



אוניברסיטה משודרת

יהושע קולודני



מטכ"ל / קצין חינוך ראשי / גלי צה"ל

משרד הביטחון – ההוצאה לאור

מודן הוצאה לאור



13 שיחות על גיאולוגיה

יהושע קולודני

13 שיחות על גיאולוגיה



מודן

מהי פעילות טקטונית ומנין לנו שיש טקטוניקה על פני כדור הארץ? למסקנה כי הרים מתרוממים, וסלעים מתכופפים ונשברים אפשר להגיע בעזרת חישוב פשוט מאוד. מהם עקרונות תורת "טקטוניקת הלוחות"? ומדוע התקבלה תורה זו ואילו "נדידת היבשות" שהוצעה כחצי קודם לכן - נדחתה?

מיפוי קרקעית הים ומדידות תכונות מגנטיות של סלעים ביבשה ובים היו בין התגליות העיקריות שהובילו לקבלת "טקטוניקת הלוחות". באיזו מידה נכונה ההנחה כי "ההווה הוא מפתח לעבר"? ומדוע יש אומרים כי "אקלים העבר הוא מפתח לעתיד"? כיצד קובעים את גילם של סלעים וכיצד נקבע גילו של כדור הארץ? מסתבר שלקביעת גילו של כדור הארץ וגם להבנת הרכבו, מחקר מטאוריטים חשוב לא פחות ממחקר הסלעים שעל כדור הארץ. המכשיר העיקרי לקביעת גילם של כדור הארץ ושל מערכת השמש הם גרעיני אטומים רדיואקטיביים. כיצד אנו לומדים את מבנהו הפנימי של הכדור שהרדיוס שלו כ-6,400 ק"מ? מסתבר שרעידות האדמה, אלה שלעיתים גורמות נזק רב ומסכנות חיי אדם, הן גם מכשיר נפלא להבנת המבנה הקליפתי של כוכב הלכת שלנו.

זהו מדגם של נושאים שפרופ' יהושע קולודני מהמכון למדעי כדור הארץ של האוניברסיטה העברית בירושלים מנסה להשיב עליהן.

מחיר מומלץ: 58 ש"ח



0 004800 036610

13 שיחות על גיאולוגיה

יהושע קלודני

ספריית "אוניברסיטה משודרת"

קצין חינוך ראשי / גלי צה"ל
בחסות אוניברסיטת תל-אביב

עורכת הסדרה: תרצה יובל-אלחנתי ז"ל

עורך הסדרה בגלי צה"ל: ד"ר חגי בעז

13 שיחות על גיאולוגיה

שודר באוניברסיטה המשודרת,
גלי צה"ל, סמסטר קיץ, 2009

יהושע קולודני

המכון למדעי כדור הארץ
האוניברסיטה העברית בירושלים

מק מודן הוצאה לאור

משרד הביטחון - ההוצאה לאור

Yehoshua Kolodny
13 TALKS ON GEOLOGY

עריכה:

איור השער

© כל הזכויות בשפה העברית שמורות, 2012
למורן הוצאה לאור בע"מ
משק 33, מושב בן-שמן, 73115

© Copyright by Modan Publishing House Ltd.
Meshek 33, Moshav Ben-Shemen, 73115

הספר יצא לאור באמצעות משרד הביטחון - ההוצאה לאור

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או בכל אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני או אחר, כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה. שימוש מסחרי מכל סוג בחומר הכלול בספר זה אסור בהחלט, אלא ברשות מפורשת בכתב מהמוציא לאור.

Printed in Israel

לזכרו של חברי ומורי

פרופ' רפאל (רפי) פרוינד (1933-1980)

גיאוולוג רבי־דמיון, מורה מלהיב, איש כלבבי.

