

'הפרצוף הדולומיטי' של מדבר יהודה

אלי רו

מוקדש לכבודו ולזכרו של פרופ' רפי פרוינד ז"ל,
שנפטר בטרם עת ובעיצומה של יצירתו המדעית

מטיולינו הראשונים במדבר יהודה זכורים בעיקר הקור המקפיא בלילות, עשן המדורה, משקל התרמיל ועקביו של הצועד לפניך. בחניות הרשה סגן אלוהים – הסייר (עדיין לא המציאו את המדריך) – לכל עשרה לשתות מימייה. לאחר מכן קרא בשמות הנחלים וההרים והסביר, אולי, כל מה שצריך. אלא שחוסר השינה בלילות, היצמדות לעקבים של ההולך לפניך, מגע הסרפד של שמיכות הצמר הקשורות לתרמיל שהגביל את חופש התנועה של הצוואר ובעיקר ספירת תנועות הגרוגרת של תשעת השותפים למימייה הסיחו את הדעת. אין דרך אחרת להסביר כיצד נעלמה מעינינו תופעת טבע מרשימה וייחודית בעולם – 'צלחות הדולומיט' של מדבר יהודה.

דולומיט (dolostone) הוא סלע שכיח למדי בין סלעי המשקע הימיים. הסלע, וכן שרשרת ההרים שבה הוא נפוץ והוגדר לראשונה בסוף המאה השמונה עשרה (הרי הדולומיט, באלפים הטירולים שבצפון איטליה), נקראים על שם המגלה המינרלוג הצרפתי דה דולומי (Dolomieu). שלא כמקובל, שם הסלע בעברית הוא כשם המינרל השולט בו. הדולומיט, בדומה למינרל הנפוץ קלציט, השולט בסלע הגיר, הוא מינרל קרבונטי (פחמתי – מכיל את היחידה CO_3). בשונה

* אלי רו, גאולוג וביולוג, מרכז מדע ים המלח והערבה. המאמר מבוסס על פרק מעבודת מוסמך בהנחייתם של רפי פרוינד ז"ל, איתן שש, אברהם סטרינסקי ויוסי ברטוב.

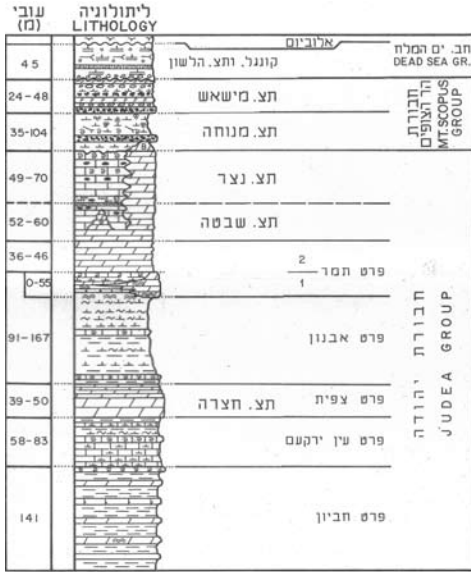
מהקלצ'יט, הוא מכיל, נוסף על הסידן, גם את היסוד מגנזיום, ביחסים קרובים ל-50% (ראו מסגרת בעמ' 6).

במזרח מדבר יהודה נחשפים שני סוגי דולומיטים: (א) דולומיט קונקורדנטי*¹ המופיע בשכבות, בהתאמה לשיכוב הכללי של החתך; (ב) גופי דולומיט דיסקורדנטי² שאינם מונחים בהתאמה לחתך הסטרטיגרפי³. גופים אלה מופיעים כאיים ומובלעות בעלי צורות, ממדים והשתרעות אופקית ואנכית המשתנים ממקום למקום, בתוך שכבות של גיר וקרטון, אך ללא קשר מחייב למישורי השיכוב. מופע זה של גופי הדולומיט, הנראה היטב בקירות הקניונים ובמצוק ההעתקים, נצפה כבר בשנות החמישים (Wyssling & Ziegler, 1955) וכונה בשם 'הפרצוף'⁴ (הפאצייס) הדולומיטי של ים המלח' (בן תור ופרומן, 1961), להבדילו מהמופעים השכיחים יותר של הדולומיטים בארץ.

החתך הסטרטיגרפי של מזרח מדבר יהודה (איור 1) כולל את חבורת יהודה מגיל קנומן-טורון (מלפני כ-100-90 מיליון שנה) בעובי של כ-600 מ' של שכבות סלעים ימיים: בעיקר גירים ודולומיטים, וכן חרסיות וחוארים ומעט צור. 'תצורת נצר', העשויה בעיקרה שכבות קשות של סלעי גיר ודולומיט, מהווה את גג חבורת יהודה ועליה מונחת 'תצורת מנוחה', מגיל סנטון (מלפני כ-87-84 מיליון שנה), שהנה בסיס חבורת הר הצופים. עובייה של תצורת מנוחה מגיע לכ-100 מ', ועיקרה הוא קרטון רך, המסולק על ידי הארוזיה בקלות יחסית, לעומת החתך הקשה של חבורת יהודה שנחשף מתחתיה. חשיפה זו יוצרת רצועה של במת שוליים קשה, המתפתחת משפות מצוק ההעתקים⁵ והקניונים הגדולים פנימה, לרמת המדבר רוחב הרצועה משתנה ממקום למקום בהתאם למידת החשיפה, והיא מאופיינת על ידי מעברים לצדדים (לטרליים) בין גיר לדולומיט דיסקורדנטי.

בחבורת יהודה נפוצים למדי דולומיטים קונקורדנטיים. בולטים בכך במיוחד הפרטים צפית ותמר של תצורת חצרה (הנמוכה בתצורות חבורת יהודה, איור 1), היוצרים רצועות מצוקים אופייניות. דולומיטים דיסקורדנטיים נפוצים מאוד בתחומי התצורות הטורוניות, הגבוהות, של חבורת יהודה – שבטה ונצר (איור 1), ובמידה מועטה יותר בחלק התחתון של תצורת מנוחה. במקומות מעטים הם נמצאו גם בפרט אבנון של תצורת חצרה. בעוד דולומיטים קונקורדנטיים נפוצים למדי גם באזורים אחרים בארץ, תפוצת הדולומיטים הדיסקורדנטיים מוגבלת לרצועה צרה, שאורכה 75 ק"מ ורוחבה עד 7 ק"מ, במזרח מדבר יהודה (איור 2).

* ראו הסברים למושגים בסוף המאמר.



