

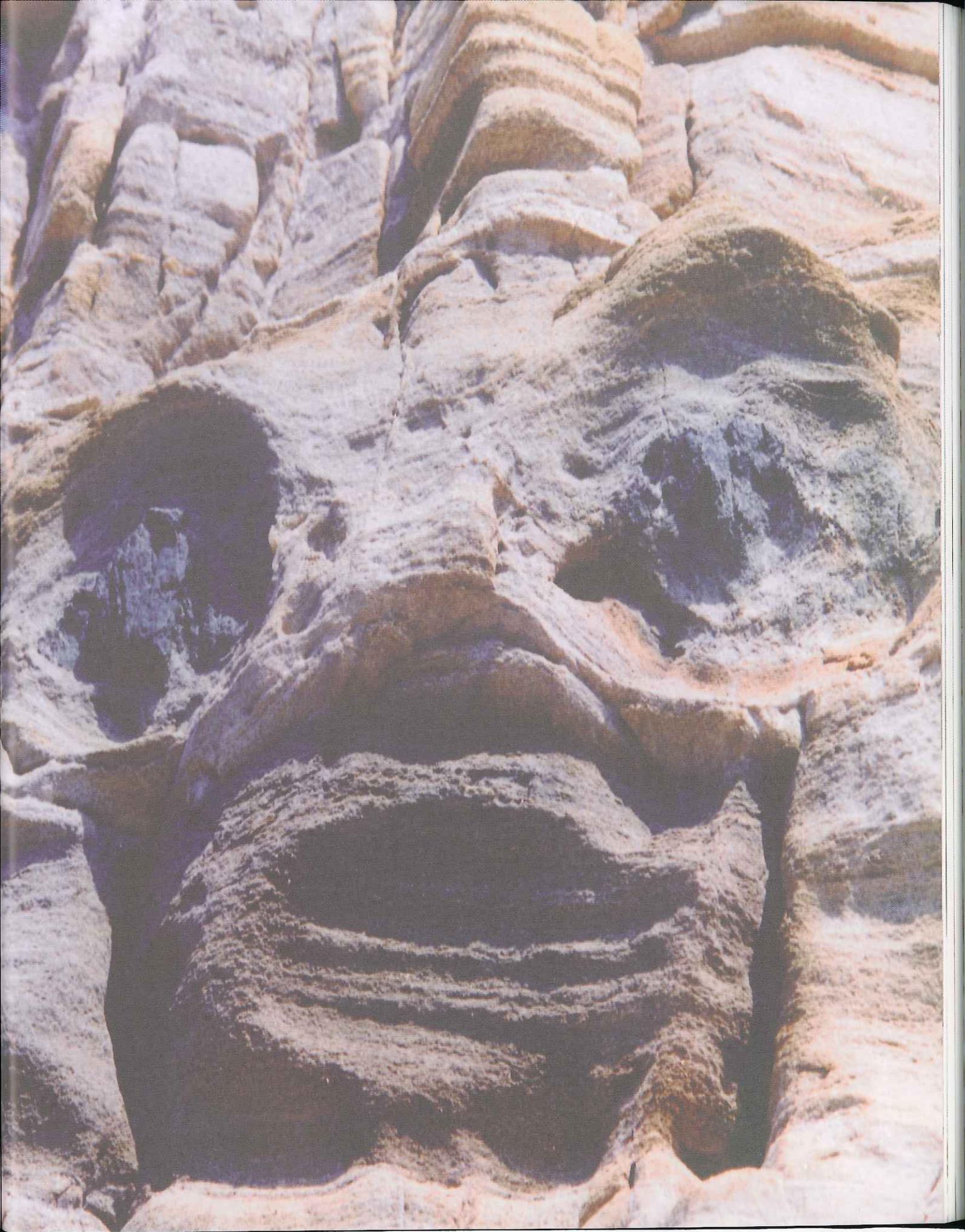
פרק שישי

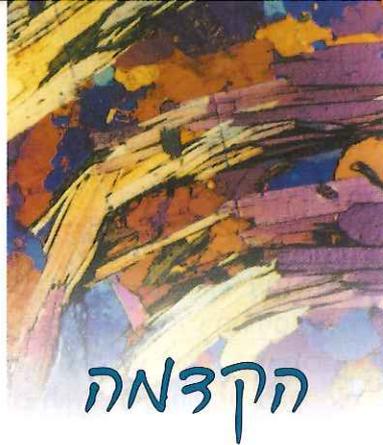
סלעים אומרים

הקדמה

משנן היווצרותם של
סלעים אומרים

סביבת היווצרותם של
סלעים אומרים





הקצנה

עד כה הכרנו שתי קבוצות סלעים: סלעים מגמטיים (פלוטוניים וולקניים), סלעי משקע (גרגריים, מכילי מאובנים וסלעים של התאדות יתר). תיארנו את התכונות המייחדות כל קבוצת סלעים, את מנגנון היווצרות שלהן ואת סביבות היווצרותם. שני סלעים הנמצאים בערכת הקס"ם אינם מתאימים לאף אחת מקבוצות אלו, אף על פי שניתן למצוא בכל אחד מהם דברים המזכירים סלעים מן הקבוצות שהוזכרו. הבה נבחן סלעים אלו מקרוב:

שיסט

לסלע זה מבנה גבישי אולם גודל הגבישים קטן ממילימטר. סידור הגבישים בסלע יוצר מעין דפים דקים המכונה מבנה דפי (איור 6.1א). המבנה הגבישי של סלע השיסט מזכיר סלע מגמטי, אולם המבנה הדפי מזכיר שכבתיות של סלע משקע. באיור 6.1ב אפשר לראות סלע שיסט נוסף שבו הדפים אינם אופקיים אלא מעוותים (ראו הרחבה 25 עמ' 124).

באיור 6.1ג אפשר לראות גבישים כהים בצורת משושה הגדולים בהרבה משאר גבישי המינרלים המופיעים בסלע. אלו הם גבישי המינרל גֶרְנֵט. את המינרל גרנט ניתן למצוא גם בסלע הגנייס, אך לא ניתן למצוא אותו אף לא באחד הסלעים המגמטיים וסלעי המשקע שהכרנו בפרקים הקודמים.



איור 6.1: דוגמאות שונות לסלע השיסט.

- א. דוגמת יד ותצלום דרך מיקרוסקופ אור מקטב של סלע שיסט. אפשר לראות מינרלים המסודרים במבנה דפי.
- ב. דוגמת יד ותצלום דרך מיקרוסקופ אור מקטב של סלע שיסט בעל מבנה של קמטים הדוקים.
- ג. דוגמת יד של סלע שיסט המכיל את המינרל גרנט ותצלום דרך מיקרוסקופ אור מקטב של סלע גנייס המכיל את המינרל גרנט.

גנייס

לסלע מבנה גבישי והוא מורכב מגבישי מינרלים שונים, הגדולים ממילימטר ונבדלים זה מזה בצבעם (איור 6.2). צירוף המינרלים בגנייס שבמערכת הקס"ם מזכיר לנו מאוד את סלע הגרניט (איור 2.1 עמוד 27) ואכן, ההרכב המינרלוגי של הגרניט והגנייס שבדקתם זהה. אולם, בסלע הגרניט המינרלים מופיעים בצורה אקראית, ואילו בסלע הגנייס הם מסודרים בכיוון אחד היוצר קוויות בסלע. מבנה כזה מכונה מבנה קווי. חשוב להדגיש כי הגנייס שבערכת קס"ם הוא הגנייס השכיח באזור אילת אולם במקומות אחרים בעולם קיימים סלעי גנייס בעלי הרכב מינרלוגי שונה (ראו הרחבה 25 עמ' 124).