תוכן העניינים

9	פתיחה
	שיחה 1
11	מדוע כדור הארץ אינו שטוח?
	שיחה 2
17	כיצד פועלת המכונה?
	שיחה 3
27	ההווה הוא מפתח לעבר - ואולי לא?
	שיחה 4
37	בראשית: כדור הארץ הקדום - מערפילית לפלנטה
	שיחה 5
45	רעידות אדמה
	שיחה 6
55	אין תוכו כברו
	שיחה 7
65	תורת הלוחות - טקטוניקת הלוחות

	שיחה 8
75	וְגִנֵּר צֶדֶק. מדוע לא נתקבלה דעתו?
	שיחה 9
85	גיאולוגיה כמדע היסטורי - סְטְרֵטִיגְרַפִּיָּה
	שיחה 10
95	מדידת גיל מוחלט
	שיחה 11
105	הרי געש, לְבוֹת - מַגְמוֹת
	שיחה 12
115	פְּלִיאֵוֶ-אֶקְלִים
	שיחה 13
123	"בשביל מה זה טוב?"

פתיחה

הקובץ מהווה אוסף של 13 שיחות רדיו על גיאולוגיה שקיימתי במסגרת האוניברסיטה המשודרת בגלי צה"ל.

המספר 13, תריסר ועוד אחת, מזכיר לי את התריסר של האופים (Baker's Dozen). באנגליה של המאות ה-13-17 הטילו עונש חמור מאוד (עד כדי קטיעת יד) על מי שרימה במשקל מצרכים שמכר: אופה שנמצא כי הלחם שמכר שקל פחות מן המידה שפורסמה - נענש. על כן נהגו האופים להוסיף כיכר לחם לתריסר שבעבורן גבו תשלום - על כל צרה שלא תבוא. חלק מכם אולי מכירים את אסופת הסיפורים היפהפיים 'תריסר רוסי' מאת ולדימיר נבוקוב, מחברו של הרומן המופתי 'לוליטה' - וגם בה 13 סיפורים.

לפנינו אפוא 13 שיחות, לא קורס סדור ב"מבוא לגיאולוגיה". גם סדר השיחות אינו כשל ספר לימוד. השיחות מתמקדות בנושאים אשר השפיעו לטעמי על הבנתנו את העולם שבו אנחנו חיים. אני מקווה שבסיום הקריאה יהיה טעמכם כטעמי.

חלק עקרוני מסיפורו של כדור הארץ עוסק במחזוריים. וכמו בכל מעשייה שעיקרה מחזור, גם כאן קשה להחליט היכן מתחיל הסיפור. הקדמת המאוחר לא תהיה אפוא נדירה.

בשיחותיי בגלי צה"ל הלנתי על הקושי לשוחח על גיאולוגיה בלי להיעזר בהצגה גרפית: מפות, חתכים, סכמות. כעת, כשמתפרסמות

השיחות בדפוס, אני יכול לשלב בטקסט איורים לא מעטים ובכך להקל על הקורא. האיורים כולם באדיבותו של המכון הגיאולוגי של ארצות-הברית. עמוד הבית של מכון זה, ובו גם ההרשאה לשימוש באיורים, הוא <http://www.usgs.gov>. את האיורים כולם עיבדה כרמל גורני.

בצאת השיחות בדפוס חובה נעימה היא לי להודות לחבריי שעזרו לי בהכנתן: לבני בגין, שהיה אמור להגיש את הסדרה ברדיו ו"העביר את הכדור" אלי בהיותו עסוק בעיסוקיו הלא-גיאולוגיים, לד"ר חגי בועז, עורך הסדרה בגלי צה"ל, לחברי אברהם סטרינסקי, שעבר בקפדנותו על כל הטקסט והאיורים ושיפרם עד מאוד. וכן לאחדים מאלה שהבהירו עניינים שדרשו הבהרה וקראו שיחות שהיו בתחום התמחותם הספציפי: אהובה אלמוגי, יונתן ארז, בעז לוז, ארי מטמון, עודד נבון, אמוץ עגנון, יאיר רינת וחגי רון. לבסוף אני מודה לעורכת הספרון, תמי בורשטיין, על סקרנותה ועל עבודתה המסורה.

כולם תרמו לניפוי השגיאות. אלה שנותרו - באחריותי בלבד.

