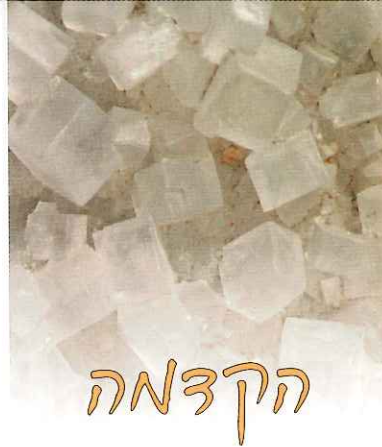


פרק חמישי
סלעים של
הלאבזול יאר

הקדמה

אנשען היווצרותם של סלעי הלאבזול יאר
סביבת היווצרותם של סלעי הלאבזול יאר
איצט הנאמז אניסויי מעצמה





הקדמה

בפרק הראשון הזכרנו כי סלעים של התאדות יתר הם סלעים גבישיים חד מינרליים (עמוד 20). סלעים גבישיים חד-מינרליים הם סלעים הבנויים מגבישים של מינרל אחד בלבד. הדוגמאות הבולטות הן: סלע הגבס המורכב מהמינרל גבס וסלע מלח המאכל המורכב מהמינרל הליט (או מלח המאכל). סלעים אלו מוכרים בעולם כולו ממחשופי סלעים עתיקים, ואפשר לחזות בהתהוותם גם היום. בים המלח למשל אפשר לחזות בהיווצרות סלע מלח המאכל (איור 5.1). מהו המנגנון המאפשר את היווצרותם של סלעים אלו ובאילו סביבות על פני כדור הארץ מתקיימים תנאים המאפשרים קיומו של מנגנון זה? על כך ננסה לענות בפרק זה.



איור 5.1: היווצרות סלע מלח המאכל בים המלח.



בניסוי "התגבשות מתמיסה רוויה" שערכתם במעבדה הבחנתם בגבישי המינרל הלית או מלח המאכל שהתגבשו מתוך תמיסה רוויה. טפטפתם שתי טיפות של תמיסת נתרן כלורי על זכוכית נושאת. התמיסה שהשתמשתם בה הכילה מולקולות מים (H_2O) וכן קטיונים של היסוד נתרן ואניונים של היסוד כלור.

חשיפת תמיסה זו לאוויר גורמת לאידוי המים. בתהליך זה עוברות מולקולות המים בתמיסה ממצב נוזלי למצב של גז (אדי מים) הנפלט לאוויר. כמות מולקולות המים בתמיסה הולכת ויורדת ואילו כמות יוני הכלור והנתרן בתמיסה נותרת ללא שינוי. במהלך תהליך האידוי של המים, עולה כמותם היחסית של היונים המומסים ביחס לכמות מולקולות המים. אפשר לתאר זאת על פי המונח **ריכוז**. בתהליך האידוי אנחנו מקטינים את נפח התמיסה כולה, אולם מסת החומר המומס אינה משתנה ולכן חלה עלייה במידת ריכוזו של החומר המומס (איור 5.2).



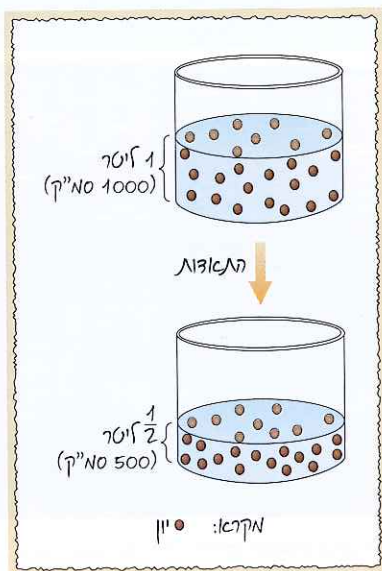
תמיסה

תערובת הומוגנית שבה חומר אחד (המומס) או חומרים אחדים מומסים ומפוזרים בתוך חומר אחר (הממס). תמיסה מימית היא תמיסה אשר הממס הוא מים. בתמיסות מימיות על פני כדור הארץ המומסים הם בעיקר מלחים מוצקים (מינרלים) שהומסו במים.