בסיס לא חשוף

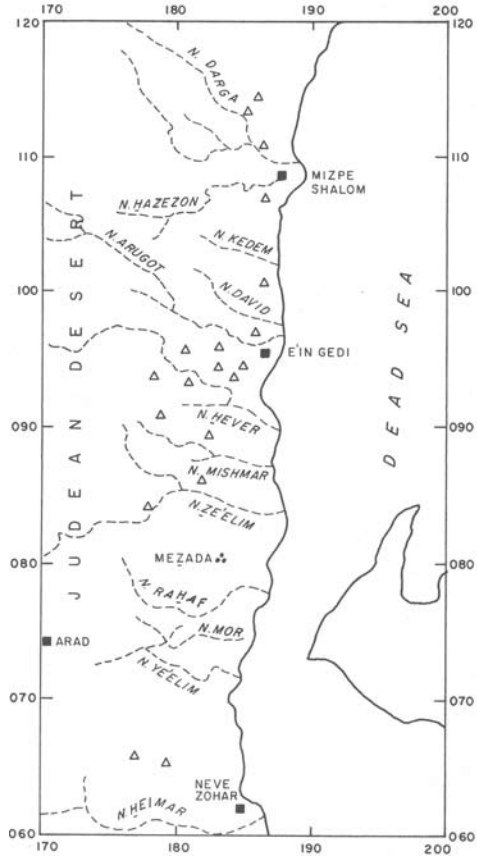


איור 1:

למעלה - סטריגרפיה ומסלע של אזור העבודה; למטה - תפוצת דולומיטים דיסקורדנטיים בחתך.



איור 2:
 מפת אתרי הדגימות של
 הדולומיטים הדיסקורדנטיים
 לצורך המחקר.



מלבד השוני בהופעתם המרחבית שונים שני סוגי הדולומיט זה מזה גם במדדים כימיים, איזוטופיים, קריסטלוגרפיים, פטרוגרפיים ועוד. כמו כן נמצא כי בעוד בסוג הראשון משתנים מדדים אלה מיחידה ליחידה בממד האנכי, בסוג השני הם בולטים יותר באחידותם בכל מרחב התפוצה שלהם. מאחר שסדר השכבות מייצג את סדר היווצרותן עם הזמן (ותיקות למטה וצעירות למעלה), סביר להסיק שהשוני בין היחידות במדדים השונים שנמדדו בדולומיטים הקונקורדנטיים הוא פרי הבדלים בתנאי הסביבה, שחלו עם הזמן. האחידות היחסית בדולומיטים הדיסקורדנטיים, לעומת זאת, מצביעה על היווצרותם במערכת תנאים דומה ובפרק זמן אחד, בכל מרחב התפוצה שלהם. דומה שכל האמור עד כאן, די בו כדי לשכנע כי שני סוגי הדולומיטים שונים זה מזה מבחינה גנטית.

העובדה כי תפוצת הדולומיטים הדיסקורדנטיים מוגבלת לרצועה המשיקה לבקעת ים המלח הובילה את המחקר לבירור הקשר המתבקש בין היווצרותם של סלעים ייחודיים אלה לבין התנאים הייחודיים שליוו את ההתפתחות הגאולוגית של בקעת ים המלח.

היווצרות הדולומיטים הקונקורדנטיים

שכבות דולומיט קונקורדנטי נפוצות למדי בנופיהם של סלעי המשקע הימיים בארץ ובעולם, וכמו שכבות הגיר, העשויות מהמינרל קלציט (CaCO_3), החלו את דרכן כבוצה (סדימנט) קלציטית. בוצה זו שקעה על קרקעיתו של ים רדוד ונרחב ונוצרו ממנה הסלעים המוצקים, הניכרים ברצף הסטרטיגרפי כשכבות בעלות גבס ברורים והשתרעות נרחבת. אלה משקפות תנאי היווצרות דומים שהתקיימו על פני מרחבים גדולים.

התהליך שבו הופכת שכבת הבוצה לשכבת דולומיט מוצקה מכונה בשם 'דיאגנוזה'; והשינוי המינרלוגי מתחולל במהלכו על ידי המסת גבישי הקלציט ויצירת גבישי דולומיט בתמורה (ראו מסגרת בעמ' 6), זאת בהתאם לתנאים הסביבתיים השוררים באגן ההשקעה (Mathews & Katz, 1977). לגיבוש דולומיט נדרש בדרך כלל יחס מולרי Mg/Ca גבוה מזה הנדרש לגיבוש קלציט, ואם יחס זה אינו מושג, הסלע שיתקבל הוא גיר. עלייה בטמפרטורת התמיסה ומיהולה במים מתוקים עשויים למתן את הדרישה ליחס Mg/Ca גבוה לשם היווצרות הדולומיט, בעוד עלייה במליחות הכללית של התמיסה מגבירה אותה. דיאגנוזה כזו נקראת פנקונטמפורנית (penecontemporaneous), לציון התרחשותה בשלב מוקדם ובסביבת ההשקעה של הבוצה.

הסלעים אוצרים בתוכם עדויות על מחזורי שינויים בלתי פוסקים בפני כדור הארץ לאורך תולדותיו. בעשרות מיליוני השנים האחרונות דחסה תנועתם של לוחות הקרום מסות סלע אדירות, שהפכו לשרשרות של רכסי קימוט גבוהים כגון: ההימליה, האלפים והרוקי. לצדן נפערו מצולות אדירות שאליהן משתפלות קרקעיות האוקיינוסים החדשים ומתנקזים המים שכיסו קודם לכן את המרחבים הרדודים. במקביל הודגשו ההבדלים בין רצועות האקלים של כדור הארץ והחורפן. תוצאת השינויים הללו, בין השאר – לא עוד תנאים שווים על פני

מרחבים גדולים, לא עוד היווצרות שכבות סלעים בעלי אחדות יחסית מאופק לאופק. הסביבות המעטות והמצומצמות שבהן עדיין מתרחשת כיום דולומיטיזציה, ומהן אפשר להסיק על העבר, הן בעיקר גופי מי ים באקלים חם, מבודדים יחסית וחשופים לאידוי נמרץ, כמו מלחות ולגונות בשולי המפרץ הפרסי והים הקריבי, שטמפרטורת הבוצה שלהן יכולה להגיע לכ-50°C.

היווצרות הדולומיטים הדיסקורדנטיים

תצפיות השדה מצביעות על זיקה הדוקה בין הגופים הדיסקורדנטיים לסדקים ושברים. לדעת חוקרים רבים הן מספקות ראיות טובות להובלת תמיסות עשירות במגנזיום באמצעותם, ואלה גרמו לדולומיטיזציה שלאחר התמצקות הסלע, כאשר התנאים כבר אינם תנאי אגן ההשקעה המקורי והנרחב. דיאגנוזה מאוחרת זו, או אפיגנוזה (כהגדרתם של Chilinger et al., 1967), שהתרחשה בסלע מוצק ולא בבוצה, היא הגורם להופעתם של גופי הדולומיט הדיסקורדנטיים, שיכוננו להלן גם אפיגנטיים.