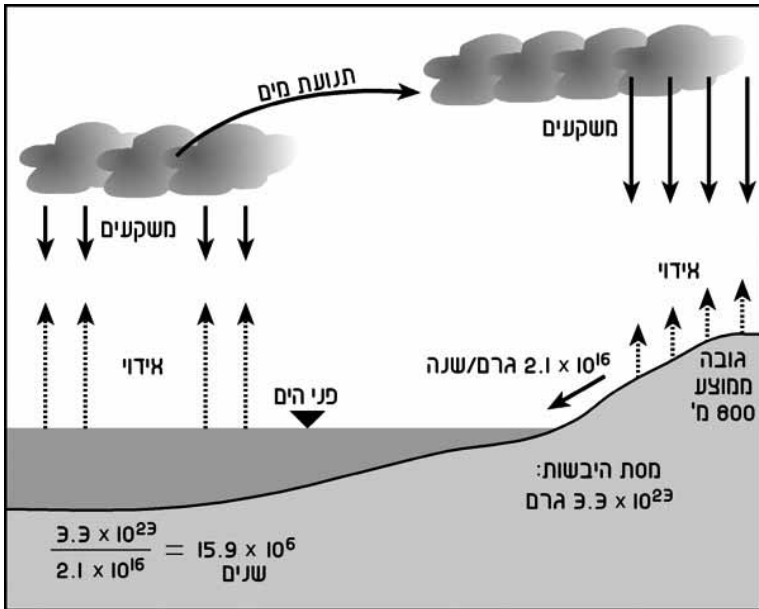
מדוע כדור הארץ אינו שטוח?

בשיחה זו נדגים כי כדור הארץ אינו סטטי. הוא פעיל, דינמי. הרים מתרוממים ושוקעים, נופים משתנים. סיפורנו לוקח אותנו לסוף המאה השמונה-עשרה. בתקופה ההיא רווחה הדעה כי כדור הארץ "צעיר". אף שהכרונולוגיה המקראית, המציגה את העולם ככזה הקיים רק כמה אלפי שנים, כבר לא היתה מקובלת על כולם, רבים עדיין ראו בכדור הארץ כוכב צעיר יחסית הקיים "רק" כמה מיליוני שנים ולכל היותר כמה עשרות מיליוני שנים. והנה באו הגיאולוגים ובשלב מוקדם למדי של התפתחות מדע זה החלו טוענים, על סמך נימוקים שבשדה וללא חישובים מתוחכמים, כי כדי ליצור את עמודת הסלעים שאנו רואים היום, דרושים כמה **מיליארדי שנים** - זמן ארוך מאוד מאוד. הטענה היתה כה מהפכנית עד שאפילו בסופה של המאה התשע-עשרה עדיין הגן אחד מגדולי הפיזיקאים של אותה מאה, הלורד קלווין, על ההערכות שכדור הארץ צעיר הרבה יותר (ראו שיחה 3).

בשלהי המאה השמונה-עשרה היתה התפיסה בדבר גילו הצעיר של כדור הארץ כה פופולרית בעיקר בשל ההערכה שקצב הבליה (האֶרוֹזִיָה) הוא מהיר למדי, ולכן לא נדרש זמן רב כדי ליצור את הנופים שאנו רואים סביבנו.

ואכן, הערכה זו נכונה. אפשר לחשב בקירוב כמה זמן נדרש כדי ליצור נוף כמו זה הקיים בעולמנו היום. אפשר לחשב בקירוב

גם כמה זמן היה נדרש כדי להגיע למצב קיצוני יותר, שבו הנוף היבשתי הממוצע הקיים כיום מיושר למישור שטוח בגובה פני הים. החשבון יראה כי בעולם דמוי עולמנו כיום תוסר כל עמודת הסלע בכ-16 מיליוני שנים (ראו מסגרת ואיור 1).



