלדספר היו חשופים בפעם האחרונה לקרינת שמש או לחום. השיטה יעילה לתיארוך דוגמאות שגילן משנים בודדות ועד מאות אלפי שנה. לומינסנציה נוצרת מפליטת פוטונים מחומר כתגובה לגירוי חיצוני, דוגמת אור באורך גל מתאים, חום, לחץ, ריאקציה כימית, או קרינה אלקטרומגנטית (Lian, 2006). מינרלים טבעיים מכילים פגמים מבניים כגון דיסלוקציות או החלפות בשריג, שחלקן מהווה 'מלכודות' אלקטרוניים. אנרגיה מקרינה קוסמית ומקרינת α , β ו- γ הנפלטת בתהליכי דעיכה רדיואקטיבית בסלע הסביבה מייננת את האטומים, והאלקטרוניים המשתחררים מצטברים במלכודות בקצב, הנגזר מכמות הקרינה הפוגעת בגביש ומשך החשיפה. איכלוס מלא של המלכודות מהווה גבול עליון לזמן שמסוגלת השיטה למדוד. הלומינסנציה עצמה מקורה בשחרור האלקטרוניים הלכודים במלכודות, שחרור המאפשר להם לשוב למצבם היציב תוך פליטת פוטונים. קיים מגוון של מלכודות בגביש, המתייחדות בעומק האנרגטי שלהן, ביכולת אצירת אלקטרוניים לפרקי זמן שונים ובעמידותן בפני גירויים חיצוניים.

מדידות הלומינסנציה מתבצעות לרוב על קוורץ או פלדספר שהופרד מהסדימנט. גיל הדוגמה נקבע על ידי מדידה של הקרינה המצטברת (equivalent dose) במינרל על ידי שחזור הסיגנל הטבעי וחלוקתה בשטפי הקרינה הסביבתיים (dose rate). השיטה בה נמדדת הקרינה המצטברת מכונה Single Aliquot dose Regenerative (SAR). השיטה מאפשרת גם מדידה של דוגמאות קטנות במיוחד (Lian, 2006). נתון זה חשוב במקרה של בריכת רם, משום שריכוז גרגרי הקוורץ בטוף נמוך ביותר (עד אלפיות מדוגמת הטוף: הדוגמה הקטנה ביותר הייתה בגודל של 0.01 גרם).

שש דוגמאות נאספו משכבות טוף ופליאוסולים החשופים סביב בריכת רם. הדיגום נערך באפלה תחת כיסוי, למניעת חשיפת הדוגמה לשמש, שעלולה היתה לגרום לאיפוס סיגנל ה-OSL. הדוגמאות הושמו בניילון אטום (לאור ולאוויר). שטפי הקרינה הסביבתיים התקבלו מחישוב התרומה של קרינות α ו- β , לפי ריכוז היסודות הרדיואקטיביים בסדימנט (^{238}U , ^{232}Th ו- ^{40}K). את התרומה של הקרינה הקוסמית ושל קרינת ה- γ מודדים בשדה בעזרת מונה γ (סינטיילטור מסוג PM-11). כדי לחשב במדויק את שטפי הקרינה צריך לדעת את תכולת המים בסדימנט, מכיוון שלמים בליעה גבוהה של קרינת ה- γ . תכולת המים חושבה משקלית ביבוש ושקילה חוזרת של חלק מהדוגמה. השגיאה בכמות המים, הנובעת משינויים עונתיים באחוזי הלחות בסדימנט, צומצמה על ידי דיגום של חומר מתוך חפירה לעומק בנקודת הדיגום. העבודה על דוגמאות הלומינסנציה נערכה בחדר עם תאורה כתומה עמומה, במעבדת המכון הגיאולוגי. הדוגמאות עברו ניפוי רטוב למיצוי הגרגרים בגודל $210\text{--}74\ \mu\text{m}$. הדוגמאות הושרו במשך למעלה מ-24 שעות בתמיסה הידרו-כלורית (HCl 10%) ולאחר מכן נשטפו ועברו ייבוש של מספר ימים בתנור ב- 50°C , טמפרטורה שלא פוגעת בסיגנל ה-OSL. החומר היבש הופרד מגנטית (במפריד של Franz) בשדה מושרה בזרם של 1.5 Amp כדי לבדד את גרגרי הקוורץ משאר המינרלים. הקוורץ שהופרד הושרה בחומצת HF מרוכזת (40%) למשך ארבעים דקות, לצורך המסת שאריות הפלדספר וחלקם החיצוני של גרגרי הקוורץ. באופן זה נותרו ליבות גרגרי הקוורץ בלבד ובהן נמדדה הלומינסנציה.

4. תוצאות

4.1. מיפוי גיאולוגי, סטרטיגרפיה ותת-הקרקע



איור 5: מפה גיאולוגית של בריכת רם. הסימון של בזלת כרמים במפה מתייחס לבזלת כרמים עליונה. בזלת כרמים תחתונה מוכרת ממחשף אנכי בצפון מערב הבריכה ואינה נראית במבט מפה.

4.1.1. יחידות המסלע ויחסי שדה

אזור של כעשרים קמ"ר מסביב לבריכת רם מופה בקנה מידה של 1:5,000 (איור 5). עוביו של החתך הוולקני בסביבת הבריכה, נע בין מטרים ספורים למאות מטרים, עובדה המעידה על טופוגרפיה חריפה בעת ההרבדה. הבזלת הראשונה, שקלחה באתר על התשתית הסדימנטרית היא 'בזלת 017' (בזלת בעלת מאפיינים יחודיים לה, הקרויה בשם השקף על פיו הוגדרה לראשונה). בנוסף לבזלת זו מצויות כפרגמנטים בטוף בזלות 006 ו-015 שמיקומן בחתך הסטרטיגרפי אינו ברור, אך העדרן במחשופים בפני השטח מציע כי הן עתיקות מהבזלות החשופות. שלוש יחידות אלו אינן חשופות בפני השטח והן מוכרות כקילוחים מתת-הקרקע בלבד (ראה תת-פרק תת-הקרקע באזור בריכת רם). הבזלת הקדומה ביותר החשופה באזור בריכת רם היא בזלת כרמים תחתונה. בזלת זו חשופה בצפון מזרח הבריכה והיא תוארכה ב-Ar-Ar ל-470 Ka (Feraud et al., 1983). על בזלת כרמים תחתונה מצויה שכבת פלאוסול המכילה כלים פלאוליטיים ועליה מונחת בזלת כרמים עליונה שגילה 223 ± 3 Ka (Feraud et al., 1983; Goren-Inbar, 1985). בזלת כרמים עליונה כיסתה את כל שטח המאאר וסביבתו (איור 5). בדרום מערב המאאר, על בזלת כרמים עליונה, מצוי חרוט סקורית אודם, החדור על ידי אינטרוזיות של בזלת יעפורי (איור 6). בזלת יעפורי מופיעה כדייקים

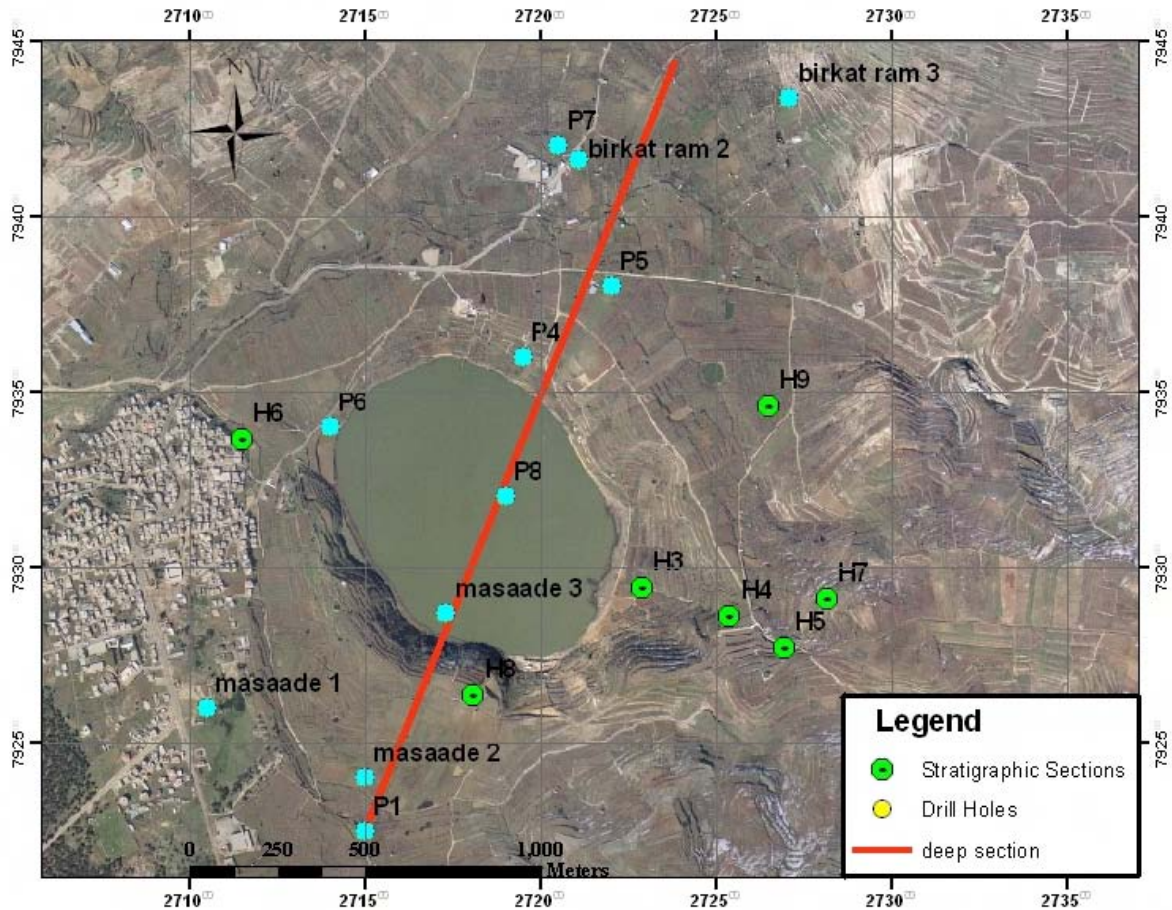
אופקיים ואנכיים, שחלקם מראים סגמנטציה או התייתדות והיא מוגבלת בתפוצתה לגוף הסקוריה בלבד (איור 5). ממערב לחרוט הסקוריה מצויה רמה בזלתית של קילוחי בזלת עין זיון, המורכבת ממספר רב של קילוחים שונים. מיקומם הסטרטיגרפי אינו תמיד ברור מיחסי השדה. מדרום למאאר מכסים קילוחי בזלת עין זיון את בזלת כרמים עליונה והם מאוחרים לה, אך מאחר ומדובר במספר קילוחים, יתכן שחלק מהם אף קודמים לבזלת כרמים. בקידוח מסעדה 3 נמצאו בזלות, הדומות בפטרוגרפיה שלהן לבזלות עין זיון, תחת תל הסקוריה ומעל בזלת 017 (איור 9). הסלעים הסדימנטריים, בזלת כרמים עליונה וחרוט הסקוריה הכולל את בזלת יעפורי, מכוסים באי-התאמה בטוף בריכת רם, המכיל פרגמנטים של כל היחידות הוולקניות שהוזכרו. שכבות מפותחות של פלאוסול קלקריטי וסקוריאי מצויות בין הטוף לסלעים הסדימנטריים ולסקוריה בהתאמה. קילוח בזלת סער מכסה את הטוף ממערב למאאר והוא המופע הוולקני הצעיר ביותר באזור הבריכה.



איור 6: דייק של בזלת יעפורי חדור בסקוריה אודם, דרום מערב המאאר (271566-792953).

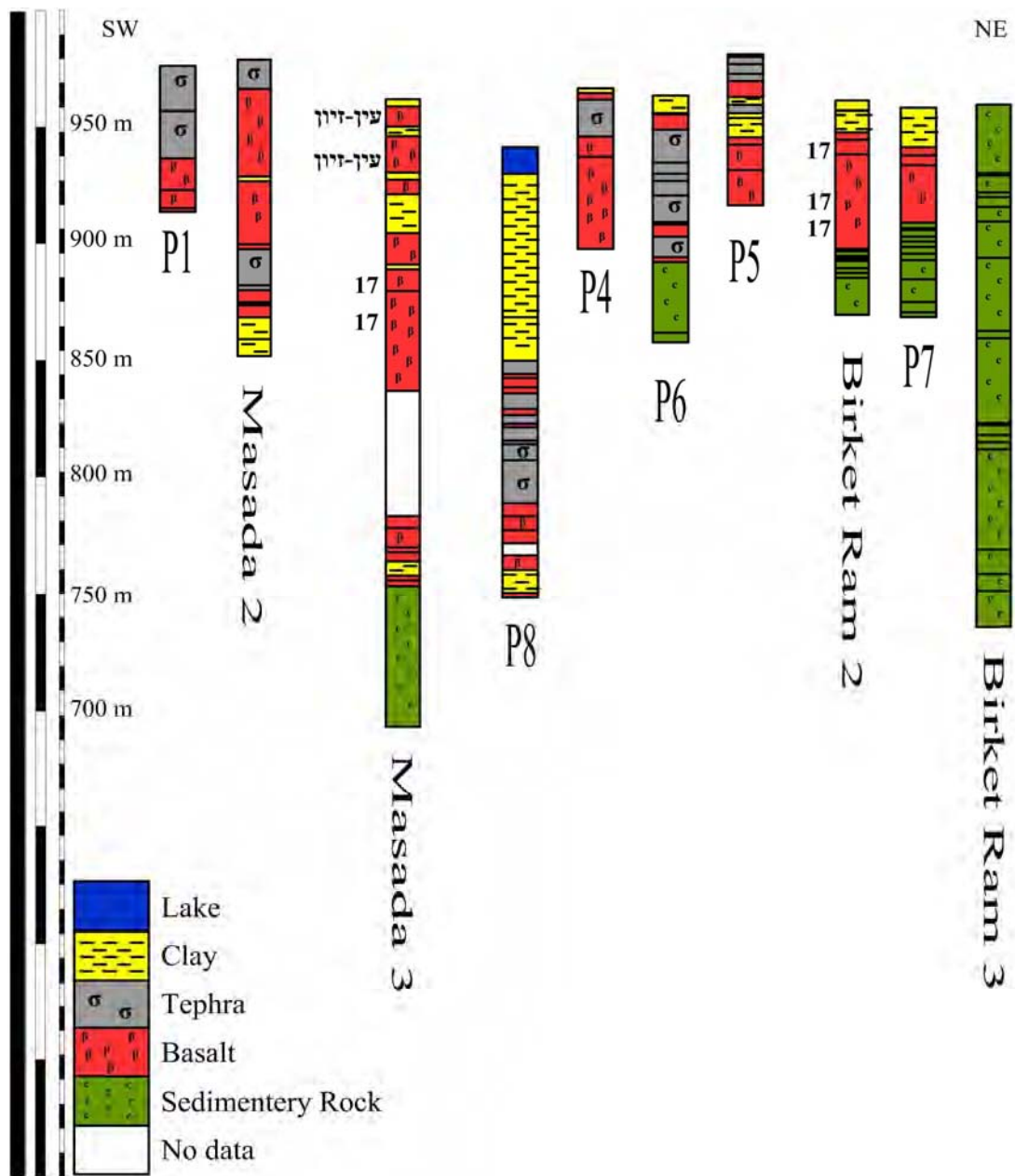
4.1.2. תת-הקרקע באזור בריכת רם

בסביבת בריכת רם (ברדיוס 1,500 מטרים) נקדחו אחד עשר קידוחים, ששה נקדחו על ידי תה"ל למחקר ותצפית (P-1, P-4, P-5, P-6, P-7, P-8) וחמישה על ידי 'מקורות': בריכת רם 2-, ו-3 וקידוחי מסעדה 1-3 (איורים 7, 8).



איור 7: מפת מיקום החתכים העמודיים (ירוק) אתרי הקידוחים (צהוב) וקו חתך העומק של איור 9 (אדום).

במסגרת העבודה הנוכחית נסקרו ועובדו דוחות הקידוחים והוכנו ונבדקו שקפים מדוגמאות cuttings מקידוחי בריכת רם-2, מסעדה-2 ומסעדה-3 (איורים 7, 8, 9). קושי שעלה בהשוואת הדוחות והלוגים הוא חוסר התאמה בין הליתולוגיה לתאור שלה בדו"ח. חוסר ההתאמה בא לידי ביטוי בשימוש במונח 'טוף' עבור כלל הסלעים הפירוקלאסטיים בחתך (לפילי-טוף, טוף וסקוריה). כמו כן יתכן כי שכבות שהן טוף דק, הוגדרו, בשל הדמיון, כחרסיות. איור 8 מציג את הקידוחים על פי תיאורם הליתולוגי בדוחות ולפי סידורם מדרום מערב לצפון מזרח. בשל חוסר ההתאמה בדוחות, מוצגים כאן כלל הסלעים הפירוקלאסטיים כטפרה.



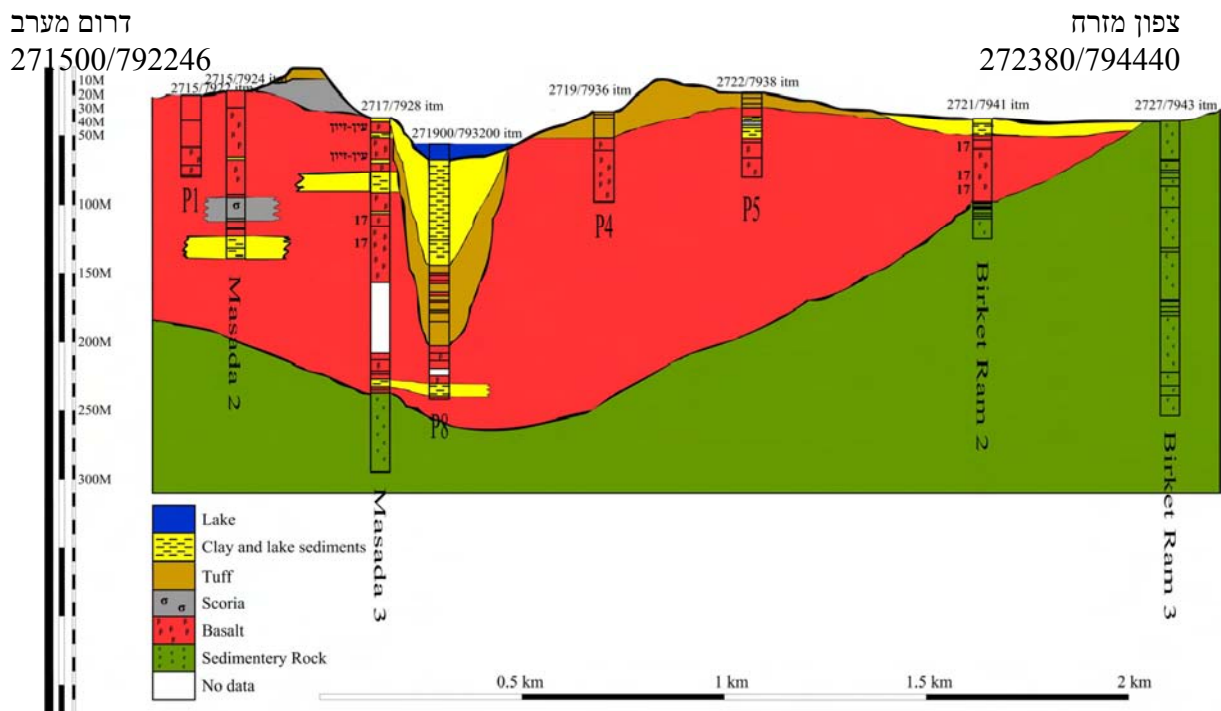
איור 8: תאור ליתולוגי של הקידוחים בסביבת בריכת רם על פי המתואר בדוחות הקידוחים. החתכים פרוסים לאורך רצועה העוברת מזרעם מערב לצפון מזרח דרך כל הקידוחים. השכבות הפירוקלאסטיות מוצגות כטפרה. על החתך, מסומנות, באתרן, בזלות 017 ועין זיון, שהוגדרו בשקפים שהוכנו מגלעיני הקידוחים בריכת רם 2 ומסעדה 3.

קידוח בריכת רם 3, כ-1500 מ' מצפון מזרח למרכז הבריכה, חדר 215 מטר של תשתית סדימנטרית. קידוחים P7 ובריכת רם 2, הממוקמים כ-1000 מ' צפונה למרכז הבריכה ודרום-מערבית לבריכת רם 3, (איור 7) הגיעו אל גג התשתית הסדימנטרית בעומק של 49 ו-65 מטר בהתאמה, אחרי שחדרו חתך בזלתי המכוסה בחרסיות. הקידוחים הקרובים אל הבריכה (פחות מ-1000 מ' ממרכזה) מצפון מזרח (P4, P5), מצפון מערב (P6) ומדרום מערב (P1 ומסעדה 2) מתאפיינים בחתך פירוקלאסטי בעובי משתנה (12 עד 53 מ'), המכסה או מתאצבע עם קילוחי בזלת. חריג בין הקידוחים הקרובים לבריכה הוא קידוח P6 בצפון מערב הבריכה, שחודר חתך בזלתי דק יחסית (בעובי מצטבר של 14 מ' בלבד). קידוח זה חודר אל התשתית הסדימנטרית בעומק רדוד יחסית (98 מ'). שני קידוחים עמוקים יחסית (מסעדה 3 - 258 מטר ו-P8 - 186 מטר) הממוקמים בתוך המאאר (איור 7), מציגים חתך שונה. בעוד שקידוח מסעדה 3 חודר חילופי בזלת וחרסית עד הגיעו אל התשתית הסדימנטרית בעומק 200 מטר, קידוח P8 המצוי במרכז המאאר, חודר 88

מטר של חרסיות אגמיות שמתחתן 58 מטר של חומר פירוקלאסטי הממלא את חרוט הדיאטרמה. קידוח P8, מגיע אל עומק של 186 מטר כשהוא חודר בזלת תחת החומר הפירוקלאסטי, ומוצע כי אינו מגיע אל התשתית הסדימנטרית משום שהוא חדור בדיאטרמה של המאאר.

על פי נתוני הלוגים באיור 8, ניתוח השקפים, ונתוני השדה (איור 5) צויר חתך בכיוון כללי צפון מזרח – דרום מערב, דרך הבריכה (איור 9). האיור כולל אבחנה בין טוף לסקוריה, המבוססת על ניתוח של נתוני השדה. האיור מציג דיאטרמה ויש בו קביעת גבול לעומק המזערי ולזווית הרחבה ביותר האפשריים של חרוט הדיאטרמה. המימדים הללו הם גבולות בלבד, משום שהחתך אינו עובר בהכרח במרכזה של הדיאטרמה. החתך מעיד על תבליט קדום בתשתית הסדימנטרית והמצאות שקע באזור הבריכה. השקע באזור הבריכה נמוך בכ-200 מטר יחסית לבקעת יעפורי והוא התמלא בקילוחי הבזלות שדרכם נפערה הדיאטרמה.

בזלת 017 הוגדרה בשקפים מפרגמנטים בטוף ונמצאה בם בשכיחות גבוהה (ראה הפטרולוגיה והכימיה של הבזלות באזור בריכת רם, בהמשך), תצפית המציעה כי הייתה מרכיב משמעותי של חלל הדיאטרמה. בזלת זו (017) זוהתה גם בקידוחים 'בריכת רם 2' בעומקים 22 עד 47 מטר ו'מסעדה 3' בעומקים 73 עד 88 מטר (איורים 8, 9). מכיוון שגם גג וגם בסיס בזלת 017, בהכרח גבוהים יותר בקידוח בריכת רם 2 ביחס למסעדה 3, והיות ובסיס הקילוח התחתון של הבזלת הזו מונח על התשתית הסדימנטרית בקידוח בריכת רם 2, ניתן לומר, כי קילוח בזלת 017 הוא שמילא לפחות חלק מהשקע הטופוגרפי של התשתית הסדימנטרית, וכי הקילוח זרם בערך מצפון מזרח לדרום מערב, דרך ובמורד העמק הקדום.



איור 9: חתך בכיוון צפון מזרח – דרום מערב, דרך הבריכה (221500/292246 – 222380/294440 itm). המרחקים האופקיים בין הקידוחים פרופורציוניים להיטל אנכי על מישור החתך.

4.2. הפטרולוגיה והכימיה של הבזלות באזור בריכת רם

4.2.1. פטרוגרפיה

המרכיב העיקרי בטוף הוא פרגמנטים בזלתיים מבזלות שונות. בכדי לזהות את סלעי המקור לפרגמנטים אלו, נלמדו הפטרוגרפיה והכימיה של הבזלות החשופות בסביבת הבריכה, וגם אלו שנחדרו בקידוחים. דוגמאות בזלת ופרגמנטים חולקו ושויכו לשמונה פרטים, לפי מאפייניהם הפטרוגרפיים והסטרטיגרפיים. לא ניתן להפריד באופן ברור בין הבזלות על פי הכימיה שלהן (ראה בהמשך), אולם הפטרוגרפיה מאפשרת הפרדה ושיוך של הפרגמנטים בטוף לבזלות השונות (ראה נספח 1, תאור פטרוגרפי של בזלות בריכת רם). ההבדלים מתבטאים בעיקר בתכולה ובטקסטורה של הפנוקריסטים, המהווים כלי פטרוגרפי חזק לאיפיון וזיהוי הבזלות בשקפים. בין השיקולים לאבחנה נבדקו החלק היחסי של הפנוקריסטים מול המטריקס, החלק היחסי של מינרלים שונים בפנוקריסטים, מתאר הגבישים, פיזורם במטריקס (כבודדים או כאגרטים) ונוכחות תאום (בפירוקסנים). גבישי המטריקס פחות יעילים להגדרה מאחר שבחלק מהיחידות נמצא מגוון רחב של הרכבים וטקסטורות.

כל הבזלות, למעט בזלת 015, מאופיינות בטקסטורה פורפירית. גודלם האופייני של הפנוקריסטים הוא 0.5-1 מ"מ, אך לעיתים הם מגיעים ליותר מ-2 מ"מ (טבלה 1). לעיתים, קיימים גם מיקרופנוקריסטים בגודל אופייני של 0.05 עד 0.4 מ"מ. מאסף הפנוקריסטים והמיקרופנוקריסטים כולל אוליבין, קלינופירוקסן ומינרלי בצר בתוך מטריקס דק עד בינוני, הנשלט לרוב על ידי פלגיוקלז ונפלין ונושא גם אוליבין, פירוקסן ומינרלי בצר. הרכבי הפלדספר משתנים עם גודל הגבישים כאשר בפריזמות הגדולות שכיח הרכב פלגיוקלזי לברדוריטי (An 50-67) ובפריזמות שבחומר האינטרגרנולרי שכיח אלקלי פלדספר ונפלין (וינשטיין, 1992).