לחלק זה נוסף תיאור של עוד שני סלעים: הקוורציט והשיש.

קוורציט

מי שערך סיור גאולוגי במכתש רמון נתקל בוודאי בסלע הקוורציט שממנו בנוי אתר הנגריה שבלב המכתש (איור 6.5).

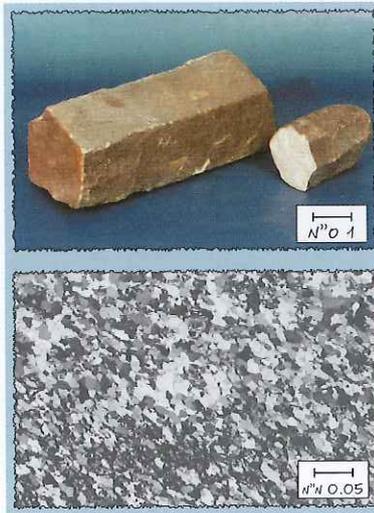
סלע הקוורציט מורכב מגרגרי קוורץ צפופים מאוד הנוצצים באור (איור 6.3). המבנה הגרגרי וההרכב המינרלוגי של הגרגרים מזכירים מאוד סלע גרגרי כדוגמת אבן חול (איור 3.15). אולם, באבן החול ישנם חללים בין הגרגרים ואילו אינם מלוכדים בחוזקה, ואילו סלע הקוורציט בנוי מגרגרים צפופים ביותר היוצרים סלע קשה מאוד ובלתי פרייר לחלוטין.

שיש

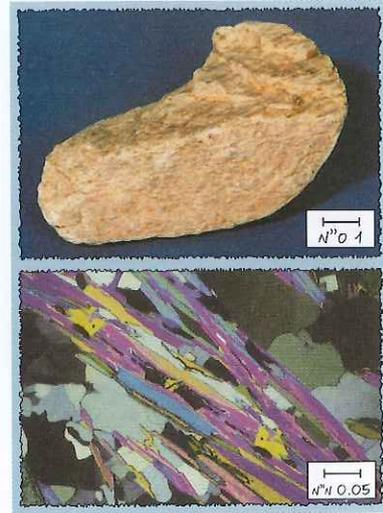
שיש הוא סלע גס גביש, חד-מינרלי ובעל הרכב של קלציט (איור 6.4). לעתים רחוקות אפשר למצוא בשיש מבנה המזכיר מאובן אך צורתו פעמים רבות מעוותת. בארץ אין מחשופים של סלע שיש. סלע השיש היה מפורסם מאוד בעבר כסלע המועדף על ידי פסלים רבים בגלל רכותו הנוחה לחציבה ולפיסול. אחד הפסלים המפורסמים היה מיכלאנג'לו, אמן שחי במאה ה-16 וה-17 באיטליה, שפיסל פסלי מופת משיש קררה, סוג שיש הקרוי על שם המקום שבו נחצב (איור 6.6). היום נהוג לכנות "שיש" כל חתיכת סלע מלוטשת (כגון גיר וגרניט) המשמשת כמשטח עבודה במטבח ולציפוי של קירות.



איור 6.4: דוגמת יד ותצלום דרך מיקרוסקופ אור מקטב של סלע השיש.



איור 6.3: דוגמת יד ותצלום דרך מיקרוסקופ אור מקטב של סלע הקוורציט.



איור 6.2: דוגמת יד ותצלום דרך מיקרוסקופ אור מקטב של סלע גנייס.



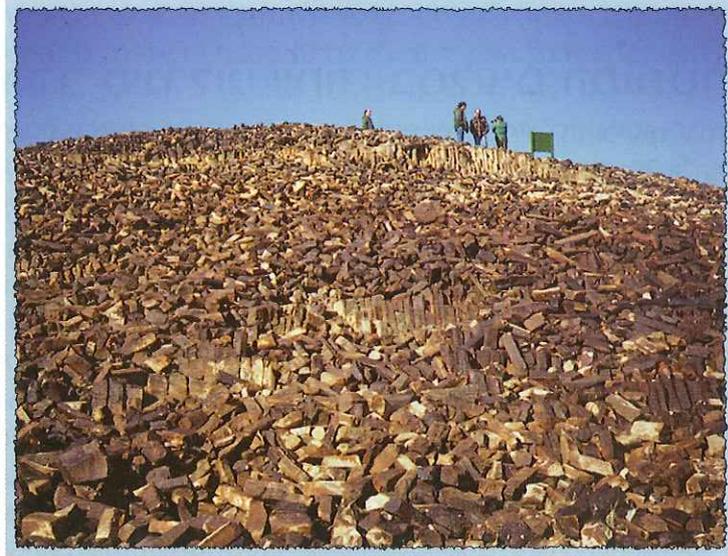
איור 6.6: משה - פסל עשוי שיש מעשה ידי הפסל מיכאנג'לו, הפסל מוצב ברומא. (באדיבות שלומית זהרוני).

הסלעים שתיארנו נבדלים מן הסלעים המוכרים לנו בשני תחומים עיקריים:
 1. הרכב מינרלוגי: הופעת מינרלים בעלי הרכב מינרלוגי שלא היה מוכר לנו מן הסלעים עד כה. דוגמה לכך הוא המינרל גֶרָנֵט.
 2. מבנה הסלע:

א. כיווניות מועדפת: בסלעי השיסט והגנייס גבישי המינרלים מסודרים בסלע לאורך קווים או דפים דקים ולא בצורה אקראית.
 ב. מבנה מעוות: לעתים אפשר להבחין בסלע השיסט בדפים המקומטים באופן הדוק מאוד (איור 6.3) או בסלע השיש במאובנים בעלי צורה מעוותת.

האם ייתכן כי ישנו מנגנון זהה הגורם להיווצרותם של סלעים אלו?
 האם ייתכן כי יש סביבת היווצרות אחידה לסלעים אלו?

על כך ננסה לענות בפרק זה.



איור 6.5: אתר הנגריה במכתש רמון. הסלעים בנויים מקוורציט. צורת בליית הסלע היא של משושים מאורכים הנראים כקורות עץ ועל שמם נקרא האתר.



אנשן היווצרותם של סלעים אומאריים

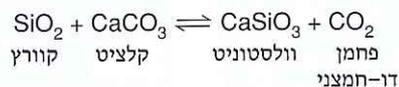
אמנם הבנת מנגנון היווצרותם של הסלעים המותמרים נעשתה, כמו בכל קבוצות הסלעים האחרות, דרך איסוף תצפיות בשדה, אולם חשיבות רבה נודעת לניסויים שנעשו במעבדה. בסעיף זה נתמקד בניסויי המעבדה ובמידע שנלמד מהם.