איור 1: סכמה של מאזן המים בכדור הארץ ושל בליית היבשות (ראו מסגרת). אורך החיצים בסכמה מייצג (סכמטית) את גודל שטף המים. מעל האוקיינוסים מתאדים כ-100 ס"מ מים בשנה ויורדים כ-90 ס"מ מי גשמים בשנה; האוקיינוסים הם כ-70% משטח כדור הארץ. כמות המים המתאדים גדולה אפוא מכמות המים היורדים מעל לאוקיינוסים, והמים העודפים מובלים אל מעל ליבשות ושם יורדים כגשם. עודף המשקעים לעומת האידוי מעל ליבשות הוא של 23 ס"מ בשנה (משקעים - 70 ס"מ בשנה, אידוי - כ-47 ס"מ בשנה). עודף משקעים זה מהווה את נפח הנהרות הזורמים לים - 3.5×10^{13} מ"ק בשנה. הנהרות מובילים בשנה 2.1×10^{16} גרם של חומרים מרחפים ומומסים, ובקצב כזה היו צריכים להביא לבליה של יבשה שמסתה 3.34×10^{23} גרם בכ-16 מיליון שנה (ראו מסגרת).

החשבון שנעשה כאן מקורב בלבד. חשבונות מקורבים יש בהם תועלת כל זמן שאנו מעריכים נכון את גבולות השגיאה שחוסר הדיוק מוביל אליה.

שטח היבשות הוא בערך 149×10^{16} סמ"ר, גובהן הממוצע 800 מטר וצפיפותן הממוצעת (משקלן הסגולי) 2.8 גרם/סמ"ק. כלומר, מסת ("משקל") היבשות היא בקירוב 3.34×10^{23} גרם = $149 \times 8 \times 2.8 \times 10^{20}$ או 34×10^{20} קילוגרם.

אפשר לחשב כמה זמן ייקח להסיר נפח כזה של יבשות ולהובילן לים. נהר ממוצע מוביל לים 0.6 ק"ג חומר לכל מטר מעוקב מים (מ"ק, 1000 ליטר) שחלקו חומר מרחף (חול וחרסית) וחלקו חומר מומס. ספיקת כלל הנהרות בעולם היא כ- 3.5×10^{13} מ"ק מים בשנה (מכפלת כמות המשקעים השנתית בשטח היבשות, איור 1). מכאן שהם מובילים לים בערך $0.6 \times 3.5 \times 10^{13} = 2.1 \times 10^{13}$ ק"ג של חומר מומס ומרחף בשנה תמימה. כלומר היבשות כולן תובלנה לים ב- $3.34 \times 10^{20} / 2.1 \times 10^{13} = 15.9 \times 10^6$ שנים.

החשבון היה מקורב. בכמה טעינו? נאמר בפי שניים. כלומר, על מנת להחליק את היבשות למישור דרושות לא 16 מיליון שנה אלא 32 מיליון שנה, ואם הטעות היא בכיוון ההפוך - 8 מיליון שנה! מה נשתנה אפוא ב-200 השנים האחרונות? השתנו ההערכות בדבר גילו של כדור הארץ. שהרי היום אנו יודעים כי כדור הארץ קיים כ-4,560 מיליוני שנים! ומנין לנו זאת? לכך נקדיש שיחה מיוחדת ובינתיים רק נציין שאנו יודעים את גילו של כדור הארץ לפי תארוך רדיואקטיבי - התפרקות יסודות רדיואקטיביים והצטברות תוצריהם (ראו שיחה 10).

בתוך פרק זמן של 4,560 מיליוני שנים היתה אמורה עמודת היבשה שלנו להיות מוחלקת לגובה מפלס הים, כלומר העקוב

היה צריך להיות למישור, לפחות 150 פעם, שלא לומר 300 פעם, ואולי אף קרוב ל-600 פעם. ואף על פי כן אין פני היבשות מישוריים כמו בהולנד ובארצות השפלה. לא רק כרמל יש, והר מירון וחרמון ובקעת הירדן, אלא גם הימלאיה ואנדים ואלפים.

משמעות הדבר היא שחוץ מכוחות הבליה, שעדויות להם נצפות בנוף, כוח נוסף פועל בכדור הארץ ובמגמה הפוכה - כוח הבונה ומרים יבשות, כוח היוצר הרים ובקעות. בשפת הגיאולוגים: יש טקטוניקה! תהליכים טקטוניים (tekton הוא בנאי בלטינית) הם אותם תהליכים בקרום כדור הארץ הבונים-יוצרים את המבנים הגיאולוגיים השונים: קמרים וקערים, בקעים וגושי סלע מורמים.