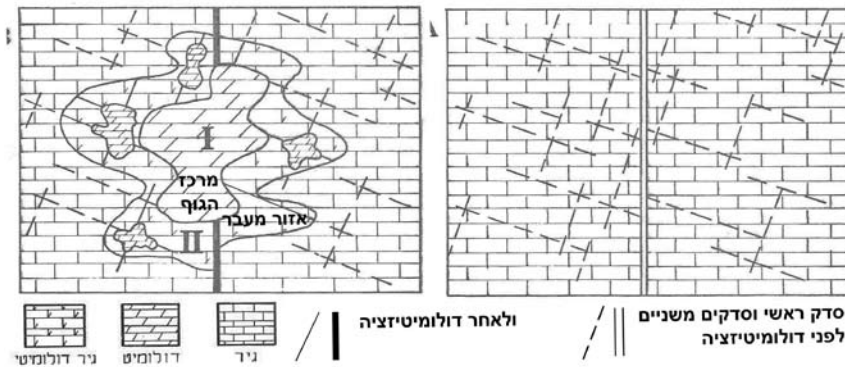
דולומיטיזציה



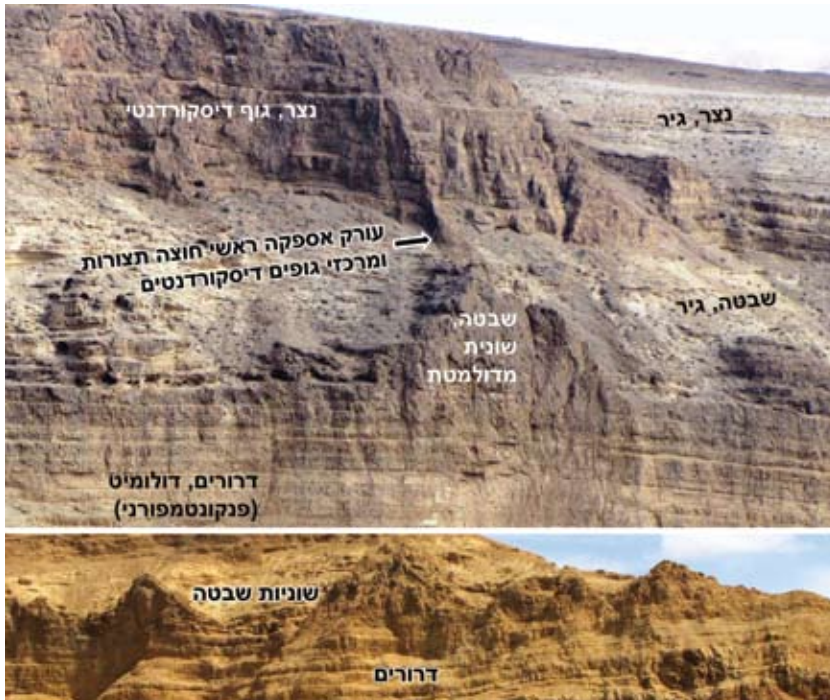
דולומיטיזציה היא ריאקציה כימית בין בוצה, או סלע מוצק, לתמיסה עתירת מגנזיום, שבמהלכה מומסים גבישי פחמת הסידן (ארגוניט או קלציט) ובמקומם נוצרים גבישים חדשים של דולומיט. מגנזיום שנתרם מהתמיסה משתתף בבניית הגבישים החדשים על חשבון חלק מהסידן שמקורו בגבישים שהומסו. התוצאה המהותית היא העשרה של הסלע במגנזיום על חשבון התמיסה והעשרה של התמיסה בסידן על חשבון הסלע, יון תמורת יון. היחס בין המגנזיום לסידן בתמיסה יורד אפוא במהלך הדולומיטיזציה, וללא תוספת של תמיסות רעננות, מיהול או חימום יגיעו התמיסה והסלע לשיווי משקל והתהליך ייעצר.

בספרות מתוארות צורות הופעה מגוונות של דולומיטים אפיגנטיים, כגון גופים אי־רגולריים, 'דגמי ארזים', 'פטירות' (איורים 1, 4) וכדומה, והן מצויות בשפע באזור המחקר. מגופים אלה יוצאים זרועות ועורקים חוצי שכבות אל סלע הסביבה.

מרכזי הגופים הדיסקורדנטיים התפתחו על סדקים אנכיים, שהיו נתיבי האספקה העיקריים של התמיסות המדלמטות. במעברים מהגופים הדיסקורדנטיים והחוצה נראים שינויים מסלע של 100% דולומיט דרך טיפוסי הביניים: דולומיט קלציטי וקלציט דולומיטי, עד לסלע גיר של 100% קלציט (איורים 3, 4). שינויים אלה מתרחשים בדרך כלל בתחום של מטרים ספורים, אך לעתים המעברים חדים יותר, למשל בין עורק ממולא בדולומיט לבין סביבתו הגירית. יחסי המינרלים קלציט־דולומיט בטיפוסי המעבר נקבעים על פי מקומם באזור המעבר. דולומיט שהנו ממש באזור המעבר מוגבל לעורקים, שעוביים הולך ודק עד למילימטרים ומיקרונים.



איור 3: סכמה של התפתחות גוף דולומיט דיסקורדנטי בהשפעת תמיסות המובלות דרך סדקים. לעתים נראה עורק האספקה העיקרי (סדק ראשי), סביבו מתפתחים מרכזי הגופים וסביבם אזור מעבר אל הסביבה הגירית. 'דגמי ארזים', המכונים גם 'דולומיטיזציה מטפסת' (ascendant) התפתחו, ככל הנראה, בעקבות תנועה של תמיסות מדלמטות, מהסדקים האנכיים אל גוף הסלע. תכונת מוליכות הנוזלים, המשתנה משכבה לשכבה, יצרה את הדמיון לגזע וענפים. צמרת הארז וקצות הענפים מציינים את גבולות יכולת ה'דלמוט' של התמיסות, שהם תוצאה של דלדול במגנוזיום או איבוד חום לסביבה תוך כדי התהליך, ולא דווקא את קצה גבול החדירה של התמיסות, שכן 'טביעות אצבעות' איזוטופית וקריסטלוגרפית שלהן נמשכות גם לתוך הגירים השכנים.



איור 4: גופים דיסקורדנטיים בתצורות שבטה (בעיקר שוניות מדולמתות) ונצר לעומת הדולומיט הקונקורדנטי בתצורת דרורים. למטה – עורק אספקה ראשי הקשור להתפתחות גופים דיסקורדנטיים, הן בתצורת שבטה והן בתצורת נצר, ואינו ניכר בתצורת דרורים.

מופע ייחודי למדבר יהודה הם גופים דמויי חרוט בתוך תצורת שבטה. גופים אלה היו במקורם שוניות רודיסטים⁷ (Rudists patch reefs) מפורזות שצמחו מקרקעית הים הרדוד, לעתים למלאו עובי התצורה, והודות למרקם הנקבובי זכו לספיגת יתר של תמיסות מדלמתות. השוניות המדולמתות כהות וקשות מהגיר המקורי, ובליה דיפרנציאלית מבליטה אותן בחתך (איור 4).

במת השוליים של רמת מדבר יהודה (גג תצורת נצר) משופעת במעברים מגיר לדולומיט דיסקורדנטי. מעברים אלה ניכרים בשינויים מפני שטח בהירים, מתונים ונוחים להליכה לגבעות של טרשים כהים ומתישים, שהמטיילים המנוסים, ויותר מכך הגיפאים, מודעים להם היטב.