בזלות סער ועין-זיון (נספח 1) חשופות מערבית לבריכה ודומות זו לזו בנוכחות פנוקריסטים של קלינופירוקסן מתואם ובמטריקס המכיל פריזמות גדולות של פלגיוקלז (עד 0.75 מ"מ). הן נבדלות ביניהן בנוכחות ובדומיננטיות של האוליבין בפנוקריסטים של בזלת סער. בזלת יעפורי (נספח 1), המתאצבעת עם הסקוריה בצידה הדרום-מערבי של הבריכה (איור 5), מתאפיינת בשליטת פנוקריסטים של אוליבין, המופיעים בתפרוסת גדלים גדולה מעשירית המילימטר ועד מילימטר בודד, ומראה שונות ניכרת בהרכב ובטקסטורת המטריקס (פריזמות פלדספר וזיקולות בכמות משתנה). בזלת זו מורכבת מקילוחים ומחדרים שונים המשולבים בסקוריה. אוכלוסיית הפנוקריסטים של אוליבין בזלת כרמים עליונה (נספח 1), הינה בי-מודלית והיא מורכבת מפנוקריסטים בגודל של 0.75-2.25 מ"מ וממיקרופנוקריסטים בגדלים של 0.05 עד 0.4 מ"מ. כמו כן מאופיינת בזלת זו בנוכחות קסנוליתים ופנוקריסטים של אמפיבול. זו הבזלת היחידה ברמת הגולן המכילה גבישי אמפיבול (לפרטים נוספים ראה פרק אמפיבול בבריכת רם). בזלת כרמים תחתונה (נספח 1) נחשפת בצפון מערב הבריכה באזור האתר הפלאוליתי (Goren-Inbar, 1985) ומאופיינת בנוכחות פריזמות פלגיוקלז גדולות (עד 1.25 מ"מ) ופנוקריסטים רבים של אוליבין. בזלת 006 (נספח 1) הזלת 006 (נספח 1) המצויה בפרגמנטים בטוף, מתאפיינת בנוכחות אגרטים של פנוקריסטים של קלינופירוקסנים עם תופעות תיאום ומטריקס בינוני חסר פריזמות, המכיל פירוקסן, אוליבין ומינרלי בצר רבים. בזלת זו ניכרת גם בהרכבה הכימי השונה מעט משאר הבזלות. היא מפותחת פחות עם $Mg^{\#}=0.59$ שהוא ערך גבוה יחסית וענייה בסיליקה ביחס לבזלות האחרות בבריכת רם (ראה בהמשך). בזלת 015 (נספח 1) מופיעה בפרגמנטים בטוף ומתאפיינת בהעדר פנוקריסטים. בבזלת זו ניכרות פריזמות פלדספר רבות וטקסטורות טרכיטיות. בזלת 017 (נספח 1) נשלטת על ידי פנוקריסטים של קלינופירוקסן ואוליבין ונבדלת מן האחרות בטקסטורה של גבישי הפירוקסן, המוחלפים גם בשוליהם וגם בגלעין הגביש. החלפה

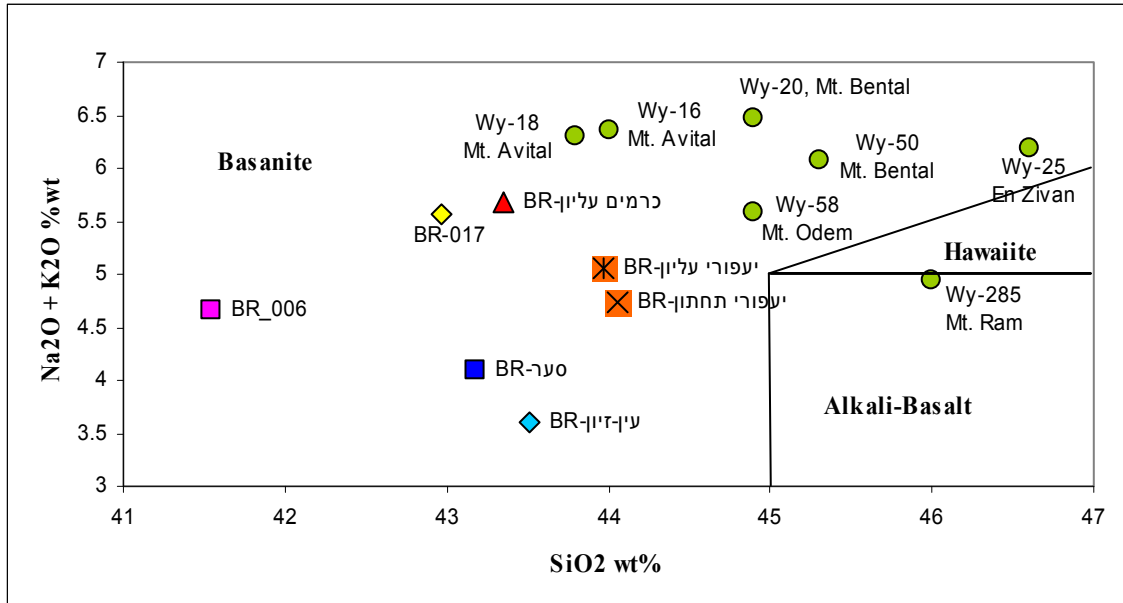
זו הינה אינדיקטיבית ובאזור בריכת רם מצויה רק בבזלת זו. בזלת 017 אינה חשופה בפני השטח ודוגמאות ממנה נמצאו בגלעיני קידוחים, בפרגמנטים בטוף ובקסנווליתים רדודים המוכלים בתוך בזלת כרמים עליונה.

טבלה 1: סיכום המאפיינים הפטרוגרפיים הבולטים של הבזלות בסביבת בריכת רם

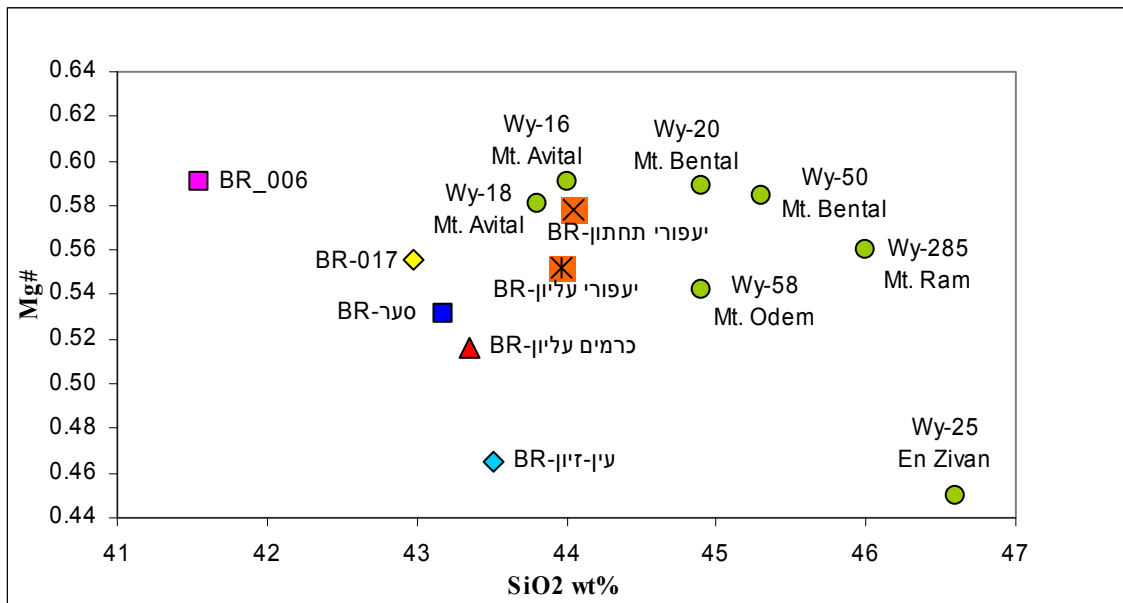
<u>מקור הדוגמאות</u>	<u>הערות</u>	<u>מטריקס</u>	<u>% פנוקריסטים שולטים בסלע</u>	<u>סוג בזלת / מאפיינים</u>
מחשופי סלע	דומה מורפולוגית לקילוחי עין זיון. טקסטורה טרכיטית	בינוני עם פריזמות פלגיוקלו	אוליבין-13% קלינופירוקסון-7%	סער
מחשופי סלע וגלעיני קידוחים	קיים מגוון קילוחים שאינם זהים לחלוטין. טקסטורה טרכיטית	בינוני עם פריזמות פלגיוקלו	קלינופירוקסון-5% (גם באגרטים)	עין זיון
מחשופי סלע ופרגמנטים בטוף	המחשופים הם של מחדרים בעלי מורפולוגיה משתנה	מגוון – משתנה בין הדוגמאות	אוליבין – 13% קלינופירוקסון-2%	יעפורי
מחשופי סלע ופרגמנטים בטוף	מכיל קסנווליתים ופנוקריסטים של אמפיבול	דק מאוד, מכיל בצר, פלדספר ומינרלים מאפיים	אוליבין בי-מודלי מיקרופוני – 11% פנוקריסטים – 6%	כרמים עליונה
מחשופי סלע ופרגמנטים בטוף	פריזמות הפלגיוקלו הגדלות מהוות סמן היכר טקסטורה טרכיטית	בינוני פלגיוקלו בצר פירוקסון ואוליבין	אוליבין – 16% קלינופירוקסון-6% פלגיוקלו – 6%	כרמים תחתונה
פרגמנטים בטוף	בפירוקסנים ניכר תאום בשלל צבעים	בינוני, תכולה גבוהה של בצר	קלינופירוקסון-11% אוליבין – 10%	006
פרגמנטים בטוף	פריזמות פלדספר וטקסטורה טרכיטית	בינוני, מכיל פלדספר, בצר, פירוקסון ואוליבין	חסרת פנוקריסטים	015
פרגמנטים בטוף, גלעיני קידוחים	הפנוקריסטים מוחלפים מאוד	בינוני עם פלדספר, בצר, אוליבין ופירוקסון	קלינופירוקסון – 9% אוליבין – 9%	017

4.2.2. כימיה של הבזלות

לכל הבזלות של בריכת רם הרכב בסניטי בדומה לזה של רוב הבזלות מצפון הגולן, אך הבזלות מבריכת רם עניות יותר בסיליקה, פחות אלקליות (איור 10) ודומות יותר לבסניטים מיוקניים מעמק יזרעאל (Weinstein et al., 2006). בין הבזלות של בריכת רם, בזלת 006 הינה הענייה ביותר בסיליקה. היא מכילה 41.5% סיליקה, הריכוז הנמוך ביותר שנדגם עד כה ברמת הגולן ומספר המגנזיום שלה גבוה (0.59). בזלת עין זיון בולטת בריכוזי אלומיניום גבוה, מגנזיום נמוך ובמספר המגנזיום הנמוך שלה (נספח 2 ואיור 11).



איור 10: דיאגרמת Total alkalis – Silica (TAS) של דוגמאות בזלת מבריכת רם (BR) בהשוואה עם הרכבי דוגמאות אחרות מצפון רמת הגולן (ירוקות, Weinstein, 1998). נתוני הבזלות של בריכת רם מנורמלות ל-100% ללא LOI.

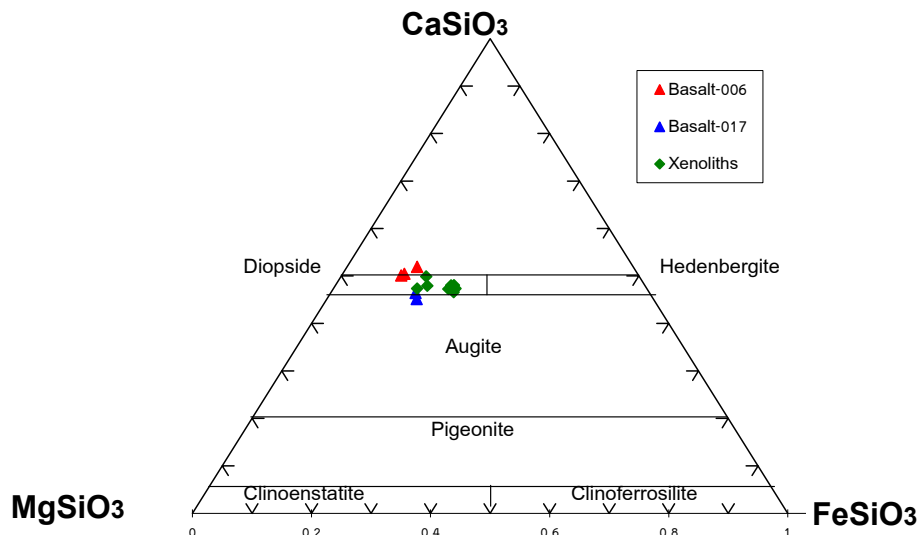


איור 11: מספר המגנזיום (הברזל הדו-ערכי חושב כתשע עשיריות משקליות מכלל הברזל) מול סיליקה בדוגמאות בזלת מבריכת רם ומצפון רמת הגולן (ירוקות, Weinstein, 1998). נתוני הבזלות של בריכת רם מנורמלות ל-100% ללא LOI.

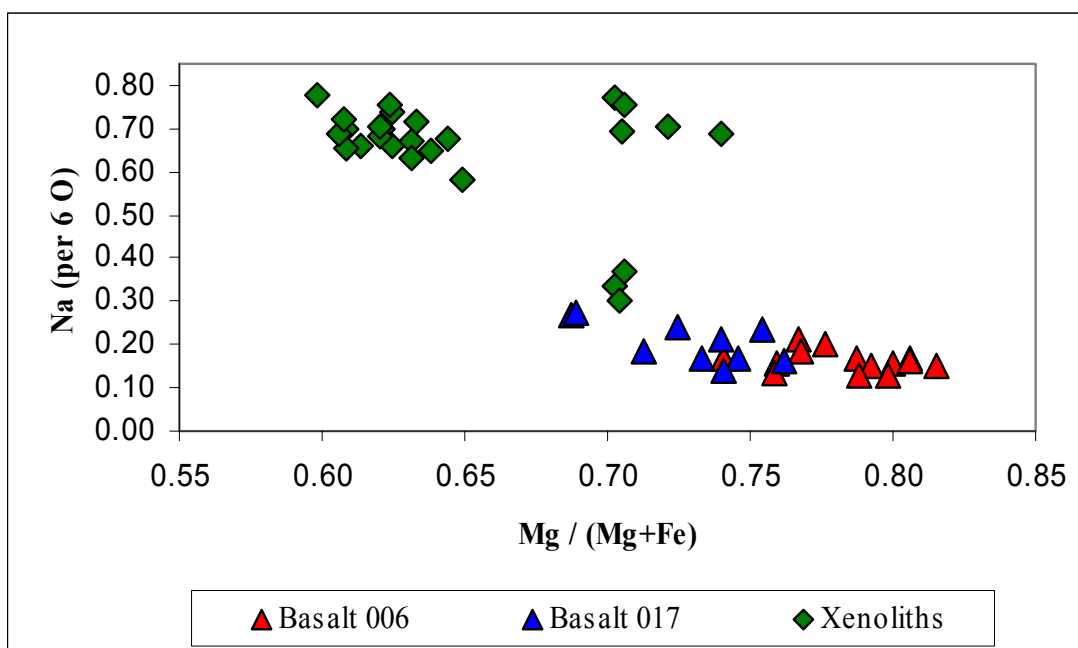
4.2.3. הרכבי מינרלים

במסגרת לימוד הבזלות עלה צורך באימות המסקנות הפטרוגרפיות. לשם כך נערכו מספר אנליזות באלקטרון מיקרופרום. אנליזות אלו נערכו ברובן לגבישים שזוהו פטרוגרפית, במטרה לוודא את החלוקה המינרלוגית ולבדוק את שיוכם של פרגמנטים שונים לפרטי הבזלת השונים. נתוני האנליזות באלקטרון מיקרופרום איששו את הקביעות הפטרוגרפיות והוסיפו מידע אודות המינרלים והבזלות שנבדקו.

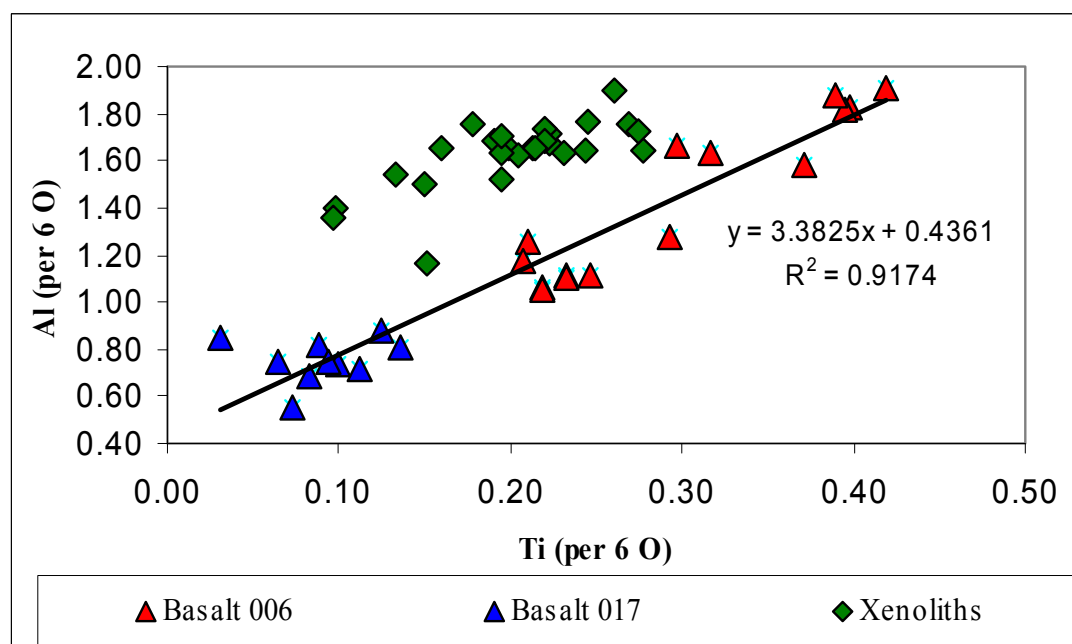
באיורים 12, 13 ו-14, ובנספח 3 מוצגים הרכבי פירוקסנים בפנוקריסטים מבזלות 017, 006 ובקסנוליטים מעטפתיים, שנמצאו בטוף בריכת רם. כל הפירוקסנים הינם דיאופסידים (איור 12), אולם ניתן לאפיין קבוצות מסויימות על פי הרכבן (איורים 13, 14). לפירוקסנים שבקסנוליטים מספר מגנזיום נמוך יחסית לזה שבפנוקריסטים והם נופלים בשני תחומי ערכים: האחד הוא בערכים של 0.70-0.74, המצויים בטווח ערכי הפנוקריסטים שבבזלות (0.69-0.82) והשני - עם ערכים נמוכים מאלה שבפנוקריסטים (0.60-0.65) (איור 13). ריכוזי הנתרן ברוב הפירוקסנים שבקסנוליטים (מרכיב הג'דאיטי) גבוהים פי-3.5 בממוצע מאלה שבפנוקריסטים, אולם נמצא גם גביש בודד בקסנוליט הדומה במספר המגנזיום ובריכוז הנתרן לפנוקריסטים הפירוקסניים שבבזלות (איור 13). הפנוקריסטים מראים מתאם חיובי טוב בין אלומיניום וטיטניום וכל בזלת מתאפיינת בטווח ערכים שונה מן האחרת. בזלת 006 מראה ערכי טיטניום של 0.21-0.42 וערכי אלומיניום של 1.05-1.9 ליחידת נוסחה, עבור שישה חמצנים, בעוד בזלת 017 מראה ערכי טיטניום של 0.07-0.12 וערכי אלומיניום של 0.55-0.88 ליחידת נוסחה, עבור שישה חמצנים (איור 14). בקסנוליטים האלומיניום גבוה מאשר בבזלות עם תכולת טיטניום דומה. מגמה זו עולה יפה עם ריכוזי הנתרן הגבוהים ומעידות על נוכחות גבוהה יותר של מרכיב הקצה הג'דאיטי ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) בקסנוליטים.



איור 12: גבישי קלינופירוקסן מבזלות 017, 006 ומקסנוליטים על משולש הגדרה של פירוקסנים. הדוגמאות נופלות בתחום הדיאופסיד ($\text{Di}_{0.61} - \text{Di}_{0.80}$).



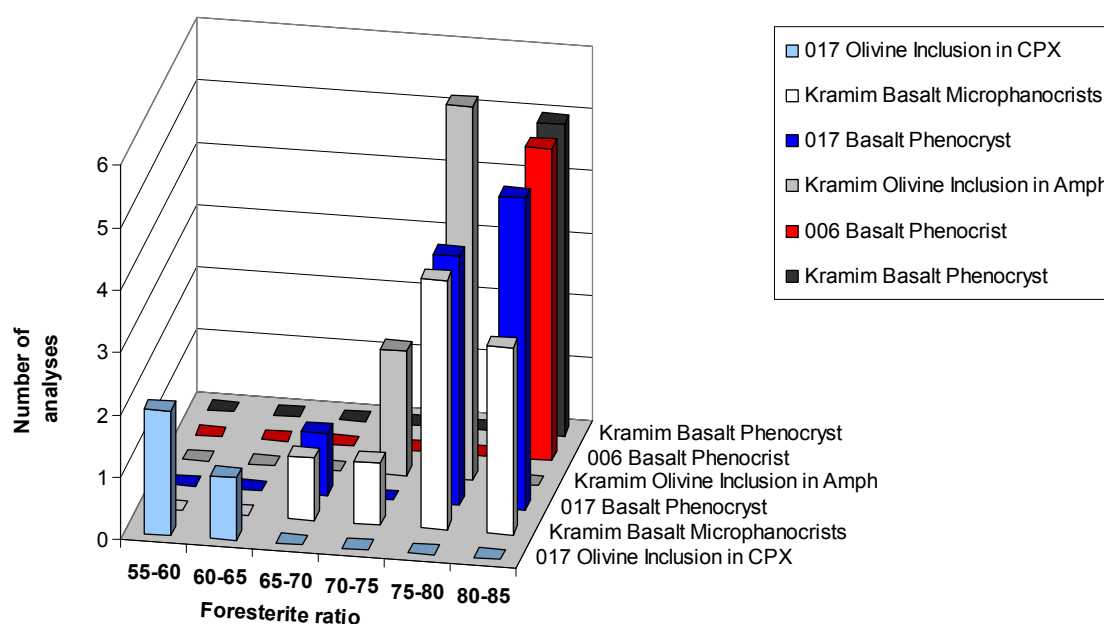
איור 13: מספר המגנזיום (כל הברזל כ- Fe^{2+}) בפירוקסנים מבזלות 006, 017 וקסנוליטים בטוף, מול הערך הסטוכיומטרי של הנתרן ביחידת נוסחה.



איור 14: יחס סטוכיומטרי של היסודות אלומיניום וטיטניום בדוגמאות קלינופירוקסן מבזלות 006, 017 ומקסנוליטים מבריכת רם. שני סוגי הבזלת והקסנוליטים מופיעים כשלושה מאספים שונים הנבדלים בהרכבם הכימי כשהפנוקריסטים של הבזלות מתאימים לקו מגמה ($R^2 = 0.92$) בעל ריכוזי אלומיניום נמוכים מאלו של קסנוליטים בעלי תכולת טיטניום דומה.

הרכבי אוליבינים משלש בזלות מוצגים באיור 15 ובנספח 4. הרכבי הפנוקריסטים האוליביניים בבזלות מראים טווח של Fo67-85 עם חפיפה בין הבזלות השונות. פנוקריסטים בקילוח בזלת כרמים עליונה מראים הרכב דומה או פרימיטיבי יותר מאשר אינקלוזיות האוליבין שבאמפיבול מאותה הבזלת (Fo81-82)

ו-Fo70-82, בהתאמה), אך המיקרופנוקריסטים של אוליבין באותה בזלת מכסים את כל הטווח ואף מראים הרכבים יותר מגנזיים (Fo70-82). תצפית זו תומכת באפשרות שהאמפיבולים בבזלת כרמים עליונה התגבשו מאותה מאגמה ואינם קסנוקריסטים. ההרכב המפותח יחסית של אינקלוזיות האוליבין מלמד כי האמפיבולים החלו להתגבש לאחר האוליבין. במקרה של בזלת 017, לאינקלוזיות האוליבין בפירוקסנים מספר פורסטריט נמוך בצורה ניכרת מטווח ההרכבים של הפנוקריסטים של אוליבין בבזלת זו או בשכנותיה (Fo58-60 ו-Fo67-85, בהתאמה) עובדה העשויה להעיד על היסטוריה של ערבוב מאגמות בבזלת זו.



איור 15: ערכי פורסטריט בגבישי אוליבין מבריכת רם.

4.3. טוף בריכת רם

טוף הוא סלע פירוקלסטי שנוצר בהתפרצויות הפריאטומגמתיות ומורכב מפרגמנטים של סלעי הסביבה בתוספת החומר היובנלי שיצר את הפיצוץ. טוף בריכת רם מתאפיין בשיכוב בעובי משתנה ולעיתים מכיל סטרקטורות סדימנטריות (איור 16).



איור 16: סטרקטורות סדימנטריות המאפיינות הרבדה על ידי base surge בטוף בריכת רם. ימין – שינויי עובי וגליות (H3-39), שמאל- שיכוב צולב (H3-23).

4.3.1. סטרטיגרפיה וחתכים

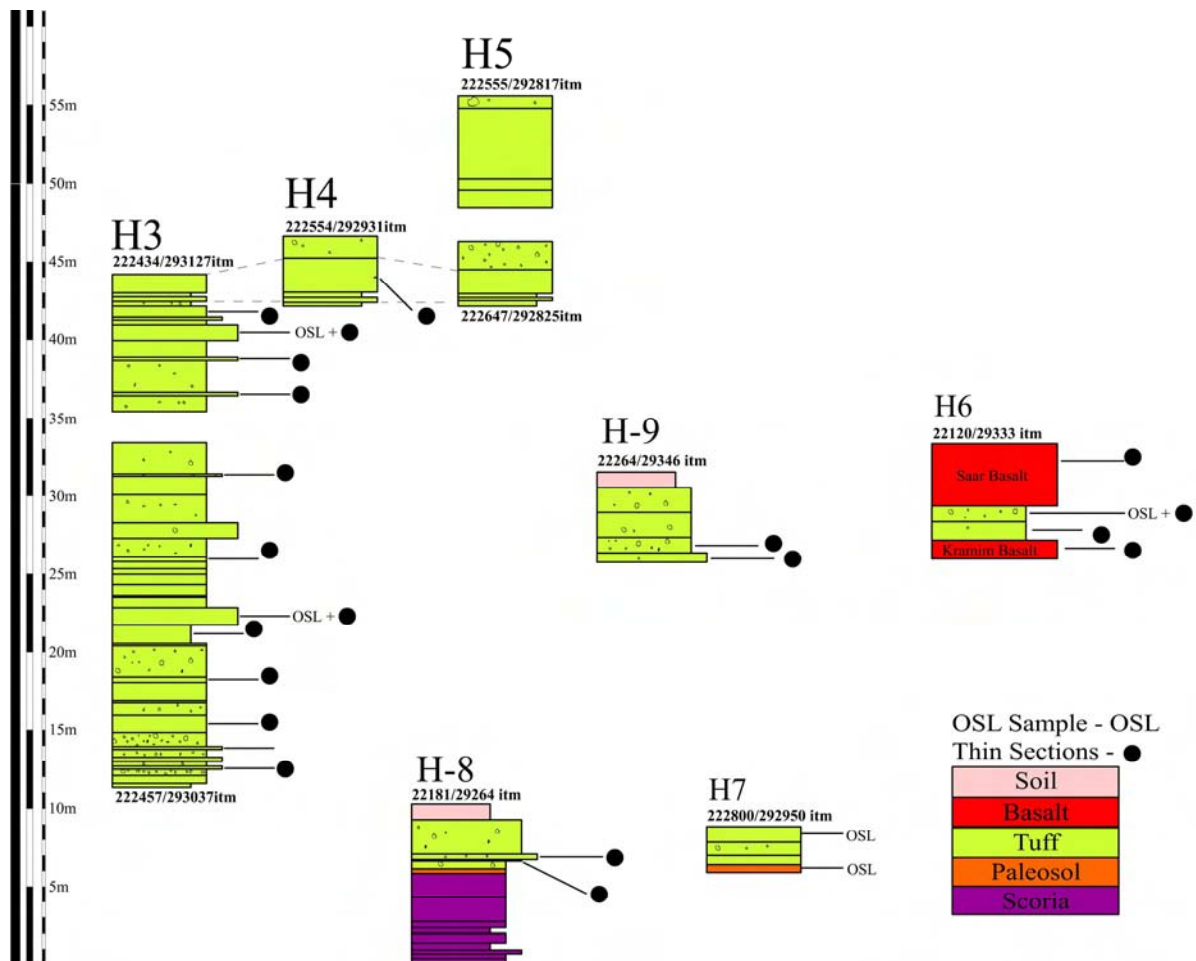
העובי המירבי של חתך הטוף (46 מטר) נמדד בדרום מזרח הבריכה, והוא מורכב משילוב של שלשה חתכים המכונים H3, H4 ו-H5 (להלן: 'החתך העיקרי', איורים 7, 17, 18). החתך העיקרי הוא החתך היחיד שנמדד במדרונותיו הפנימיים של המאאר, בעוד כל החתכים הנוספים נעשו בשכבות טוף המצויות על מדרונותיו החיצוניים.

חתך H8, מדרום לבריכה (איורים 7 ו-17), בסיסו שכבות של סקוריה בעובי מצטבר של 5.75 מ', המכוסות בפליאוסול בעובי של כ-0.30 מ' ומעליו רצף שכבות טוף בעובי 3.15 מ', המכוסה בקרקע רצנטית.

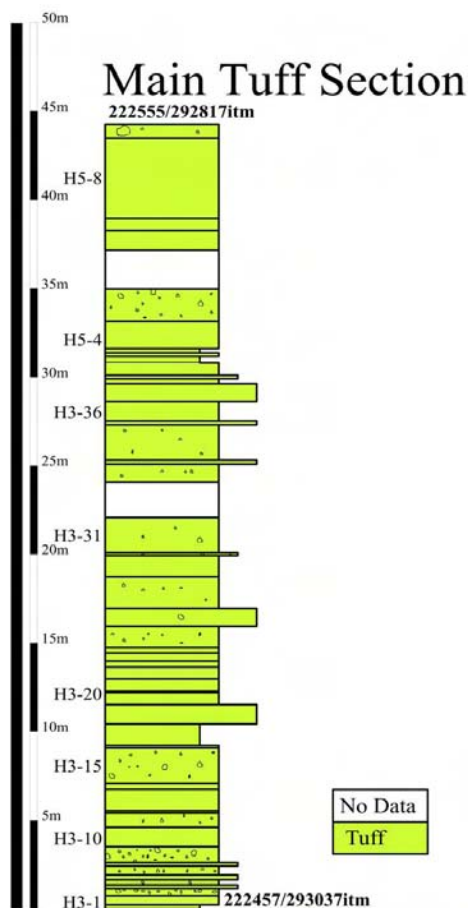
חתך H6 (איורים 7 ו-17) מצפון מערב לבריכה, מגיע לעובי של 7.40 מ' הכולל 2.20 מ' של טוף, הכלוא בין בזלת כרמים עליונה מלמטה ובזלת סער מעל.