עד כה הבהרנו כי את קרום כדור הארץ היבשתי בונים כל הזמן כוחות פנימיים כלשהם - כוחות טקטוניים, וקרום זה נהרס על ידי כוחות אחרים - מים זורמים או רוח.

מותר לנו להניח כי כדור הארץ כולו הוא מערכת סגורה פחות או יותר. מלבד כמות קטנה של חומר קוסמי הנופל עליו בדמות מטאוריטים ואבק קוסמי, שום חומר אינו מיתוסף לכדור; למעט כמות קטנה של חומר, גזים קלים בעיקר, שום חומר גם אינו עוזב אותו. אם כן, מאין מגיע חומר הבנייה ולכן נעלם החומר שנהרס? נראה שיש **מחזור של חומר** - חומר שנהרס נקבר וברבות הימים עולה שוב לפני השטח. החומר הבונה היום הר חדש כבר היה כאן פעם.

בחשבון פשוט מאוד - חשבון מאזן (השייך בעצם לתחום עיסוקם של רואי חשבון) - אפשר אפוא להגיע לשתי מסקנות מרחיקות לכת: א. יש טקטוניקה.

ב. יש מחזור של חומר.

נדון בקביעה "יש טקטוניקה". מה משמעותה? בקביעה זו אנו דורשים שבכדור הארץ יתקיימו במקביל שני תהליכים מנוגדים, תהליך של בנייה ותהליך של הרס: בתהליך הבנייה - טקטוניקה - נבנים רכסי הרים, קמרים, קערים; ובתהליך ההרס מוסרים הרכסים

והרמות, ומוצרי ההרס מובלים לבסיס הארוזיה (בסיס הניקוז) ובסופו של דבר לים.

בנייה והרמה חיוניות כי מרבית הסלעים נוצרים בגובה טופוגרפי נמוך. כל סלעי המשקע (הסלעים הסדימנטריים) שוקעים על יבשה או על קרקעית של ים או של אגם הנמצאים במישור נמוך למדי. הסלעים הוולקניים הם תוצר של שפכי לבה על פני שטח כדור הארץ. הסלעים הפלוטוניים, כגון הגרניט, נוצרים בעומק של עשרות קילומטרים מתחת לפני השטח, בטמפרטורות ובלחצים גבוהים. גם הסלעים המטמורפיים, כמו שיסט (צפחה) או שיש, היו פעם סלעי משקע או סלעים מגמתיים שעברו שינויים בעומק קרום כדור הארץ בטמפרטורה ובלחץ גבוהים.

הר האוורסט, לדוגמה, בנוי מסלעי משקע כמו אבני גיר ימיות, ומסלעים מטמורפיים כמו שיש, שעברו שינויים בעומק רב, וכן מסלעים מגמתיים, כמו גרניט, שגם הם נוצרו בעומק כדור הארץ. משהו הרים אפוא את הסלעים האלה לגבהים של כמעט תשעה קילומטרים.

תוך כדי הרמה גם נוצרו בסלעים אלו קמטים. קמטים בסלע? והרי ראשי ממשלתנו אומרים "סלע קיומנו" דווקא כשהם רוצים לתת דוגמה לדבר שלא יתכופף ולא יישבר לעולם! מסתבר כי הדברים פשוטים פחות וסלעים יכולים להתקמט ואף להישבר. מוצקים מגיבים למאמץ (הפעלת כוח על יחידת שטח) בשבירה או בזרימה - כיפוף. תגובתם תלויה בכמה גורמים. למוצק הנשבר תחת מאמץ אנו קוראים פְּרִיךְ (Brittle), ואילו למוצק המתכופף וזורם אנו קוראים מְשִׁיךְ (Ductile). הנה דוגמה מחיי היום-יום: הקרקר הוא שביר ואילו החמאה משיכה. אך לוח מלח בישול (או עץ או זכוכית), שאנו רגילים לראותו נשבר בתגובה למאמץ, כאשר נהדק אותו בין שני מלחציים מרוחקים זה מזה, יתכופף במרכזו תחת כובד המשקל. מי לא ראה בספרייה מדפי ספרים שהתכופפו מעומס הספרים שעליהם? אותו לוח, אם נכה עליו בפטיש, יישבר. כלומר מה שקובע הוא גם קצב הפעלת המאמץ.