בחינה מיקרוסקופית של מרקם הגופים הדיסקורדנטיים מגלה אף היא מאפיינים מובהקים של דולומיטיזציה אפיגנטית. סטרוקטורות מוקדמות לדולומיטיזציה טושטשו כמעט לחלוטין, למעט מאובנים שאינם עשויים קלציט או ארגוניט, כגון שברי עצמות ושיניים. חלקיקים העשויים תחמוצת צורן (SiO_2) שהיא תוצר של סביבה חומצית (pH נמוך), כגון גרגרי קוורץ ומיקרופאונה מצוררת שנחשפו לתמיסות מדלמטות בעלות pH גבוה, מזוהים בחלק הגירי של הדוגמה וחסרים לעתים בחלק הדולומיטי שלה, ואם הם קיימים, הם מציגים פני שטח מכורכמים. עדשות אבן חול נובית נפוצות בגבול התצורות שבטה-נצר. במקומות שגבול זה נחצה על דולומיטים דיסקורדנטיים, 'הולחמו' גרגרי הקוורץ זה לזה ונוצר סלע חדש וקשה במיוחד – קוורציט. החומר המלכד הוא המינרל כלקדון-פולימורף⁸ של קוורץ, והוא מעיד על המסת מעטפת הגרגרים על ידי התמיסות וגיבושם מחדש (recrystallization) עם נדידתן הלאה.

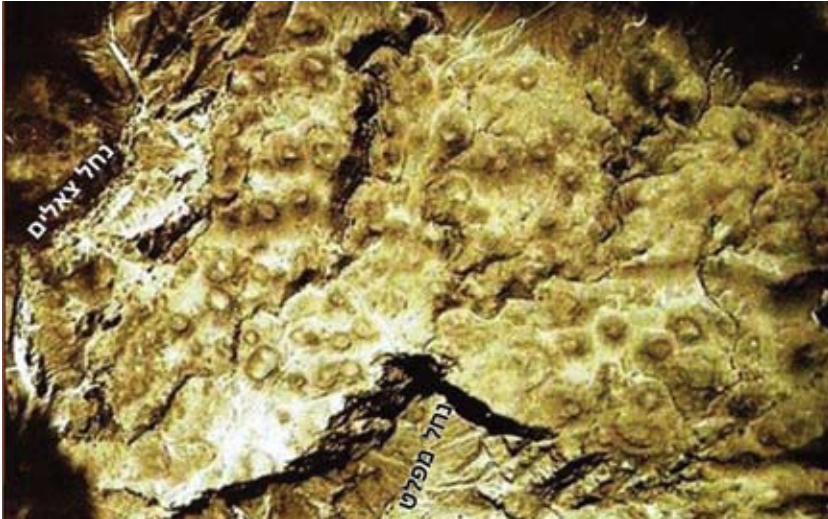
צלחות הדולומיט

במת השוליים נעדרת מבני קימוט קלסיים, אך לעתים מלווה המעבר גיר-דולומיט בהתעבות שכבות והתפתחות מבנים מקומיים קטנים בתחום התצורה. עיבוי מצטבר של שכבות, בדרך כלל במרכזים של גופי הדולומיט, מתבטא במעין תפיחות בפני השטח, הנראות כגבעות חומות ונמוכות של טרשי דולומיט. בראשיהם של חלק מהמבנים הללו קיימים שקעים טופוגרפיים רדודים, שקוטרם עשרות עד מאות אחדות של מטרים. בהיעדר ניקוז חיצוני, האבק האאולי⁹ נשטף מפני השטח של השקעים ומצטבר עם הזמן במרכויהם. הוא מכסה את טרשי הדולומיט שבמרכז ומבליט את השקעים בגונו הבהיר, לעומת טבעת השוליים של הדולומיט הכהה (איור 5). צפיפותם של גופים אלה עשויה להגיע לעשרות בקילומטר מרובע אחד, והם משווים לפני השטח נוף המזכיר פני ירח מחוטטי מטאוריטים (איור 6). אין ספק שמשלל המופעים הדיסקורדנטיים של הדולומיטים האפיגנטים במדבר יהודה, זהו המופע הייחודי והמרתק ביותר ואין דיווח על תופעה דומה במקום אחר בעולם; מישוהו קרא להם 'צלחות', והכינוי התקבע.



איור 5: צלחות דולומיט בקרבת השבר המערבי של הורסט מצדה, אבק אאולי שנשטף למרכז מדגיש את צורת הצלחת (צילום 'אלבטרוס').

ספרות המסעות והטיולים מתעלמת מהתופעה חרף ייחודה הנופי, אולי משום שהנתיבים המסורתיים אינם מובילים לראשי הגבעות. ניסיונות ההסבר הראשונים צצו לאחר שהתופעה נצפתה בצילומי אוויר, בעקבות מלחמת העולם הראשונה, והם נשענו על הדמיון לתופעות טבע מוכרות כגון לועות געשיים, דולינות קרסטיות ורישומי פגיעות של מטאוריטים. ניסיון הסבר נוסף הציע קשר בין הצלחות לאטולים¹⁰, אולם לכל ההצעות הללו לא נמצאו סימוכין בשטח. בעבודתם החלוצית, הראו אריה גילת וחבריו (Gilat et al., 1978) טביעת אצבעות גאוכימית משותפת לצלחות ולגופים טבוריים סמוכים. להצעתם, דולומיטים אלה נוצרו בהשפעת תמיסות חמות שעלו מהעומק, נעו בסלעים לאורך סדקים ומהסדקים נקלטו בסלעי הסביבה, בהתאם ליכולת הספיגה שלהם, ובמיוחד בשוניות בעלות נקבוביות. ג'רלד פרידמן וחבריו (Friedman et al., 1979) הציעו לראות את מקורה של צורת הצלחות בשוניות דמויות חרוט, שבלטו מעל פני הים הקדמון ופסגותיהן נקטמו בפעולות גלים. הצעה זו גורסת כי ההבדל בתנאי הסביבה בין

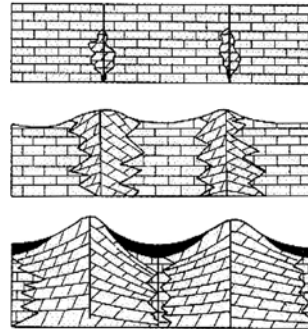
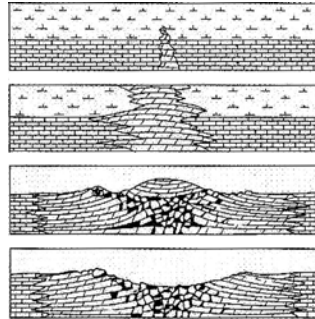


איור 6: צלחות על במת השוליים מדרום לנחל צאלים.

מרכז השונית לשוליה גרם לכך שההיקף היה עמיד לבליה יותר מאשר המרכז, שהתבלה מהר יותר, ומכאן צורת הצלחת.

במסגרת המחקר המוצג כאן נדגמו צלחות רבות בגג תצורת נצר ולא נמצאה כל ראייה למקור שונית, לא בבדיקות שדה ולא תחת המיקרוסקופ. כאמור, בתצורת שבטה אכן נמצאו שפע של שוניות דמויות חרוט ומדולמטות, אך ללא צלחות. במקומות שגופים אלה נחשפים במלואם לבליה, הם מאבדים את חוד החרוט, פסגותיהם מתעגלות, אבל לא נוצר בהם שקע כלשהו.