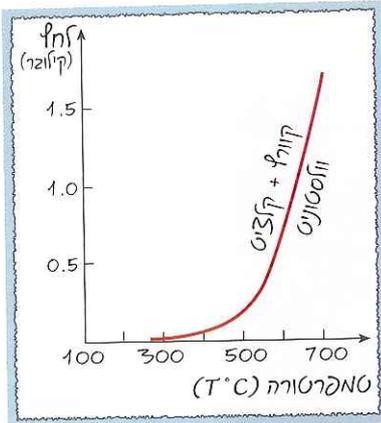
הרכב מינרלוגי ייחודי בסלעים המותמרים

מלבד המינרל גרנט ישנם מינרלים רבים נוספים המופיעים בסלעים המותמרים ואינם נמצאים בסלעים מגמטיים או בסלעי משקע (למשל המינרל טלק שאתם ודאי מכירים). מהם התנאים להיווצרותם של מינרלים אלו? בשנות הארבעים הקים גאולוג אמריקני ששמו טאטל (Tuttle) מעבדה משוכללת ובה מכשיר היכול ליצור בו זמנית טמפרטורות גבוהות ולחצים גבוהים. טאטל הכניס למכשיר תערובות שונות של מינרלים הנמצאים בסלעים מגמטיים ובסלעי משקע. הוא מצא שבהתאם ללחץ, לטמפרטורה ולהרכב המינרלים המקורי נוצרים מינרלים חדשים אשר לא היו בתערובת הראשונה. המינרלים החדשים נוצרים על חשבון המינרלים המקוריים שנעלמים מהתוצר החדש. ההרכב הכימי הכולל של הסלע, כלומר כלל היסודות שבנו את המינרלים השונים לפני הניסוי ואחריו דומה, אולם המינרלים הנוצרים ממנו משתנים.

לדוגמה, אם מכניסים תערובת של מינרלי קוורץ וקלציט למכל הניסוי, מווסתים את הלחץ לערך קבוע של בר (1 בר שווה ללחץ אטמוספרי) ומתחילים לחמם את התערובת - בטמפרטורה של 270°C נוצר מינרל חדש ששמו וולסטוניט, משתחרר גז פחמן דו-חמצני וחלק מהכמות המקורית של הקוורץ והקלציט נעלמת.

בין הקלציט והקוורץ מתרחשת ריאקציה כימית המבוטאת במשוואה הבאה:





איור 6.7: שדה היציבות של המינרל וולסטוני הנוצר מראקציה כימית בין המינרלים קוורץ וקלציט.

המינרלים שהיו בסלע המקורי עברו שינוי. התמרה בעברית או מטמורפוזת בלעז הן מונחים הבאים לתאר שינוי מהותי - שינוי מינרלוגי הנוצר מהפעלת לחץ על סלע ו/או טמפרטורה גבוהה נקרא התמרה, והסלעים הנוצרים בתהליך זה נקראים **סלעים מותמרים** או **סלעים מטמורפיים** בלעז.

בעשרים השנים האחרונות פותחו מכשירי מעבדה משוכללים שבאמצעותם אפשר לבחון טווח רחב של שינויים בטמפרטורה ובלחץ של ראקציות כימיות כפי שתואר קודם. תוצאות ניסויים אלו אפשרו לקבוע את שדה היציבות של מינרלים שונים.

שדה יציבות של מינרל הוא תחום הטמפרטורות והלחצים שבהם הוא מסוגל להתגבש ולהישאר יציב. אפשר לתאר את שדה היציבות של מינרל בגרף של טמפרטורה כנגד לחץ, בקווים המציינים את גבולות שדה היציבות. איור 6.7 מתאר את שדה היציבות של המינרל וולסטוני. אם נתבונן באיור נראה כי ראקציה במצב צבירה מוצק בין מינרלי הקלציט והקוורץ מתרחשת החל מטמפרטורה של 270°C ולחץ של 1 בר. מנקודה זו נוצר המינרל וולסטוני והוא יציב גם בטמפרטורות ולחצים גבוהים יותר.

דרגת ההתמרה (כלומר רמת הטמפרטורה והלחץ המופעלים על הסלעים) יכולה להשתנות מדרגת התמרה נמוכה לדרגה בינונית וממנה לדרגת התמרה גבוהה (איור 6.8). במהלך השינוי בדרגת ההתמרה משתנים המינרלים המופיעים בסלע. כלל המינרלים המופיעים בסלע בדרגת התמרה מסוימת נקרא **מאסף מינרלים**. מאסף המינרלים תלוי כמובן בהרכב המינרלוגי ההתחלתי של הסלע. הדגמה לשינוי במאספי המינרלים עם השינוי בדרגת ההתמרה בסלע חרסיתי ובסלע בזלת ניתנת באיור 6.9.

קשה להעריך במעבדה את קצב תהליכי ההתמרה, אולם נראה כי אלו מתרחשים לאורך מיליוני שנים. כמו כן, קשה להעריך את משך הזמן שבו פעלה על הסלע דרגת התמרה מסוימת.

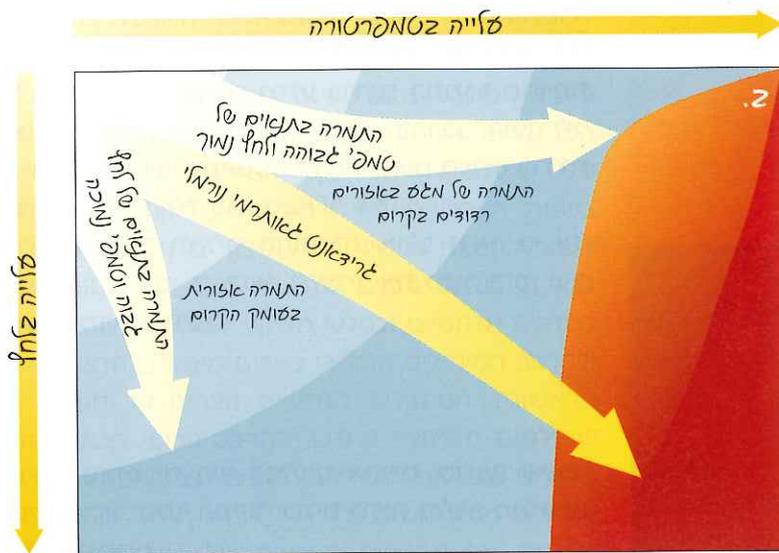
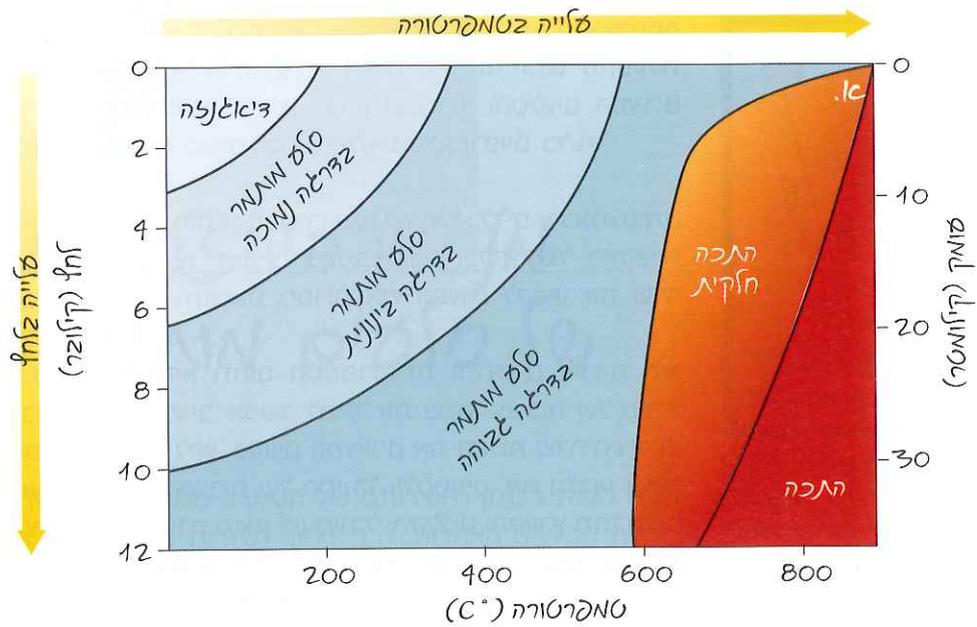
מסקנות הניסוי:

- מקורם של הסלעים המותמרים הוא בסלעים אחרים, סלעים שעברו שינוי שאנחנו מכנים סלעי מקור. סלעי המקור יכולים להיות סלעים מגמטיים, סלעי משקע או סלעים מותמרים.
- השינוי מתחולל בסלעים בעקבות היחשפותם ללחץ גבוה או לטמפרטורה גבוהה או לשניהם גם יחד.
- תהליך ההתמרה מתרחש כאשר הסלע במצב פלסטי אך עדיין מוצק. בתנאי הלחץ והטמפרטורה החדשים המינרלים אינם יציבים ולכן הם מתפרקים ומתגבשים מחדש למינרלים היציבים בתנאים החדשים (תהליך המכונה בלעז רה-קריסטליזציה, רה=חדש קריסטליזציה=גיבוש). ההרכב הכימי הכולל של הסלע נשאר קבוע פחות או יותר (ייתכן איבוד חומר כתוצאה מפליטת גז פחמן דו-חמצני או מולקולות מים) אולם ההרכב המינרלוגי משתנה.
- בעבור כל סלע מאספי המינרלים משתנים עם השינוי בדרגת ההתמרה.
- תהליכי ההתמרה מתרחשים בטווח של מיליוני שנים.



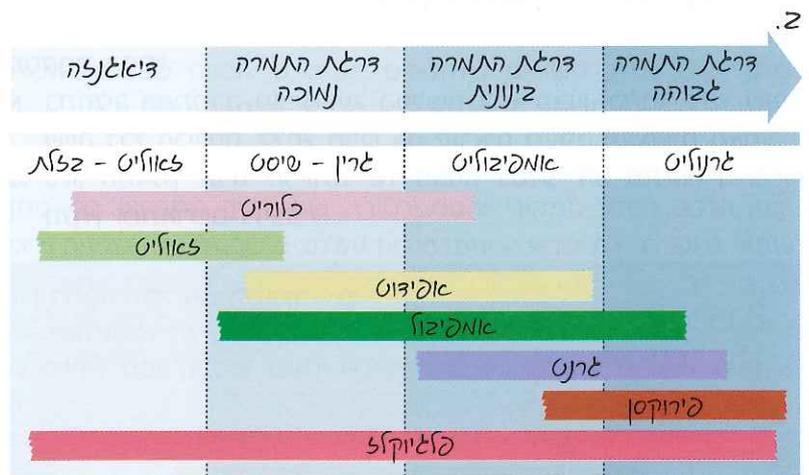
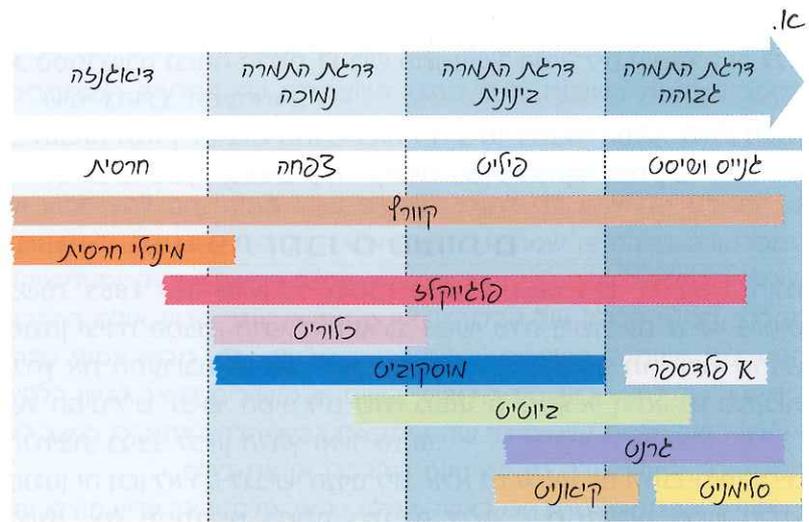
לחץ

לחץ מוגדר ככוח המופעל על יחידת שטח ומבוטא ביחידות משקל ליחידת שטח כמו למשל קילוגרם/לסנטימטר². קיימות מספר יחידות למדידת לחץ: אטמוספירות - על פני כדור הארץ הלחץ הוא של אטמוספירה אחת. בר - יחידה אחרת השווה בערך ל 1 אטמוספירה. קילובר הוא 1000 באר, לחץ הקיים בעומק של בערך 3 קילומטרים בתוך כדור הארץ. פסקל - יחידה קטנה יותר למדידת לחץ. בר 1 שווה ל 10^5 פסקל. מגה-פסקל היא 10^6 פסקל או 10 בר.



איור 6.8:

- א. תהליך ההתמרה מתרחש בטווח הטמפרטורות 200°C - 600°C ובטווח הלחצים 3-12 קילובר. ככל שהטמפרטורה והלחץ עולים דרגת ההתמרה עולה.
- ב. הגרדיאנט הגאותרמי הנורמלי מציין את הלחץ והטמפרטורה בעומקים שונים בתוך כדור הארץ. בתהליך ההתמרה הלחץ והטמפרטורה המופעלים על הסלעים שונים מאלו המתאימים לגרדיאנט הגאותרמי הנורמלי. התמרה בטמפרטורה גבוהה ובלחץ נמוך אופיינית להתמרה של מגע (באזורים רדודים בקרום). התמרה בטמפרטורה נמוכה ובלחץ גבוה אופיינית להתמרה אזורית (בעומק הקרום).



איור 6.9:

התמרה בדרגות שונות של חרסית (א) וזלת (ב). מאסף המינרלים משתנה, כאשר דרגת ההתמרה משתנה, כלומר כאשר הטמפרטורה והלחץ משתנים. בדרגת התמרה נמוכה הטמפרטורה והלחץ נמוכים יחסית והם עולים ככל שדרגת ההתמרה עולה.