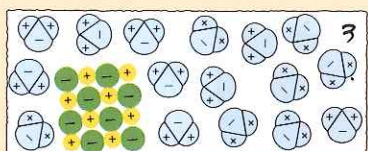
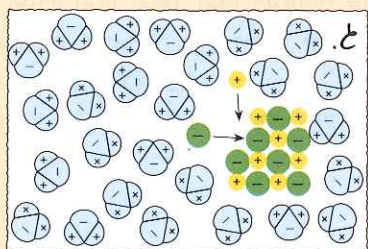
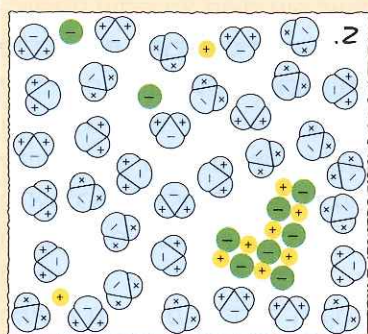
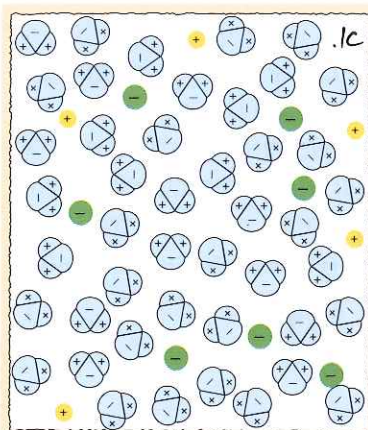


ריכוז

הריכוז נמדד בדרך כלל ביחידות של מסה ליחידת נפח, לדוגמה, גרם ל-100 סנטימטר מעוקב ממס, או גרם לליטר תמיסה.



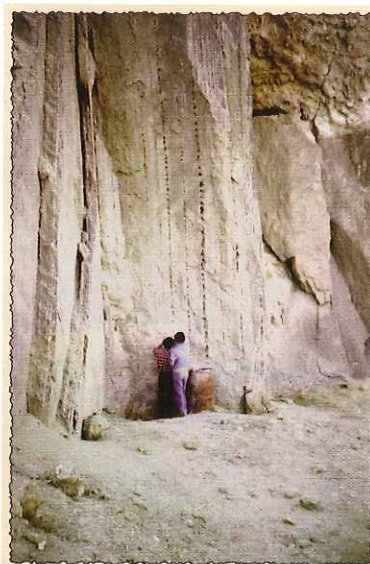
איור 5.2: עלייה בריכוזו של חומר עקב תהליך ההתאדות.



איור 5.3: תהליך שקיעת המינרל מלח המאכל מתוך תמיסת נתן כלורי שעוברת תהליך של אידוי. בין שלב א ל-ד כמות מולקולות המים הולכת ויורדת דבר המאפשר התקרבות יוני הנתרן והכלור זה לזה, בעקבות משיכה חשמלית והתגבשות גביש בעל צורה של קובייה.

העלייה בריכוז המומס גורמת להתקרבות היונים זה לזה עד לשלב שבו מולקולות המים אינן מפרידות ביניהם והיונים מסוגלים ליצור מבנה גבישי (איור 5.3). הנקודה שבה מגיע החומר לריכוז המאפשר לו להתגבש לגבישים נקראת **נקודת רוויה**.

נחזור לניסוי "התגבשות מתוך תמיסה רוויה" שעשיתם בכיתה. עובי שולי הטיפה שטפטפתם דק מאשר מרכז הטיפה. המים בשולי הטיפה עברו אידוי מהיר יותר, ריכוז הנתרן הכלורי עלה עד לדרגת הרוויה שלו וגבישי מלח המאכל החלו להתגבש שם עוד לפני שהופיעו במרכז טיפת המים. סלעים גבישיים חד-מינרליים הם אפוא תוצאה של התגבשות מתוך תמיסה רוויה. תנאים אלו מתאפשרים כאשר גוף מים עובר תהליך של התאדות מוגברת, ומכאן שמם **סלעים של התאדות יתר**. סלעים אלו מכונים גם סלעים **אֵוֹפּוֹרִיטִיִּים**, מן השם הלועזי להתאדות - אוֹפּוֹרִצִּיה (Evaporation). גבישי המינרלים הנוצרים בתהליך שתיארנו שוקעים ומורבדים על קרקעית גוף המים, עקב כוח הכבידה ולכן, סלעים אלו שייכים למשפחת **סלעי המשקע**. מאחר שתהליך היווצרות הסלע הוא תהליך כימי, מכונים סלעים אלו סלעי משקע כימיים (להבדיל מסלעים שהיווצרותם קשורה לעולם החי ועליהם דנו בפרק הרביעי).