ניתן להבחין בשני טיפוסים צלחות: 'מכתשוניים' ו'קערונים' (איור 7). המכתשוניים הם אותם שקעים המופיעים בראשי חלק מהתפיחות הדולומיטיות והשיכוב בהן נטוי מהמרכז לשוליים. התפיחה הקלה אינה אלא 'קצה קרחון דולומיטי', ובמקרים בהם הוא חצוי על ידי קיר זקוף של קניון. ניתן לעתים להבחין בו לעומקים של עשרות רבות של מטרים ולהתרשם מסדקים רבים והתפרקויות גושים בסלעי הליבה. טיפוס זה, עגול או אליפטי, מושך תשומת לב רבה במיוחד כאשר הוא מופיע בריכוזים גדולים (איור 6). נוסף על התופעות שתוארו נמצאו גם תפיחות קוויות לאורך סדקים וכן תפיחות על מערכות סידוק הכולאות בתוכן שטח שנתר נמוך, ואלה יוצרות את טיפוס הקערון.



איור 7: למעלה – צלחת מטיפוס 'מכתשון', שימו לב לעיבוי השכבות במרכז הגוף ולקריסה בפסגת התפיחה, השכבות נוטות מהמרכז החוצה. למטה – צלחת מטיפוס 'קערון', שימו לב למסגרת המצולעת של מישורי העתקה קלה, אך ברורה. הפינות מעובות, השכבות תפוחות בשוליים ונוטות אל המרכז השקוע. בתרשימים מימין – שלבי ההתפתחות המשוערים.

התעבות השכבות במהלך הדולומיטיזציה האפיגנטית במרכזי הגופים התרחשה בסלע מוצק, ובמידה שונה משכבה לשכבה. עקב כך נוצרו לחצים בתוך השכבות וביניהן, שגרמו לסידוק הסלע ופירוקו ולהופעה הבריכוואידית הנצפית בלב הגופים. העיבוי המצטבר, שיצר את התפיחה על פני השטח, לוהה אפוא גם בהצטברות של רווחים וחללים בין חלקי הסלעים המתפרקים וכן באי־ציבות, אשר בחלק מהמקרים גרמה לקריסה גרוויטציונית בפסגתה ולהופעת צלחת מטיפוס מכתשון. טיפוס זה מבטא התפתחות סביב מוקד של אספקת תמיסות על סדק או על



איור 8: עיבוי שכבות במעבר גיר-דולומיט יוצר אנומליה טופוגרפית של התרוממות השפות של במת השוליים לקראת הקניונים.

הצטלבות סדקים. התפשטות התמיסות מציר האספקה לסלע הסביבה הייתה רדיאלית, ולכן התפיחה היא דמוית כיפה והצלחות מעוגלות.

לקערונים מסגרת מצולעת המושפעת ממערכות סידוק, שלעתים מלוות גם בהעתקות קלות. שולי הצלחת מורמים כלפי חוץ, והשכבות נוטות מהשוליים למרכז, אשר נותר לעתים כגיר שלא דולמט. לעתים פינות המצולע מפותחות, מוגבהות ומעובות ביחס למרכזי הדפנות, כביטוי לאספקה טובה יותר של תמיסות בהצטלבויות סדקים (איור 7).

אנומליה טופוגרפית מפתיעה הקשורה בתפיחות הדולומיטיות היא התרוממותם של שולי הרמה כלפי הקניונים המבתרים אותה, במקום ההשתפלות המצופה (איור 8). הקניונים מאוחרים לגופים הדיסקורדנטיים וכמוהם התפתחו יותר לאורך סדקים ושברים, לעתים תוך חציית הגופים האלה. תצפיות בקירות הקניונים מסייעות מאוד לתפיסה תלת-ממדית של הגופים הדיסקורדנטיים.

הדיון בדולומיטיזציה באזור המחקר עסק עד כה רק בתהליך שבו מחליף דולומיט את גבישי ה- CaCO_3 בבוצה, בסלעי גיר או קרטון. מן הראוי להזכיר גם את קיומו של גיבוש דולומיט מתוך תמיסה, שלא על חשבון מינרל קודם. דולומיט מסוג זה, שאינו פרי החלפה, מכונה דולומיט ראשוני (primary dolomite) ויש לו מאפיינים מוכרים.

בדולומיטים האפיגנטיים, ובעיקר במרכזי הגופים הדיסקורדנטיים, מפורזות, בחוסר אחידות, אוכלוסיות של גבישי דולומיט גדולים וצלולים האופייניים ל'דולומיט ראשוני'. אלה שונים מאוד מהגבישים העכורים, המכילים אינקלוזיות ואיזור (zoning) האופייניים לגבישים מחליפים. באותה סביבה גם נפוצים, אף הם בחוסר אחידות, חללים שגודלם בין כמה מיקרונים למספר מילימטרים, בעוד גוף הסלע שביניהם מגובש בצפיפות. חללים כאלה אינם קיימים בגירים השכנים.

נקבוביות אחידה מוכרת בדולומיטים פנקונטמפורניים ומוסברת בצמצום במסת הסלע, משום שיוני המגנזיום קטנים מיוני הסידן; לכן, אם החלפת הקלציט בדולומיט מאזנת, מול תמורת מול, קשה לצפות לגידול בעובייה של שכבת הסלע במעבר מגיר לדולומיט. ואולם, הדולומיטיזציה האפיגנטית אינה שומרת בהכרח על איזון זה. החללים מעידים על כך שבמקומות מסוימים כמות הגיר שהומס גדולה מכמות הדולומיט שהושקע. עם זאת מעידות אוכלוסיות של גבישי דולומיט ראשוני, במקומות אחרים, על כך שדולומיט יכול להיווצר לא רק כמחליף של קלציט. דחיקה של אוכלוסיות דולומיט ראשוני לסלע, נוסף על דולומיט המחליף קלציט, יכולה לספק הסבר לתופעה, שאינה מובנת מאליה, של עיבוי שכבות במעברים מגיר לדולומיט, וזאת כתוצאה מתוספת בנפח.

סיכום ההבדלים העיקריים בין דלומיטים פנקונטמפורניים לדלומיטים אפיגנטיים במדבר יהודה

דלומיטים פנקונטמפורניים	דלומיטים אפיגנטיים
נפוצים בפרטים חביון, צפית ותמר ובתצורות דרווים. נוכחים מעט גם בתצורות שבטה ונצר	קיימים בתחום התצורות שבטה, נצר ומנוחה ובכתמים מעטים בקרבת סדקים ושברים בפרט אבנון
קונקורדנטים – התפוצה המרחבית תואמת את הגבולות הסטרטיגרפיים	גופים דיסקורדנטים חוצי גבולות סטרטיגרפיים, בצורות וגדלים שונים, פעמים רבות עם זיקה ברורה לשברים וסדקים
שכבות אחידות בעוביין, אינן מכילות עיוותים, הפרעות ואי־רציפיות שאינם קיימים ביחידות שמעליהן ומתחתיהן	נפוצות תופעות של שינויי עובי, תפיחות, קריסות ו'צלחות'
התכונות הכימיות והאזוטופיות דומות בתחום כל יחידה ומשתנות מיחידה אחת לאחרת	קיים דמיון כימי ואזוטופי לאורך כל החתך ובכל מרחב ההופעה, תחום הערכים מצומצם
ניתן לזהות מאפיינים פטרוגרפיים מהשלב המוקדם לדלומיטזציה, כגון שרידי מאובנים, למינציות וסטיליטים	לא ניתן לזהות מאפיינים פטרוגרפיים מהשלב המוקדם לדלומיטזציה, למעט אלמנטים לא קרובנטיים כגון שברי עצמות ושיניים
אוכלוסיית הגבישים הנפוצה היא דקת גביש, לעתים מתווספות אוכלוסיות קטנות בינוניות וגסות גביש בחללי מאובנים ובעורקים	אוכלוסיית הגבישים השלטת היא בינונית גביש, אוכלוסיות גסות גביש נפוצות כמילוי חללים, אוכלוסיות דקות גביש מוגבלות לעורקים