מבנים ייחודיים בסלעים המותמרים

מבנה גבישי ומבנה צפוף

בשנת 1805 ניסה המדען האנגלי סר ג'יימס הול לבדוק את התנאים להיווצרות השיש. הוא הכניס שברי קירטון (סלע הבנוי כולו ממאובנים זעירים, עיינו גם בפרק הרביעי, עמ' 88-89) לצינור פורצלן שהוכנס לחלל גילי בתוך גוש ברזל. לאחר חימום בתנור התקבל סלע בעל הרכב קלציטי ומבנה גבישי כמו זה של השיש. לא היה זכר למאובנים הרבים שהרכיבו סלע זה. מסקנתו הייתה כי עלייה בטמפרטורה גורמת לגבישים להתפרק ולהתגבש מחדש ללא תוספת או הפסד חומר. גיבושם מחדש מוחק את המבנים המקוריים. תהליך דומה קשור בהיווצרות סלע הקוורציט. חימום גרגרי הקוורץ גורם להמסת הגרגרים ולהתגבשותם מחדש (רה=קריסטליזציה). החללים בין הגרגרים נעלמים ומבנה הסלע הופך למבנה צפוף (איור 6.3). ההרכב הכימי של הסלע אינו משתנה אלא סידור גבישי המינרלים שבתוכו.

מסקנות הניסוי:

- א. טמפרטורה גבוהה גורמת לגיבוש מחדש של המינרלים (במקרה זה ללא שינוי בהרכב המינרלוגי).
- ב. תוצאת תהליך הגיבוש מחדש באה לידי ביטוי במבנה הסלע: לסלע מבנה גס גביש, צפוף, ומבנים שהיו קיימים בסלע המקור נמחקים.

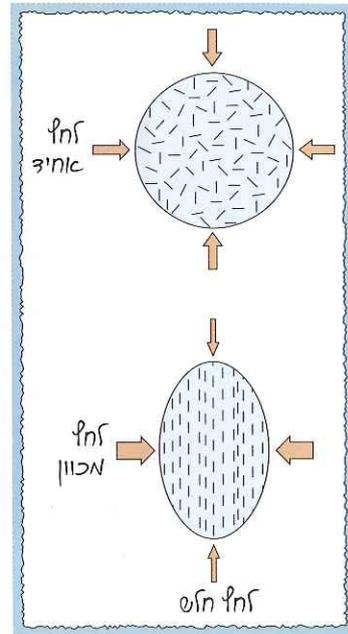
כיוונית מועדפת ומבנים מעוותים

בשנת 1853 ערך מדען דני ששמו סורבי (Sorby) ניסוי הדמיה לבחינת מנגנון יצירת המבנה הדפי. הוא ערבב גבישי מלח בישול עם גבישי ביוטיט ולחץ את התערובת בין שני לוחות מלחציים. התוצאה הייתה ארגון מחדש של המינרלים. גבישי המינרלים שהיו מפוזרים באקראי התארגנו בעקבות הלחיצה, בניצב לכיוון הלחץ (איור 6.10).

מנגנון זה נכון לא רק לגבישי המינרלים, אלא גם למאובנים ולמבנים מקוריים בסלע. אלו מסתדרים בדומה בתגובה ללחץ - מתקצרים בכיוון הלחץ ומתארכים בניצב לו ולכן צורתם נראית מעוותת (ראו הרחבה 23).

מסקנות הניסוי:

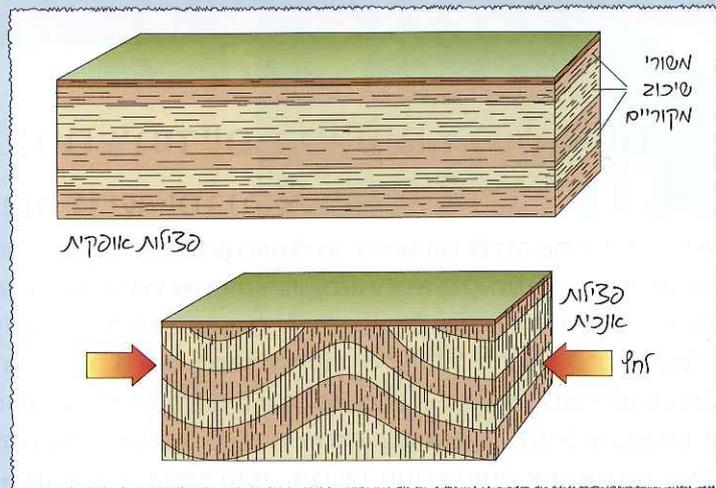
- א. בתהליך ההתמרה מופעל על הסלעים לחץ מכוון, כלומר לחץ שאינו שווה בכל הכיוונים. ללחץ מכוון אנו קוראים בשפה מקצועית מאמץ.
- ב. כיוון המאמץ גורם לעיוותם של מבנים בסלע. הם מתקצרים בכיוון הלחץ ומתארכים בניצב לו.



איור 6.10: לחץ מכוון המופעל על מינרלים המסודרים בצורה אקראית יוצר מבנה מסודר לאורך קווים. הסלע כולו מתקצר בכיוון הלחץ ומתארך בניצב לו.

הרחבה 23: תרומתו של צ'רלס דרווין לחקר הסלעים המותמרים

צ'רלס דרווין, ידוע אמנם כביולוג, אך הוא ראה עצמו לא פחות כגאולוג. דרווין היה גאולוג נלהב שתרתם מספר תצפיות חשובות לחקר הסלעים. לדוגמה, במהלך מסע המחקר שערך דרווין בדרום אמריקה בשנים 1831-1836 הוא הבחין שקיים הבדל בין שיכוב שמקורו בהרבה של סלע משקע לבין המבנה הדפי האופייני לסלע השיסט (איור 6.11). ביכולת ההבחנה העמוקה שלו הוא שם לב כי המבנה הדפי של הסלע שמצא אינו חופף את המבנה השכבתי שלו. מכאן הוא הסיק כי המבנה הדפי התפתח מאוחר יותר, לאחר היווצרות סלע המשקע.



בכך היה דרווין בין הראשונים שהפנו את תשומת לב הקהילה המדעית כי סלעים, בדומה לשיסט, שנחשבו עד אז כסלעי משקע, אינם שייכים בעצם לקבוצת סלעים זו אלא הם סלעי משקע שעברו שינוי מהותי.

איור 6.11:

- א. שיכוב מקורי של סלע משקע. הקווים השחורים בתוך שכבות מציינים שיכוב אופקי מקורי של מינרלים שכבתיים (חרסיות), המקביל למישורי השיכוב.
- ב. בעקבות הפעלת לחץ אופקי השכבות מתקמטות והמינרלים השכבתיים מסתדרים בניצב לכיוון הלחץ, תהליך היוצר מבנה דפי. המבנה כולו מתקצר.

המידע שנלמד מניסויי המעבדה - סיכום

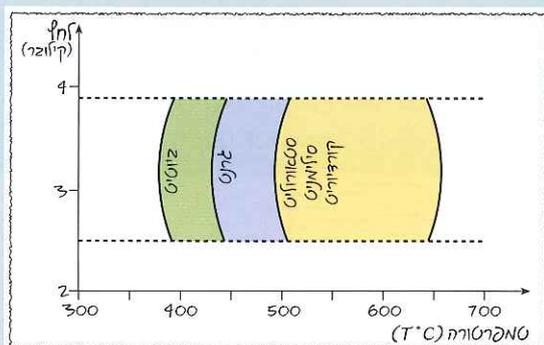
מספר מסקנות חשובות, לגבי מנגנון היווצרותם של הסלעים המותמרים נלמדו מתוך ניסויי מעבדה אלו.