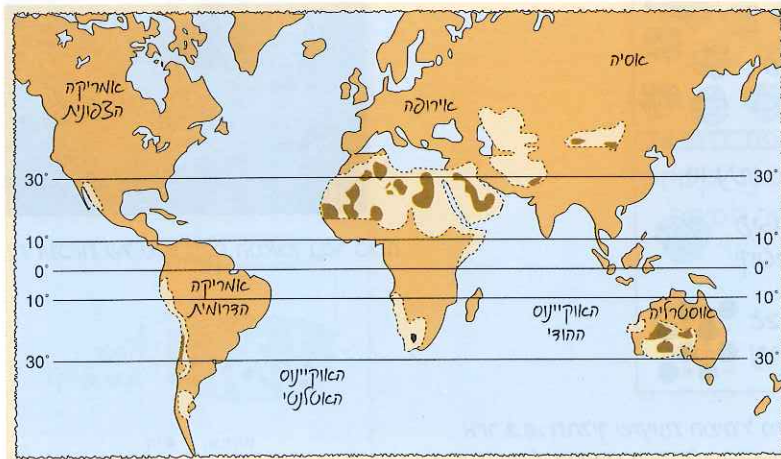
שכבות אנכיות של סלע מלח המאכל בהר סדום.

סביבת היווצרות של סלסי האאדוא יאר

כל גוף מים מאבד מים בתהליך אידוי. כדי שגוף מים יוכל לשמור על נפח קבוע עליו לקבל פיצוי על המים ההולכים לאיבוד. פיצוי זה נעשה באמצעות כניסת מים בכמות השווה לכמות המים שאבדה בהתאדות. מי גשמים, נהרות או מי ים יכולים למלא את החסר. כדי שייוצרו תנאים של אידוי יתר, כמות המים ההולכת לאיבוד באידוי צריכה להיות גדולה מכמות המים הנכנסת.

תנאים כאלו יכולים להתפתח בגוף מים שבו כניסת המים מוגבלת. התהליך מואץ עוד יותר אם גוף מים כזה נמצא באזור צחיח המאופיין בהתאדות מוגברת. אזורים צחיחים קיימים היום בחופים סוב-טרופיים הנמצאים בין קווי הרוחב 15° ל- 30° (צפון ודרום). ברצועה גאוגרפית זו מצויים מרבית המדבריות הגדולים בעולם והיא מאופיינת במיעוט משקעים, בקרינה חזקה של השמש וברוחות חזקות הגורמות להסעת אדי המים מן האוויר ולהגברת האידוי (איור 5.4). ואכן באזורים אלו מתרחשת בימינו הרבדה של סלעי התאדות יתר. תנאים מקומיים (צל גשם) יכולים ליצור התאדות יתר של אגמים בתוך היבשה (ים המלח, למשל) אולם אלו שכיחים הרבה פחות.

שתי סביבות שבהן כניסת המים מוגבלת מוכרות לנו על פני כדור הארץ היום: לגונה וסבחה.



מקרא: אזורים סיקריים של מדבריות (צפון ודרום) — אזורים סיקריים של מדבריות

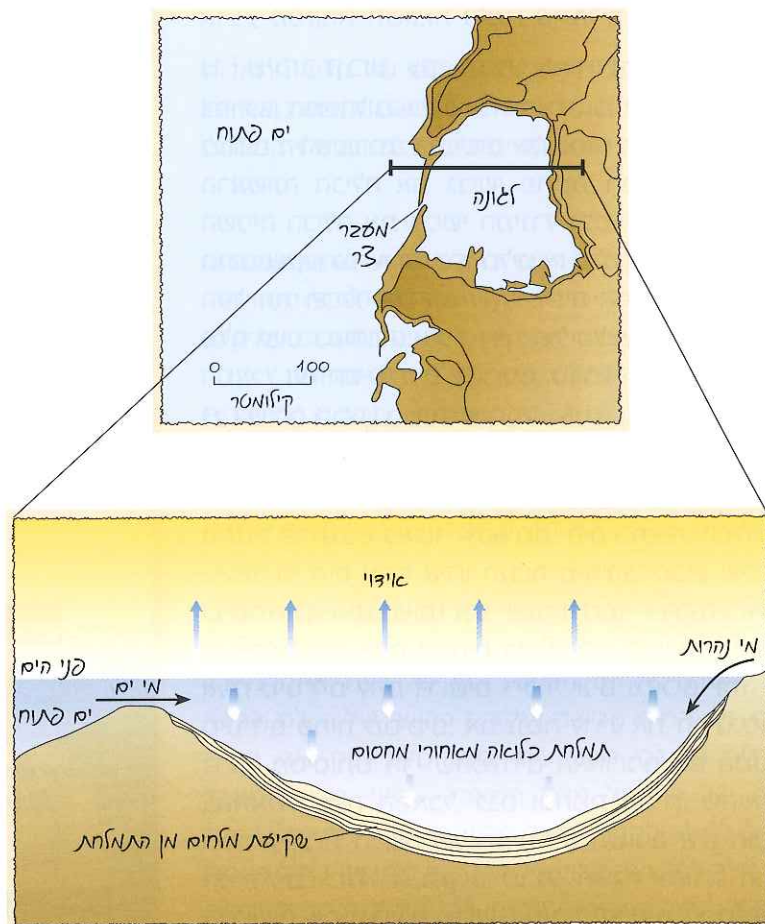
איור 5.4: מפה המתארת את אזורי המדבריות הגדולים בעולם, המדבריות מרוכזים בקווי רוחב 15° - 30° צפון ודרום.