חתך H9, בוצע מצפון מזרח לבריכה, במבואות בקעת יעפורי (איורים 7 ו-17). עובי הטוף שנמדד הוא 4.80 מ' והוא מכוסה קרקע רצנטית. חתך זה מצוי בדופן חפירה שהגיעה אל מי התהום של בקעת יעפורי. בסיס הטוף לא נחשף.

חתך H7, ממזרח לבריכה (איורים 7 ו-17), כולל טוף בעובי של 1.45 מטר, המכוסה בפלאוסול קלקריטי בעובי של כ-0.5 מטר. הפלאוסול מכסה סלעים קנומניים מתצורת דיר חנא.



איור 17: חתכים עמודיים המציגים מחשופי טוף סביב בריכת רם. מיקום החתכים מופיע באיור 7. הקורלציה בין H3, H4, ו-H5 נערכה בשדה על פי מורפולוגיה ואקסטרפולציה של מיקום ונטיית שכבות ואומתה בעבודה גרנולומטרית (איור 27). בחתכים מאוירים פוליגונים, המציגים שברי סלע (גדולים מ-3 ס"מ) שנמדדו לאורך מטר אופקי אקראי בכל שכבה. עיגולים שחורים מסומנים ליד שכבות שהוכנו מהן שקפים והאותיות OSL מסומנות ליד שכבות שנדגמו לצורך תארוך לומיניסציה.



איור 18: החתך העיקרי בטוף בדרום מזרח הבריכה (222555/292817 - 222457/293037 itm). מורכב מחיבור של חתכים H4, H3 ו-H5 (איור 7). בחתך מאויירים פוליגונים, המיצגים שברי סלע (גדולים מ-3 ס"מ) שנמדדו לאורך מטר אופקי אקראי בכל שכבה.

4.3.2. ליתולוגיה ופטרורפיה

סלעי הטוף מורכבים בעיקרם משברים של החתך הבזלתי והסדימנטרי שמתחתם, בתוספת חומר יובנלי, מגקריסטים של אמפיבול וקסנוליטים של קרום תחתון וגבול קרום-מעטפת. החומר היובנלי מופיע בשקפים כפלאגוניטית (זכוכית וולקנית מוחלפת) במטריקס שבין הקלאסטיים, או כחומר המלכד או מקיף פרגמנטים (איורים 19, 20). תכולת החומר היובנלי בדוגמאות הטוף משתנה מאד, בין דוגמאות עם 50% חומר יובנלי לדוגמאות בהן לא ניתן להבחין בו כלל. החומר היובנלי מעורבב במקרים רבים בחומר חרסיתי, שחלק ניכר ממנו עשוי אף הוא להיות חומר יובנלי מוחלף, וההפרדה ביניהם במיקרוסקופ לא התאפשרה. בבדיקת 469 נקודות אקראיות בחמישה שקפי טוף, באמצעות Pick-pointer, עלה כי הריכוז הממוצע של הזכוכית והחרסית בטוף עומד על 23%. שטח החללים הממוצע בדוגמאות שנבדקו עמד על 9% (השקפים שנבדקו עברו הקשיה טרם השיקוף והחללים הם חללי סלע המקור). המרכיב העיקרי בטוף הוא פרגמנטים שנגזרו מן הסלעים שהיו בחלל הדיאטרמה טרם היווצרה, ואלו מרכיבים 68% משטח השקפים בדוגמאות הטוף. בטוף מצויים גם פרגמנטים הגדולים בכדי להימדד בשקפים, אך סך הנפח שלהם אינו עולה על 1% מהטוף, ובמקרה זה מיצגים השקפים היטב את המצב בשדה. רוב הפרגמנטים הינם בזלתיים וחלקם הקטן סדימנטריים. לימוד החתך הבזלתי הראה כי אפשר להבחין בין הבזלות השונות על פי הפטרורפיה האופיינית לכל אחת מהן, ולשייך את הפרגמנטים השונים בטוף למקורותיהם. בבחינה של 2600 נקודות אקראיות המכילות פרגמנטים (ולא חללים או חומר חרסיתי וזכוכיתי) ב-20 שקפי טוף, זוהו ושויכו 80% מן הפרגמנטים שנבדקו לסלע מקור ספציפי (טבלה 2). 42% זוהו כפרגמנטים של בזלת כרמים

עליונה (איור 21), 18% - כבזלת 017, 9% - כבזלת עין זיון, 4% נגזרו מבזלת 015, 3% - מבזלת יעפורי ואחוז בודד הוא מבזלת 006. בנוסף לבזלות נצפו גם פרגמנטים ממוצא סדימנטרי (קרבוניטי ואבני חול, מעט יותר מ-1%) וכן קסנוליתים של קרום תחתון/מעטפת.

יש להעיר כי ייתכן שפרגמנטים קטנים של בזלת יעפורי נספרו כבזלת כרמים עליונה, בשל הדמיון ביניהן. כמו כן ייתכן, שפרגמנטים של בזלת כרמים תחתונה הוגדרו כבזלת עין זיון, בשל הדמיון ביניהן, שכן בזלת כרמים תחתונה לא הוגדרה פטרוגרפית עד לשלב מאוחר של המחקר, ורק לאחר ביצוע הדיגום ב-Pick pointer.

טבלה 2: תוצאות מיון פרגמנטים בטוף למקורותיהם השונים

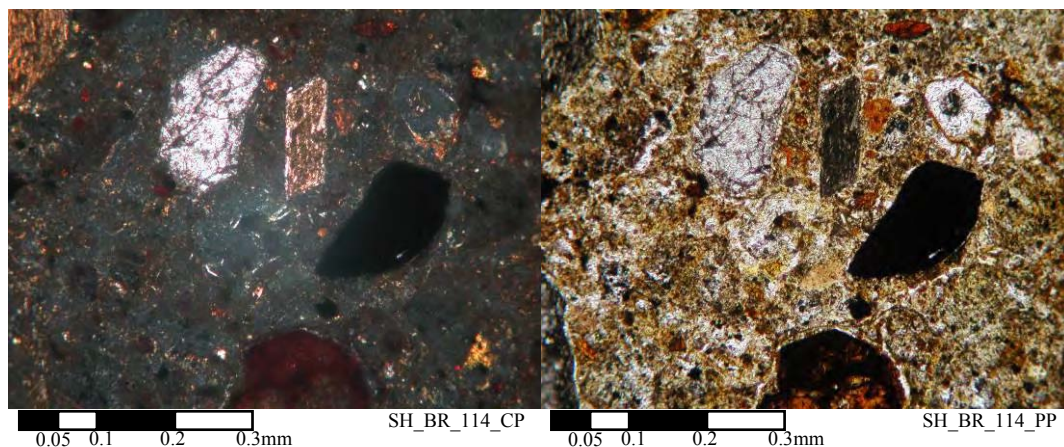
מסלע	אחוז מתוך הפרגמנטים בטוף
בזלת כרמים עליונה	42
בזלת 017	18
בזלות עין זיון וכרמים תחתונה	9
בזלת 015	4
בזלת 006	1
בזלת יעפורי	3
קסנוליתים	~1
סלעים סדימנטריים	~1
גרגרי קוורץ	~1
לא מזוהים	20

הערה: בטבלה מוצגות תוצאות מיון 2600 נקודות אקראיות של פרגמנטים מתוך עשרים שקפי טוף. 20% מהנקודות לא זוהו והן עשויות לייצג בחלקן, פרגמנטים של בזלות לא מוכרות מתת-הקרע.

בין הפרגמנטים זהו חלקי קסנוליתים עמוקים (איור 22) וסלעים סדימנטריים, שנגזרו מן החתך הסדימנטרי שמתחת לבזלות. הסלעים הסדימנטריים שנצפו כוללים פרגמנטים קרבוניטיים וגרגרי קוורץ (איור 23). החומר הקרבוניטי נמצא גם כפרגמנטים, אולם רובו במטריקס הדק (~5.4% ממוצע משקלי מהטוף כולו ואחוז בודד מן הפרגמנטים, ראה המשך הפרק). גודל גרגרי הקוורץ שנמצאו בטוף נע בין 0.1 מ"מ ל-0.6 מ"מ. לגרגרים אלו דרגת בגרות גבוהה עם עיגוליות וכדוריות טובות. חלק מן הפרגמנטים מראים סימנים של לחיצה והם מרוסקים או שניכרת בהם החשכה גלית. בתצורות קטיע וחתירה (קרטיקון תחתון) משיפולי החרמון הקרובים לבריכת רם נמצאו אבני חול המכילות גרגרי קוורץ דומים. הדוגמה מתצורת קטיע (נ.צ: itm 22055/29425, איור 24), הממוקמת גבוה יותר מבין השתיים בחתך הליתולוגי, דומה יותר לגרגרי הקוורץ שבטוף (בגודל הגרגרים ובאופי המשתנה של הכדוריות והריסוק בהם) והיא כנראה המקור העיקרי של פרגמנטים אלו (איור 24). יתכן ואבני החול נדגמו על ידי המאגמה תוך עלייתה, אך הופעתם בריכוז גבוה בהרבה מאשר בבזלת כרמים עליונה המכילה מעט מהם אף היא, עשויה להעיד כי שורש הדיאטרמה הגיע עד לאבני החול, המצויות בעומק של כ-1000 מטר (ראה הסבר החישוב בפרק הדיון).

.א

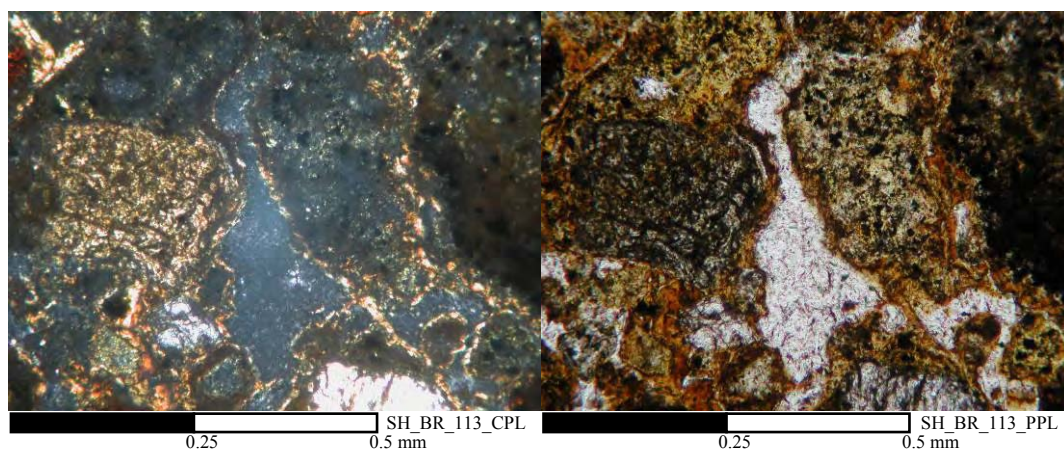
.ב



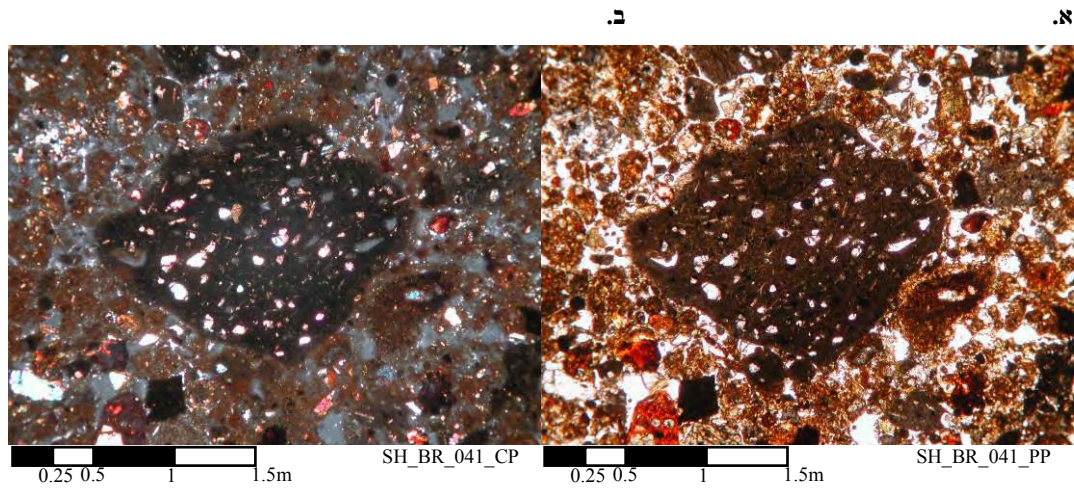
איור 19: זכוכית פלאגוניטית כמטריקס בטוף, הזכוכית מתאפיינת בגוון חום בקיטוב מישורי ובהחשכה בקיטוב צולב. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב: א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

.א

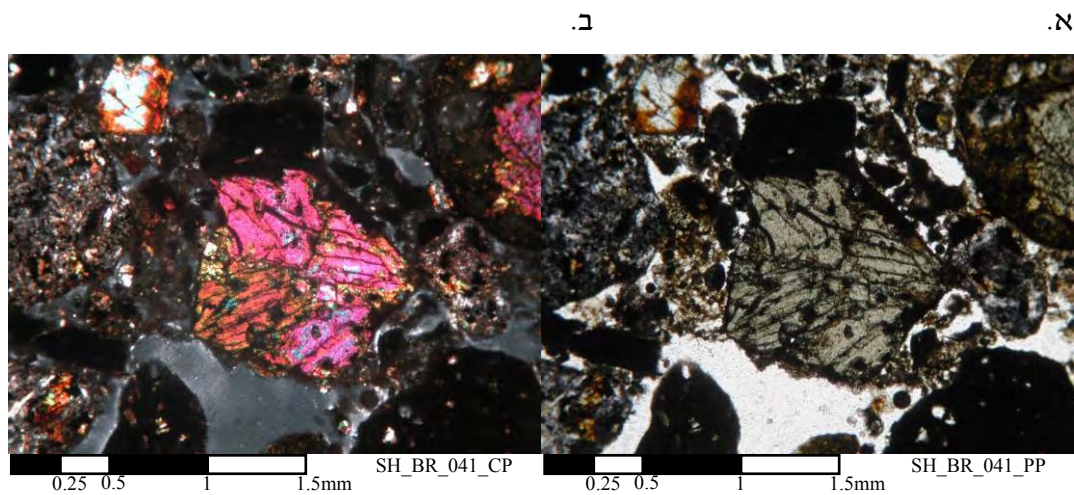
.ב



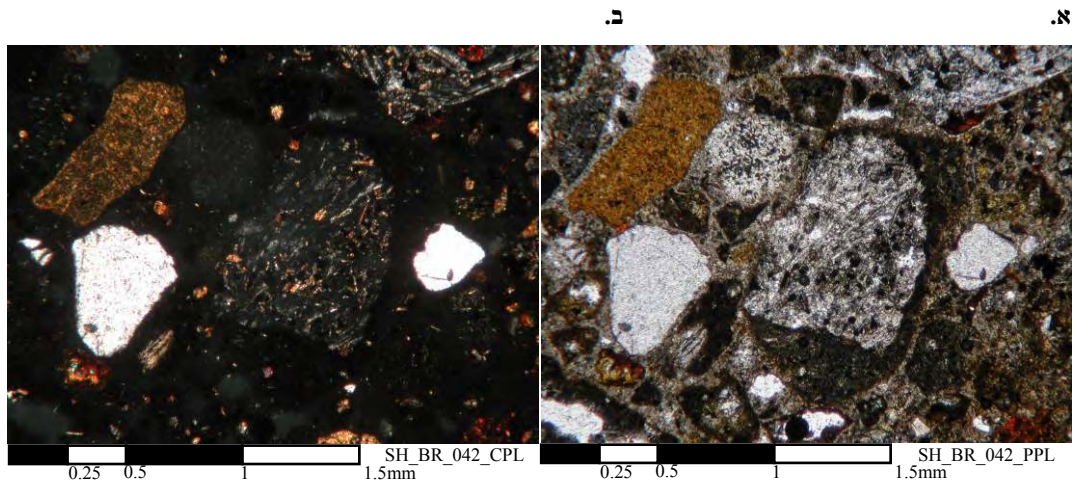
איור 20: זכוכית פלאגוניטית כ'צמנט' המצפה פרגמנטים בטוף, צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב: א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.



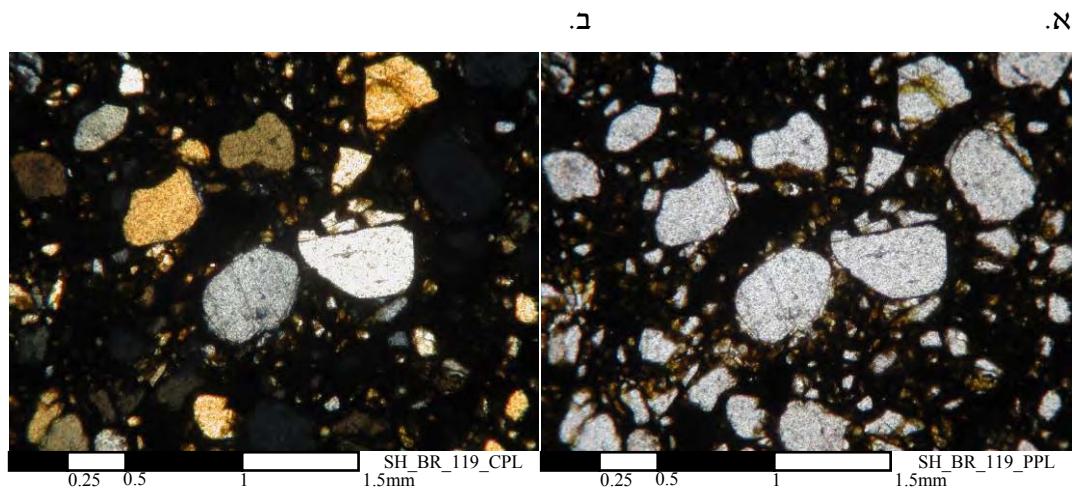
איור 21: פרגמנט בזלת כרמים בתוך טוף. בפרגמנט מיקרופנוקריסטים של אוליבין המאפיינים את בזלת כרמים. המטריקס סביב הפרגמנט מורכב מקלאסטים דקים, חרסיות וזכוכית יובנלית. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב: א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.



איור 22: קסנוליית בסלע טוף, הפירווקסנים בקסנוליית מראים גבולות של פשרה ביניהם. הפרגמנטים מתחת לקסנוליית, מימין ומשמאל הם של בזלת כרמים, הפרגמנט בפניה השמאלית התחתונה הוא כנראה מבזלת 017. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב: א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.



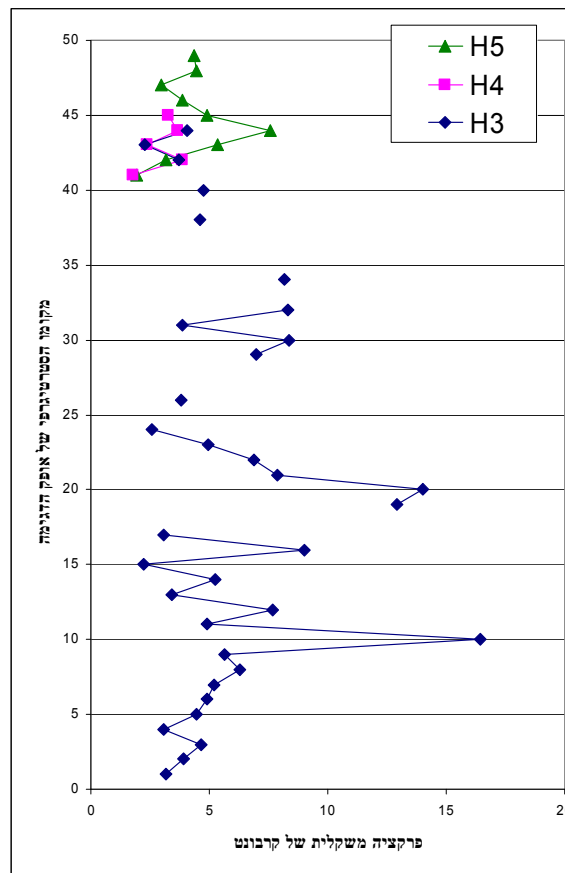
איור 23: גרגרי קוורץ בסלע טוף, ופרגמנט בזלתי במרכז. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב: א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.



איור 24: אבן חול קרטיקונית מתצורת קטיע (נ.צ. itm 756617/681326), גרגרי קוורץ בימודליים, ביניהם בעלי עיגוליות טובה וגרועה, סידוק וריסוק או שלמים וכן ניקרת בחלקם החשכה גלית. ליכוד ברזלי. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב: א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

4.3.3. תכולת קרבונט

פרגמנטים קרבונטיים גדולים מצויים בטוף, אולם אינם שכיחים. עיקר הקרבונט מצוי בחומר הדק בטוף. עובדה זו משפרת את מיצוי בהמסה על ידי חומצה. תכולת הקרבונט נבחנה על ידי המסה ב-80% משכבות הטוף, בחתך העיקרי ובשכבות הטוף של חתכים H3, H4, H5 ו-H6. תכולת הקרבונט נמדדה משקלית על ידי שטיפה והמסה בחומצה הידרו-כלורית. דוגמאות הטוף נשקלו אחר ייבוש לפני ואחרי ההמסה, וההפרש פורש כחלקו המשקלי של הקרבונט בטוף (ראה פרק שיטות). התכולה הממוצעת של הרכיב הקרבונטי היא 5.42% עם סטית תקן של 2.9%. ככלל, הרכיב הקרבונטי בטוף קטן מ-10% (משקלי) מהדוגמה, למעט שתי אנומליות בולטות המצויות בחתך העיקרי, המצויות כ-4 ו-12 מטר מבסיס החתך ומגיעות לכדי 14% ו-16% (משקלי) (איורים 25, 29). שכבות טוף מקבילות בחתכים H3 ו-H4 מראות התאמה טובה של תכולת הקרבונט, אך ריכוז הקרבונט בחתך H5 גבוה מאשר בחתכי השכבות ההקורלטיביות בחתכים האחרים (איור 25). אי-התאמה זו יכולה לנבוע משינויים לטרלים בשכבת הטוף. שתי האנומליות (בשכבה מספר 10 ובשכבות 19-20, ב-H3) מעידות, ככל הנראה, על אירועים חריגים ברצף ההתפרצויות. אפשר ששכבות אלו הן ביטוי להתעמקות הדיאטרמה לתוך התשתית הקרבונטית, או שמקורן במחשופי הקרבונט של דרום המאאר (ראה פרק הדיון). אין הבדלים סיסטמטיים בין תכולת הקרבונט בחתך העיקרי, לזו שבחתכים אחרים סביב הבריכה (בם הקרבונט הוא 1.8-9.3%), או בין החתכים הקרובים והרחוקים ממרכז המאאר.

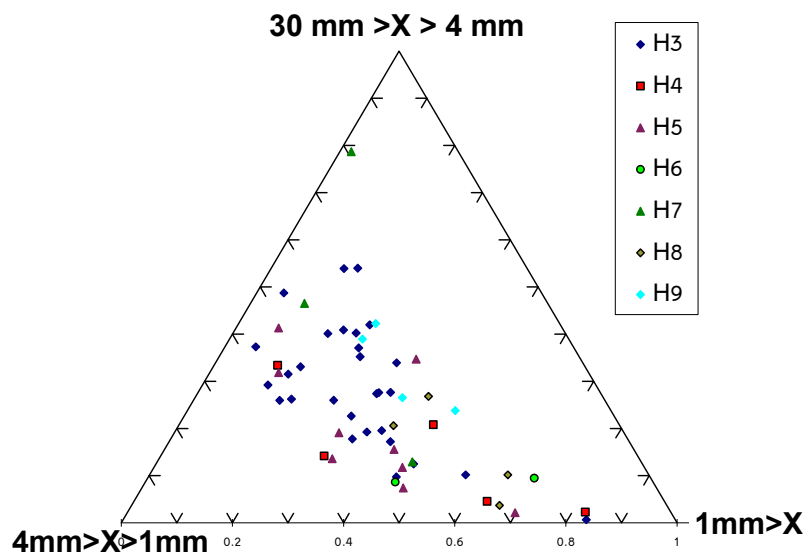


איור 25: פרקציה משקלית של הקרבונט בשכבות הטוף של החתכים המרכיבים את החתך העיקרי, H3, H4 ו-H5. השכבות מוצגות על ציר Y לפי סידורן הסטרטיגרפי בחתך העיקרי.

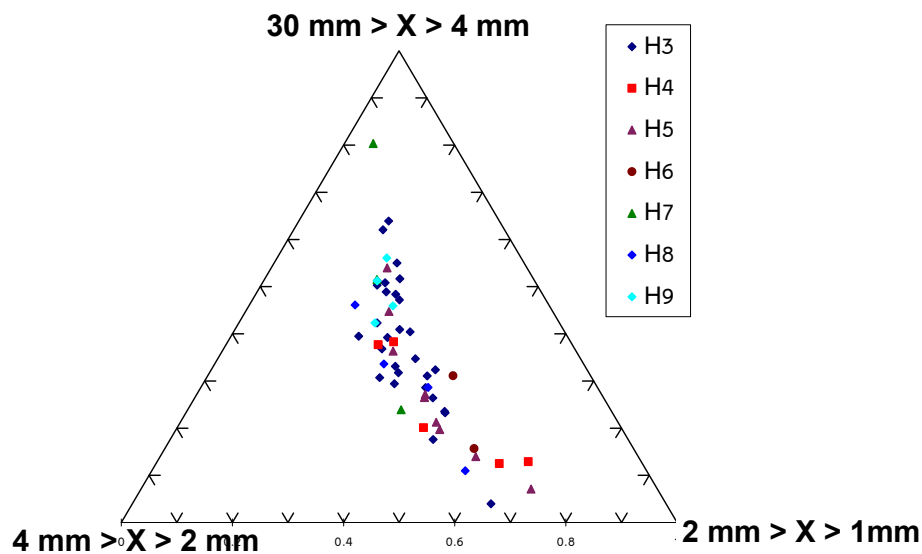
4.3.4. גרנולומטריה

גודל הגרגרים בשכבות הטוף משתנה, הן במשרעת והן בשכיחות בשכבות השונות. השונות בגודל הגרגר משקפת ומושפעת ממספר גורמים, ביניהם: עוצמת ההתפרצות, דרגת הפרגמנטציה ועוצמת וכיוון הרוחות במהלך ההתפרצות. דרגת הפרגמנטציה נגזרת מעוצמת ההתפרצות ועומקה ומן הליתולוגיה של הסלע (Kuppers et al., 2006).

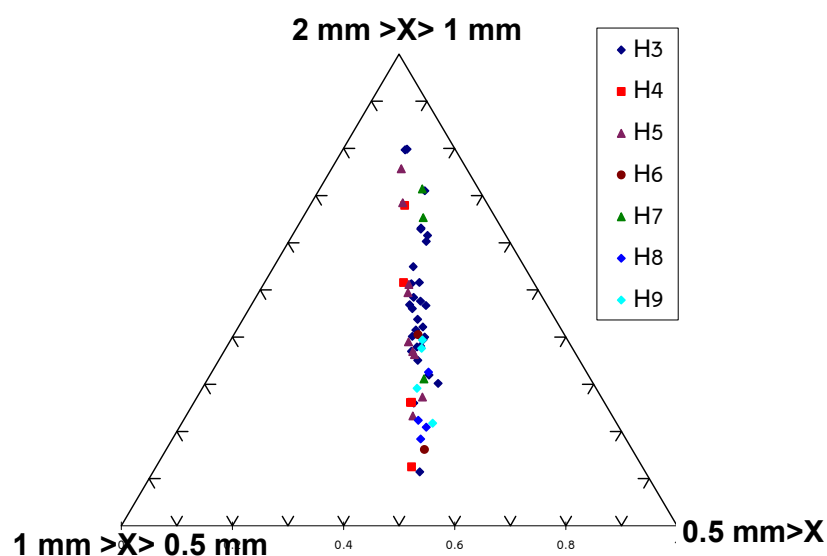
שברי סלע גדולים (בקוטר גדול מ-30 מ"מ) נמצאו בטוף בשכיחות שונה בשכבות שונות, הם מצויים ב-43% מעובי החתך העיקרי ונעדרים מ-57% הנותרים. השטח שהם תופסים בחתך מגיע עד 0.3% וגודלם מגיע עד לקוטר של 450 מ"מ (גודל החציון הוא 70 מ"מ). וראביליות ניכרת בהתפלגות גודלי הגרגר נצפתה גם במטריקס ($30 < \text{מ"מ}$) של הטוף. איורים 26 א', ב' ו'ג' מציגים את פיזור החומר הדק לפי החלוקה המשקלית של פרקציות הגדלים השונים בחתכים H3 עד H9. בבדיקת השונות בגודל הגרגר בין השכבות השונות עולה, כי ככל שקטן גודל הגרגר הנבדק, כך עולה הדמיון בין השכבות ולכן נבחרה פרקצית הגרגר הגס כמדד לשוני בין השכבות.