1. מקורם של הסלעים המותמרים הוא בסלעים קודמים.
2. התנאים הדרושים כדי לחולל בסלעים שינוי מהותי הם לחץ מכוון או טמפרטורה גבוהה או שניהם. בתנאים אלו המינרלים אינם יציבים ועוברים שינויים מינרלוגיים כלומר פירוק והיווצרות מינרלים חדשים (רה=קריסטליזציה). ההרכב הכימי הכולל של הסלע נשאר פחות או יותר קבוע אולם ההרכב המינרלוגי משתנה. השינויים יכולים להיות מבניים, כמו מבנה צפוף יותר, ובמקרה של לחץ מכוון, סידור לאורך קווים או מישורים בניצב לכיוון הלחץ או עיוות של מבנים קיימים כך שהם יתקצרו בכיוון הלחץ ויתארכו בניצב לו. הסלע יכול לעבור חלק מן השינויים שהוזכרו או את כולם.
3. תהליך ההתמרה מתרחש כאשר הסלע במצב פלסטי אך עדיין מוצק. עד 200°C השינויים המתרחשים בסלעים קשורים בעיקר לתהליכים דיאגנטיים (ראו פרק רביעי). מעל 650°C ישנם סלעים המתחילים לעבור התכה והשינויים המתרחשים בסלע קשורים לתהליכים מגמטיים. הטווח שבו מתרחשת ההתמרה הוא בין תהליך הדיאגנזה לבין תהליך ההתכה (איור 6.8).

אם כן, הגורמים המשפיעים על היווצרות סלע מותמר, הם מידת הלחץ, כיוונו, הרכב הסלע המקורי והטמפרטורה שהתהליך מתרחש בה. ניתן לשחזר במעבדה את תנאי הטמפרטורות והלחצים שפעלו על הסלעים (ראו הרחבה 24). טווח הטמפרטורות והלחצים שחושבו באמצעות המינרלים המופיעים בסלעים המותמרים השונים אינו מתאים לתנאים השוררים על פני כדור הארץ. אם כן, מהי סביבת היווצרותם של הסלעים המותמרים?

הרחבה 24: שחזור תנאי טמפרטורה ולחץ שעברו הסלעים באירוע ההתמרה באמצעות ניסויי מעבדה

לימוד תנאי הטמפרטורה והלחץ הדרושים להיווצרותם של מינרלים מותמרים במעבדה יכול לשמש כלי לשחזור תנאי טמפרטורה ולחץ שעברו הסלעים באירוע התמרה. כיצד? לכל מינרל יש שדות יציבות מוגדרים. ישנם מינרלים היציבים בטווח רחב של טמפרטורות ולחצים, לעומת מינרלים בעלי טווח יציבות צר יחסית. מינרל שטווח היציבות שלו צר נקרא **מינרל מנחה**. לצורך השחזור משתמשים במספר מינרלים מנחים. לכל מינרל מגדירים את שדה היציבות. תנאי הטמפרטורה והלחץ החופפים לכולם מגדירים את התנאים שהסלע נוצר בהם. לדוגמה, בשיסטים של אזור אילת נמצאו בסלע אחד המינרלים המותמרים סטאורוליט, קורדיריט וסלימניט. מאיור 6.12 אפשר לראות כי האזור החופף בעבור כל המינרלים במאסף זה מעיד על היווצרות תחת לחץ של 2.5-4 קילובר וטמפרטורה של $500-600^{\circ}\text{C}$. תנאים אלו מתאימים לעומקים של 9-12 קילומטרים בקרום כדור הארץ.



איור 6.12: שדות היציבות של מינרלים שנמצאו בשיסט באזור אילת.

הרחבה 25: שיסט וגנייס - הגדרה מבנית לעומת הגדרה מינרלוגית

שלא כמו הסלע קוורציט או שיש, ששמן מייצג הרכב מינרלוגי ומבנה פנימי מוגדרים, שיסט וגנייס הן הגדרות למבנה פנימי של סלע ולא להרכבו המינרלוגי. שיסט בא מן המילה שיסטוס שפירושו בלטינית מתפצל, שם המתייחס לסידור המקביל של הגבישים היוצר מבנה דפי. השם גנייס בא מן המילה הגרמנית גנייסטו שפירושה נצנוץ והיא מתייחסת לגבישים הגסים המנצנצים הבונים את הסלע. בסלעי הגנייס והשיסט ניתן להבחין במבנה של כיווניות מועדפת. השיסט בנוי מגבישים בגודל בינוני המסודרים במבנה דפי והגנייס בנוי מגבישים גסים המסודרים לאורך קווים. מבנה זה נוצר, כפי שכבר תיארנו, בעקבות לחץ מכוון המופעל על סלע המקור. ומה באשר להרכב המינרלוגי של סלעים אלו?

ההרכב המינרלוגי של סלע השיסט

סלע השיסט יכול להיווצר מהתמרה של סלעים שונים. התוצאה היא מבנה דפי בינוני גביש אולם ההרכב המינרלוגי משתנה בהתאם לסלע המקור.

דוגמה ראשונה - התמרה של חרסית (איור 6.9א): סלע חרסיתי הבנוי מן המינרלים קוורץ ומינרלי חרסית שעובר התמרה בדרגה נמוכה הוא סלע זעיר גביש בעל מבנה דפי. סלע זה נקרא **צפחה**. ההרכב המינרלוגי של הסלע משתנה והמינרלים המרכיבים אותו הם: קוורץ, פלגיוקלז, כלורית ומוסקוביט. בדרגת התמרה גבוהה יותר, המבנה הדפי נשאר, הגבישים גדלים ונוצר סלע שיסט. ההרכב המינרלוגי משתנה וסלע השיסט מכיל מינרלים שונים מן הצפחה: קוורץ, פלגיוקלז, ביוטיט, גרנט וסלימניט.

דוגמה שנייה - התמרה של בזלת (איור 6.9ב): כבר בדרגת התמרה נמוכה יחסית מתקבל סלע בעל מבנה דפי הנקרא גרין-שיסט. המאסף המינרלוגי של הסלע המקורי (כלורית, זאוליט ופלגיוקלז) משתנה והסלע מכיל את המינרלים כלורית, אפידוט, אמפיבול ופלגיוקלז. הצבע הירוק של הכלורית מקנה לסלע את הצבע הירוק ואת שמו (גרין=ירוק באנגלית).

תיארונו שני סלעי שיסט. מבנה הסלעים דומה אולם הרכבם המינרלוגי שונה לגמרי. הסיבה לכך היא שכל אחד מהם נוצר מסלע מקור שונה.

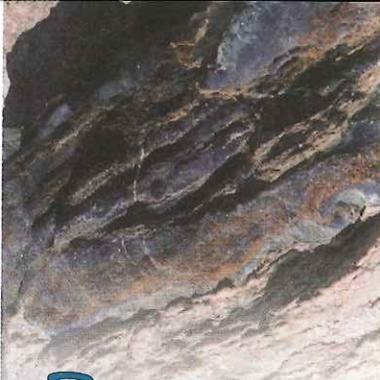
ההרכב המינרלוגי של סלע הגנייס

סלע הגנייס נוצר מהתמרה והתוצאה היא סלע גס גביש בעל מבנה קווי. גנייס יכול להיווצר מהתמרת סלעים שונים.