1. לגונה

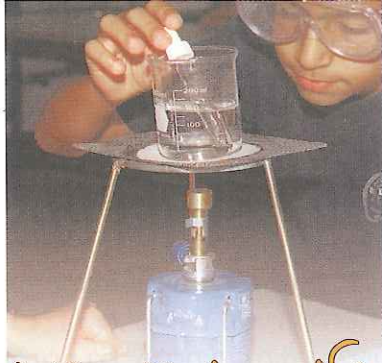
לגונה היא גוף מים מוגבל הקשור במעבר צר לים הפתוח. גוף כזה יכול להיווצר ממבנה קו החוף היוצר מפרץ סגור (איור 5.5) או כתוצאה ממבנה של שונות אלמוגים היוצרת מחסום בין הים הפתוח לבין גוף מים המוגבל בינה לבין קו החוף (איורים 4.10, 4.13). מי הים נכנסים ללגונה דרך המעבר הצר ובמקרים שבהם הלגונה מוגבלת על ידי מחסום, מי הים מחלחלים דרך חללים הקיימים בסלעים הבונים את המחסום. כאשר אובדן המים בעקבות אידיוי רב מכמות מי הים ומי הנהרות הנכנסת, נוצרים תנאים מתאימים להתגבשות גבישי מינרלים האופייניים לתנאים של התאדות יתר. מינרלים אלו שוקעים על גבי קרקעית הלגונה. תנאים אלו קיימים היום במפרץ קרה-בוגז הקשור במעבר צר לים הכספי.

2. סבחה

סבחה היא גוף של מים רדודים הנמצא על חוף הים. גוף זה מתמלא במים רק כאשר הים מציף את החוף (מישורי הצפה באיור 4.10). המים עוברים אידיוי ומהם שוקעים מינרלים של התאדות יתר. גוף המים מתייבש עד להצפה הבאה וחוזר חלילה. סביבה כזו קיימת היום בצפון סיני, לחוף הים התיכון ונקראת סבחת ברדוויל.



איור 5.5: למעלה - מפה המתארת מבט על של לגונה: גוף מים הקשור אל הים הפתוח במעבר צר. למטה - חתך רוחב של לגונה. גוף מים העובר אידיוי מוגבר בגלל קשר מוגבל לים הפתוח.



מיצץ הנאמץ מניסויי מעבדה

אמצעי חשוב מאוד במדע הגאולוגיה (ובמדע בכלל) הם ניסויי מעבדה. ניסויים אלו מנסים לחקות את התנאים הטבעיים ועל ידי כך להבין את התהליכים שבהם נוצרים סלעים.

אבן דרך בהבנת היווצרותם של סלעי המשקע הכימיים הייתה ניסוי של הכימאי האיטלקי אוזיליו (Usilio) שנעשו בשנת 1849 (איור 5.6). אוזיליו מילא כלי גדול במי ים מן הים התיכון וחיים אותם. המים עברו אידוי עד שלא נותר בכלי נוזל.

ארבע מסקנות חשובות נלמדו מתהליך זה:

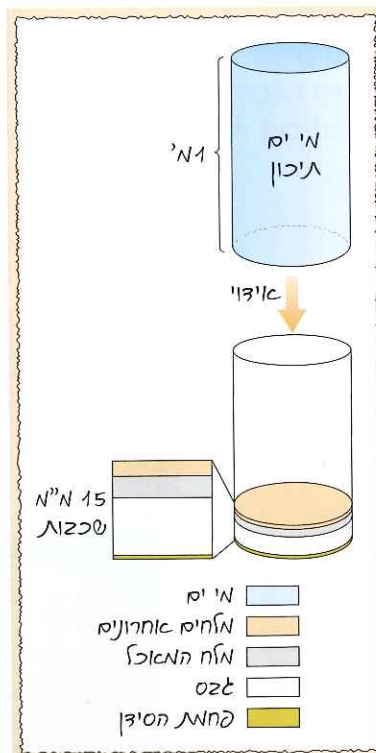
(1) שיכוב קבוע: עקב תהליך האידוי נוצרו בתחתית הכלי שכבות השונות בהרכב המינרלוגי. כל שכבה הייתה בנויה מגבישים של מינרל אחד עיקרי. לעתים היו מעורבים בגבישים אלו כמות מעטה של מינרלים נוספים. השכבה הראשונה הכילה את גבישי פחמת הסידן (ארגוניט - CaCO_3). השכבה השנייה הכילה את גבישי המינרל גבס ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (איור 5.7). על גבי הגבס שקעו גבישי המינרל הליט או מלח המאכל (NaCl) (איור 5.8). השכבות העליונות הכילו מינרלים של מלחים המכילים אשלגן ומגנזיום (על המונח מלח עיינו בהגדרה). נוצר רצף של סלעים הכולל: גיר, עליו גבס, עליו מלח המאכל ועליהם מלחים אחרונים. סדר זה חזר בקביעות בכל ניסיונות האידוי.

(2) שלב ההתגבשות של כל חומר: החומרים השונים התגבשו בדרגות אידוי מוגדרות: ארגוניט התחיל להתגבש כאשר 50% ממי הים התאדו, גבס התחיל להתגבש כאשר 70% ממי הים התאדו ואילו מלח המאכל התחיל להתגבש כאשר 90% ממי הים התאדו. המלחים האחרונים התגבשו כאשר מי הים עברו אידוי הגבוה מ-90%. מכאן שלכל מינרל ריכוז מסוים בו מתחילה התגבשותו וכפי שנהוג לומר - דרגת רוויה שונה. מינרלים להם דרושים ריכוזי יונים גבוהים כדי להגיע לרוויה נקראים "מינרלים מסיסים" ואילו מינרלים להם דרושים ריכוזי יונים נמוכים יותר כדי להגיע לרוויה הם מינרלים פחות מסיסים. אם ננסה לדרג את המינרלים אותם הזכרנו על פי דרגת מסיסותם הרי שהמלחים האחרונים הם המסיסים ביותר ואחריהם בהתאמה מלח המאכל, גבס ופחמת הסידן, שהיא הפחות מסיסה מבין כולם. נקודות הרוויה של המינרלים השונים אינן חופפות אולם התגבשות המינרלים יכולה להתקיים מרגע השגת נקודת הרוויה כל זמן שהיונים הדרושים להתגבשות גביש המינרל קיימים בתמיסה. משום כך, בנקודת הרוויה של מינרל מסוים רוב הגבישים המתגבשים הם בהרכב מינרלוגי זהה, אולם תיתכן גם התגבשות גבישי מינרלים נוספים, שדרגת הרוויה

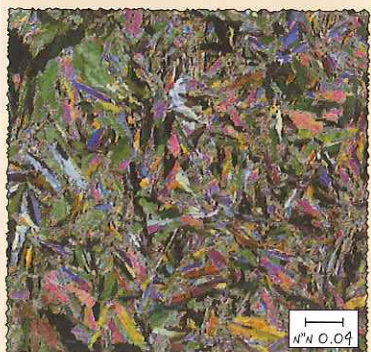


מלח

מלח היא תרכובת בה החלקיקים - יונים - קשורים בקשר חשמלי - יוני (על קשר יוני עיינו בהרחבה 1 עמוד 22). קיימות תרכובות רבות כאלו בטבע שהידועה ביותר ביניהן היא המינרל מלח המאכל. דוגמאות נוספות למלחים הם המינרלים סילביניט וקרנליט.



איור 5.6: ניסוי שנעשה אוזיליו בשנת 1849: בתהליך אידוי סופי של מים מן הים התיכון נוצרו שכבות של סלעי התאדות יתר.



איור 5.7: סלע גבס. למעלה - גבישי המינרל גבס בעלי צורה של סיבים דקים. למטה - צילום דרך מיקרוסקופ אור מקטב.

שלם כבד הושגה. כמותם של המינרלים הנוספים פחותה בהרבה. כך למשל, עם השגת דרגת הרוויה של המינרל גבס מתגבשים בעיקר גבישי גבס אך גם מעט גבישי ארגוניט. גבישי המינרלים שוקעים על גבי קרקעית גוף המים ונוצר סלע הבנוי בעיקר מגבישי מינרל מסוג מסוים ומעט מאוד גבישי מינרלים נוספים. משום כך, אפשר להתייחס לסלע שנוצר כסלע חד-מינרלי. (יש לציין, כי בין המלחים האחרונים ישנם כאלו הבנויים ממספר מינרלים ולעיתים מצטרפים גם המים למבנה הגבישי. מינרלים הבנויים משני מלחים נקראים מלחים כפולים. כך למשל הקרנליט הוא מלח כפול של אשלגן כלורי ומגנזיום כלורי המתגבשים יחד עם מולקולות מים $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ והסלביניט הוא מלח כפול של אשלגן כלורי ונתרן כלורי $(KCl \cdot NaCl)$).