מקורן של התמיסות שגרמו לדלומיטיזציה האפיגנטית

בתקופת הפליוקן (לפני כחמישה מיליון שנה) חדרה לשון ימית לבקע ים המלח (זק, 1967). חדירה זו זכתה לכינוי 'לגונת סדום'. תנאי האקלים גרמו לאידוי מוגבר ולשקיעת שכבות של מלח בעובי כולל של קילומטרים (תצורת סדום), שמהן בנוי דיאפיר המלח של הר סדום (ראו מלח הארץ 1, עמ' 1) ומשולבים בהן גם דלומיטים פנקונטמפורניים, קונקורדנטים.

אברהם סטרינסקי (1974) מייחס את המים המלוחים בתת-הקרקע באזור ים המלח לתמלחות שיוניות של לגונת סדום. אלה עברו מאז שינויים רבים וניכרים, והיחס הנמוך של Na/Cl המצוי בהן מיוחס לסילוק הנתרן עם השקיעה המסיבית של המלח.

בניגוד לסביבה הימית, שבה התרחשה דולומיטיזציה פנקונטמפורנית של בוצה קלציטית, שלט בבוצה של לגונת סדום, המאודה והמבודדת, המינרל ארגוניט, שהוא פולימורף של קלציט. היחס הנמוך של Mg/Ca שבתמלחת יוחס לסילוק המגנזיום בדולומיטיזציה פנקונטמפורנית של בוצה ארגוניטית זו, שיצרה את הדולומיטים של תצורת סדום. ואולם, היחס Sr/Ca שבתמלחת נמצא נמוך פי שניים מהמצופה ביחס לשינוי מארגוניט לדולומיט, והתאים יותר לשינוי מקלציט לדולומיט (Sass & Starinsky, 1979).

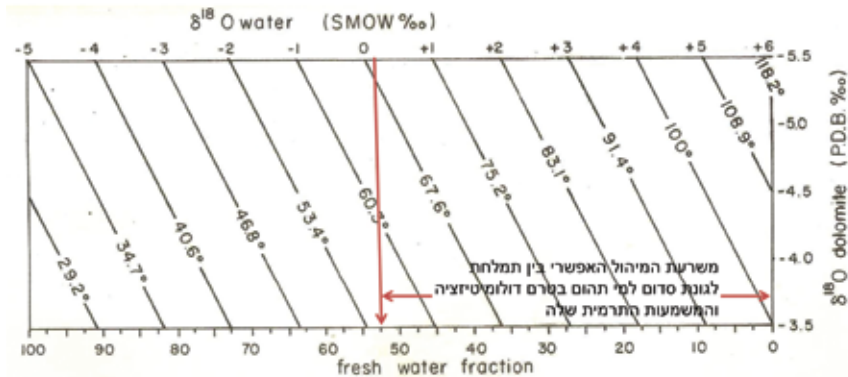
לפנינו אפוא סתירה, אך ניתן ליישבה אם נניח שאותן תמיסות היו מעורבות פעם נוספת בדולומיטיזציה, והפעם בדולומיטיזציה האפיגנטית של קלציט בגיריים ובקרטונים, המוכרת לנו מהגופים הדסקורדנטיים של דופן הבקע. מצד אחר, ספק אם תמלחות מדולדלות מגנזיום עקב הדולומיטיזציה הפנקונטמפורנית המוקדמת בקרקעית מפרץ סדום מסוגלות להוציא לפועל דולומיטיזציה אפיגנטית בקיר הבקע, וזאת ללא חימום או מיהול במים מתוקים.

מדדי גאוכימיה ואיזוטופים יציבים (ראו להלן) עשויים לרמוז על תנאי סביבה שבהם נוצרו הסלעים. היחס Mg/Ca שנמצא בדולומיטים האפיגנטיים שלנו הוא מהנמוכים בעולם הדולומיטים בכלל, ומשקף גם יחס נמוך בסביבת ההיווצרות. יחס Mg/Ca נמוך בתמיסה מעלה את הדרישה למיהול במים מתוקים או לחום. ערכים נמוכים של $\delta^{18}\text{O}$ (המבטא את יחסי האיזוטופים $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) שנמדדו בדולומיטים האפיגנטיים שלנו וריכוזים חריגים של יסודות קורט רומזים לכיוון של תמיסות חמות שעלו מהעומק (תמיסות הידרותרמליות) והיו מעורבות בתהליך הדולומיטיזציה.

דולומיטים במדבר יהודה	Mg/Ca (מולרי)	$\delta^{18}\text{O}$ P.D.B (%)
קונקורדנטיים (פנקונטמפורניים)	בין 0.80 ל-0.96	בין 4.71 - ל-3.35+
דיסקורדנטיים (אפיגנטיים)	בין 0.76 ל-0.82	בין 5.60 - ל-3.60-

בתת-הקרקע באזור ים המלח מצויה תתי-קבוצה של תמלחות בעלת מליחות של 170-211 גרם בליטר, המצביעה כנראה על מיהול בכ- 50% מים מתוקים לעומת מליחות המים של לגונת סדום (סטרינסקי, 1974), והיא עשויה להתאים לדולומיטיזציה האפיגנטית. ככל שחלק גדול יותר מהמיהול שלה התרחש לפני הדולומיטיזציה, הדרישה לחום בזמן הדולומיטיזציה עצמה אמורה להיות מתונה יותר. קיימת נוסחה הקושרת בין ההרכב האיזוטופי של חמצן במינרל לבין ההרכב האיזוטופי של החמצן והטמפרטורה של התמיסה שממנה נוצר (Fritz & Smith, 1970). מנוסחת הפליאותרמומטריה הזו (איור 9), אנו יכולים לחלץ את תחומיהן של טמפרטורות ההיווצרות המתאימות לערכי $\delta^{18}\text{O}$ (P.D.B) בדולומיטים האפיגנטיים שלנו בכל מיהול ומיהול של תמלחת מימיה של לגונת סדום במי תהום. אם התרחש המיהול כולו לפני הדולומיטיזציה, התחום האפשרי של טמפרטורת ההיווצרות הוא בין 55°C ל- 75°C ; אם המיהול כולו מאוחר לדולומיטיזציה, התחום האפשרי של טמפרטורת ההיווצרות הוא בין 100°C ל- 118°C , וזה כמובן לזו של התמלחת.

אם תחום הטמפרטורות עבור התמלחת המדלמטת בטרם מיהולה הוא אכן 100°C - 118°C , ואם השינוי בטמפרטורה עם העומק (ראו מלח הארץ 1: 39) באזור לא השתנה עם הזמן, אזי עומק מקורותיה של התמלחת הוא 3,000-4,000 מ'.