הגנייס המוכר ביותר בארץ, מאזור אילת נוצר כתוצאה מהתמרה של גרניט (גנייס אילת).

גרניט הוא סלע גס גביש. כאשר מופעל על הגרניט לחץ מכוון, הגבישים מתארכים בניצב לכיוון הלחץ ויוצרים מבנה קווי (איור 6.2). ההרכב המינרלוגי של הגרניט (קוורץ, פלגיוקלז, פלדספר אשלגני ומיקות, איורים 2.8 ו-3.5) דומה מאוד לזה של גנייס אילת (קוורץ, פלגיוקלז, פלדספר אשלגני ומעט מיקות).

אולם, סלע גנייס יכול להיווצר מהתמרה של סלעים אחרים ולכן הרכבו המינרלוגי לא יהיה זהה להרכבו המינרלוגי של גנייס אילת. למשל, גנייס טבה, הנמצא גם הוא באזור אילת בנוי מן המינרלים קוורץ, פלגיוקלז וכמות רבה של מיקות. הסלע ממנו נוצר גנייס זה היה סלע פלוטוני, שונה מן הגרניט הנקרא קוורץ דיוריט ולכן הרכבו המינרלוגי אינו זהה (איור 2.10).

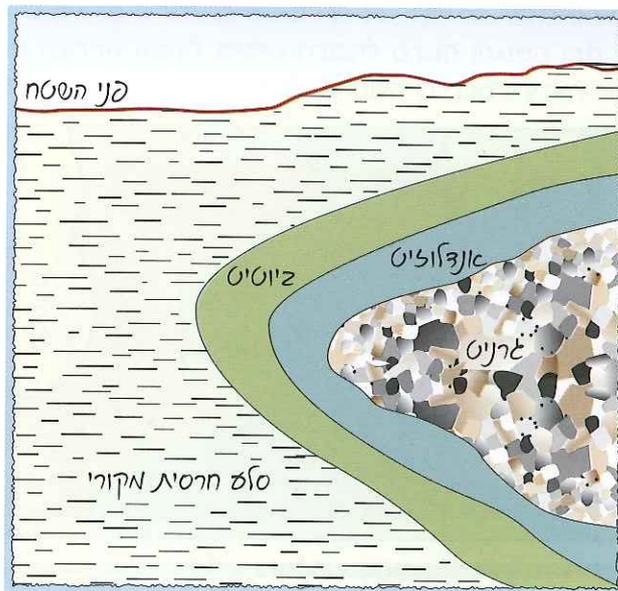


סביבת היווצרות של סלעים מותמרים

התמרה של מגע

במקומות רבים בעולם נמצאו סלעים מותמרים סביב מחדרים מגמטיים (סלעים פלוטוניים). לפיכך, תהליך ההתמרה של סלעים אלו מתרחש כנראה בתוך קרום כדור הארץ.

אילו תנאים קיימים סביב מחדר מגמטי המאפשרים את היווצרותם של הסלעים המותמרים? אחד המחקרים הראשונים על סלעים מותמרים שנמצאו בקרבת מחדר מגמטי נעשה בשנת 1877 על ידי גאולוג גרמני בשם רוזנבוש (Rosenbush). הוא חקר אזור של חרסיות שלתוכו חדר מחדר של גרניט. בקרבת המחדר הפכה החרסית לסלע בעל מבנה גבישי, אולם ככל שהמרחק מן המחדר גדל אפשר היה לזהות את המבנה המקורי של סלע החרסית. מלבד השינויים במבנה, אפשר היה לחלק את האזור הקרוב לגרניט לאזורים הנבדלים זה מזה במאסף המינרלים כשלכל אחד מהם מינרל מנחה שונה (איור 6.13 והרחבה 24): רחוק מן הגרניט נמצאו החרסיות המקוריות. ליד החרסית נוצר סלע שהמינרל המנחה בו הוא ביוטיט ואילו בחלק הפנימי ביותר, בסמוך לגרניט נוצר סלע שהמינרל המנחה בו הוא אנדלוזיט. לאחר חקר שדה היציבות של המינרלים השונים במעבדה התברר, כי ההרכב הכימי הכולל של הסלעים מן האזורים השונים סביב המחדר המגמטי שווה. השינויים בסלעים באזורים השונים הם מינרלוגיים וכל מאסף מציין דרגת חימום שונה. הלחץ שנוצר בו המאספים השונים הוא פחות או יותר קבוע.



איור 6.13: גרניט החודר לסלע חרסית גורם להתמרה באזור המגע ביניהם בעקבות חימום.

אם כן ההסבר להיווצרות הסלעים הללו קשור בחימום שמקורו במחדר מגמטי. באזורים הקרובים מאוד למחדר, הטמפרטורות גבוהות מאוד (700°C עד 800°C בדוגמה שהובאה למעלה). ככל שהמרחק מן המחדר גדל, הטמפרטורה הולכת ויורדת עד שבמרחק מסוים אינה משפיעה על סלע הסביבה. התהליך העיקרי שמתרחש הוא גיבוש מחדש (רה=קריסטליזציה) של מינרלים חדשים היציבים בטמפרטורה גבוהה יותר ללא אובדן או תוספת חומר.

רוחב האזור המותמר בסמוך למחדר המגמטי תלוי בגודל המחדר. כאשר המחדר ברוחב של מספר מטרים, כמו דייק או סיל (על גופי מחדר עיינו בפרק השני), רוחב האזור המותמר יכול להגיע למספר סנטימטרים בלבד. אם המחדר המגמטי בעל קוטר של קילומטר או יותר האזור המותמר יכול להגיע לרוחב של מאות מטרים ויותר. מאספי המינרלים הנוצרים בתהליך התמרה תלויים כמובן בהרכב המקורי של הסלע שהמחדר המגמטי חדר אליו. לסיכום:

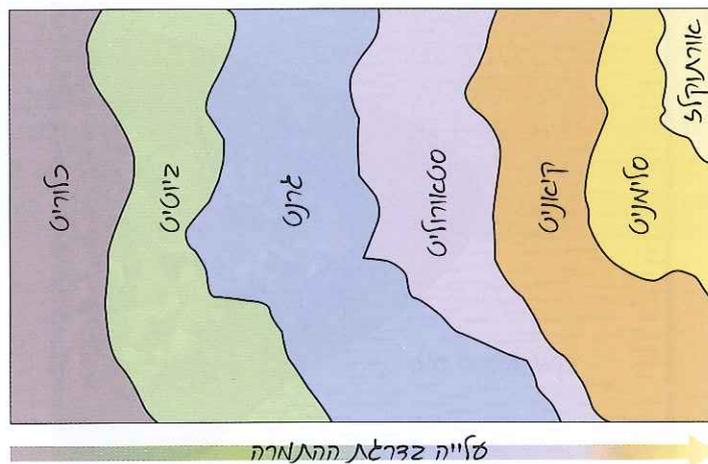
התמרה של מגע הוא תהליך המתרחש כאשר סלע בא במגע עם מחדר מגמטי חם. הגורם המרכזי להתמרה הוא העלייה בטמפרטורה ולא העלייה בלחץ (איור 6.8) ולכן סוג זה נקרא גם התמרת חום (התמרה תרמלית). השינויים העיקריים החלים בסלעים הם מינרלוגיים.