איור 26א': חלוקה משקלית של גדלי הגרגר בחומר בונה הטוף ($30 < \text{מ"מ}$) בכל דוגמאות הטוף שנבדקו.



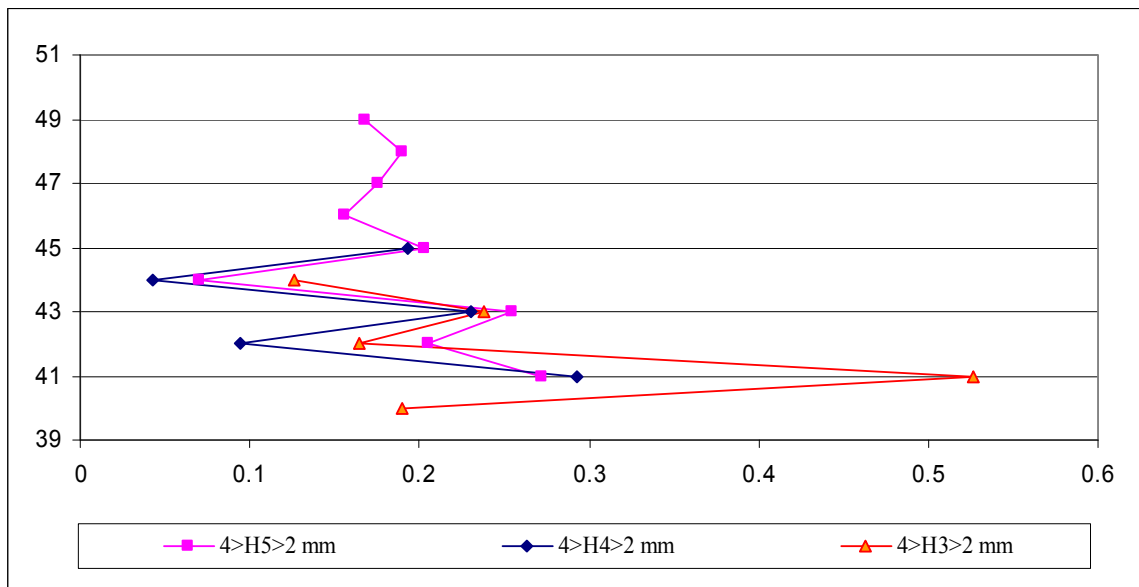
איור 26ב': חלוקה משקלית של גדלי הגרגר בחומר בונה הטוף ($30 > X > 4$ מ"מ) בכל דוגמאות הטוף שנבדקו. עיקר השוני בא לידי ביטוי בפרקצית גודלי הגרגר הגסים ($4 > X > 30$ מ"מ).



איור 26ג': חלוקה משקלית של גדלי הגרגר הקטנים מ-2 מ"מ בחומר בונה הטוף בכל דוגמאות הטוף שנבדקו. ניתן לראות שהחלוקה בין פרקצית גודל גרגר $X < 0.5$ מ"מ לגודל גרגר $1 > X > 0.5$ מ"מ בשכבות השונות היא ביחס קבוע של 1:1.

איור 27 מציג את החלק המשקלי של הגרגרים בגודל 2-4 מ"מ, לפי מיקומם הסטרטיגרפי בחתך. טווח גדלים זה מהווה 4-30% מהטוף (להוציא את שברי הסלע הגדולים) ובמקרה אחד, קבוצת גודל גרגר זה אף שולטת במאסף (> 50%). בהשוואה בין החתכים H3, H4 ו-H5 עולה, כי למרות שתפוצת גודל גרגר זה

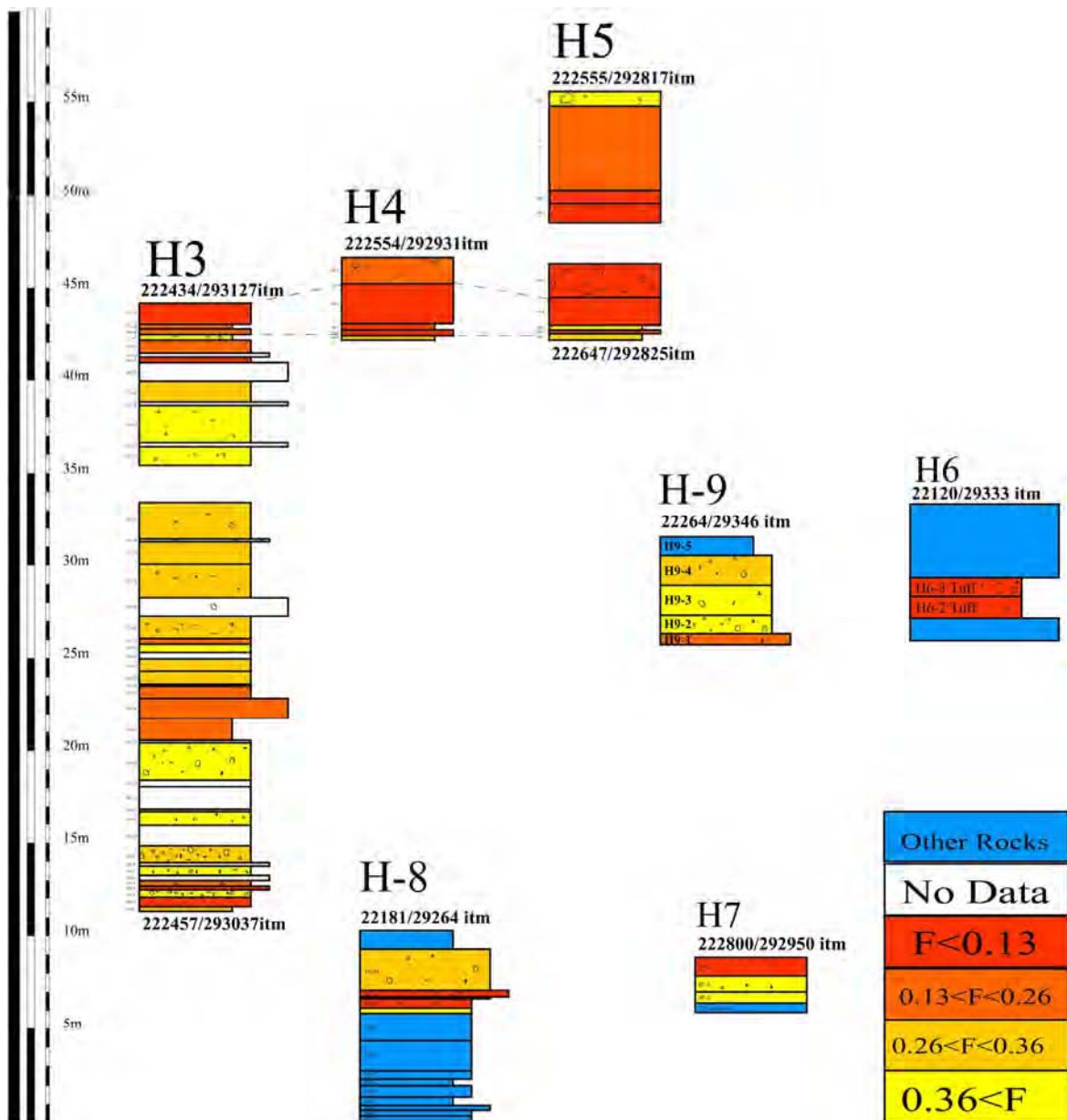
אינה אחידה בשכבות קורלטיביות, מגמת השינוי בין השכבות עקבית בשלשת החתכים. לדוגמה, אחוז הגרגרים בגודל הנדון בשכבה 43, גבוה מאשר בשכבות שמתחתיה ומעליה בכל שלושת החתכים (איור 27).



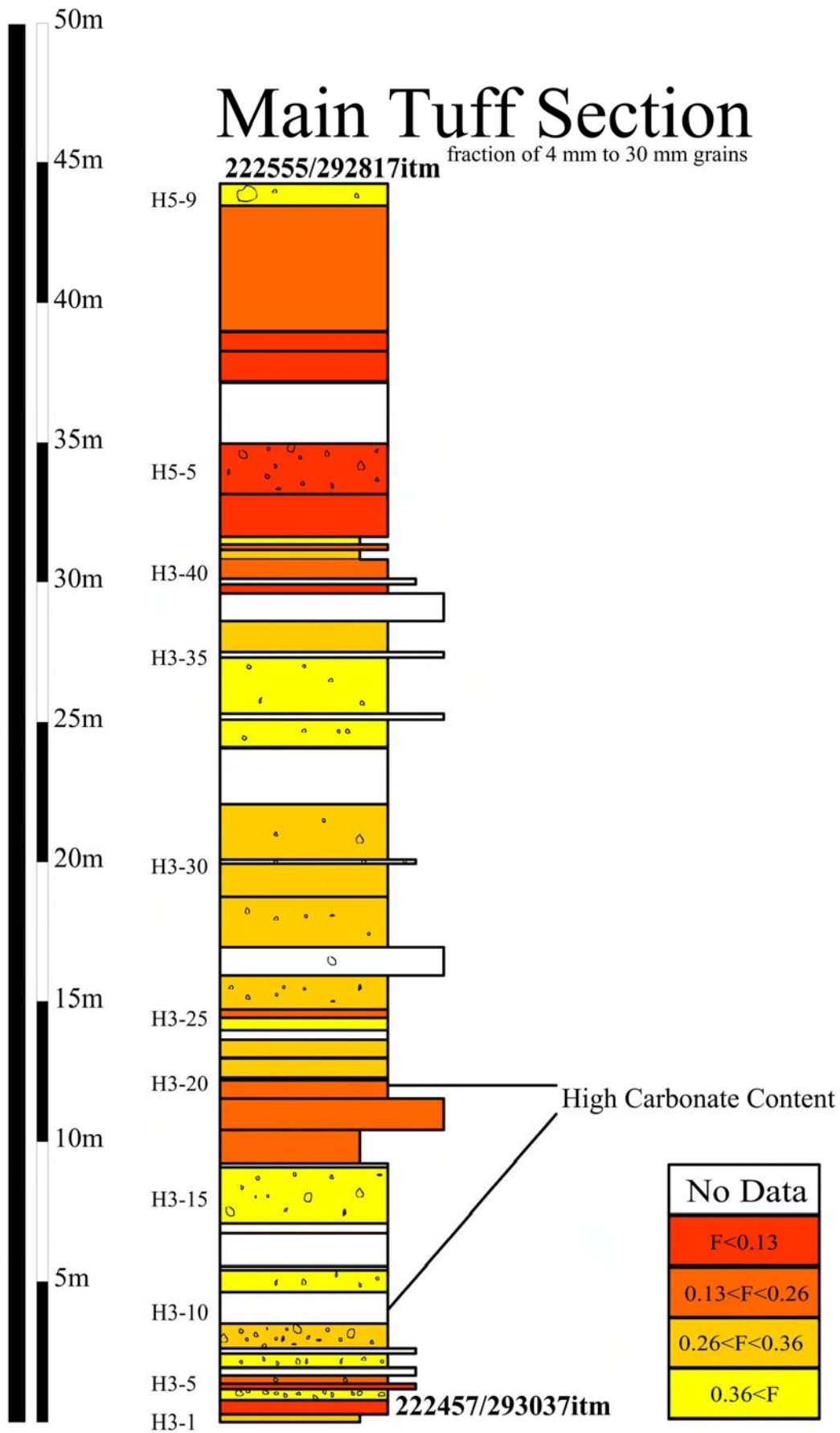
איור 27: חלקם המשקלי של הגרגרים בגדלי 2-4 מ"מ בחלקים הקורלטיביים של חתכים H5 ו-H4, H3 כאשר השכבות הקורלטיביות ממוקמות על ציר Y לפי מיקומן הסטרטיגרפי בחתך העיקרי (40-49).

איור 28 מציג את חלקם המשקלי של גרגרים בגדלים 4-30 מ"מ, בחתכי הטוף השונים. על החתכים מסומנים גם שברי הסלע הגדולים מ-30 מ"מ, כאשר הסימון משקף את מספר הפרגמנטים שנמצאו לאורך מטר אופקי אקראי בכל שכבה בחתך. מהשוואת הגרנולומטריה של החתכים עולה בבירור, כי שכיחות שברי הסלע הגדולים וריאבילית ואינה מוגבלת למחשופי החתכים הקרובים בלבד. בבדיקה שיטתית לאורך החתך העיקרי (איור 29) נמצא, כי קיימת קורלציה טובה בין תכולת שברי הסלע הגדולים, לגודל הגרגר במטריקס וכי השכבות העתירות בשברי הסלע הגדולים מ-30 מ"מ, הן גם בעלות מטריקס גס יחסית. כל השכבות המכילות שברי סלע גדולים, למעט שתי חריגות (H3-5 ו-H5-5, איור 29), מכילות מעל 26% פרקצית מטריקס גסה (4-30 מ"מ). כמו כן נמצא, כי הטוף בחלקו התחתון של החתך (פרט לאזור רבע החתך) גס יחסית ועתיר שברי סלע גדולים, בעוד שהשליש העליון והמרוחק יותר ממרכז הבריקה דק יותר וכמות שברי הסלע מועטת יחסית. ביתר פרוט, ניתן לחלק את החתך לחמישה חלקים מבסיס החתך: 0-9 מטרים – חומר גס, 9-12 מטר – חומר דק, 12-29 מטר – חומר גס, 29-43 מטר – חומר דק, 43-44 מטר (שכבה עליונה) – מורכבת חומר גס.

בשונה מהחתך העיקרי, בחתכים הרחוקים מן הבריקה, המצויים במדרונות החיצוניים של המאאר (חתך H6 וחתך H9) מצויים שברי סלע גדולים בתוך שכבות המורכבות גם ממטריקס דק.



איור 28: הפרקציה המשקלית של קלאסטים בגודל 4-30 מ"מ בשכבות השונות בטוף. מספר הנקודות בכל שכבה מציין את מספר שברי הסלע הגדולים מ-30 מ"מ, שנשפרו לאורך מטר אופקי אקראי בכל שכבה בחתך. בכחול מסומנות שכבות של סלעים שאינם טוף, כגון סקוריה, בזלת וקרקעות (פירוט הסלעים שאינם טוף מופיע באיור 17).



איור 29: החתך העיקרי בטוף, עליו מסומן חלקה המשקלי של קבוצת גודל גרגר 4-30 מ"מ וכן מאוירים שברי סלע (גדולים מ 30 מ"מ) שנמצאו לאורך מטר אופקי אקראי בכל שכבה בחתך (איור 7, H3, H4, H5).

4.4. אמפיבול בבריכת רם

גבישי אמפיבול מסוג קרסוטיט נמצאו בטוף בריכת רם ובבזלת כרמים עליונה (נספח 5). בטוף בריכת רם מצויים גבישי הקרסוטיט הן כמגקריסטים (איור 30) והן בתוך קסנוליטים מן הקרום התחתון ומן המעטפת העליונה (Mittlefehldt, 1984; Downes et al., 2004). בזלת כרמים עליונה, שהיא הבזלת האחרונה שקלחה באתר בטרם יצירת המאאר, מכילה פנוקריסטים של אמפיבול וקסנוליטים. חלק מן הקסנוליטים ממקור עמוק וחלקם פרגמנטים של בזלות מן החתך המקומי וגרגרי קוורץ שמקורם, כנראה, בסלעי הקרטיקון התחתון. דוגמה נוספת ויחידה של אמפיבול נמצאה בשקף בודד של בזלת מקילוחי סער, שנאספה בגשר הידודות. מכיוון שהדוגמה בודדת, רחוקה וחריגה בבזלת סער, ומשום שאין לה שיוך סטרטיגרפי ברור, וכן אינה שייכת לאחת משלוש האסוציאציות בהן נמצאו אמפיבולים בשכירות גבוהה, לא אתייחס אליה בהמשך.



איור 30: מגקריסט של אמפיבול קרסוטיטי שהוצא מן החתך העיקרי, טוף בריכת רם.

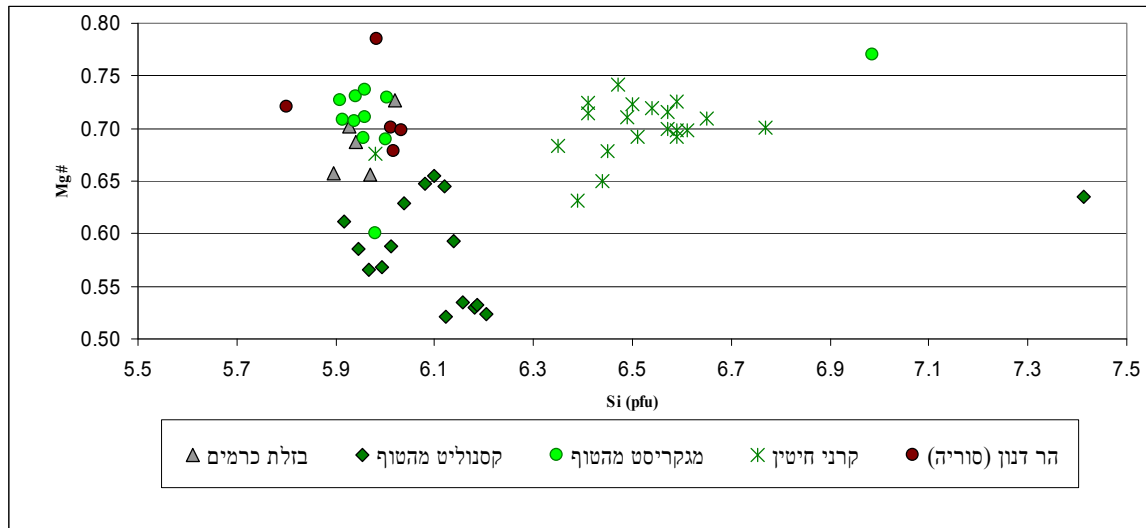
איור 31: החתך העיקרי, עליו מסומנות השכבות בהן נמצאו מגקריסטים של קרסוטיט או קסנוליטים.

המגקריסטים אינם מופיעים בחתך הטוף בפריסה הומוגנית והם נעדרים מבסיס החתך (איור 31). יש לציין כי בכל השכבות בהן נמצאו קסנוליטים, נמצאו גם מגקריסטים של אמפיבול. גודלם של המגקריסטים נע ממילימטרים בודדים ועד $60 \times 35 \times 35$ מ"מ. חלק מהמגקריסטים אוהדרליים עם פני גביש מפותחים (איור 30) ואחרים אנהדרליים ופאותיהם מוחלקות. ייתכן כי החלקת הפאות היא עדות להמסה חלקית של שולי הגביש (Nasir and Al-Rawas, 2006).

האמפיבולים שבבזלת כרמים עליונה זוהו בשקפים וגודלם מגיע עד 5 מ"מ. באמפיבולים אלו נמצאו אינקלוזיות אוליבין בהרכב דומה לזה של מיקרופנוקריסטים אוליביניים המצויים באותה בזלת ועל כן סביר כי גובשו מאותו נתך, וכי האמפיבולים מאוחרים להתגבשות המיקרופנוקריסטים האוליביניים (איור 15 ונספח 4)

באיור 32 מוצגים מספרי מגנזיום מול מספר אטומי הסיליקון ביחידת נוסחה באמפיבולים. האמפיבולים בקסנוליטים מטוף בריכת רם הם בעלי מספרי מגנזיום של 0.50-0.65. ערכים אלו נמוכים מהערכים

במגקריסטים שנמצאו בטוף (0.60-0.77) ובפנוקריסטים של בזלת כרמים עליונה (0.66-0.73). אמפיבולים שנאספו מטוף בהר דנון אשר נמצא בחלק הסורי של חארת א-שאם (Nasir and Al-Rawas, 2006) דומים למגקריסטים בטוף ולפנוקריסטים בבזלת כרמים. אמפיבולים בקסנוליטים מהקרום התחתון בבזלות מקרני-חיטין (גזית, 2005) נבדלים בתכולת סיליקה גבוהה יותר.



איור 32: מספר מגנזיום מול הסיליקה ליחידת נוסחה באמפיבולים (22 חמצנים) מבזלת כרמים, מקסנוליטים מטוף בריכת רם, ממגקריסטים בטוף בריכת רם, מקסנוליטים מקרני-חיטין (גזית, 2005) וממגקריסטים מהר דנון, סוריה (Nasir and Al-Rawas, 2006).

נוכחות אמפיבול בקסנוליטים אינה מפתיעה, אולם נוכחותו של המינרל בבזלת כרמים עליונה היא חריגה ביחס לכל בזלות הגולן. העובדה כי האמפיבולים מכילים אינקלוזיות אוליבין בהרכבם של מיקרופנוקריסטים בבזלת, תומכת בהיותם פנוקריסטים שגדלו במאגמה בשיווי משקל עמה ולאחר התגבשות דור ראשון של אוליבין. בעבודה על האמפיבולים שנמצאו בטוף של הר דנון, עלה מתוך השוואת יסודות עיקריים ויסודות קורט, כי האמפיבולים היו, כנראה, ברובם בשיווי משקל עם הנתך המארח בו גדלו (Nasir, 1995; Nasir and Al-Rawas, 2006). משילוב התצפית באינקלוזיות שבאמפיבולים ומעדות לקיום נתך בזלתי המצוי בשיווי משקל עם אמפיבול בהר דנון, ניתן להניח כי האמפיבולים בבזלת כרמים גובשו מהמאגמה המארכת. ניתן כמו כן להניח, שהמגקריסטים שבטוף, הדומים בהרכבם לאלה שבפנוקריסטים, גדלו מהמאגמה המארכת או מהמאגמה של בזלת כרמים עליונה.

4.5. גילי החתך הוולקני בבריכת רם

4.5.1. רקע

הסטרטיגרפיה של סלעי בריכת רם מעידה, כי המעבר מוולקניזם 'יבש' להתפרצויות פריאטומאגמתיות מאוחר מקילוח בזלת כרמים עליונה ומוקדם מקילוח סער. מבנה המאאר חודר אל בזלת כרמים עליונה ופרגמנטים שנגזרו ממנה מהווים מרכיב עיקרי בטוף. בזלת כרמים עליונה תוארכה ב-Ar-Ar ל- 223 ± 3 Ka (Goren-Inbar, 1985; Feraud et al., 1983). גיל זה מהווה חסם עליון לגיל המאאר. בזלת סער מכסה שכבות טוף מערבית למאאר והיא תוארכה בשיטת K-Ar ל- 140 ± 80 Ka מערבית לאתר (Mor, 1993). חסם תחתון לגיל המאאר נקבע על ידי ארליך וזינגר (Ehrlich and Singer, 1976) שערכו אקסטרפולציה לגיל רדיוקרבון מסדימנט אגמי מעומק 36 מ' מבריכת המאאר. בהנחת קצבי השקעה, הם קבעו את גיל הסדימנט האגמי העתיק ביותר ל-108 Ka. גיל צעיר יותר של תחילת ה Würmian (60 Ka) נקבע על ידי פולך מקידוח P8 (Weinstein, 1976), אם כי כיום מקובל שהגלציאל החל מוקדם יותר ויש לעדכן את התארוך.

בניסיון להצר את חלון הזמן בו התרחשה יצירת המאאר, תוארכו ב-OSL שני פלאוסולים המכוסים בטוף וארבע שכבות טוף. תארוך הפלאוסולים בוצע על גרגרי קוורץ אולי, בעוד שתארוך שכבות הטוף בוצע על גרגרי קוורץ, המהווים חלק מן הוולקניקלאסטים, המרכיבים את הטוף ומקורם בסלעי הקרטיקון התחתון, המצויים תחת החתך הבזלתי באזור. הנחת העבודה היתה כי חוסם ההתפרצות היה גבוה מספיק בכדי לאפס את סיגנל הלומינסנציה בגרגרים.

4.5.2. דוגמאות וגילים

נתוני גילי ה-OSL מוצגים באיור 35 ובנספח 6.

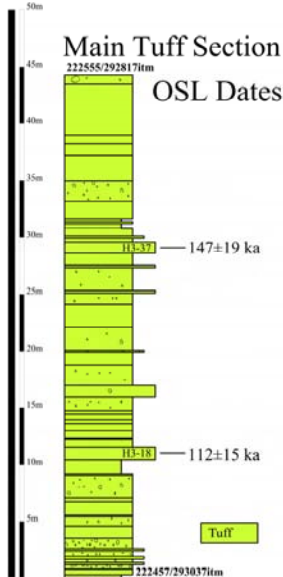
דוגמה BRU-2 היא של פלאוסול סקוריאי המכוסה טוף ומצוי ממערב לבריכה (ITM) (221357-293230) (איור 33). דוגמה זו תוארכה ל- 215 ± 54 Ka.

דוגמה BRU-3 היא דוגמת פלאוסול קלקריטי המכוסה טוף ומצוי ממזרח לבריכה (ITM) (222800-292950) והיא תוארכה ל- 166 ± 15 Ka.



איור 33: פלאוסולים בבריכת רם. מימין - פלאוסול סקוריאי המכוסה טוף ומצוי מערבית לבריכה (itm) (221357-293230). משמאל - פלאוסול קלקריטי המכוסה טוף המהווה את בסיס חתך H7 מזרחית לבריכה (itm) (222800-292950).

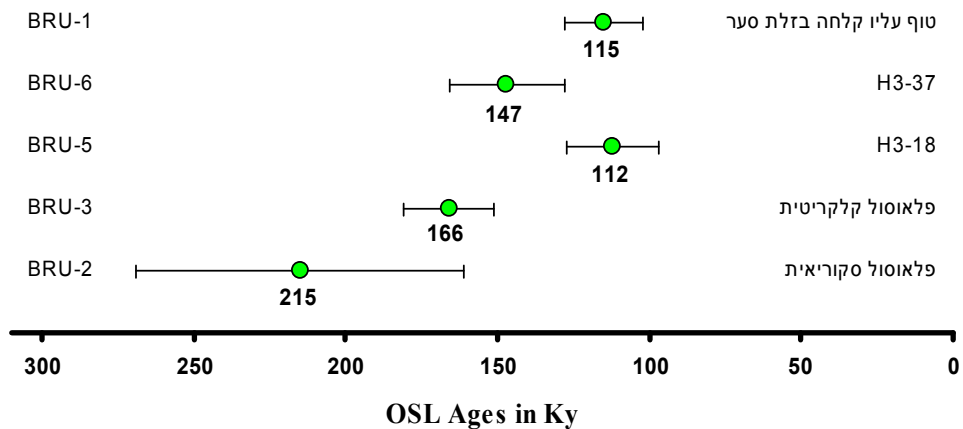
BRU-4 היא דוגמה משכבת הטוף השלישית בחתך H7, מעל BRU-3 (הפלאוסול הקלקריטי) והיא נתנה גיל של 332 ± 44 Ka. גיל זה אינו מתאים למיקומה הסטרטיגרפי של השכבה (מעל פלאוסול של 166 ± 15 Ka) והוא אף גדול מגילה של בזלת כרמים עליונה. מוצע כי סיגנל הלומינסנציה של גרגרי הקוורץ בדוגמה זו, לא עבר איפוס מלא במהלך ההתפרצות.



BRU-5 ו-BRU-6 הן דוגמאות משכבות בחתך העיקרי (H3-37 ו-H3-18, בהתאמה) והן נתנו גילים של 112 ± 15 Ka ו- 147 ± 19 Ka בהתאמה (איורים, 34 ו-35). לכאורה, הגילים של שתי שכבות הטוף אינם תואמים את מיקומם הסטרטיגרפי היחסי, אולם טווחי השגיאה מצמצמים את ההבדל ואף ייתכן כי, בדומה לדוגמה BRU-4, גם הסיגנל שלהן לא עבר איפוס מוחלט במהלך ההתפרצות. אם אכן זה המצב, ודוגמאות אלו לא עברו איפוס מלא, אז יש לאמץ את הגיל הצעיר מבין השניים כאמין יותר.

איור 34: חתך הטוף העיקרי עם גילי הלומינסנציה מסומנים על השכבות שנמדדו

דוגמה BRU-1 נאספה מחתך H6 המצוי מערבית לבריכה (22120-27110 itm) והיא נותנת גיל של 115 ± 13 Ka. הדוגמה היא משכבת טוף עליה קלחה בזלת סער (כ-20 ס"מ תחת הקילוח). הכוונה בדיגום והפרשנות שניתנת לגיל הדוגמה הם של גיל קילוח בזלת סער, מתוך ההנחה כי החום של קילוח בעובי של כ-4 מטרים איפס את סיגנל הלומינסנציה של גרגרי הקוורץ בשכבת טוף זו.



איור 35: גילי OSL מבריכת רם, ב-Ka.

דוגמה BRU-4 אינה נכללת, מתוך הערכה כי גרגרי הקוורץ בדוגמה זו לא עברו איפוס (ראה טקסט).

5. דיון

המורפולוגיה של בריכת רם שיוצרת שקע טופוגרפי המוקף בטבעת של טוף, הדומיננטיות בטוף של שברי סלע הסביבה ונוכחות חומר יובנילי זכוכיתי חסר וזיקולות, כל אלה תומכים בהנחת העבודה, כי בריכת רם הינה מאאר וולקני, אשר נוצר בסדרת התפרצויות פריאטומאגמטיות (Lorenz, 1986; Zimanowski, 1991).