(3) היחס בין עובי השכבות השונות: היחס שבין עובי משקעי הארגוניט, משקעי הגבס ומשקעי מלח המאכל בניסוי היה 1 : 200 : 10.

(4) יחס עומק עמודת המים ועובי המשקעים: בניסוי זה הסתבר כי בעבור עמוד מים בגובה אלף מטרים מתקבל עמוד משקעים בעובי של 15 מטרים בלבד.

ממצאים אלו עזרו מצד אחד בהבנת תהליך ההיווצרות של סלעי התאדות היתר השונים אך מצד שני עוררו בעיות כאשר ניסו ליישם תוצאות אלו על תצפיות שנעשו בחתכים של סלעי התאדות יתר עתיקים ובכאלו הנוצרים היום.

הבעיות המרכזיות היו שתיים:

- (1) עובי החתכים המוכרים ממחשופים רבים בעולם מגיע למאות מטרים ולכן דרוש ים עמוק בהרבה מזה הקיים בימינו (עומק של 5000 מטרים).
 - (2) היחסים שנמדדו בין עובי המשקעים השונים אינם נראים בחתכים עתיקים. החתכים בנויים בעיקר מגבס ונדיר למצוא את המלחים האחרונים. פתרונות לבעיות אלו נמצאו מתוך הבנה מעמיקה יותר של סביבות ההיווצרות של סלעים אלו ושל המנגנונים הגורמים להיווצרותם, ועל סמך העיקרון כי ההווה הוא מפתח לעבר (מוסבר בהרחבה בפרק רביעי).
- נבחן את סביבות ההיווצרות שכבר הזכרנו, סביבות שבהן נוצרים סלעים של התאדות יתר:

לגונה - הלגונה היא גוף מים הקשור למי הים הפתוח במעבר צר. קיימת כניסת מים מוגבלת מן הים ללגונה. משום כך לא מתרחש בתוכה תהליך של אידוי סופי. דרגת האידוי של מי הלגונה היא שקובעת איזה מינרל יתגבש וישקע מן המים. אם המים מגיעים לנקודת הרוויה של הגבס, גבישי גבס מתגבשים, מורבדים על גבי הקרקעית ונוצר סלע גבס. אם המים מגיעים לדרגת הרוויה של המינרל מלח המאכל, גבישי מלח המאכל מתגבשים, מורבדים על גבי הקרקעית ונוצר סלע של מלח המאכל. דרגת הרוויה של מי הלגונה יכולה להישאר קבועה לאורך זמן ממושך בגלל כניסת מי ים טריים המונעים את העליה במליחות המים, דבר היכול לגרום לשכבות בעלות הרכב מינרלוגי קבוע לשקוע זו על זו וליצור חתך עבה של סלעי התאדות יתר מסוג אחד.



איור 5.8: סלע מלח המאכל. לגבישי המינרל מלח המאכל צורה של קוביות.

השכבות אינן סותמות את גוף המים משום שקרקעית האגן שוקעת עקב לחץ השכבות המצטברות מעליה ועומק המים נשאר קבוע פחות או יותר. **סבחה** - סבחה היא גוף מים המתקיים רק כאשר מי הים מציפים את החוף. לאחר ההצפה המים עוברים אידי במהלכו תמיסת המים מגיעה לנקודת הרוויה של הארגוניט, לאחריה של הגבס ולאחריה גם של מלח המאכל והמלחים האחרונים. בהצפה הבאה חוזר התהליך על עצמו וכך מורבדות שכבות זו על זו עד לקבלת חתכים עבים. גוף המים אינו נסתם מהסיבה שצינו בלגונה. בגלל אספקת המים הטריים, מלח המאכל והמלחים האחרונים, שמסיסותם גבוהה יחסית, אינם מורבדים כלל ואם הם כן מורבדים, הם מומסים בנקל בהצפה הבאה. משום כך, החתך מכיל בדרך כלל שכבות של ארגוניט וגבס.

אם כן, מתוך הבנת סביבת ההיווצרות של הסלעים היום אפשר לספק תשובות הולמות לשתי הבעיות שהצגנו.