איור 9: הקשר בין $\delta^{18}\text{O}$ (P.D.B) בערכים שנמדדו בדולומיטים האפיגנטיים של מדבר יהודה (מימין) לבין אחוזי המיהול במים מתוקים, $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) והטמפרטורה של התמיסה ממנה נוצרו (מבוסס על נוסחת הפליאותרמומטריה של Fritz & Smith, 1970).

המנגנון

הדלומיטיים האפיגנטיים נפוצים בחתך רצוף של כ-150 מ', הכולל את החלק העליון של חבורת יהודה ואת החלק התחתון של תצורת מנוחה. ואולם, גירים מצויים גם נמוך יותר בחתך, בתחום הפרטים אבנון ועין ירקעם, אך לא נצפו בהם דלומיטיים אפיגנטיים (למעט הופעות נדירות ומצומצמות לסדקים ומישורי העתקים בפרט אבנון). הנתונים הגאוכימיים והאיזוטופיים הולמים מעורבות של תמיסות הידרותרמליות שעלו מעומק של קילומטרים אחדים ומקורן בתמלחות של לגונת סדום. מדוע אפוא דילגה הדלומיטיזציה האפיגנטית על הגירים בחלק התחתון של החתך, אף כי נראה שהתמיסות המדלמטות עברו דרכו?

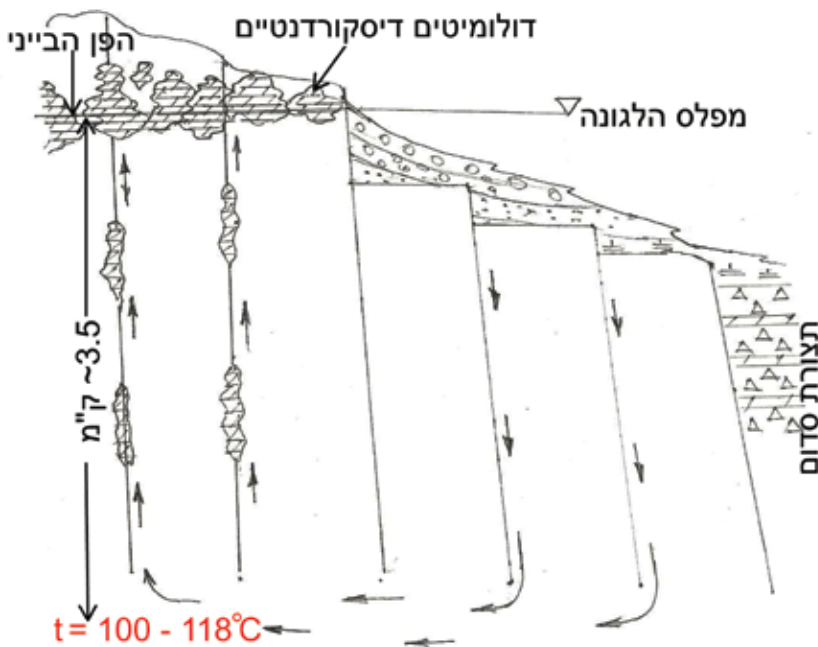
כדי שתתרחש דלומיטיזציה, לא די להביא את התמיסה המתאימה למגע עם הסלע. אם לא תהיה אספקה שוטפת של תמיסות רעננות, יושג עד מהרה שיווי משקל בין הסלע לתמיסה והדלומיטיזציה תיעצר. דרושה אפוא תנועה מעגלית (סירקולציה), שתפנה את התמיסות המדולדלות ותספק חדשות תחתיהן. התמלחות החמות אינן יכולות להשתחרר מן הסדקים אל גוף הסלע אלא אם כן מתקיימים שני תנאים: הלחץ המקיף אותן נמוך מהלחץ ההידרוסטטי המניע אותן, והסלע הוא בעל תכונת מוליכות נוזלים טובה.

דלומיטיזציה אפיגנטית בפרט אבנון מוגבלת לכתמים בסדקים ובמישורי ההעתק וכלל לא נמצאה בגירים של פרט עין ירקעם. הסיבה לכך איננה תכונות המוליכות של הסלע, אלא כנראה הלחץ המקיף בעומק שבו היו נתונים באותו זמן. בפרט תמר ותצורת דרורים, הנמצאים גבוה יותר בחתך, לא היו אמורים לחול שינויים משום היותם עשויים ממילא מדלומיטיים (פנקונטמפורניים), ולכן אי-אפשר לדעת מה היו אז התנאים ההידראוליים בתחומם. לעומת זאת, ממדי הגופים הדיסקורדנטיים בתצורות שבטה ונצר ופיזורם במרחב מראים על תנועה חופשית יותר של תמיסות מדלמטות מהסדקים הראשיים וספיגה יעילה יותר שלהן בגוף הסלע. זו השאירה את חותמה, גם מעבר לפוטנציאל הדלמוט שלהן, בגירים השכנים.

כאמור, היחס Mg/Ca הנמוך בתמיסות דורש פיצוי בחום או מיהול במים מתוקים כדי להוציא דלומיטיזציה אל הפועל. מאחר שאין להניח כי התמיסות מתחממות בעלייתן, הופך גורם המיהול לבעל משמעות רבה יותר בשאלת היעדרות דלומיטיים אפיגנטיים או נדירותם בחלק התחתון של החתך לעומת חלקו העליון. בנסיבות אלה נוח לשער כי כאשר עמדת החתך הטורוני, החופשי יחסית

מסלעים אטימים, הייתה קרובה למפלס של לגונת סדום, יכלו להתקיים בתחומם אקוות ויחסי פן בייני¹², שמעליו זורמים מי תהום אל הלגונה ואליו משתחררות התמלחות ונמהלות במי תהום, ואילו נמוך יותר בחתך מקשה הלחץ המקיף על התמיסות להשתחרר אל גוף הסלע. אזור הפן הבייני יכול אפוא לספק תמהיל מתאים ליצירת הדולומיטים האפיגנטיים (איור 10).

הפרשי הגבהים בין בקעת ים המלח לרמת מדבר יהודה התפתחו על ידי שקיעת הבקעה מצד אחד והתרוממות מצוק ההעתקים מצד שני (רו, 1983). לכן, אם אמנם מתאים המיחול בסביבת הפן הבייני להיווצרות הדולומיטים האפיגנטיים, הרי שהתפוצה האנכית שלהם משקפת כ-150 מ' התרוממות של שולי מדבר יהודה לעומת המפלס של לגונת סדום, שהביאה שכבות קרטון וגיר למגע עם הפן הבייני מלמטה למעלה.



איור 10: המנגנון: חלחול תמלחת לגונת סדום לעומק שבין שלושה לארבעה קילומטרים, תוך דולומיטיזציה פנקונטמפורנית ואיבוד מגנזיום בסדימנט, התחממות ועלייה לאורך העתקי השוליים תוך דולומיטיזציה אפיגנטית מצומצמת ומוגבלת לקירות העתק. שחרור התמיסות בפן הבייני מאפשר סירקולציה, והמיהול מפצה על הדלדול במגנזיום ומאפשר היווצרות דולומיטים אפיגנטיים דלי מגנזיום.