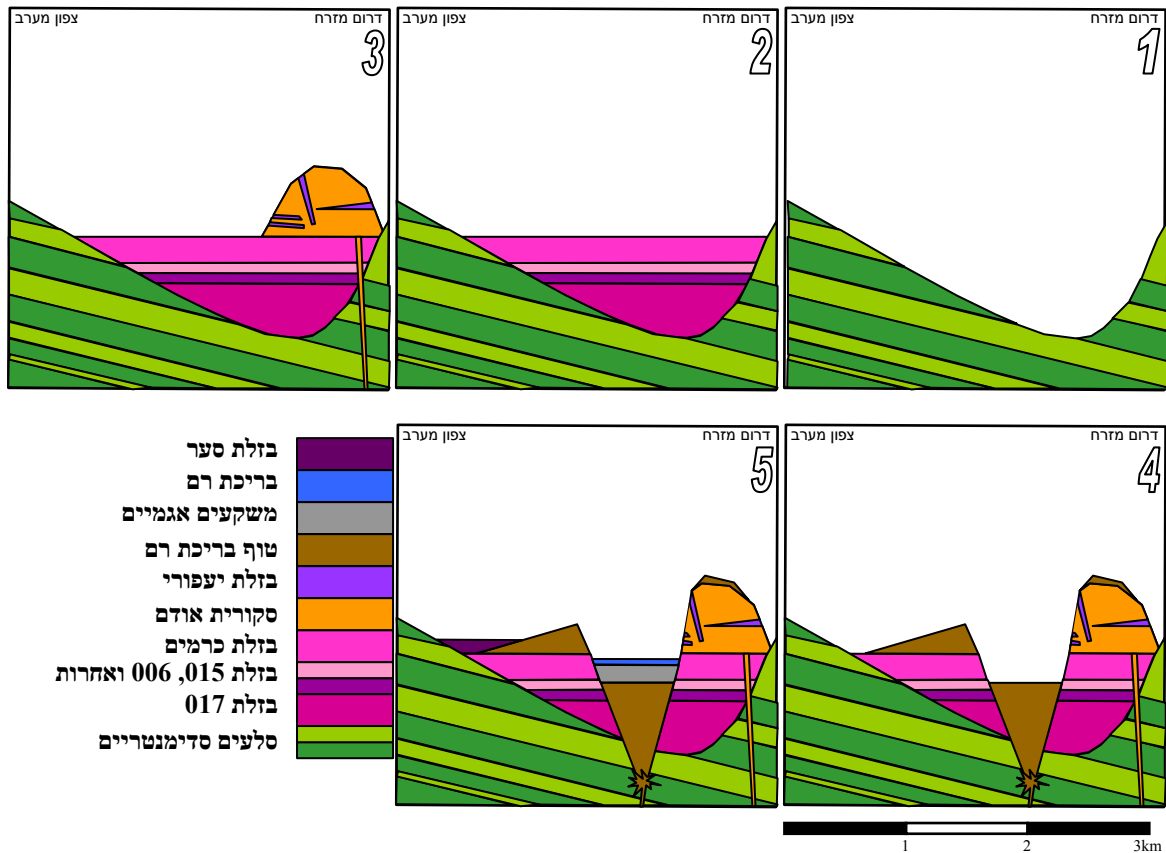
למעשה, עומק ה'בור' גדול אף יותר מזה שחשוף בשדה, מאחר והוא התמלא במים (עד כ-10 מטר עומק) ותחתם כ-90 מ' של משקעי אגם (איור 8, קידוח P8). קוטר שולי השקע (1000 עד 1200 מ') (איור 40) מצוי בטווח המימדים האופייני למבני מאארים מוכרים בעולם (Gencalioglu-Kuscu et al., 2007). לפי הגדרתם של Gevrek and Kaznci (2000), המחלקת מאארים ליגדולי 'קטן' ו'בינוני', בריכת רם הוא מאאר גדול. היותו כמעט סימטרי מציעה כי מיקום מרכז ההתפרצות סמוך למרכז הבריכה. מבחינה הידרולוגית, השקע הינו 'חלון' אל האקוויפר המקומי.

ערב ההתפרצות הפריאטומאגמטית היה אזור המאאר חלק משקע טופוגרפי (להלן: "עמק רם"). בשלב זה השתרע עמק רם בגבולות בקעת יעפורי והיה מלא ברצפים וולקניים, ומשום כך בעל שיפועים מתונים. תאי שטח גבוהים של מסלע סדימנטרי מגיל יורא עד איאוקן הגדירו את גבולותיו מצפון, ממזרח ומדרום. במערב העמק השתרעה רמה בזלתית של קילוחי עין זיוון. ניקוזו של העמק היה כנראה דרך נחל סער הקדום, אם כי קיימת אפשרות כי העמק היה בעל ניקוז קרסטי פנימי.

המאאר נוצר במפגש של המאגמה העולה עם מי תהום סמוך לפני השטח (ראה דיון בהמשך). האנרגיה התרמית של המאגמה הומרה באנרגיה מכאנית של קיטור, תוך קריעת פני השטח, פרגמנטציה של המגמה וריסוק של סלעי הסביבה. טווח היחסים מיסומאגמה, האופטימאלי לפיצוץ פריאטומאגמתי וליצירת מאאר, מצוי סביב 3:1 (Wohletz and McQueen, 1984). יחסים שונים מאלה ייצרו התפרצויות בעוצמה פחותה או מופעים פריאטומאגמטיים אחרים, כגון חרוטי טוף או נביעות קיטור.

5.1. היסטוריה גיאולוגית

את ההסטוריה הגיאולוגית של בריכת רם ניתן לחלק לארבעה שלבים. שלב ראשון הוא השלב הפרה-וולקני, בו מתפתח שקע עם טופוגרפיה חריפה (עמק רם, איור 36, -1) בין מדרונות החרמון לרכס פרה-בזלתי (רכס ששיאו באזור תל מנפוחה, כ-2 ק"מ ממזרח לבריכה). שלב שני הוא שלב הוולקניזם היבש, בו מתמלא עמק רם בחתך עבה של רצפים וולקניים, הכוללים בזלות וסקוריה (איור 36, -2-3). בשלב השלישי מתרחש מעבר מוולקניזם 'יבש' לוולקניזם פריאטומאגמתי, בו נוצרו המאאר בפיצוץ תחת פני השטח, והפרגמנטים שנגזרו בפיצוץ זה מרכיבים את טוף בריכת רם (איור 36, -4). ואילו השלב הרביעי מסמל את סיום הוולקניזם הפריאטומאגמתי וחזרה לוולקניזם יבש, בו קולחת בזלת סער לאורך מדרונותיו המערביים של המאאר (איור 36, -5).

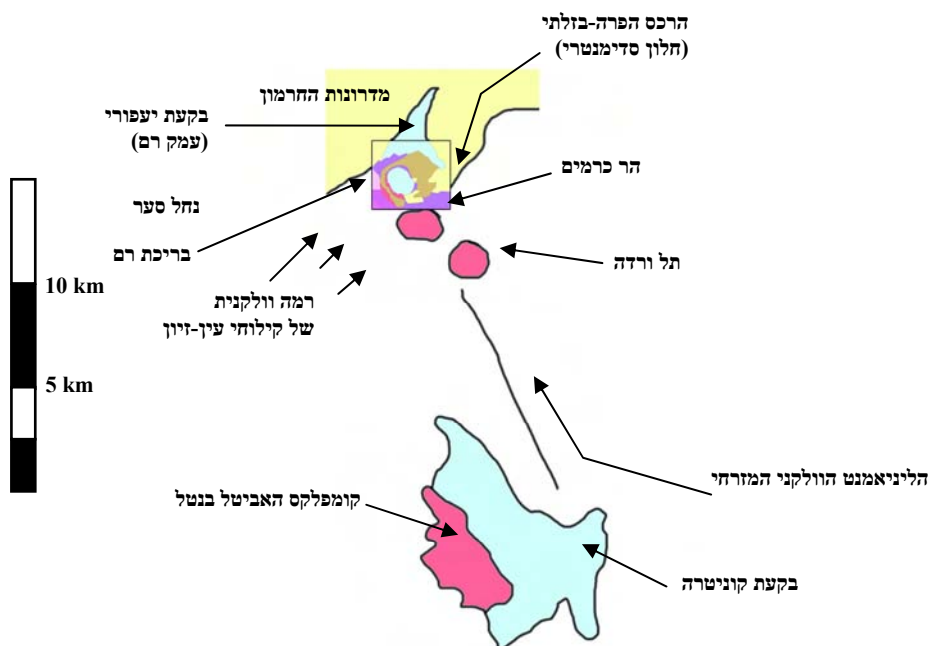


איור 36: תאור סכימאטי של שלבי התפתחות החתך של בריכת רם.

1. שקע רם מוגבל מצפון במדרונות החרמון ומדרום ברכס פרה-בזלתי. השקע, בשלב זה, בעל טופוגרפיה חריפה.
2. שקע רם מתמלא ברצף וולקני הכולל את בזלות 017, 015, ו-006 (הקבורות בתת-הקרע). הבזלת האחרונה שקולחת בעמק (טרם הוצרות המאר) היא בזלת כרמים עליונה.
3. בתוך שקע רם, על גבי בזלת כרמים, מתפתח חרוט סקוריה המורכב מסקורית אודם ומחדרים של בזלת יעפורי.
4. אינטראקציה של מאגמה עם מים סמוך לפני השטח, הביאה להתפרצויות פריאטומאגמטיות וליצירת מבנה מאאר-דיאטרמה, החודר דרך החתך הוולקני ועד הסלעים הסדימנטריים ומכסה אותם בטוף בריכת רם.
5. א. ממערב לבריכה, קילוח של בזלת סער מכסה על בזלת כרמים וטוף בריכת רם.
ב. המאאר מהווה חלון אל מי התהום של בקעת יעפורי ובתוכו מצוי אגם המשקיע סדימנטים אגמיים.

5.2. התשתית והטופוגרפיה הפרה-בזלתית

המסלע העתיק ביותר החשוף באזור האתר הינו סלעים סדימנטריים מן היורא והקרטיקון (Mor, 1987). סלעים אלו הם חלק ממשקעי הפלטפורמה הסדימנטרית, המכסה את לוח ערב ותת-לוח הלבנט. מחשופים סדימנטריים אלו מצויים מצפון לבריכת רם כמדונותיו הדרומיים של מבנה החרמון. במדרונות אלו נטויים הסלעים לכיוון דרום מזרח. ממזרח ומדרום מזרח לבריכה מופיע 'חלון סדימנטרי' (רכס פרה-בזלתי על פי Dafny et al., 2003) (איור 37). בדרום מזרח הבריכה חשופים סלעים קרטיקוניים של התצורות דיר חנא ובע'נה (איור 3). בין מחשופים אלו של מדרונות החרמון מצפון לבריכה וה'חלון הסדימנטרי' ממזרח ומדרום לה, התפתח שקע רם (איורים 3, 5, 9, 36). פני השטח של השקע מכוסים כיום בטוף, באגם, בסחף ובאדמות חקלאיות, אולם בנתוני קידוחים מתת-הקרקע, ניתן לראות כי השקע מלא ברצפים וולקניים עבים. קידוחים P4 ו-P5, שחדרו במרכז השקע הגיעו לעומקים של מעל 60 מ', עברו דרך רצפי בזלות בעובי של 47 מ' ו-28 מ' בהתאמה ולא הגיעו למגע הרצף הוולקני עם הסלעים הסדימנטריים (איור 8). בדרום הבריכה, סמוך למחשופים של סלעי דיר חנא, המגיעים עד 100 מ' מעל הבריכה, הגיע קידוח מסעדה 3 (איור 7) אל מגע הסלעים הוולקניים עם התשתית הסדימנטרית בעומק של כ-200 מ'. תצפיות אלו מעידות, שהטופוגרפיה שקדמה להצטברות החתך הוולקני באתר הייתה חריפה ביותר. השקע השתרע באזור נחל סער העליון של היום, והיה מוגבל מדרום מזרח על ידי רכס פרה-בזלתי שנמשך ממנפוחה (2 ק"מ ממזרח לבריכה) בכיוון דרום מערב (Dafny et al., 2003). הנטיות בסלעי התשתית הסדימנטרית באזור בריכת רם דומות (אם כי לא זהות) לאלה שבחרמון (לדרום מערב ולדרום מזרח, איור 5), ועל כן שוללות את האפשרות, שהשקע הינו קער מקומי. החריפות של השקע מצביעה על מקור ארוזיבי. במחשופי מחצבה מדרום למאאר ממלאת בזלת כרמים חללים קרסטיים (איור 38), תצפית המעלה את האפשרות, כי השקע האמור היה קארסטי. קיומו של שבר בדרום הבריכה (ראה דיון בהמשך) עשוי אף להעיד על מרכיב טקטוני ביצירת השקע



איור 37: מפה סכימאטית של אלמנטים וולקניים וטופוגרפיים באזור בריכת רם.



איור 38: בזלת כרמים עליונה ממלאת חללים קרסטיים בקרבונטים קרטיקוניים (קנומן-טורון) מדרום למאאר בריכת רם (2725332/792607).

5.3. הוולקניזם הבזלתי- סטרומבוליאני והפליאוגיאוגרפיה ערב יצירת המאאר

בעמק רם הצטבר חתך בזלות בעובי של לפחות 200 מ', וככל הנראה גדול בהרבה (ראה דיון בהמשך). חלק מבזלות אלה חשוף על פני השטח (כרמים תחתונה, כרמים עליונה, עין זיון ויעפורי, ראה איור 5) וחלק - רק בתת-הקרקע, או שהוא מיוצג כפרגמנטים בטוף (בזלות 017, 015, ו-006, איור 9, ונספח 1). בנוסף לקילוחי בזלת משולבת ברצף הוולקני גם סקוריה (התפרצויות סטרומבוליאניות) המופיעה כחרוט בדרום מערב הבריכה כפרגמנטים בטוף ובתת-הקרקע.

באזור הבריכה ובמערב בקעת יעפורי מצויים מחשופי בזלת כרמים בגובה אחיד של כ-950 מטר מעל פני הים, גובה דומה לזה של בקעת יעפורי. מוצע, על כן, כי לאחר מילוי השקע בבזלות, היה התבליט באזור שקע רם פחות או יותר שטוח (איור 36, 4). השקע סגור מצפון על ידי רכס החרמון וממזרח ומדרום - על ידי תבליט סלעי משקע מקומי הנע בין 1,000 ל-1,100 מ' מעל פני הים (איורים 3, 36). ממערב סוגרת את השקע רמה בזלתית של קילוחי עין זיון, שגבהה נע בין 980 ל-1,000 מטר והיא נטויה קלות בכיוון צפון. נראה, על כן, שהניקוז של העמק היה גם אז דרך ערוץ הסער היוצא בקצהו המערבי של השקע (איורים 3, 4, 36). אפשר גם, כי לעמק היה ניקוז פנימי דרך הבזלות אל מערכת קרסטית בתת-השטח או דרך סלעי המשקע החשופים בדרום השקע.

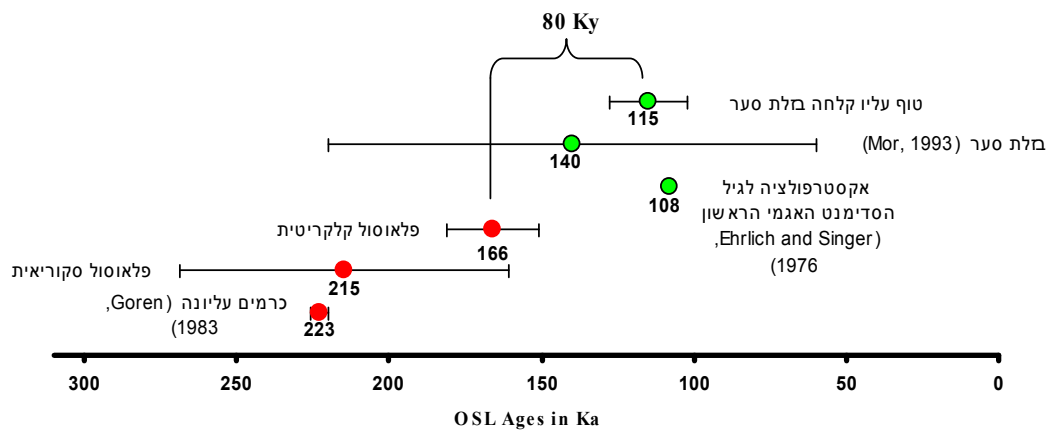
5.4. גיל ההתפרצות הפריאטומאגמתית

הוולקניזם בחארת א-שאם הוא אוליגוקני עד הולוקני (Weinberger et al., 2001; Ilani et al., 2001; Shaw et al., 2003). הסלעים הוולקניים בגולן הם פליוקניים עד פלייסטוקניים, ובהכללה, הסלעים הצעירים יותר מצויים בצפון מזרח הרמה, שם רוב הוולקניזם הוא פלייסטוקני (Mor, 1993). קומפלקס אביטל-בנטל, המצוי כ-12 ק"מ מדרום לבריכת רם (איורים 2, 37), תוארך לאחרונה ב-Ar, ונמצא כי המעבר מהתפרצות סטורומבוליאנית לפריאטומאגמיזם אירע לפני 100-120 Ka (Weinstein et al., unpublished data).

בעבודה הנוכחית נקבע גיל הפלאוסול הקלקריטי המכוסה בטוף במזרח המאאר (166 ± 15 Ka), כגבול עליון לגיל האירוע הפריאטומאגמתי, וגיל דוגמת הטוף המייצגת את קילוח סער (115 ± 13 Ka), כגבול תחתון. גילי הלומניסציה של שלוש שכבות טוף מן החתך העיקרי ומחתך H7, לא הראו התאמה טובה עם מגבלות הסטריטיגרפיה והעבודות הקודמות. חוסר ההתאמה יוחס לאיפוס לא מלא של הסיגנל של גרגרי הקוורץ בטוף, עובדה המתיישבת יפה עם היות התפרצויות פריאטומאגמטיות מאופיינות בטמפרטורות נמוכות (Schmincke, 2004).

התפרצויות פריאטומאגמטיות היוצרות מאאר כבריכת רם מאופיינות כקצרות מועד ועשויות להמשך ממספר ימים עד כ-15 שנה (Lorenz, 2007). ברצף הטוף של בריכת רם לא נמצאו פלאוסולים ואין סיבה לחשוב, שמשך יצירתו ארוך יותר מהאמור. שני החסמים לגיל ההתפרצויות הפריאטומאגמטיות עולים בקנה אחד עם עבודות התיארוך הקודמות מן האזור (איור 39) ומצמצמים את חלון הזמן בו התרחשו האירועים הפריאטומאגמטיים, ל-80 אלף שנה, שבין 180 Ka (166 ± 15 Ka) ו- (115 ± 13 Ka) 100 Ka). כאמור, בסופו של פרק הזמן הזה ארעה גם ההתפרצות הפריאטומאגמטית בקומפלקס אביטל-בנטל.

בדומה לקומפלקס אביטל-בנטל ולמאאר בריכת רם, גם בלפחות חמש מערכות וולקניות, שהתפתחו לאורך העתקים בשדה האיפל המערבי שבגרמניה, התרחשו מעברים מפעילות סטורומבוליאנית לפריאטומאגמטית ותלי הסקוריה חדלו לפעול כשהתפתח מאאר על אותה מערכת הזנה. יתכן כי המאגמה שהזינה את תלי הסקוריה הסמוכים, נדחפה אל המאאר כתוצאה מירידת הלחץ תחת המאאר בעקבות התחזרות הדיאטרמה (Lorenz, 2007).



איור 39: גילים מקסימליים ומינימליים של ההתפרצות הפריאטומגמתית, כפי שנקבעו על ידי תארוך יחידות שקדמו להתפרצות (אדום), וכאלה המכסות את המשקעים הפריאטומגמתיים (ירוק), בהתאמה.

5.5. הוולקנולוגיה של מאאר בריכת רם

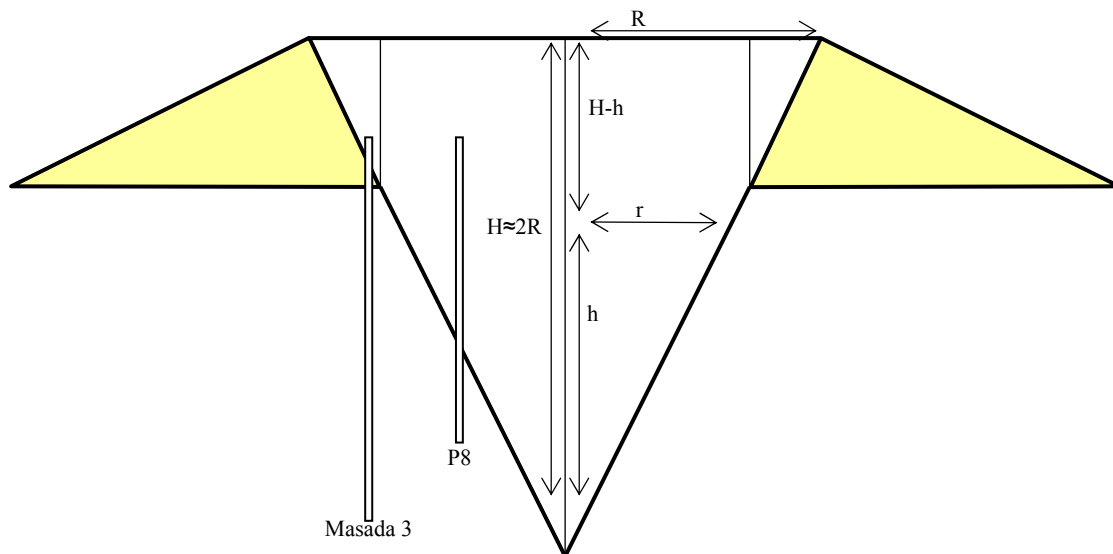
משקעי הטוף מכילים מידע רב על ההתפרצות הפריאטומגמתית. גודל הגרגר מעיד על עוצמת הפרגמנטציה ואנרגיית הפיצוץ (Zimanowski et al., 2003; Wohletz and McQueen, 1984), ופיזור הטוף וצורת הרבדתו מעידים על מנגנוני ההובלה ואופי ההתפרצות. הליתולוגיה של הפרגמנטים בטוף מעידה על הליתולוגיה שהרכיבה את חלל הדיאטרמה ועל עומק הפיצוץ. השוואת המידע הליתולוגי של הקלאסטים בטוף עם הסטרטיגרפיה באזור, בשילוב עם אופי ועוצמות ההתפרצויות הפריאטומגמתיות, מאפשרת זיהוי של תהליכים ומאורעות שיצרו ועיצבו את המאאר של בריכת רם.

5.5.1. טוף בריכת רם

טוף בריכת רם חשוף בשטח של 1.15 קמ"ר, על מדרונותיו הפנימיים והחיצוניים של המאאר. חתך הטוף העבה ביותר שנמדד – 46 מטר – נמצא במדרון הפנימי בצידו הדרום מזרחי של המאאר, בעוד החתכים הטיפוסיים אינם עולים על 10 מטר. פיזורו של הטוף מוגבל ומגיע עד כ-1.2 ק"מ ממרכז המאאר, והערכה שמרנית לנפחו הכללי עומדת על 0.01 ק"מ מעוקב. נפח זה אינו עולה בקנה אחד עם הערכות המתבססות על הנפח החסר בבור של המאאר. בהנחה שפני השטח עמדו בגובה של 950 מ' מעל פני הים, ובניקוי הסדימנטים האגמיים, מתקבל בור בעומק 110 מ' (איור 40, H-h). בור זה הוא חלק מקומפלקס מאאר-דיאטרמה, ולפי Lorenz (1986), עמקו (שורש הדיאטרמה, איור 40, H) פרופורציונלי ודומה לקוטר בסיס החרוט (קוטר הבור, איור 40, 2R). בחישוב המתבסס על קוטר בסיס של 1,000 מ' מתקבל נפח חרוט של 0.26 ק"מ מעוקב (ראה בהמשך) ונפח בור (החומר החסר) של 0.073 ק"מ מעוקב. היות ופרגמנטים של סלע הסביבה מהווים 75% מהחומר של הטוף (פרק תוצאות, טוף בריכת רם), הרי שנפח מרבצי הטוף סביב הברכה אמור להיות 0.091 ק"מ מעוקב. נפח זה אף נמצא בהסכמה עם עבודות אחרות. לדוגמה, לפי Mertes (1983), הנפח של החומר הוולקניקלאסטי הנפלט ממאאר שקוטרו 1 ק"מ הוא 0.1-0.075 ק"מ מעוקב. בעבודה שערכו Németh et al. (2000) על Tihany

East Maar שבמערב הונגריה, חושב נפח פליטה של 0.11 ק"מ מעוקב במאאר שגודלו דומה לזה של בריכת רם.

נפח הטוף הקטן משמעותית שנמצא בבריכת רם הינו, ככל הנראה, תוצאה של התבליט המקומי, שהביא להסרתו מן השלוחות. מערבית למאאר מכסה קילוח סער על חתך טוף, שעוביו למעלה משני מטר (חתך H6 איורים 7, 017), בעוד שמצפון למאאר על מדרונות החרמון, במרחק דומה ממרכז המאאר, לא מצוי טוף כלל. השטח סביב המאאר, להוציא את מדרונותיו הפנימיים, מנוקז כולו על ידי נחל סער ויובלו ואדי אבו-סעיד. סביר כי נפח לא קטן של טוף הורבד בבקעת יעפורי ועל מדרונות החרמון, כמו גם על הרכס הפרה-בולתי שמדרום ומזרח לבריכה, וזה הוסר באירוזיה והובל על ידי נחל סער אל הבקע.



איור 40: שרטוט סכימאטי של מבנה מאאר-דיאטרמה. R – רדיוס לוע המאאר עומד על כ-500 מטר. H – עומק הדיאטרמה, מוערך בכ 1,000 מטר (פי שניים מן הרדיוס). קידוחים P8 ו-Masada 3 מסומנים על פי הערכת מיקומם בחלל הדיאטרמה. 5.5.4. המאאר והדיאטרמה

5.5.2. עוצמות התפרצות

היחס מים/מאגמה מכתוב את עוצמת ההתפרצות וממנה נגזרת עוצמת הפרגמנטציה, כאשר פיצוץ אלים יותר מביא לפרגמנטציה יעילה ולקלאסטים דקים יותר באפר ובטוף (Sheridan and Wohletz, 2003; Zimanowski et al., 2006; Kueppers et al., 1983). מניתוח מגמות השינוי בתפוצת גודל הגרגר בחתך העיקרי רואים לפחות שני מחזורים ברורים של עליה וירידה בעוצמת ההתפרצות (איור 29). בחתך חמישה שלבים בעלי עוצמות התפרצות שונה: השלבים הראשון (9-0 מטר) והשלישי (29-12 מטר) והחמישי (45-44 מטר) מורכבים מחומר גס גרגר, בעוד שהשני (12-9 מטר) והרביעי (43-29 מטר) - מחומר דק גרגר. השכבה העליונה ביותר שנמדדה בחתך מהווה את השלב החמישי וגם היא, כאמור, מורכבת מחומר גס גרגר. הבדלים אלה בגודל הגרגר, הנובעים משינויים בעוצמת התפרצות, משקפים, ככל הנראה, שינויים ביחס המים והמאגמה ועשויים להעיד על שינויים בלחץ המאגמה, או בספיקת מי התהום המחלחלים בחלל הדיאטרמה.