התמרה אזורית

סלעים מותמרים נמצאו באזורים נרחבים המגיעים לממדים של עשרות אלפי קילומטרים רבועים. חלק גדול מן המינרלים המופיעים בסלעים באזורים אלו אינם מוכרים מאזורים שעברו התמרה של מגע. בסלעים אלו בולטים שינויים מבניים הבאים לידי ביטוי במבנה דפי וקווי של הסלעים ובקימוטם. לסלעים הללו אין קשר ישיר להימצאות מחדר מגמטי. אם כן כיצד הם נוצרו?

בסוף המאה ה-19, גאולוג סקוטי ששמו ג'ורג' ברו (Barrow) חקר אזור נרחב שעבר התמרה, באזורים הגבוהים של סקוטלנד. גם כאן, סלעי המקור היו חרסיות. הוא גילה כי האזור מורכב מסלעים שונים, מיפה אותם ומתח קווים המגדירים את הגבולות ביניהם (איור 6.14).

אחר כך פנה לעבודת המעבדה. הרכבם המינרלוגי של הסלעים נבדק ולכל סלע נמצא מינרל מנחה שונה (על מינרל מנחה עיינו בהרחבה 24). סדרת המינרלים המנחים כללה: כלורית, ביוטיט, גרנט, סטאורוליט, קיאניט, סלימניט ואורתוקלז (איור 6.14).



איור 6.14: מיפוי אזורים הנבדלים ביניהם במינרלים מנחים ולכן גם בדרגת התמרה שונה.

תנאי הלחץ והטמפרטורות שהמינרלים השונים נוצרים בהם נקבעו והוגדרו שדות היציבות שלהם. נעקוב יחד אחר שדות היציבות של שני מינרלים מנחים: קיאניט וסלימניט (איור 6.15).

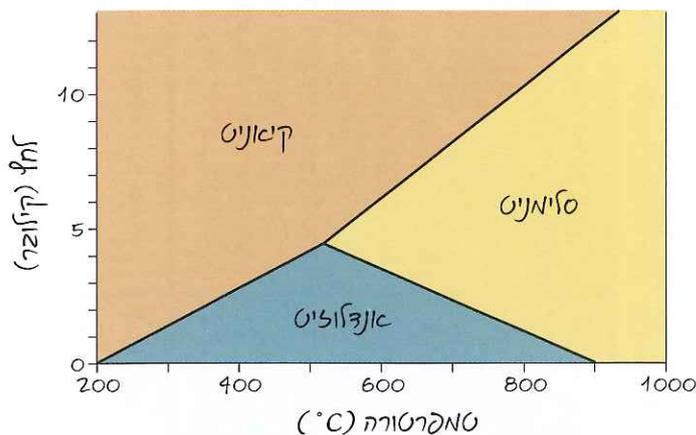
לשני המינרלים הרכב כימי זהה: Al_2SiO_5 . הם מורכבים מתחמוצות אלומיניום וסיליקה ולכן נקראים מינרלים אלומוסייליקטיים. הם נבדלים זה מזה בסידור המבנה שלהם (מינרלים בעלי הרכב כימי זהה ומבנה שונה נקראים פולי-מורפיים). מינרל אחר, בעל הרכב זהה לשני אלו ומבנה שונה הוא האנדלוזיט, המופיע גם הוא באיור 6.15. הזכרנו את האנדלוזיט בסעיף הקודם כאשר עסקנו בהתמרה של מגע. מה ההבדל בינו לבין השניים האחרים? כפי שאפשר לראות משדות היציבות שלהם, האנדלוזיט נוצר בתנאים של לחץ נמוך יחסית לשניים האחרים, תנאים המתאימים להתמרה של מגע. ההתמרה שהתרחשה באזור סקוטלנד מאופיינת, אפוא, בלחצים גבוהים יותר. הקיאניט והסלימניט מופיעים זה בסמוך לזה באזור הנחקר. מה ההבדל בתנאים שבהם הם נוצרו? הסלימניט נוצר בטמפרטורות גבוהות יותר מהטמפרטורות שבהן נוצר הקיאניט.

ברו הגדיר את שדות היציבות של כל המינרלים המנחים וגילה כי סדרת המינרלים מתארת עלייה בטמפרטורה לא רק בין הקיאניט והסלימניט אלא בין הכלוריט, המייצגת את הטמפרטורה הנמוכה ביותר, עד לאורתוקלז, המייצג את הטמפרטורה הגבוהה ביותר. אם כן, הקווים הגובלים בין הסלעים השונים גובלים גם בין אזורים המאופיינים בדרגת התמרה זהה. לכן קווים אלו נקראים איזוגרדים, איזו=שווה וגרד=דרגה. באזור שחקר ברו הפרשי הטמפרטורות נעו בין $300^{\circ}C$ ל- $600^{\circ}C$.

מחקרים רבים כדוגמת זה נעשו באזורים שונים בעולם.

אם כן, מה שמאפיין התמרה אזורית, לעומת התמרה של מגע, הוא תנאי טמפרטורה ובעיקר לחצים גבוהים (איור 6.8). גם כאן, ההרכב הכימי הכולל של הסלעים נשאר קבוע פחות או יותר. תנאי הטמפרטורה והלחץ הגבוהים גורמים להיווצרותם של מינרלים מותמרים והלחצים המכוונים גורמים למבנה דפי או קווי ולקימוטם של הסלעים. נותרנו עם השאלה: מהו המקור לטמפרטורות וללחצים גבוהים כל-כך?

הטמפרטורה בתוך קרום כדור הארץ עולה עם העומק. לעלייה זו אנו קוראים גרדיאנט גאותרמי נורמלי. בעבור כל קילומטר ישנה עלייה ממוצעת של 30 מעלות צלסיוס (איור 6.8). העומק הדרוש כדי להגיע לטמפרטורות התמרה של 300 עד 600 מעלות צלסיוס הוא 10-20 קילומטר. כמו כן, לחץ של קילובר אחד קיים בכדור הארץ בעומק של כ-3 קילומטרים. הופעתם של מינרלים כמו קיאניט וסלימניט מעידה על לחצים של מספר קילוברים להם נחשפו הסלעים (איורים 6.12 ו-6.15). לחצים אלו קיימים בעומקים של כ-10 קילומטרים ויותר בתוך קרום כדור הארץ. אם כן, סלעים שנוצרו על פני כדור הארץ, כמו החרסיות למשל, צריכים היו להיקבר לעומק הקרום. הפרשי הטמפרטורות בין הסלעים השונים כפי שנמצאו באזור המחקר של ברו ובאזורים אחרים מראים כי כנראה שהיו חלקים שנקברו לעומק רב יותר מן האחרים. מהו המנגנון הגורם לקבורת סלעים לעומק הקרום? על כך נלמד ביחידה העוסקת בתאוריית הלוחות, מבנה כדור הארץ ותאוריית הלוחות, עמודים 148-152.



איור 6.15: שדות היציבות של שלושה מינרלים מותמרים בעלי הרכב כימי זהה Al_2SiO_5 ומבנה פנימי שונה (פולימורפים).