סיכום

דולומיטים דיסקורדנטיים בארץ בלעדיים למדבר יהודה. הם מכילים שלל צורות ותכונות בזיקה לשברים וסדקים שמאפיינים דולומיטיזציה אפיגנטית של סלע מוצק, כפי שתועדו במחקרים בעולם. נוסף על כך נמצאו גם מופעים ותכונות ייחודיים ובלעדיים כגון תופעת ה'צלחות' ויחס Mg/Ca נמוך במיוחד. היווצרותם של דולומיטים אלה קשורה להתפתחות הגאולוגית של בקעת ים המלח ושל הלשון הימית 'לגונת סדום' שחדרה אליה בפליוקן, ומכאן תפוצתם המוגבלת והנושקת לבקעת ים המלח. בתת-הקרקע של האזור נמצאו תמלחות שהרכבן הנוכחי עשוי לבטא התפתחות היסטורית, שראשיתה במי לגונת סדום. אלה השקיעו מסות מלח באסוציאציה עם דולומיטים קונקורדנטיים, נמהלו במי תהום וגרמו לדולומיטיזציה אפיגנטית של סלעי גיר. מסתבר שדלדול מגנזיום בדולומיטיזציה המוקדמת לא היה מאפשר את זו המאוחרת ללא מעורבות של חום ומיהול. הנתונים האיזוטופיים מורים על טמפרטורת תמיסות של $118^{\circ}\text{C}-100^{\circ}\text{C}$, המתאימה לעלייה מעומק של שלושה עד ארבעה קילומטרים עד לפן הבייני, שם התרחשו עיקר המיהול והדולומיטיזציה, וזאת אף על פי שהתמיסות חצו במסלולן גם שכבות גיר נמוכות יותר. כ-150 מ' תפוצה אנכית של דולומיטים אלה משקפים כנראה התרוממות שולי מדבר יהודה ביחס למפלס לגונת סדום, שהביאה שכבות קרטון וגיר למגע עם הפן הבייני שלה בתת-הקרקע, מלמטה למעלה.

'תפיחות' בגג תצורת נצר הן עיבוי מצטבר של שכבות במרכזי גופים דיסקורדנטיים. בחינה של מרקם הסלע במיקרוסקופ מראה צמיחה של אוכלוסיות גבישי דולומיט ראשוני, נוסף על אלה שהחליפו את הקלציט, והם ככל הנראה הסיבה לתפיחות. עיבוי השכבות חל בסלע מוצק ובשיעור שונה משכבה לשכבה והביא ללחצים פנימיים והדדיים שגרמו לסידוק, פירוק, רווחים וחללים. בחלק מהמקרים הם הביאו לקריסה גרוויטציונית של פסגות התפיחות ולהופעת שקעים המכונים 'צלחות'.

הסברים למושגים המופיעים במאמר

1. **דולומיט קונקורדנטי**: סלע הממוקם בחתך הסטרטיגרפי (ראו להלן) במקביל לגבולות השכבות שמעליו ומתחתיו ובהתאמה אליהם.
2. **דולמיט דיסקורדנטי**: גוף סלע שהמגעים שלו עם סלעי סביבתו חוצים את מישורי השיכוב שלהם.
3. **חתך סטרטיגרפי**: תיאור והגדרה של יחידות סלע משוכבות, הנבדלות זו מזו על פי תכונותיהן, דרכי היווצרותן, השתרעותן במרחב ומקומן ברצף השכבות. חבורה היא יחידת-על סטרטיגרפית הנחלקת לתצורות, ותצורה ניתנת לחלוקה לפרטים.
4. **פרצוף**: שימוש חריג וצירי של המחברים למונח הלטיני (face) facies באנגלית), המשמש בדרך כלל לתיאור שינויים במופע ובמהות (הרכב, מינרלוגיה, מרקם וכדומה) של גוף סלע בתחום יחידה סטרטיגרפית. במקרה הנדון הוא משמש לציון מופע שונה וחריג של גופי דולומיט לעומת הדולומיטים השכיחים.
5. **מצוק ההעתקים** (המערבי): המצוק המלווה את בקעת ים המלח לאורכה ממערב והנו גבול טקטוני-גאוגרפי בינה לבין רמת מדבר יהודה.
6. **יחס מולרי**: היחס בין ריכוז (במולים) של חומר/יסוד מסוים לריכוז של חומר/יסוד אחר באותה תמיסה.
7. **רודיטיים**: קבוצת סוגי צדפות בעלות קשוות שונות בגודלן (הגדולה דמוית שופר או גליל), מחשובי היצורים בוני השוניות בים הקרטיקוני.
8. **פולימורף**: אחת מכמה צורות הופעה גבישית של אותו מינרל (נוסחה כימית זהה).
9. **אאולי**: מוסע על ידי רוח.
10. **אטול**: שוניית טבעית שהתפתחה על שוליו של לוע הר געש תוך שקיעתו מתחת לפני הים.
11. $\delta^{18}\text{O}$: ערך שמבטא את היחס בין האיזוטופים היציבים של החמצן $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ בדוגמת סלע או מים, ביחידות של ‰. ערך זה מושפע מהממפרטורות ביחס הפוך, הוא גבוה יחסית בטמפרטורות נמוכות ולהפך. הוא מונצח בסלע ומקובל כמדד לטמפרטורת התמיסה שממנה נוצר.
12. **פן בייני**: שטח המגע בין שתי ישויות שונות בתכונותיהן, כאן – גופי מים בעלי צפיפות שונה.

רשימת מקורות וקריאה נוספת

- בן-תור, י"ק ופרומן, ע'. 1961. 'המפה הגאולוגית של ישראל 1:100,000', גיליון 16: 'הר סדום', ירושלים: המכון הגאולוגי.
- זק, י'. 1967. 'הגאולוגיה של הר סדום', חיבור לשם קבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- סטרינסקי, א'. 1974. 'יחסי גומלין בין תמלחות Ca-כלורידיות לסלעי משקע בישראל', חיבור לשם קבלת תואר דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- רו, א'. 1983. 'הגאולוגיה של מדבר יהודה', עבודה לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים (דו"ח 83/3/ס המכון הגאולוגי, ירושלים).
- Chilinger, G. V., Bissel, H. J. & Wolf, K. H. 1967. 'Diagenesis of Carbonate Rocks', *Development in Sedimentology* 8: Larsen, G. & Chilinger, G. V. (Eds.): 179-322.
- Friedman, G. M., Arkin, Y. & Aharoni, E. 1979. 'Patch or Pinnacle Reefs of Western Margin Dead Sea (Israel)', *Sedimentology* 26: 143-149.
- Fritz, P. & Smith, D. G. W. 1970. 'The Isotopic Composition of Secondary Dolomites', *Geochimica et Cosmochimica Acta* 34: 1161-1173.
- Gilat, A., Mimran, Y., Bogoch, R. & Rot., I. 1978. 'Circular and Tabular (discordant) Dolomite Bodies in the South Judean Desert', *Journal of Sedimentary Petrology* 48: 1159-1166.
- Sass, E. & Starinsky, A. 1979. 'Behaviour of Strontium in Subsurface Calcium Chloride Brines; Southern Israel and Dead Sea Rift Valley', *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43 (6): 885-895.
- Wyssling, L. & Ziegler, P. 1955. 'Geological Report On Further Investigations In the Southern Dead Sea Area', *Israel-American Oil Corporation, Int. Report G-12*.