בשתי הסביבות שתוארו, הלגונה והסבחה, נוצרים חתכים עבים של סלעי התאדות יתר. היחס שנצפה במעבדה בין סוגי הסלעים השונים איננו מצוי משום שתהליך ההתאדות איננו סופי. המים מגיעים למצב של רוויה המתאים לסוג מינרל מסוים. משום כך מורבדות זו על גבי זו שכבות בעלות הרכב מינרלוגי זהה היוצרות חתך עבה מאוד ללא צורך בים בעומק רב.

הרחבה 22: מה אפשר ללמוד משכבות הגבס הנחשפות במכתש רמון?



איור 5.9: שכבות סלע הגבס כפי שנראות במחצבת הגבס במכתש רמון.

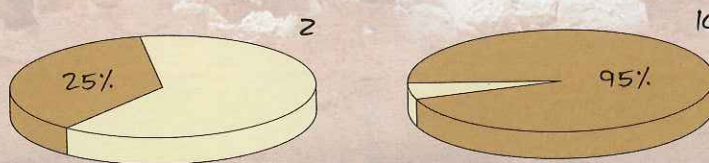
על פי העיקרון כי ההווה מפתח לעבר, שכבות עבות (מאות מטרים) של סלעי התאדות יתר עתיקים יכולות להיות סמנים לאקלים קדום (פלאו-אקלים, פלאו-קדום). הן יכולות להעיד כי המקום שבו נוצרו סלעים אלו באותה תקופה היה אזור אקלימי יבש מאוד, הנמצא היום בין קווי רוחב 15° - 30° צפון ודרום על פני כדור הארץ (עיינו באיור 5.4). לדוגמה, אפשר למצוא בארץ במכתש רמון שכבות גבס שעוביין 100 מטרים (איור 5.9) והן הורבדו שם לפני 200 מיליון שנים (בתקופה גאולוגית המכונה טריאס). אם כך, אפשר לשער כי לפני 200 מיליון שנים התקיימו באזור הנגב תנאים הדומים לאלו הקיימים באזורים האקלימיים היבשים. האם הנגב היה ממוקם בעבר בקו רוחב דרומי יותר? האם האקלים על פני כדור הארץ השתנה?

עם שאלות אלו ננסה להתמודד ביחידת הלימוד **מבנה כדור הארץ ותאוריית הלוחות**, עמ' 139-184.

סלעי משקע - סיכום

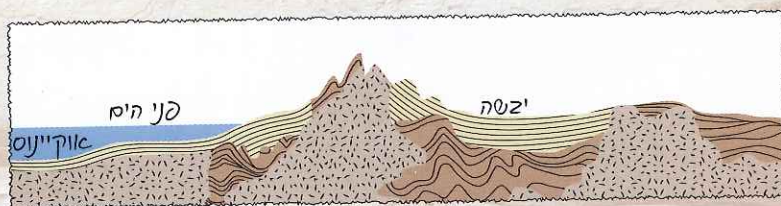
"סלעי משקע" הוא שם כולל למספר קבוצות סלעים שעליהן למדנו (איור 5.12):

סלעים גרגריים (קלסטיים), סלעים המכילים מאובנים (ביוגניים), סלעים של התאדות יתר (איופוריטיים). סלעי משקע נוצרים על פני כדור הארץ, בסביבות ימיות או יבשתיות. מוצאם של החלקיקים הבונים אותם במקורות שונים, והם מצטברים בתהליך של שקיעה והרבדה. תהליך זה מתקיים בזכות כוח המשיכה (הכבידה) של כדור הארץ. חלקיקים אלו יוצרים סדימנט ההולך ומתכסה בסדימנט אחר המורבד מעליו וכן הלאה. משום כך, סלעים אלו נקראים בלעז סלעים סדימנטריים. בעקבות הצטברותם של הסדימנטים זה על גבי זה נוצר לחץ על הקרום השוקע עקב כך וגורם לשכבות להיקבר לעומק של עד עשרות קילומטרים, לאזורים שבהם הטמפרטורה והלחץ גבוהים מאלו הקיימים על פני כדור הארץ. משום כך הסדימנטים עוברים תהליכים דיאגנטיים הכוללים תהליך של דחיסה (קומפקציה) ולעיתים גם תהליך של המסה וגיבוש מחדש. הסדימנטים הופכים בעקבות תהליכים אלו לסלעי הצטברות הסדימנטים זה על גבי זה יוצר מבנה של שכבות האופייני לכל סלעי המשקע. סלעי המשקע הם הסלעים הנפוצים ביותר על פני שטח כדור הארץ אולם הם כיסוי דק של הקרום היבשתי שעוביו מגיע עד 60 קילומטרים והוא בנוי מסלעים מגמטיים ומותמרים (איורים 5.10, 5.11).