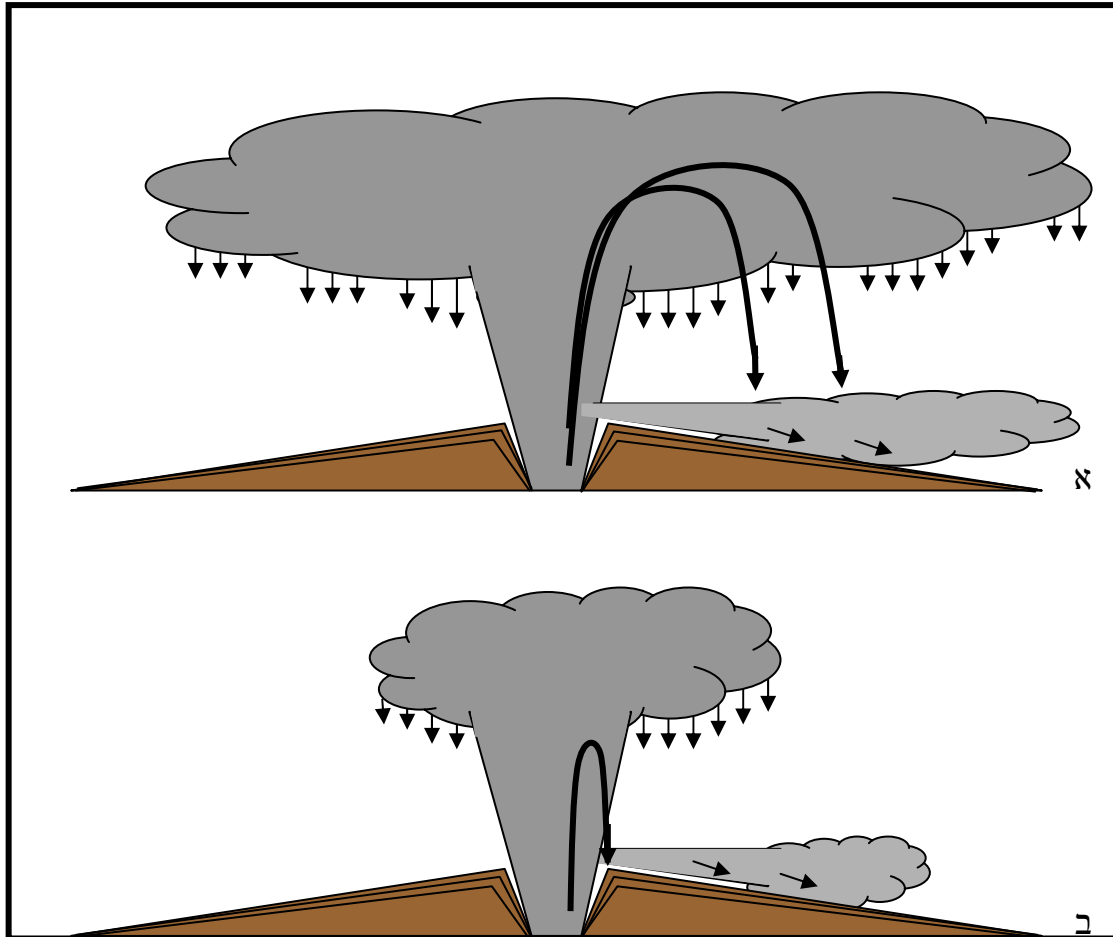
שינויים בעוצמת הפרגמנטציה או בגרנולומטריה מתוארים בחתכים פריאטומאגמטיים רבים, דוגמת Narko'y maar שבמרכז אנטוליה (Gevrek and Kazanci, 2000), Crater Hill שבניו זילנד (Houghton et al., 1999), Tihany East Maar שבמערב הונגריה (Németh et al., 2000) ו-Ukinrek maars שבאלסקה (Self et al., 1980). בלוע המכונה "The Crater" אשר באי הדרומי של ניו זילנד, מפורשים המעברים הגרנולומטריים בחתך כשינויים בעוצמת ההתפרצות (Németh, 2000). ב-Atexcac crater שבמזרח מקסיקו מצוי חתך פליטת מאאר של 60 מטר, המחולק לארבעה מקטעים: שניים מהם גסי גרגר ושניים - דקי גרגר. שינויים אלו מפורשים כשינויי ספיקה ויחס של המים והמאגמה באתר ההתפרצות (Carrasco-Núñez et al., 2007). גם השינויים בחתך הפירוקלאסטי של Capelas tuff cone שבסאן מיגל (ארכיפלג האיים האזוריים), מיוחסים לשינויים ביחסי המים והמאגמה של הפיצוצים הוולקניים (Solgevik et al., 2007).

5.5.3. מנגנוני הובלה ואופי ההתפרצויות

בהתפרצויות פריאטומאגמטיות מובל עיקר החומר הוולקניקלאסטי בשני אופנים. הראשון הוא בהתרוממות אל על בענני התפרצות (eruption clouds), הנראים כענן אנכי (דוגמת ענן קומולוס) והשני בנחשולים וולקניים (base surges), הנראים כנחשול צמוד קרקע, היוצא ממרכז ההתפרצות כזרוע, או כטבעת רדיאלית (Fisher and Waters, 1970). הרבדת חומר מענן התפרצות מאופיינת בשכבות בעובי אחד. שכיחות פרגמנטים גדולים, המלווים בכיפוף השכבות תחתיהם (impact sags) בסדימנט הפריאטומאגמטי, מעידה על הרבדה במנגנון של Fall (Gençalioglu-Kuşcu et al., 2007). חומר המורבד בנחשולים וולקניים מתאפיין בהיעדר פרגמנטים גדולים ובשכבות דקות עם שינויי עובי, אנטי-דיונות ושיכוב צולב ומדורג (Lorenz, 1970; Fisher and Waters, 1970; Gençalioglu-Kuşcu et al., 2007). בחתך הטוף העיקרי בדרום מזרח הבריכה מצויים פרגמנטים גדולים בכ-43% מן החתך (מן החתך ולא מן השכבות), ובכ-14% מהחתך מצויות סטרוקטורות המאפיינות נחשולים וולקניים. בכמחצית מהשכבות נושאות המאפיינים של נחשולים (7% מן החתך) מופיעים גם פרגמנטים גדולים, המעידים על מנגנון משולב של הרבדה של חומר שירד מענן התפרצות או במעוף בליסטי על נחשול וולקני (איור 41).

בחתך העיקרי, המצוי במדרונותיו הפנימיים הדרום מזרחיים של המאאר, קיימת התאמה טובה בין הופעת מטריקס גס, לבין נוכחות פרגמנטים גדולים (< 30 מ"מ). למעט חריגה אחת, מצויים הפרגמנטים הגדולים רק בשכבות בהן חלקו המשקלי של הגרגר הגס (30-4 מ"מ) עולה על 13% מן החומר בונה הטוף (איור 29). לעומת זאת, בחתכים שנערכו רחוק יותר ממרכז המאאר (H-6 עד H-9), על מדרונותיו החיצוניים של המאאר, מצויים פרגמנטים גדולים בארבע מתוך חמש שכבות בהן הפרקציה המשקלית הגסה קטנה מ-13% (איורים 28, 29). תצפיות אלה מעידות על פעילות בו זמנית של מנגנוני הובלה שונים. פיצוץ בעוצמה עזה מביא מחד לפרגמנטציה יעילה (Zimanowski et al., 2003), בה נוצר אפר דק יחסית בעוד שהפרגמנטים הגדולים נזרקים למרחק רב (האסוציאציה של הטוף הדק והפרמנטים הגסים בחתכים H6 עד H9, איור 41א). לעומת זאת, בפיצוץ פחות חזק נוצר (1) טוף גס יחסית ו (2) הפרגמנטים הגדולים נופלים קרוב יותר למרכז ההתפרצות (החתך העיקרי, איור 18).

נוכחות בו-זמנית של משקעי Surge ופרגמנטים גדולים תוארה באתרים פריאטומאגמתיים נוספים, ביניהם Cora maar שבתורכיה (Gençalioglu-Kuşcu et al., 2007) ו-Neapolitan Maar שבאיטליה. באחרון, הפרט התחתון של המשקעים הפריאטומאגמתיים מכיל 13 תת-יחידות, המורכבות ממשקעי Surge ו-Fall המשולבים זה בזה. באתר נערכה עבודה סטרטיגרפית וגרנולומטרית, המציעה כי התפרצות בודדת הפעילה שני מנגנוני הובלה בו זמנית (Wohletz et al., 1995).



איור 41: בסדימנטים הפירוקלאסטיים של בריכת רם משולבים מנגנוני הובלה של fall ו-surge, המעידים על הופעת שני המנגנונים בו זמנית במהלך ההתפרצויות. פיצוצים עוצמתיים יחסית (א) הביאו לפרגמנטציה טובה יותר ולהוצרות סוף דק גרגר ולפיזור פרגמנטים גדולים למרחק רב יחסית, בעוד פיצוצים בעוצמות פחותות (ב) מתאפיינים בחומר גס יחסית ובתפוצת פרגמנטים גדולים רק בסמוך למוקד ההתפרצות.

5.5.4. המאאר והדיאטרמה

התפרצויות פריאטומאגמתיות מתרחשות בלחץ ליתוסטטי נמוך מ-30 bar, כלומר בעומקים רדודים של עד כ-120 מטר (Lorenz, 1986, 2007). אין סיבה להניח שמפלס מי התהום בזמן ההתפרצות היה שונה משמעותית מהמפלס הרדוד המצוי כיום באתר. עם התפתחות הארוע גדל עומק הפיצוץ, כתוצאה מחלחול המים בחרוט הדיאטרמה והעמקת מפגשם עם המאגמה העולה. עליית עומק הפיצוץ מגדילה את אזור הריסוק שמעליו ואת הדיאטרמה. שולי המאאר מגיבים לגידול הדיאטרמה בקריסת שוליו הפנימיים אל תוכה תוך שמירה על יחס של בערך 1:1 בין קוטר המאאר ועומק הדיאטרמה

(Lorenz, 1986). לפיכך, תוך אימוץ המודל של לורנץ ניתן, על פי קוטר מכתש ההתפרצות של מאאר בריכת רם (מכתש ההתפרצות ולא שפת הבריכה), להעריך את עומק הדיאטרמה בכ-1000 מטר (איור

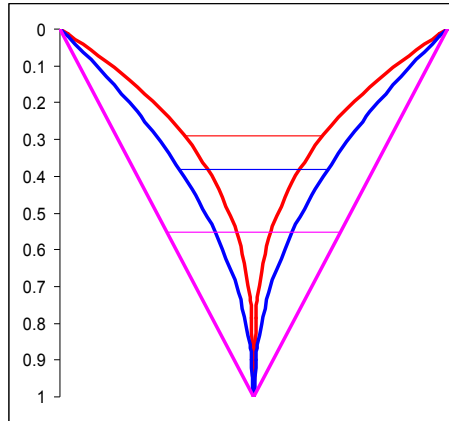
$$(40) \text{ ואת נפח הדיאטרמה (משוואת נפח חרוט): } V = \frac{\pi r^2 h}{3} \text{ ב-0.26 ק"מ מעוקב.}$$

המתאר הסימטרי של המאאר מציע כי מרכז המאאר קרוב למרכז הבריכה העכשווית וכי יש לחפש את שורש הדיאטרמה בנקודה זו. קידוחים מסעדה 3 ו-P8 מצויים בתוך המאאר (איור 7). קידוח מסעדה 3 מצוי בקצה הדרומי של הבריכה, חודר דרך חתך וולקני ועובר אל התשתית הסדימנטרית (מחוץ לחרוט הדיאטרמה - איור 9) בעומק של 200 מטר. קידוח P8, המצוי במרכז הבריכה, מגיע לעומק של 186 מטר ובדרכו חודר 88 מטר של משקעי אגם המאאר, 58 מטר של סלעים פירוקלאסטיים ו-40 מטר של בזלות בתחתיתו. הקידוח לא דגם גלעינים אלא Cuttings בלבד וקשה לקבוע אם חלקו העמוק דוגם בזלות מרוסקות מתוך הדיאטרמה, או שהוא יוצא מהדיאטרמה וחודר את הרצף הוולקני שמסביב (איורים 9, 40). כך או כך P8 אינו מגיע אל התשתית הסדימנטרית.

הטוף מורכב ברובו מרסק סלעי הסביבה אותם חדרה הדיאטרמה. העובדה כי טוף בריכת רם הוא סלע צעיר יחסית, מאפשרת ניתוח תהליכי ההתפרצות, הפרגמנטציה וההובלה, ללא הפרעה של תהליכי בליה מאוחרים. פרקציית רסק סלע הסביבה שבטוף בריכת רם (כ-75% מהטוף) מורכבת בעיקר מרסק של בזלת וכן מצויים בו כ-5 wt% חומר קרבונטי (8% לאחר נרמול שברי הסלע ל-100%) וכ-1% של גרגרי קוורץ (ראה פרק תוצאות, טוף בריכת רם, תכולת קרבונט). החומר הקרבונטי, העמיד פחות, עבר פרגמנטציה משמעותית ורובו מופיע בפרקציה החרסיתית.

שליטת הפרגמנטים הבזלתיים ומיעוט הקרבונט בחתך מציעים, שרוב החתך אותו חודרת הדיאטרמה הינו וולקני. הצבת הערכים במשוואת חרוט והנחת עומק חרוט של 1000 מטר מעלה כי המגע בין הסלעים הוולקניים (המהווים 91% מנפח הדיאטרמה) לסדימנטריים (9% מנפח הדיאטרמה) נמצא באתר זה בעומק של כ-550 מטר משפת המאאר (400 מ' מעל פני הים).

חישוב המניח דיאטרמה לא לינארית, כזו שדפנותיה עוקבות אחר עקומה תלולה יותר (איור 42), יחלץ עומק מגע רדוד יותר בין הרצף הוולקני לסדימנטרי. בחרוט דיאטרמה שדפנותיה מתארות שורש ריבועי יהיה עומק המגע כ-380 מטר משפת המאאר, ובדיאטרמה שדפנותיה בצורת שורש משולש יהיה עומק המגע בין הסלעים הוולקניים והסדימנטריים כ-290 מטר (איור 42). העומקים הללו מלמדים על הפרשים טופוגרפיים של 400-650 מ' בין הגבעות הבנויות סלעים סדימנטריים שבדרום ומזרח המאאר (איור 5), לבין ראש החתך הסדימנטרי בתחתיתו, ולכן על קיום שיפוע חריף ביותר לפני מילוי השקע בבזלות.



איור 42: הצגה סכמטית של דיאטרמה לינארית (ורוד), דיאטרמה עם שיפועים המתארים שורש ריבועי (כחול) וכזו בה השיפועים מתארים שורש משולש (אדום). הקווים האפקיים מסמנים את העומק תחתיו מצוי נפח של 10% מתחתית כל אחת מהדיאטרמות.

החישובים האחרונים בוצעו בהנחה, שכל הקרבונט נגזר מחתך סדימנטרי הנמצא עמוק בתת-הקרקע, ושהמגע בין החתך הסדימנטרי לבזלתי הינו אופקי. המציאות במאאר של בריכת רם הינה שונה. סלעים סדימנטריים חשופים בשולי הבריכה הדרומיים והמזרחיים, ואף מתנשאים לגובה של 100 מ' (1,070 מ' מעל פני הים) מעל לשפת המאאר. תמונה זו מציעה, כי לפחות חלק מהקרבונט שבטוף נתרם על ידי שולי המאאר, אפשרות המורידה את הפרקציה של הקרבונט הנתרם מעומק הדיאטרמה, וממילא מציעה עובי גדול יותר של החתך הוולקני בשקע רם.

ההצעה של תרומה (חלקית או מלאה) של קרבונט מהשוליים נתמכת על ידי התצפית שפיזור הקרבונט כמעט ואינו משתנה לאורך חתך הטוף העיקרי (איור 25), שכן דומיננטיות של תרומה מהעומק היתה צריכה לבוא לידי ביטוי בעליית המרכיב הקרבונטי עם העליה בחתך כתוצאה מהעמקת הדיאטרמה בזמן. שתי השכבות, בגובה 4 ו-12 מטר מתחתית החתך, המראות אנומליות בריכוז הקרבונט (16% ו-14% משקלי, בהתאמה, איורים 25, 29), משתלבות גם הן טוב יותר עם מודל של תרומה מהשוליים, ומן הסתם מייצגות ארועי התמוטטות אל תוך הדיאטרמה המתהווית.

הסבר אלטרנטיבי להמצאות פרגמנטים סדימנטריים כבר בתחילת הארועים הפריאטומאגמתיים הוא, שהאינטרקציה עם המים והפיצוצים הראשוניים ארעו בעומק החתך הסדימנטרי, תחת לחץ הנמוך מהלחץ הליתוסטטי בעומק זה. מצב שכזה יכול להתאפשר על ידי קיומו של חלל קרסטי בעומק. חלל קרסטי פריאטי (המצוי תחת מפלס מי תהום) יהיה נתון ללחץ הידרוסטטי, שערכו הוא קרוב לשליש מן הלחץ הליתוסטטי, ומאפשר אינטרקציה ופיצוץ פריאטומאגמתי ראשוני בעומק של 300-400 מטר. למעשה, אינטרקציה של מאגמה עם מים במערכת קרסטית עשויה לקרות אף בעמקים גדולים יותר, לדוגמא: Peperino Albano שבאיטליה, שם התרחש המעבר בעקבות אינטראקציה של מאגמה עולה עם מי אקוויפר, במערכת קרסטית המצויה כ-1 ק"מ תחת פני השטח (Funciello et al., 2001; Giordano et al., 2003). בסלעים הקרבונטיים באזור בריכת רם אכן מוכרות מערכות קרסטיות מפותחות. יתכן אף כי מערכת קרסטית מקומית התפתחה על מישור ההעתק החשוף בדרום המאאר (ראה בהמשך פרק זה). העתק עשוי להוות נתיב מועדף לתנועת המאגמה ולאפשר אינטרקציה טובה עם המים שבחלל הקרסטי.

בנוסף לחומר הקרבונטי, מצוי בטוף בערך אחוז של גרגרי קוורץ שנגזרו, ככל הנראה, מתצורת קטיע מן הקרטיקון התחתון (איור 3). נוכחות גרגרי הקוורץ מעידה על חדירת הדיאטרמה לעומק שכבת המקור שלהם. כמו הקרבונט, גם גרגרי הקוורץ מופיעים לאורך החתך ולא רק ברומו. תצפית זו תומכת בהצעה של פיצוץ ראשוני עמוק, בהקשר עם חלל קרסטי, הקרוב (סטרטיגרפית) לחול של תצורת קטיע. תצפית זו אף מלמדת, ששכבות הקרטיקון התחתון נמצאות בעומק לא רב מתחת לחתך הוולקני בשקע רם, עובדה המציעה שהחתך הקרבונטי (קרטיקון עליון עד קרטיקון תחתון) בבסיס עמק רם הינו דק יחסית, ותומכת בכך ששקע רם היה שקע ארוזיבי.

בניגוד למקרים מהספרות (Németh et al., 2000), בבריכת רם לא נצפה שינוי בתכולת הקרבונט, הקוורץ או בין הבזלות השונות לאורך חתך הטוף. תצפית זו תומכת בהצעה כי הפיצוץ הראשוני של המאאר התרחש בעומק החתך.

5.6. הסיבות לאירועים הפריאטומאגמתיים

בצפון רמת הגולן מצויים כ-60 תלי סקוריה פלייסטוקניים הסדורים בשתי שורות בכיוון צפון-דרום (מור, 1986). טוף, לעומת זאת, מצוי בקומפלקס אביטל-בנטל ובבריכת רם בלבד. בשני האתרים מסמן הטוף מעבר מהתפרצויות סטרומבוליאניות (פולטות סקוריה ובזלת) לפיצוצים פריאטומאגמתיים.

5.6.1. מקור המים בפיצוץ הפריאטומאגמתי

התפרצויות וולקניות בזלתיות המתרחשות באזורים המנוקזים היטב, מייצרות, לרוב, חרוטי סקוריה (Solgevik et al., 2007). התפרצות פריאטומאגמתית תקרה בדרך כלל באזורים עם ניקוז גרוע. המים שלקחו חלק בפיצוץ בבריכת רם, יכולים היו להיות (1) מי אגם, בדומה לתרחיש שהוצע על ידי וינשטיין (Weinstein and Weinberger, 2007) ו (Weinstein, 2007) בקומפלקס אביטל-בנטל, או (2) מי תהום.

מקובל בספרות שהתפרצות פריאטומאגמתית בהקשר עם אגם, תביא בדרך כלל ליצירת טבעת טוף (Tuff ring) ולא מאאר (שקע נמוך מפני הסביבה) כבריכת רם (Lorenz, 1986). האפשרות השנייה של אינטראקציה עם מי תהום, נראית מתאימה לתנאים באזור בריכת רם. בשונה מקומפלקס האביטל-בנטל, שם מפלס מי התהום מצוי בעומק של מאות מטרים מתחת לפני השטח (Dafny et al., 2003), מפלס מי התהום באזור בריכת רם רדוד מאד, והוא נחשף בבריכה ובבארות בעומק של מטרים בודדים בבקעת יעפורי. היות והתנאים האקלימיים באזור לא השתנו הרבה ב-100-200 Ka (מ. בר-מטיוס, שיחה בע"פ ב-Weinstein, 1997) ועמק רם היה כבר מלא ברצפים וולקנים, סביר להניח שמפלס מי התהום בעת ההתפרצות היה דומה. כמו כן, יחס מיסומאגמה גבוה יחסית, שיביא לפיצוץ פריאטומאגמתי התאפשר על יד קיום חללים קרסטיים הנפוצים מאד בסלעי הגיר שבאזור.

נפח הטוף המקורי (לפני ההסרה) מוערך בכ-0.09 ק"מ מעוקב (ראה חישוב בראשית הפרק) והריכוז הממוצע של החומר היובנילי והחרסיתי (שאינם מופרדים מסיבות טכניות) מוערך בכ-23%. אם נניח כי כמחצית מן החומר (10%) הינה חומר יובנילי (זכוכיתי או מוחלף), הרי שבפיצוצים הפריאטומאגמתיים היו מעורבים כ-0.01 ק"מ מעוקבים של מאגמה. לצורך יצירת הפיצוץ דרוש יחס משקלי של מיסומאגמה של 1:3 (Wohletz and McQueen, 1984; Kokelaar, 1986; Zimanowski et al., 1991). בהנחה שהצפיפות של הנתך הייתה 2.5 g/cm^3 , אזי מדובר בכ-25 מליון טון נתך. על כן, בכדי

ליצור ריאקציה טובה, יש צורך בכ-8,000,000 מטר מעוקב מים. יש לציין, כי כמות המים המחושבת היא של סך המים שהשתתפו בפיצוץ. כמות המים שהשתתפה באינטרקציה ובפיצוץ הראשוני יכולה היתה להיות קטנה בהרבה.

5.6.2. העתק

בדרום המאאר מצוי העתק, שניכרת בו זריקה ששיעורה אינו ברור, אך הוא עולה על מספר מטרים, והוא מציב את החתך הוולקני (בזלות וסקוריה) מול קרבונטים טורוניים (איורים 3, 5). כיוון ההעתק הוא צפון-צפון-מערב וכיוונו תת-מקביל לזה של השורה המזרחית של תלי הסקוריה בצפון הגולן, שבריכת רם ממוקמת בקצה הצפוני שלה. כיוון ההעתק אף מקביל לציר ההתארכות של המאאר. ההעתק עשוי להוות ציר ניקוז של מים אל המאגמה, שאפשר שאף היא עלתה לאורך ההעתק. מאארים נוצרים בדרך כלל כשמאגמה עולה בתוך סדק ופוגשת מי תהום (Martin et al., 2007). תרחיש דומה מתואר על ידי Gevrek and Kaznci (2000), ב-Narkoy maar שבמרכז לוח אנטוליה, בו מאגמה שעלתה לאורך מישור העתק פגשה מערכת הידרולוגית שהתפתחה לאורכו ואשר הביאה למעבר מהתפרצויות סטרומבוליאניות להתפרצויות פריאטומאגמתיות.

5.6.3. אמפיבולים, קסנוליטים ומעבר מוולקניזם סטרומבוליאני לפריאטומאגמתי

מעברים מהתפרצויות יוצרות סקוריה להתפרצויות פריאטומאגמתיות מוכרים בחמישה מקרים לפחות בשדה אייפל בגרמניה (Lorenz, 2007). בקומפלקס אביטל-בנטל, המעבר הוא תוצר של שינויים בניקוז בשל סכירת האגן על ידי קילוח בזלת (Weinstein, 2007; Weinstein and Weinberger, 2007). כפי שנדון למעלה, המעבר לפריאטומאגמתיזם בבריכת רם אירע, ככל הנראה, כתוצאה ממפגש עם מי תהום רדודים. למרות זאת, הנוכחות והעושר במגקריסטים של אמפיבול והנוכחות של אמפיבול כפנוקריסטים בלבה שקדמה לאירועים הפריאטומאגמתיים (בזלת כרמים עליונה) מעלים אפשרות, כי המאגמות באזור בריכת רם הכילו אחוז גבוה יחסית של מים מאגמתיים (יוצא דופן למאגמות בגולן). עובדה זו מעלה חשד, כי קיים קשר בין האירועים הפריאטומאגמתיים לתכולת המים במאגמה.

בטוף בריכת רם, כמו גם בבזלת כרמים עליונה, מצויים גבישים של אמפיבול (המופיעים כמגקריסטים) וקסנוליטים 'עמוקים' מקרום תחתון וגבול קרום-מעטפת בשכיחות גבוהה יחסית (Mittlefehldt, 1984, 1982; Stein et al., 1993) (איורים 22, 30, 31). גם המגקריסטים וגם הקסנוליטים עלו עם החומר היובנילי של הטוף וקיים מתאם בשכיחות שתי הקבוצות (איור 31). האמפיבולים של בזלת כרמים עליונה מכילים אינקלוזיות אוליבין, שהרכבן מתאים להרכב המיקרופנוקריסטים האוליביניים, המאפיינים בזלת זו (איור 15 ונספח 4). תצפית זו מציעה כי האמפיבולים הינם פנוקריסטים שגדלו מהמאגמה ואינם קסנוקריסטים זרים לה.

הפטרורגפיה מעידה, על קיומם של נתכים המכילים מים בכמות המאפשרת גיבוש של אמפיבול. גיבוש חלקי של מאגמה כזו, או שילובו עם ירידת הלחץ והטמפרטורה הכרוכים בעלית הנתך, מעלים את ריכוזי הנדיפים ומורידים את מסיסותם במאגמה. שילוב גורמים אלו עשוי להביא לנוקליאציה של בעות עם עלית המאגמה ובכך להוריד את צפיפותה ולשנות את הריאולוגיה שלה (Lensky et al., 2006). במפגש מים חיצוניים עם מאגמה עולה דרוש מנגנון ערבוב ופרגמנטציה של הנתך, על מנת לאפשר אינטראקציה טובה של המים והנתך, כזו שתביא לפיצוץ הפריאטומאגמתי. בדרך כלל מתפתחת במגע הנתך עם המים שכבת קיטור (vapor film) המסוככת ומבודדת את המאגמה מהמים

החיצוניים, ובכך עשויה למנוע את הערבוב ולהוריד מיעילות הפיצוץ (Sheridan and Wohletz, 1983; Trigila et al., 2007; Francis, 1993). מאגמה הטרוגנית עשירה בבועות, העולה במהירות גבוהה יחסית בשל כוח הציפה המוגבר להתקשות בשמירה על רציפות שכבת הקיטור המבודדת ובכך לאפשר אינטראקציה טובה עם מים חיצוניים.

הצעה זו נתמכת על ידי עבודתם של Trigila et al. (2007), אשר הראו בניסויי מעבדה כי שכבת הקיטור המסוככת מתקשה לשמור על רציפות כשהנתך וזיקולרי, וכי קיום וזיקולות בנתך מביא לערבוב של המים והמאגמה. מניסויים שערכו בתנאים קבועים בהזרקות מים לנתכים בעלי וזיקולריות שונה, עולה כי התרחשות ועוצמת ההתפרצויות הפריאטיות נובע בעיקר מהבדלים בפורוזיות הנתך, וכי נתך פורוזי עשוי יותר להתפרץ אקספלוזיבית בהנתן לו מנגנון הובלה אל המים החיצוניים. האקספלוזיביות של הנתך הפורוזי מוסברת בזרימה מהירה של מים חיצוניים אל תוך חללי הבועות, ובכך נגרמת פגיעה ברציפות שכבת הקיטור, פגיעה שמביעה לפרגמנטציה של הנתך ומגבירה את ערבובו עם המים החיצוניים, ועל ידי כך לפיצוץ הפריאטומאגמתי.

לסיכום, מוצע כי המגמות של בזלת כרמים ושל הטוף היו עשירות יחסית במים, עובדה שבמקרה האחרון הביאה לנוקליאציה של בועות ולאינטרקציה מוגברת עם מי תהום, אשר גרמה להתפרצויות הפריאטומאגמתיות.

כוח הציפה המוגבר והיווצרות הבועות עשויים גם להעלות את הלחץ בצינור המאגמה ולגרום לסידוק בסלעי הסביבה. סידוק זה עשוי לאפשר הובלה טובה יותר של המים החיצוניים אל הנתך הוויקולרי. לסידוק ולריאולוגיה השונה בשל תכולת המים הגבוהה עשוי אף להיות תפקיד בגזירת קסנוליטים (Lensky et al., 2006). השכיחות הגבוהה של קסנוליטים בטוף (ובבזלת כרמים) מהווה עדות תומכת ובלתי תלויה לאגרסיביות של מאגמות אלו. נוכחות של 'קסנוליטים רדודים' של (בזלות עתיקות) בתוך בזלת כרמים מעידה על זרימה 'אגרסיבית' גם קרוב אל פני השטח.