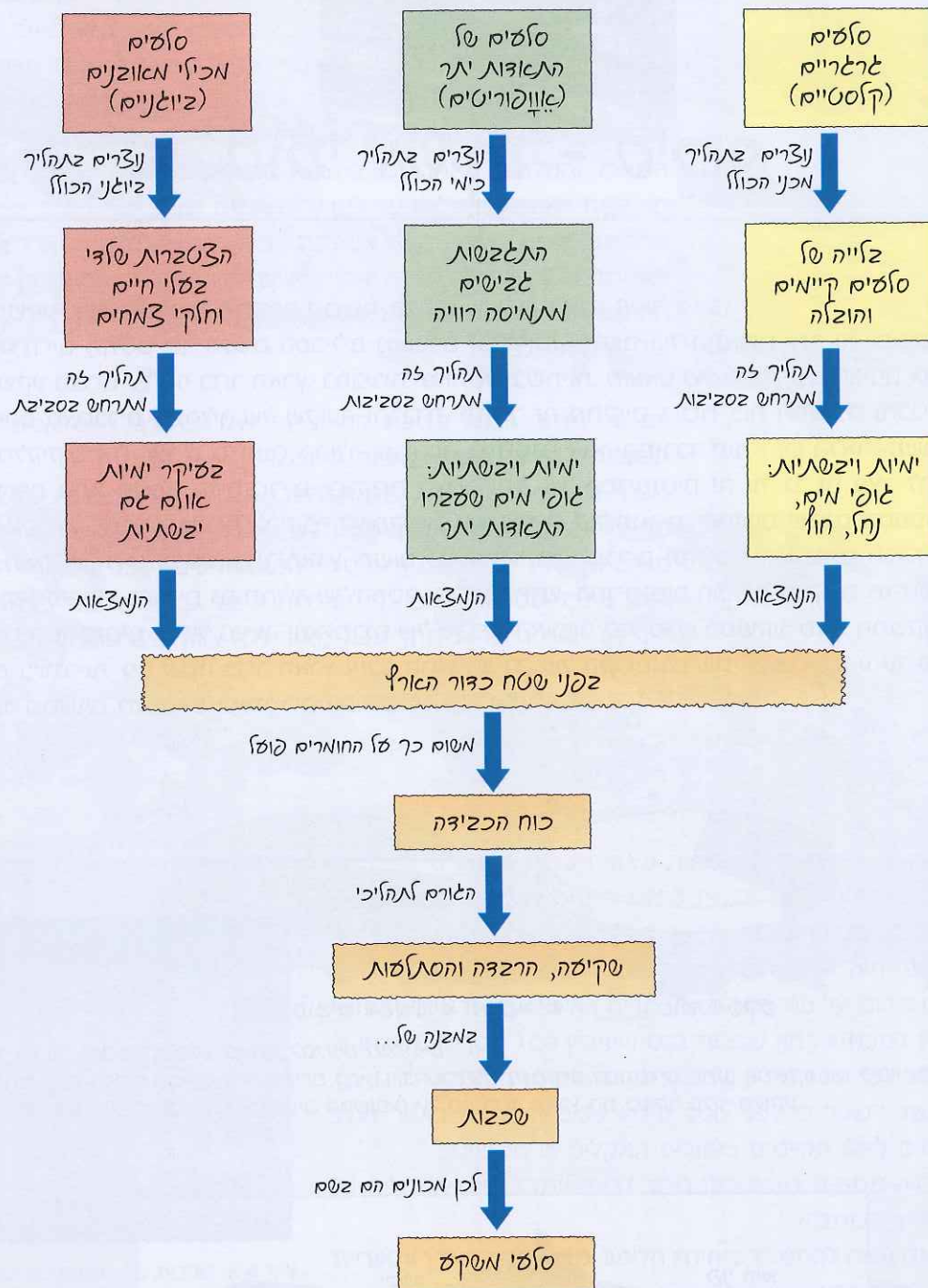


איור 5.10: יחסים בין סלעי משקע לסלעים מגמטיים

א. יחסי נפח בקרום כדור הארץ: הקרום בנוי ברובו מסלעים מגמטיים ומותמרים, סלעי המשקע הם כיסוי עליון שלהם.
ב. יחסי שטח על פני היבשות: הסלעים החשופים על פני כדור הארץ הם בעיקר סלעי משקע.



איור 5.11: סלעי משקע הם כיסוי דק יחסית על גבי הקרום הבנוי סלעים מגמטיים וסלעים מותמרים.



איור 5.12: תרשים זרימה המתאר את תהליך היווצרותם של סלעי המשקע.