6. מסקנות

- הדומיננטיות של שבירי סלע סביבה, העדר הוויקולות בחומר היובנלי שבטוף והתדירות של משקעי נחשולים וולקניים (base surges), מעידים על המקור הפריאטומאגמתי של המאאר של בריכת רם.
- קודם ליצירת המאאר היה באזור בריכת רם עמק בעל טופוגרפיה חריפה של סלעים סדימנטריים, אשר כוסה ברצף וולקני של מאות מטרים.
- ההתפרצות הפריאטומאגמתית ארעה כתוצאה מאינטרקציה של המאגמה עם מי תהום רדודים באקוויפר המקומי.
- שכחות אמפיבול בטוף ובבזלת שקלחה באתר טרם יצירת המאאר מציעה כי נתכים בעלי תכולה גבוהה יחסית של מים, שהיו וזיקולריים יחסית, איפשרו אינטראקציה טובה עם מי האקוויפר המקומי ובכך גרמו לפיצוצים הפריאטומאגמתיים.
- בדרום הבריכה מצוי העתק, המקביל לשורת המבנים הוולקניים הפלייסטוקניים באזור (כיוונו צפון-צפון-מערב). מוצע כי מישור ההעתק סייע במפגש המים והמאגמה, שהביא לפיצוצים הפריאטומאגמתיים.
- האירועים הפריאטומאגמתיים שיצרו את המאאר התרחשו בחלון הזמן שבין 166 ± 15 Ka ל- 115 ± 13 Ka.
- השילוב בחלק משכבות הטוף של סטרוקטורות זרימה עם פרגמנטים גסים, באסוציאציה עם סטרוקטורות פגיעה (impact sags), מעיד על הובלה בו זמנית של תוצרי הפיצוץ בזריקה בליסטית (חומר גס) ובנחשולים וולקניים (base surges, חומר דק ועתיר גז).
- מניתוח מגמות השינוי בתפוצת גודל הגרגר בחתך העיקרי רואים בבירור לפחות שני מחזורים של עליה וירידה בעוצמת ההתפרצות (איור 29).
- משילוב הרכב הטוף ומימדי המאאר ניתן לקבוע, כי הדיאטרמה חודרת עד חולות הקרטיקון התחתון וכי מגע הרצף הוולקני עם החתך הסדימנטרי, הוא בעומק של מאות מטרים (300-550 מטר ואולי אף יותר).
- במהלך ההתפרצויות הוצאו מאזור המאאר כ-0.09 ק"מ מעוקב של סלעי סביבה בזלתיים וסדימנטריים וכ-0.01 ק"מ מעוקב של מאגמה יובנלית.

7. רשימה ביבליוגרפית

- גזית א., 2005. קסנוליתים גרנוליטים מאפים מקרני חיטין והתפתחות הקרום התחתון בצפון ישראל. המכון הגיאולוגי, ירושלים, דו"ח מס' GSI/11/05.
- דאוטי מ. צ., 1921. על פני ערב. תורגם מעברית על-ידי ראובני א. 1931. תל אביב, הוצאת ספרים נ. טברסקי. עמ' 19.
- היימן א., 1993. בריכת רם – תופעה וולקנית ייחודית. עורכים: דגני א., ענבר מ., ארץ הגולן והחרמון, תל אביב, משרד הביטחון-ההוצאה לאור. עמ' 140-153.
- היימן א., 1982. הגיאולוגיה של בריכת-רם רמת-הגולן. האוניברסיטה העברית בירושלים, המחלקה לגיאולוגיה, החברה להגנת הטבע.
- היימן א., 1990. התפתחות בקע ים המלח ושוליו בצפון ישראל בפליוקן ובפלייסטוקן. חיבור לשם קבלת תואר "דוקטור לפילוסופיה" במחלקה לגיאולוגיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- וינשטיין י., שטיין מ., נבון ע., 2004. מבנים הידרו-פירוקלאסטיים וסלעי מעמקים בצפון רמת הגולן. כנס החברה הגיאולוגית הישראלית, הגושרים, מדריך סיורים, עמ' 79-97.
- וינשטיין י., 1992. פטרולוגיה של בזלות צעירות בצפון רמת הגולן. משרד האנרגיה והתשתית, המכון הגיאולוגי, ירושלים, דו"ח מס' GSI/27/92.
- כרמי י., מירו פ., 1969. בריכת רם, מאזן המים מנתוני מפלסים ונותבים טבעיים, כנס החברה הגיאולוגית לנושא רמת הגולן. כפר גלעדי עמ' 10-11.
- מור ד., 1986. הוולקניזם ברמת הגולן. דו"ח משרד האנרגיה והתשתית, המכון הגיאולוגי, האגף למחצבים ומקורות אנרגיה, מס' GSI/5/86.
- מזור ע., 1969. מערות ומכתשי התפוצצות וולקנים בגולן. כנס החברה הגיאולוגית לנושא הגולן. כפר גלעדי עמ' 15-16.
- מזור ע., 1976. גיאולוגיה בפטיש ישראלי. האוניברסיטה הפתוחה. עמ' 309-310.
- מיטלפלדט ד., 1982. עדויות פטרוגרפיות למקור הסדרה הקסנוליטית של בריכת רם. החברה הגיאולוגית הישראלית, הכנס השנתי 1982 אילת ומזרח סיני. 28-29.
- מיכלסון ח., 1979. הגיאולוגיה והפאליאוגיאוגרפיה של רמת הגולן. חיבור לשם קבלת התואר דוקטור לפילוסופיה, אוניברסיטת תל אביב.
- מירו פ., כהרנביץ א., 1969. חוות דעת הידרולוגית על בריכת רם. דו"ח פנימי, תה"ל.
- פלכסר ע., 1969. הגיאולוגיה ותהליך יצירתה של בריכת רם. כנס החברה הגיאולוגית לנושא רמת הגולן, כפר גלעדי עמ' 17-18.
- פלביוס י., "תולדות מלחמת היהודים עם הרומאים", תורגם מיוונית על-ידי דר' י. נ. שמחוני, מסדה. קדרון י., 1971. רמת הגולן, סקר הידרולוגי של בריכת רם, דו"ח תה"ל.

- קדרון י., 1974. סכום המצב ההידרולוגי בבריכת רם בשנים 1969-1974, דו"ח תה"ל.
- קדרון י., 1977. אזור בריכת רם, סכום המצב ההידרולוגי בבריכת רם בשנת 1976, דו"ח תה"ל.
- קדרון י., 1978. אזור בריכת רם, סכום המצב ההידרולוגי בבריכת רם בשנת 1977, דו"ח תה"ל.
- Auer A., Martin U., Németh K., 2007. The Fekete-hegy (Balaton Highland Hungary) "soft-substrate" and "hard-substrate" maar volcanoes in an aligned volcanic complex – Implications for vent geometry, subsurface stratigraphy and the palaeoenvironmental setting. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159. 225-245.
- Camp V. E., Roobol M. J., 1989. The Arabian continental alkali basalt province Part I. Evolution of Harrat Rahat, Kingdom of Saudi Arabia. *Geol. Soc. Am. Bull.* 101, No. 1 pp. 71–95
- Carrasco-Núñez G., Ort M. H., Romero C., 2007. Evolution and hydrological conditions of a maar volcano (Atexcac crater, Eastern Mexico). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 179-197.
- Dafny E., Gvirtzman H., Burg A., Fleischer L., 2003. The hydrogeology of the Golan basalt aquifer, Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 52, 139-153.
- Downes H., Beard A., Hinton R., 2004. Natural experimental charges: an ion-microprob study of trace element distribution coefficients in glass-rich hornblendite and clinopyroxenite xenoliths. *Lithos.* 75, 1-17.
- Dubertret L., 1954. Feuille de Beyrouth-Carte géologique au 200,000. Avec notice explicative Rep. Liban. *Min. Trav.* 1-100.
- Ehrlich A., Singer A., 1976. Late Pleistocene Diatom Succession in a Sediment Core from Birket Ram, Golan Heights. *Isr. J. Earth sci.* 25, 138-151.
- Feraud G., York D., Hall C. M., Goren N., Schwarcz H. P., 1983. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age limit for an Acheulian site in Israel. *Nature.* 304, 263-265.
- Fisher R. V., Waters A. C. 1970. Base surge bed forms in maar volcanoes. *Amer. Bull. Sci.* v. 268 pp. 157-180.
- Francis P., 1993. *Volcanoes, a planetary perspective.* Oxford University press, Walton st' Oxford, pp. 128.
- Frank U., Schwab M. J., Negendank F. W., 2002. A lacustrine record of paleomagnetic secular variations from Birkat Ram, Golan Heights (Israel) for the last 4400 years. *Phys. Earth Planet. Inter.* 133, 21-34.
- Funiciello R., Giordano G., De Rita D., 2003. The Albano maar lake (Colli Albani Volcano, Italy): recent volcanic activity and evidence of pre-Roman Age catastrophic lahar events. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 123. 43-61
- Garfunkel Z., 1990. Tectonic setting of Phanerozoic magmatism in Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 38, 51-74.
- Gençalioglu-Kuşçu G., Atilla C., Cas R. A. F., Kuscu I., 2007. Base surge deposits, eruption history, and depositional processes of a wet phreatomagmatic volcano in Central Anatolia (Cora Maar). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 198-209.

- Gevrek A. I., and Kazanci N., 2000. A Pleistocene, pyroclastic-poor maar from central Anatolia, Turkey: influence of a local fault on a phreatomagmatic eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 95, 309-317.
- Giordano G., De Rita D., Cas R., Rodani S., 2001. Valley pond and ignimbrite veneer deposits in the small-volume phreatomagmatic 'Peperino Albano' basic ignimbrite, Lago Albano maar, Colli Albani volcano, Italy: influence of topography. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 118, 131-144.
- Goren-Inbar N., 1985. The lithic assemblage of the Berekhat Ram Acheulian site, Golan Heights. *Paleorient.* 11, 7-28.
- Goren-Inbar N., Perlman I., Heimann A., 1986. Chemical mapping of basalt flows at paleolithic site. *Archaeometry* 28, 1, 89-99.
- Houghton B. F., Wilson C. J. N., Smith I. E. M., 1999. Shallow-seated controls on styles of explosive basaltic volcanism: a case study from New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 91, 97-120.
- Ilani S., Harlavan Y., Tarawneh K., Rabba I., Weinberger R., Ibrahim K., Peltz S., Steinitz G., 2001. New K-Ar ages of basalts from the Harrat Ash Shaam volcanic field in Jordan: Implications for the span and duration of the upper-mantle upwelling beneath the western Arabian plate. *Geology* 29, 171-174.
- Kokelaar P., 1986. Magma-water interactions in subaqueous and emergent basaltic volcanism. *Bull. Volc.* 48, 275-289.
- Kueppers U., Scheu B., Spieler O., Dingwell D. B., 2006. Fragmentation efficiency of explosive volcanic eruptions: A study of experimentally generated pyroclasts. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 153, 125-135.
- Lensky N. G., Niebo R. W., Holloway J. R., Lyakhovsky V., Navon O., 2006. Bubble nucleation as a trigger for xenolith entrapment in mantle melts. *Earth Planet. Sci. Lett.* 245 (1-2), 278-288.
- Lian O. B., Roberts R. G., 2006. Dating the Quaternary: progress in luminescence dating of sediments. *Quater. Sci. Rev.* 25, 2449-2468.
- Lorenz V., 1970. Some Aspects of the eruption mechanism of the Big Hole Maar, central Oregon. *Geol. Soc. Am. Bull.* 81, 1823-1830.
- Lorenz V., 1986. On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings. *Bull. Volc.* 48, 265-274.
- Lorenz V., 2007. Syn- and posteruptive hazards of maar-diatreme volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 285-312.
- Lorenz V., Kurszlaukis S., 2007. Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 4-32.
- Martin U., Németh K., Lorenz V., White J. D. L., 2007. Editorial Introduction: Maar-diatreme volcanism. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 1-3.

- Michelson H., 1979. The geology and paleogeography of the Golan heights. Ph.D. thesis , Tel-Aviv university.
- Mittlefehldt D. W., 1984. Genesis of clinopyroxene-amphibole xenoliths from Birket Ram: trace element and petrologic constraints. *Contrib. Mineral. Petrol.* 88, 280-287.
- Moor J. G., Nakamura K., Alcaraz A., 1966. The 1965 Eruption of Taal Volcano. *Science* 151, 955-960.
- Mor D., 1993. A time-table for the Levant Volcanic Province, according to K-Ar dating in the Golan Heights, Israel. *J. Afr. Earth Sci.* 16, 223-234.
- Mor D., 1987. The geological map of Israel, Har Odem. Geological Survey of Israel, sheet 2-II, scale 1:50,000, 1 sheet.
- Morrissey M., Zimanowaski B., Wohletz K., Buettner R., 2000. Phreatomagmatic fragmentation, *Encyclopedia of volcanoes*, Elsevier, Burlington, p431-445
- Nasir S., Al-Rawas A. D., 2006. Mossbauer characterization of upper mantle ferrikaersutite. *Am. Min.* 91, 1163-1169.
- Nasir S., 1995. Cr-poor megacrysts from the Shamah volcanic field, northwestern part of the Arabian plate. *J. Afr. Earth Sci.* 21, 349-357.
- Németh K. 2000. Collapse structures of an eroded maar/diatreme volcanic field from Central Otago, New Zealand: The Crater as an example. *Terra Nostra* 6, p. 365-374.
- Németh K., Martin U., Hrangí Sz., 2000. On the calculation of the diatreme pipe from a deposits of an “accidental lithic clast rich” maar, Tihany East Maar, (Hungary). *Terra Nostra* 6. p. 383-391.
- Németh K., White C., 2005. How subaqueous was the volcanism in the Mio/Pliocene Snake River Plain (Idaho, USA) volcanic field? - Volcanological field observations as tools to reconstruct palaeoenvironments. *A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése.* 77-94.
- Schmincke U. H., 2004. *Volcanism*. Springer, Germany, pp. 117-228.
- Schumacher G. 1888. The Jaulan : surveyed for the German Society for the exploration of the Holy land, R. Bentley (eds.) London. pp 304.
- Schwab M. J., Neumann F., Liit T., Negendank J. F.W., Stein M., 2004. Holocene palaeoecology of the Golan Heights (Near East) investigation of lacustrine sediments from Birkat Ram crater lake. *Quater. Sci. Rev.* 23, 1723-1731.
- Segev A., 2005. Phanerozoic magmatic activity associated with vertical motions in Israel and the Adjacent Countries. Eds. Hall J. K., Krashennikov V. A., Hirsch F., Benjamini C., Flexer A., *Geological Framework of the Levant*, 2, 553-578.
- Self S., Kienle J., Huot J-P., 1980. Ukinrek Maars, Alaska, II. Deposits and formation of the 1977 craters. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 7, 39-65.

- Shaw E. J., Baker A. J., Menzies A. M., Thirlwall F. M., Ibrahim M. K., 2003. Petrogenesis of the Largest Intraplate Volcanic Field on the Arabian plate (Jordan): a Mixed Lithosphere-Asthenosphere Source Activated by Lithospheric Extension. *J. Petrol.* 44 (9). 1657-1679.
- Sheridan M. F., Wohletz K. H., 1983. Hydrovolcanism: Basic considerations and review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 17, 1-29.
- Sheridan M. F., Wohletz K. H., 1981. Hydrovolcanic Explosions: The Systematics of Water-Pyroclast Equilibration. *Science.* 212, 1387-1389.
- Sheridan M. F., Barberi F., Rosi M., Santacroce R., 1981. A model for plinian eruptions of Vesuvius. *Nature.* 289.
- Solgevik H., Mattsson H. B., Hermelin O., 2007. Growth of an emergent tuff cone; Fragmentation and depositional processes recorded in the Capelas tuff cone, São Miguel, Azores. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 246-266.
- Stein. M, Garfunkel Z., Jagoutz E., 1993. Chronothermometry of peridotitic and pyroxenitic xenoliths: Implications for the thermal evolution of the Arabian lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 57, 1325-1337.
- Tarawneh K., Ilani S., Rabba I., Harlavan Y., Peltz S., Ibrahim K., Weinberger R., Steinitz G., 2000. Dating of the Harrat Ash Shaam Basalts, northern Jordan. *Isr. Geol. Surv. Rep. GSI/2/2000.*
- Trigila R., Battaglia M., Manga M., 2007. An experimental facility for investigating hydromagmatic eruptions at high-pressure and high-temperature with application to the importance of magma porosity for magma-water interaction. *Bull. Volc.* 69, 365-372.
- Weinberger R. Ilani, S., Tarawneh K., Rabba I., Harlavan Y., Peltz S. and Steinitz G., 2001. Spatial and temporal activity along fissure eruptions in the western Arabian plate based on new K-Ar ages from Harrat-Ash-Shaam, Jordan. *Isr. Geol. Soc. Annu. Meet.* 130.
- Weinstein M., 1976. The late Quaternary vegetation of the northern Golan. *Poll. Spor.*, 18, 553-562.
- Weinstein Y., 1998. Spatial and temporal changes in composition of Neogene-Quaternary magmatic rocks in NE Israel. *GSI Curr. Res.* 11, 87-95.
- Weinstein Y., Navon O., Altherr R., Stein M., 2006. The Role of Lithospheric Mantle Heterogeneity in the Generation of Plio-Pleistocene Alkali Basaltic Suites from NW Harrat Ash Shaam (Israel), *J. Petrol.* 47 (5). 1017-1050.
- Weinstein Y., 2007. A transition from strombolian to phreatomagmatic activity induced by a lava flow damming water in a valley. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 167-284.
- Weinstein Y., Weinberger R., 2007. The geology and volcanological history of Mount Avital. *Isr. J. Earth Sci.* 55, 237-255.
- Wohletz K., Orsi G., de Vita S., 1995. Eruptive mechanisms of the Neapolitan Yellow Tuff interpreted from stratigraphic, chemical, and granulometric data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 67, 263-290.

- Wohletz K. H., McQueen RG., 1984. Experimental studies of hydromagmatic volcanism. Geophysics Study Committee: Studies in Geophysics: Explosive volcanism: Inception, evolution, and hazards. National Academy Press, Washington 158-169.
- Wohletz K., 2002. Water/magma interaction: some theory and experiments on peperite formation. J. Volcanol. Geotherm. Res. 114, 19-35.
- Zimanowski B., Wohletz K., Dellino P., Buttner R., 2003. The volcanic ash problem. J. Volcanol. Geotherm. Res. 122. 1-5.
- Zimanovski B., Fröhlich G., Lorenz V., 1991. Quantitative experiments on phreatomagmatic explosions. J. Volcanol. Geotherm. Res. 48, 341-358.

8. נספחים

נספח 1: תאור פטרוגרפי של שמונה פרטי הבזלת, בצירוף תמונות אופייניות שצולמו במיקרוסקופ אופטי

1. בזלת סער (9 שקפים ממחשופים):

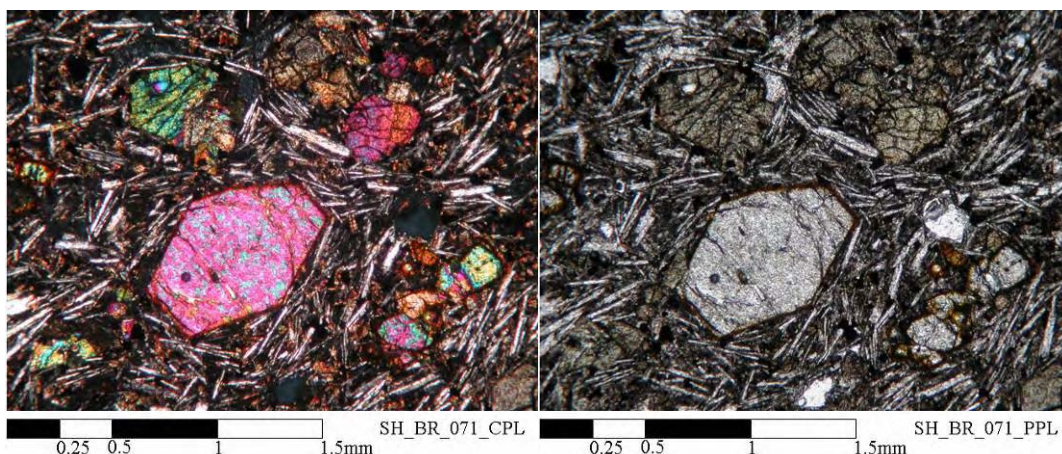
פנוקריסטים: גבישי אוליבין בגודל של 0.2-1.5 מ"מ מהווים כ-13% משטח השקפים, הגבישים הם סובהדרליים עד אוהדרליים עם שוליים אידינגזיטיים ונושאים אינקלוזיות של מינרלי בצר. קלינופירוקסנים (7%) מופיעים באגרטים או כגבישים בודדים של עד 2.5 מ"מ. הגבישים הם אנהדרליים עד סובהדרליים ולעיתים ניכר בס תאום.

מטריקס: בינוני גביש נשלט על ידי פריזמות פלגיוקלו שאורכן עשוי להגיע עד 0.5 מ"מ היוצרות טקסטורה טרכיטית. בין הפריזמות מצויים פירוקסנים ומינרלי בצר בגודל אופייני של עד 0.1 מ"מ.

סימנים אינדקטיביים: שליטת אוליבין בפנוקריסטים אוהדרליים, חלקם באגרטים, ופריזמות פלגיוקלו בטקסטורה טרכיטית. דומה מורפולוגית לקילוחי עין זיון ונבדלת ממנה בתכולת האוליבין הגבוה שלה.

ב.

א.



בזלת סער, במרכז פירוקסן אוהדרלי ומסביבו אגרטים של אוליבין ופירוקסן. במטריקס פריזמות פלגיוקלו גדולות יוצרות טקסטורה טרכיטית. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

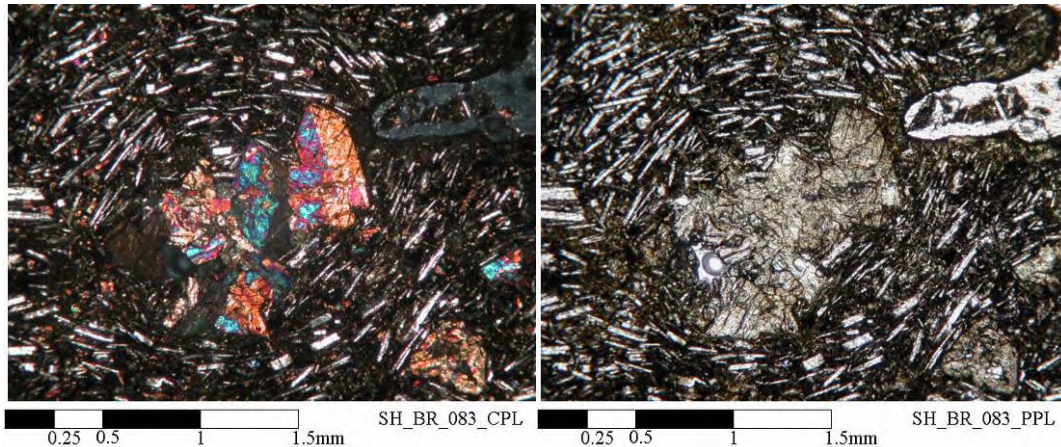
2. בזלת עין-זיון (12 שקפים, 10 ממחשופים ו-2 מגלעיני קידוח):

פנוקריסטים: גבישי קלינופירוקסן בגודל של 0.25-0.6 מ"מ מהווים כ-5% משטח השקפים, והם סובהדרליים ובחלקם ניכרים תאום ומציאות אינקלוזיות אוליבין. כמו כן נצפתה בפנוקריסטים טקסטורה סוב-אופיטית (פלגיוקלו בפירוקסן). גבישי הפלגיוקלו בגודל של עד 0.6 מ"מ וניכר בחלקם תאום. גבישי אוליבין בגדלים המגיעים אל 2.5 מ"מ והם מכילים אינקלוזיות של מינרלי בצר.

מטריקס: בינוני, בגודל גביש המגיע עד 0.15 מ"מ. המטריקס נשלט על ידי גבישי פירוקסון, ופריזמות פלגיוקלז בגדלים שונים המגיעות עד לאורך של 0.75 מ"מ. פריזמות הפלגיוקלז יוצרות טקסטורה טרכית. כמו כן מצויים במטריקס מינרלי בצר ואוליבין.

סימנים אינדקטיביים: קלינופירוקסון בפנוקריסטים אוהדרליים או באגרטים, ופריזמות פלגיוקלז בטקסטורה טרכיטית. דומה מורפולוגית לבזלת סער ונבדלת ממנה בתכולת האוליבין הנמוכה שלה.

א. ב.



בזלת עין-זיון, אגרנט של פירוקסנים בתוך מטריקס עם טקסטורה טרכיטית. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

3. בזלת יעפורי (10 שקפים, 9 ממחשופים ו-1 מפרגמנט בטוף):

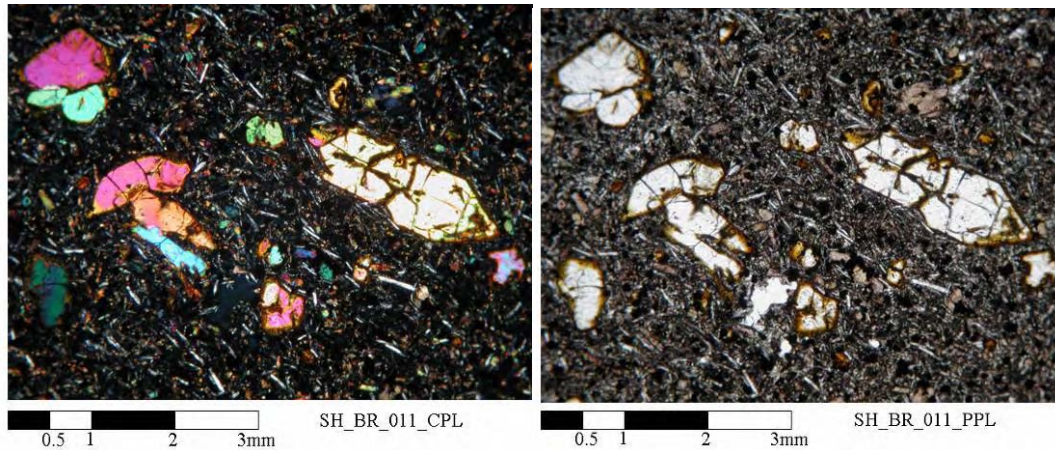
פנוקריסטים: גבישי אוליבין בגדלים משתנים המגיעים עד 1.4 מ"מ מכסים 13% משטח השקפים. גבישי האוליבין אוהדרליים עד אנהדרליים. גבישי קלינופירוקסון המגיעים עד לגודל של 1 מ"מ מופיעים כבודדים או באגרטים ותופסים 2% משטח השקפים.

מטריקס: מגוון. בחלק מן הדוגמאות גודל הגבישים בינוני (מגיעים לגודל של 0.15 מ"מ) ובאחרות הוא דק (והגבישים בו קטנים מ-0.05 מ"מ). לעיתים נשלט על ידי פריזמות פלדספר ולעיתים הפריזמות חסרות או מועטות. המטריקס מכיל פירוקסון. קיימים בו מינרלי בצר, אך בכמות נמוכה יחסית לבזלות אחרות בסביבה. בחלק מהדוגמאות ניכרת טקסטורה טרכיטית ברורה ובחלקן היא נעדרת גם בנוכחות הפריזמות. חלק מן הדוגמאות וזיקולריות מאוד וחלקן מאסיביות (בין 45% ל-1%). השונות הרבה בבזלת יעפורי עשויה להיות קשורה לכך שמדובר בשפכים או מחדרים שונים המופיעים במבנה הסקוריה שבדרום מערב הבריכה.

סימנים אינדקטיביים: מתאפינת בשליטת פנוקריסטים אוליביניים פולימודליים.

א.

ב.



בזלת יעפורי, פנוקריסטים פולימודליים, אוהדרליים עד אנהדרליים של אוליבין, המציגים כמו המטריקס טקסטורה טרכיטית. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

4. בזלת כרמים עליונה (24 שקפים, 11 ממחשופים ו-11 מפרגמנטים בטוף):

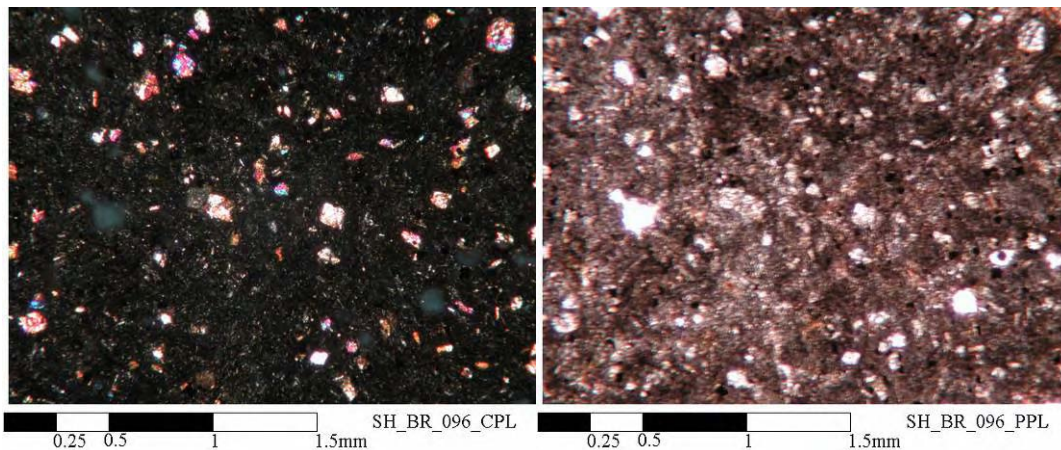
פנוקריסטים: גבישי אוליבין בימודלי המופיע כמיקרופנוקריסטים סובהדרליים עם מעט אידינגזיט שגודלם 0.05 עד 0.4 מ"מ המכסים 11% משטח השקף וכפנוקריסטים סובהדרליים בגדלים של 0.75-2.25 מ"מ המכסים 6% מן השקף. גבישי קלינופירוקסן המגיעים ל-1 מ"מ ואמפיבול סובהדרלי בגודל 0.5-7 מ"מ. המיקרופנוקריסטים האוליביניים מופיעים גם במטריקס וגם כאינקלוזיות בתוך הפנוקריסטים האמפיבולים.

מטריקס: דק מאוד (עד 0.04 מ"מ), מכיל מינרלי בצר, פריזמות פלדספר קטנות ומינרלים מאפיים (אוליבין או פירוקסן).

סימנים אינדקטיביים: שליטת מיקרופנוקריסטים אוליביניים ופנוקריסטים אמפיבוליים.

א.

ב.



בזלת כרמים עליונה, מאופיינת במיקרופנוקריסטים של אוליבין. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים. מיקרופנוקריסטים אוליביניים בתוך מטריקס דק.

5. בזלת כרמים תחתונה (9 שקפים, 5 ממחשופים ו-4 מפרגמנטים בטוף):

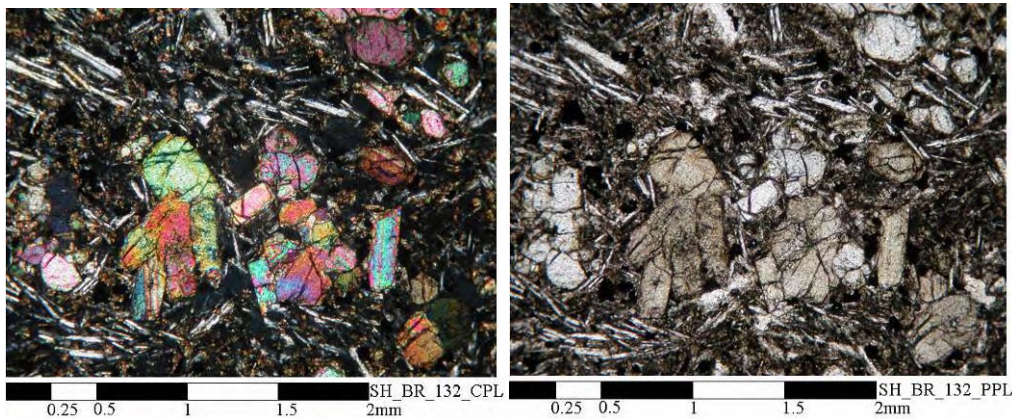
פנוקריסטים: גבישי אוליבין בגודל 0.25-1.25 מ"מ, מכסים 16% מן השקף. האוליבין סובהדרלי עד אוהדרלי עם שולי אידינגזיט. גבישי קלינופירוקסן בגדלים של 0.25-1 מ"מ מכסים 6% מהשקף. הקלינופירוקסנים מופיעים כגבישים בודדים או באגרטים, כאנהדרליים או סובהדרליים ובחלקם ניכר תאום. פריזמות גדולות של פלגיוקלו מגיעות לאורך של 1.25 מ"מ ומכסות 6% משטח השקפים.

מטריקס: גודל גביש בינוני (עד 0.1 מ"מ), נשלט על ידי פלגיוקלו ומכיל מינרלי בצר, פירוקסן ואוליבין.

סימנים אינדקטיביים: אגרטים גדולים של אוליבין וקלינופירוקסן המתואם בחלקו. פריזמות פלגיוקלו גדולות בטקסטורה טרכיטית.

א.

ב.



בזלת כרמים תחתונה, במרכז שני אגרגטים של אוליבין וקלינופירוקסן במטריקס המכיל פריזמות פלגיוקלז גדולות. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

6. בזלת 006 (4 שקפים מפרגמנטים בטוף):

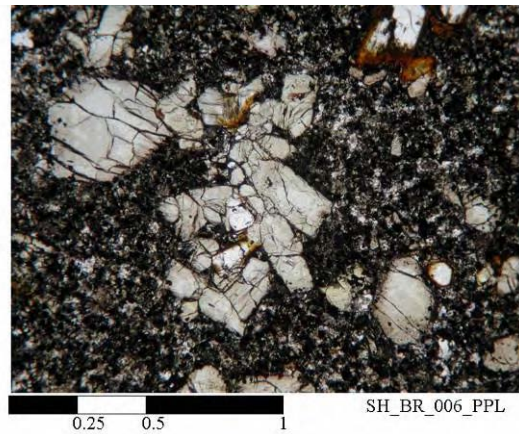
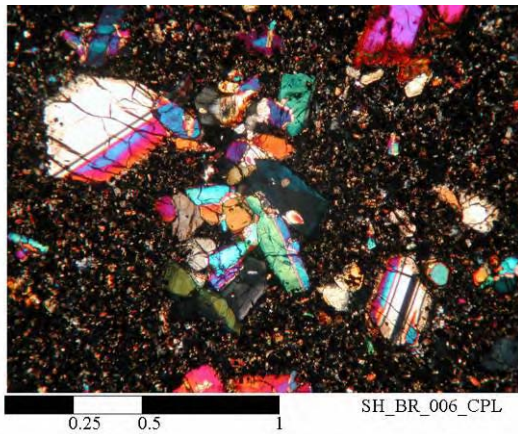
פנוקריסטים: גבישי קלינופירוקסן בגדלים של 0.3-1.75 מ"מ מראים תאום ומכסים 11% משטח השקף. לעיתים רק שוליהם מוחלפים ולעיתים ניכרת החלפה בגוף הפנוקריסטים. אוליבין אוהדרלי או סובהדרלי בגדלים של בערך 1 מ"מ מכסה 10% מהשקף. האוליבין ברובו מוחלף החלפה מלאה לאידינגזיט ולעיתים הוא מוחלף רק בשוליו.

מטריקס: בינוני מגיע לגודל גבישים של 0.1 מ"מ. במטריקס גבישי בצר רבים, אוליבין ופירוקסן. המטריקס חסר לחלוטין פריזמות ובשל כך, לא ניכרת טקסטורה טרכיטית.

סימנים אינדקטיביים: אגרגטים של קלינופירוקסן עם תופעות תאום בשלל צבעים ומטריקס בינוני חסר פריזמות.

א.

ב.



בזלת 006, פירוקסן מתואם כפנוקריסטים בודדים או באגרגטים. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

7. בזלת 015 (4 שקפים, מפרגמנטים בטוף):

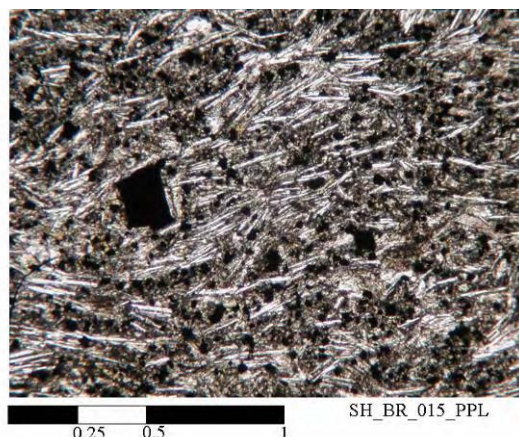
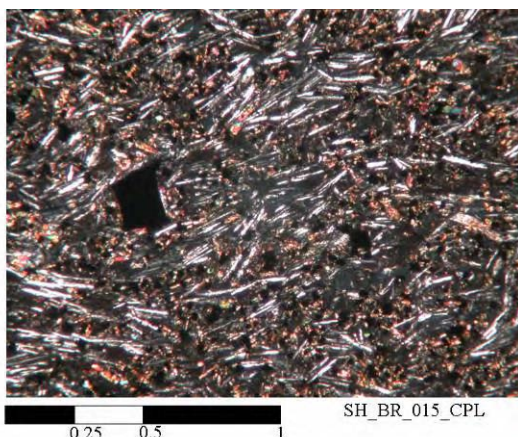
בזלת חסרת פנוקריסטים, למעט מספר מועט של גבישי בצר המגיעים לגודל של 1 מ"מ, (תאורם בתיאור המטריקס).

מטריקס: בגודל בינוני שברובו מגיע לגודל של עד 0.05 מ"מ. המטריקס מכיל פריזמות פלדספר בטקסטורה טרכיטית, ביניהן גבישי פירוקסן קטנים מאוד, מעט גבישי אוליבין קטנים ומינרלי בצר בי-מודליים, שהגדולים בהם מגיעים עד גודל של מילימטר והינם אוהדרליים עד סובהדרליים, והקטנים נעים סביב עשירית המילימטר.

סימנים אינדקטיביים: היעדר פנוקריסטים, למעט מינרלי בצר, וטקסטורת טרכית.

א.

ב.



בזלת 015, מטריקס של פירוקסן אוליבין בצר ופלדספר בטקסטורה טרכיטית. גביש בודד של מינרל בצר. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

8. בזלת 017 (16 שקפים, 11 מפרגמנטים של טוף ו-5 מגלעיני קידוח):

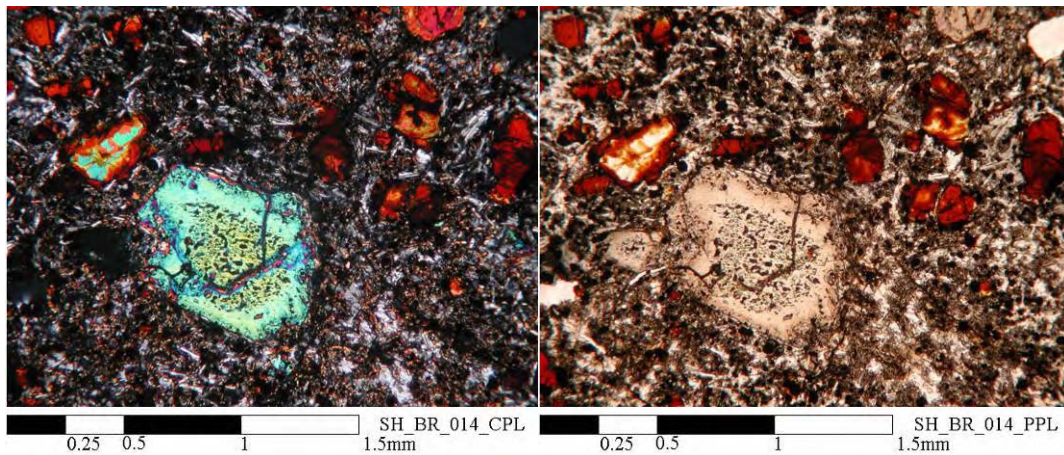
פנוקריסטים: גבישי קלינופירוקסן בגודל 0.25-1.75 מ"מ, המוחלפים במרכזם (קורוזיביים) ובשוליהם, ומצויות במ אינקלוזיות אוליבין, מכסים 9% משטח השקף. גבישי אוליבין המגיעים עד גודל 2 מ"מ מכסים 9% מהשקף. גבישי האוליבין אוהדרליים או סובהדרליים ולהם שוליים של אידינגזיט. אנליזות האלקטרון מיקרופרוב מלמדות, כי לאינקלוזיות האוליבין שבקלינופירוקסן הרכב שונה מהרכב הפנוקריסטים האוליביניים, עובדה המורה על גנזה מורכבת של בזלת 017 (ראה 'הרכבי מינרלים', איור 15).

מטריקס: גודל בינוני. הגבישים מגיעים לגודל של 0.1 מ"מ וביניהם פריזמות פלדספר, מנרלי בצר, ומעט אוליבין ופירוקסן.

סימנים אינדקטיביים: אוליבין מוחלף לאידינגזיט בשוליים או כל הגביש ופירוקסנים המוחלפים במרכזם ובשוליהם ומכילים אינקלוזיות אוליבין.

ב.

א.



בזלת 017, במרכז פירוקסן אוהדרלי המוחלף בגופו וסביבו ומעליו גבישי אוליבין המוחלפים לאידינגזיט. צילום שקף במיקרוסקופ אור מקוטב, א. אור מקוטב מישורית, ב. מקטבים צלובים.

נספח 2: הרכבים כימיים של דוגמאות בזלת מסביבת בריכת רם באחוזים משקליים.

	SH-BR-23	SH-BR-25	SH-BR-73	SH-BR-76	SH-BR-83	SH-BR-87	SH-BR-88
	BR-017	BR_006	כרמים עליונה BR	סער-BR	עין-זיון- BR	יעפורי תחתון-BR	יעפורי עליון-BR
SiO ₂	42.5	41.0	42.7	42.1	42.2	43.7	43.4
TiO ₂	2.7	2.7	3.1	3.4	2.9	3.0	3.2
Al ₂ O ₃	13.7	13.2	14.5	15.0	17.6	14.3	14.8
Fe ₂ O ₃	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3
FeO*	11.7	11.6	11.7	12.2	11.9	11.4	11.7
MnO	0.17	0.18	0.18	0.17	0.18	0.17	0.20
MgO	8.2	9.4	7.0	7.8	5.8	8.8	8.1
CaO	11.7	12.7	9.5	9.6	10.0	10.1	9.7
Na ₂ O	4.5	3.6	4.3	2.8	2.7	3.1	3.2
K ₂ O	1.0	1.0	1.3	1.2	0.8	1.6	1.8
P ₂ O ₅	1.4	1.3	2.0	1.5	1.3	1.4	1.4
SO ₃	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
L.O.I	1.1	1.3	1.5	2.5	3.0	0.8	1.3
SrO	0.15	0.15	0.21	0.15	0.11	0.13	0.15
Ba, ppm	680	690	950	720	570	610	590
Mg#	0.56	0.59	0.52	0.53	0.47	0.58	0.55
Total	100.1	99.4	99.3	99.8	99.8	99.8	100.3

*הברזל הדו-ערכי חושב כתשע עשיריות מכלל הברזל

נספח 3: הרכבי פורקסטים

שם הזוגמה	סלע המקור	SiO ₂ wt%	TiO ₂ wt%	Al ₂ O ₃ wt%	FeO wt%	MnO wt%	MgO wt%	CaO wt%	Na ₂ O wt%	Mg/(Mg+Fe)
SH_BR_006_B	בולת 006	48.94	1.90	6.05	6.05	0.00	13.42	23.47	0.50	0.80
SH_BR_007_B	קסנוליט מרסוף	50.45	1.63	8.40	7.30	0.00	10.25	19.86	2.24	0.71
SH_BR_014_B	בולת 017	51.58	0.83	3.91	8.66	0.00	13.34	21.91	0.69	0.73
SH_BR_017_C	בולת 017	51.73	0.61	3.77	9.13	0.00	13.46	21.28	0.58	0.72
SH_BR_025_A	בולת 006	48.44	2.14	6.59	6.26	0.00	13.18	23.62	0.51	0.79
SH_BR_025_B	בולת 006	48.27	1.69	8.62	10.29	0.00	9.24	19.31	2.09	0.62
SH_BR_109_D	קסנוליט מרסוף	48.27	1.69	8.62	10.29	0.00	9.24	19.31	2.09	0.62
SH_BR_109_E	קסנוליט מרסוף	48.01	1.61	7.70	10.83	0.27	9.82	19.38	2.16	0.62
SH_BR_109_F	קסנוליט מרסוף	47.23	1.75	9.09	10.03	0.11	9.74	19.17	2.07	0.63
SH_BR_109_H	קסנוליט מרסוף	47.86	1.65	7.93	10.29	0.30	9.53	18.72	2.14	0.62
SH_BR_109_I	קסנוליט מרסוף	48.01	1.75	8.66	10.35	0.26	9.27	18.99	2.15	0.61
SH_BR_109_J	קסנוליט מרסוף	47.55	1.95	8.74	9.88	0.23	9.41	19.34	2.17	0.63
SH_BR_110_B	קסנוליט מרסוף	48.72	0.87	7.30	8.76	0.12	11.68	21.31	1.04	0.70

נספח 4: הרכבי אוליבינים

שם הזוגות	סלע המקור	SiO ₂ wt%	Al ₂ O ₃ wt%	FeO wt%	MnO wt%	MgO wt%	CaO wt%	Mg/(Mg+Fe)
SH_BR_005_B	בזלת כרמלים	40.45		17.06		43.95	0.00	0.82
SH_BR_006_A	בזלת 006	40.60		15.77		44.20	0.00	0.83
SH_BR_014_A	בזלת 017	39.62	0.25	22.09		38.05	0.29	0.75
SH_BR_014_B_inclusion	בזלת 017	36.45		35.35	0.46	28.29	0.53	0.59
SH_BR_017_A	בזלת 017	40.19		14.44		44.62	0.30	0.85
SH_BR_030_Inc3	אנקלזייה באמפיניול בבזלת כרמלים	39.71		20.29		40.02	0.31	0.78
SH_BR_030_Inc4	אנקלזייה באמפיניול בבזלת כרמלים	39.73		20.75		39.57	0.37	0.77
SH_BR_030_Micri-phano1	מיקרוטפוקרקליט בבזלת כרמלים	40.60		17.11		43.92	0.13	0.82
SH_BR_030_Micri-phano2	מיקרוטפוקרקליט בבזלת כרמלים	39.44		21.94		38.45	0.31	0.76
SH_BR_030_Micri-phano3	מיקרוטפוקרקליט בבזלת כרמלים	39.09		21.20		38.02	0.38	0.76

נספח 5 : הרכבי גבישי אמפיבל מנרית רם באחוויים משקליים.

מיקור חיצומה	שם חיצומה	סוג האמפיבל	מספר אנליזות	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	MnO
בולת כרמים	SH BR 005 A	Kaersutite	5	2.18	12.86	15.27	40.36	1.88	11.19	5.17	8.64	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 007 A	Kaersutite	5	2.78	11.12	15.42	40.99	1.78	10.88	5.00	10.44	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 007 C	Kaersutite	3	2.74	10.96	15.35	40.31	1.62	10.69	4.64	11.53	0.14
קסנוליט מחרטוף	SH BR 007 D	Pargasite	3	2.75	11.31	14.92	40.77	1.51	10.64	4.40	11.13	0.14
קסנוליט מחרטוף	SH BR 007 E	Pargasite	3	2.92	11.44	14.89	40.88	1.47	11.02	4.34	11.10	0.25
בולת כרמים	SH BR 026 A	Kaersutite	3	2.48	11.88	15.34	39.59	1.81	11.10	5.02	11.04	
בולת כרמים	SH BR 026 B	Kaersutite	3	2.35	12.25	15.48	39.95	1.80	11.26	5.26	9.92	
בולת כרמים	SH BR 030 A	Kaersutite	3	2.41	12.56	15.40	39.75	1.74	11.27	4.99	9.53	
בולת כרמים	SH BR 030 B	Kaersutite	3	2.66	11.76	15.33	39.99	1.46	10.77	5.15	10.96	
בולת סער	SH BR 093 A	Kaersutite	3	2.35	12.46	13.93	39.63	0.89	12.14	6.47	10.42	
בולת סער	SH BR 093 B	Kaersutite	3	2.32	12.36	14.24	39.25	0.77	12.27	6.48	10.12	
בולת סער	SH BR 093 C	Kaersutite	3	2.41	12.05	14.17	39.29	0.97	11.96	6.28	10.44	
בולת סער	SH BR 093 D	Kaersutite	3	2.43	12.23	14.23	39.49	0.99	12.26	6.30	10.26	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 106 A	Kaersutite	3	2.33	13.09	15.29	39.75	1.88	11.29	5.31	8.75	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 106 B	Kaersutite	3	2.12	13.00	15.36	39.59	1.77	11.27	5.30	8.53	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 106 C	Kaersutite	3	2.34	13.24	15.91	40.55	1.89	11.23	5.01	8.44	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 107 A	Kaersutite	3	2.54	12.76	15.32	40.25	1.76	11.19	5.03	9.25	0.08
מגקריסט מחרטוף	SH BR 108 B	Kaersutite	3	2.27	12.96	15.64	40.08	1.79	11.11	5.36	9.52	0.01
מגקריסט מחרטוף	SH BR 108 C	Kaersutite	3	2.33	12.86	15.36	40.25	1.74	11.22	5.01	8.51	0.09
קסנוליט מחרטוף	SH BR 110 F	Kaersutite	3	2.39	10.90	15.68	40.42	0.78	10.77	2.54	13.33	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 109 G	Kaersutite	3	2.80	10.16	14.91	39.66	1.38	10.27	4.82	13.78	0.20
קסנוליט מחרטוף	SH BR 110 I	Pargasite	2	2.58	10.98	15.89	40.14	0.80	11.12	2.73	13.69	0.20
קסנוליט מחרטוף	SH BR 125 A	Pargasite	3	2.32	9.84	14.02	40.80	1.54	10.51	3.85	15.57	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 125 B	Pargasite	3	2.50	9.66	14.32	40.65	1.55	10.63	3.77	15.84	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 125 C	Pargasite	3	2.56	9.95	13.93	40.83	1.50	10.52	3.94	15.45	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 125 D	Edenite	3	1.18	11.13	5.95	49.47	0.01	19.89	0.72	11.41	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 125 E	Pargasite	3	2.38	9.74	13.90	41.12	1.53	10.67	3.71	15.80	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 125 F	Pargasite	3	2.12	9.77	14.23	40.74	1.56	10.88	3.68	15.27	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 122 A	Kaersutite	3	2.52	10.48	15.14	39.60	1.43	10.97	5.31	12.46	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 122 B	Edenite	3	1.25	12.74	9.56	47.85	0.02	20.36	2.08	6.76	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 122 C	Kaersutite	3	2.39	12.46	15.34	40.53	1.51	11.24	5.19	9.97	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 122 D	Kaersutite	3	2.43	12.81	15.45	40.22	1.65	11.33	5.32	9.45	
מגקריסט מחרטוף	SH BR 123 A	Kaersutite	9	2.39	12.34	15.62	40.12	1.72	11.20	5.07	9.84	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 127 A	Kaersutite	4	2.82	10.37	16.16	39.92	1.33	10.65	4.63	13.10	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 127 B	Kaersutite	5	2.73	9.89	16.10	39.85	1.39	10.71	4.59	13.51	
קסנוליט מחרטוף	SH BR 129 A	Kaersutite	4	2.67	10.72	16.10	39.70	1.25	11.06	5.22	12.15	

* ההרכבים המועגים הינם ממוצע תוצאות האנליזות עבור גביש ספציפי.

נספח 6: מרטי המוליזה של גילי ה OSL

Sample	Location	Depth	Field γ + Cosmic (mGy/a)	Moisture (%)	K %	U (ppm)	Th (ppm)	Ext. a (mGy/a)	Ext. b (mGy/a)	Total dose (mGy/a)	De (Gy)	Age (ka)
BRU-1	שכבת טוף עליונה תחת קילוח טער (H6)	2.5 (m)	855	14	0.54	2.2	10.3	9	775	1640±93	189±18	115±13
BRU-2	פלאוסול על סקוריה מפורסה בטוף	2.5	826	18	0.73	1.7	7.2	6	737	1569±88	337±82	215±54
BRU-3	פלאוסול על קרובנט מפורסה בטוף	3	721	24	0.52	3.9	4.4	8	750	1478±85	246±16	166±15
BRU-4	שכבת טוף שלישית מעל BRU-3	1.5	630	17	0.29	2	9	8	560	1198±71	398±47	332±44
BRU-5	שכבת טוף H3-18	2	844	13	1	1.4	6	5	879	1729±96	194±24	112±15
BRU-6	שכבת טוף H3-37	2	859	7	1.16	1.6	5	6	1044	1909±96	280±34	147±19

Depth – מיוחס לעובי כולל של הסדימנט (במטרים) מעל נקודת הדיגום.

Cosmic + Field γ – מדידת קרינת הגמא והקרניה הקוסמיות בשדה, באתר הדיגום ביחידות של מיקרו גריי לשנה.

Moisture – לחות הדוגמה, חושבה משקלית בשקילה יבוש ושקילה חוזרת.

U and Th – היסודות הרדיואקטיביים נמדדו באנליזה כימית של הדוגמה.

α Ext. – חישוב קרינת α שחדרה לגרגרי הקוורץ לפי ריכוזי היסודות הרדיואקטיביים. ערכיה נמוכים משום שחדירותה בקוורץ נמוכה ושולי גרגרי הקוורץ הומטו בחומצת HF.

β Ext. – חישוב קרינת β שחדרה לגרגרי הקוורץ לפי ריכוזי היסודות הרדיואקטיביים.

Total dose – סכום הקרינה החיצונית שהגיע לגביש (b Ext. + a Ext. + Cosmic + Field γ) במיקרו גריי לשנה.

De – ערך כמות האור שנופלט מן הדוגמה בהקרנה ראשונית, לפי גרף הכיול של התנהגות הדוגמה ביחידות של קרינה (גריי).

south. The absence of paleosol within the tuff implies that the explosions occurred within a relatively short time of no more than 10-15 years.

A NNE-trending fault was described in the southern rim of the maar. It is suggested that the fault was part of the hydrological system, and enabled the interaction of the rising magma with groundwater in the local aquifer, causing the phreatomagmatic eruption.

Amphibole (Kaersutite) megacrysts are very common in Birket Ram Tuff together with other lower crustal to upper mantle xenoliths. Kaersutite phenocrysts were also uniquely found in the Upper Keramim Basalt. Olivine inclusions in the amphibole have very similar composition to that of olivine microphenocrysts in the same basalt, implying that the amphibole crystallization occurred simultaneously with the olivine. The presence of the amphibole phenocrysts and megacrysts in the Upper Keramim Basalt and the tuff suggests that these magmas were H₂O-rich. It is suggested that the relatively high content of water and the resultant vesiculation with decreasing pressure allowed better interaction of the melt with shallow groundwater, which led to the phreatomagmatic eruption. The abundance of xenoliths in the tuff (also in Keramim Basalt) could also be related to the different rheology of this water-rich magma.

Abstract

Birket Ram is a maar lake located at the northwestern edge of the Ash-Shaam volcanic field, next to the contact of the Golan Pleistocene basalts with the Mt. Harmon anticline. The maar-lake is a window into the regional aquifer, created by phreatomagmatic eruptions. The maar's rims are covered with Birket Ram Tuff. The tuff mainly consists of lithic clasts, fragments of surrounding rocks that were fragmented during the explosions, with a minor component of juvenile material (palagonitic glass).

The sedimentary basement of the Birket Ram area consists of Jurassic, Cretaceous and Eocene rocks. Birket Ram is underlain by a depression with a steep topography, the Ram Valley. This valley was filled with a thick section of Pleistocene volcanics, mainly basalts, which unconformably covered the Mesozoic sediments. Some of the basalts (En zivan, Lower Keramim and Upper Keramim) are exposed at the surface around the maar, while other, older basalts are known just from the subsurface or found as fragments in the tuff (basalts 17, 15 and 6). A Scoria cone covers the Upper Keramim Basalt at the southwestern part of the maar, and it is intruded and intercalating with intrusions and flows of the Ya'afuri Basalt. Birket Ram Tuff covers all of the above volcanic units. West of the maar, the tuff is covered by the Sa'ar Basalt, which represents the most recent volcanic event in the area and the end of the phreatomagmatic era at Birket Ram.

All the basalts have a similar, basaltic composition. Petrographic differences between the basaltic units allow the identification of the basaltic fragments in the tuff.

Seven columnar sections of tuff were described around the lake. Three of these sections were correlated at the field. This correlation was verified through the granulometric work results, enabling the documentation of a 46 m-long tuff sequence of the southeastern rim (hereinafter "The Main Section").

A granulometric work on the main section showed cyclical changes in the grain size of the tuff matrix and in the occurrence of big fragments (> 30 mm) in the tuff. These reflect changes in the intensity of the phreatomagmatic eruptions. At least two cycles of increasing and decreasing intensity were identified. The presence of big fragments in tuff layers containing flow structures suggests a synchronous activity of base surges and ballistic transport during the phreatomagmatic explosions.

The volume of the diatreme was calculated as 0.26 cubic km, assuming a cone model and a depth-diameter ratio of 1:1. The diatreme penetrates through a volcanic section of hundreds of meters, and through the base of Ram Valley into the Cretaceous. Quartz grains, identified as the Lower Cretaceous Katih formation, were found as fragments in the tuff, suggesting the diatreme penetrated at least as deep as this formation in the sedimentary section.

Thermoluminescence ages of eolian quartz from a calcritic paleosol (166 ± 15 Ka) and of Cretaceous quartz grains, found in a tuff layer directly underlying the Sa'ar Basalt (115 ± 13 Ka) set a time window of 80 thousand years between 100 to 180 Ka within which the phreatomagmatic explosions occurred. These ages are similar to Ar-Ar ages of the phreatomagmatic eruption of Mt. Avital, 13 km to the



THE MINISTRY OF NATIONAL
INFRASTRUCTURES
GEOLOGICAL SURVEY OF ISRAEL

Birket Ram maar

Uri Shaanan

This work was submitted for the degree of M.Sc.
to the Senate of the Hebrew University, Jerusalem.

The study was carried out under the supervision of:
Prof. Oded Navon, Institute of Earth Sciences, Hebrew University of Jerusalem.
Dr. Yishai Weinstein, Department of Geography, Bar-Ilan University.
Dr. Ram Weinberger, Geological Survey of Israel.