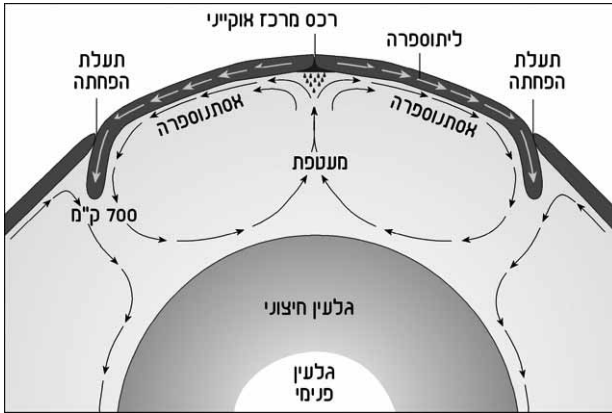
ניקח גליל עשוי שיש ונכניסו למכל שמן שאפשר לשנות את הלחץ ההידראולי המופעל עליו בעזרת בוכנה. נוהגים לומר כי על גליל השיש מופעל לחץ מקיף: בלחץ מקיף נמוך יתחיל הגליל בשלב מסוים להישבר; בלחץ מקיף גבוה הוא יתעוות - יתקצר וישמין במרכזו. כלומר בתנאים מסוימים סלעים מסוגלים לזרום - להתקמט. בתנאים אחרים הם נשברים. לעתים תלוי הדבר בסוג הסלע, אך תמיד בקבורה עמוקה דיה ובמאמץ אטי דיו מתקמטים הסלעים ולא נשברים. רוצה לומר: בלחץ מקיף גבוה דיו דברים הנראים קשיחים יכולים להתכוּפף או להתקמט.

היכן אנו רואים בארץ גם קמטים וגם שברים (העתקים)? קמטים אפשר למצוא בשכבות צור מקומטות מאוד בדרך ירושלים-יריחו, בסביבות המכתש הקטן או בסלעים הלבנים של תצורת הלשון (מה שרבים קוראים חוואר הלשון) שבנחל פרצים ליד סדום. שברים יפים ולא גדולים אפשר לראות בנחל רמון שבמכתש רמון; שבר גדול יותר - בקירות שליד עין פשחה, בכביש סדום-עין גדי. קירות אלה הם מישורי השבירה של העתק גדול: בקע ים המלח.

כיצד פועלת המכונה?

בשיחה הראשונה הגענו למסקנה כי בהשוואה לזמן קיומו של כדור הארץ, כ-4.5 מיליארדי שנים, נוף כדור הארץ חייב להיות צעיר יחסית. שאם לא כן היתה הארוזיה מבלה את כולו למישור שטוח כבר לאחר 10-30 מיליון שנה. אך הרים עדיין נישאים ולכן לא היה מנוס מלהגיע למסקנה כי לא רק תהליכי ארוזיה, הרס ובליה פועלים בכדור הארץ אלא גם תהליכי בנייה - תהליכים טקטוניים, והם מתבטאים בתופעות של הרמת גושי סלעים גדולים והורדתם, של קימוטם ושבירתם.

כדי להניע תהליכי בנייה והרס יש צורך בכוח ובמקור אנרגיה. צריך "מנוע" שיעלה את ההרים מעלה, ישבור ויקמט סלעים. אך צריך גם מנוע שיגרום לבלית ההרים - יוביל את תוצרי ההרס בנהרות אל הים. וכל מנוע צריך מקור אנרגיה, או במילים אחרות, מקור חום. מהם מקורות החום של שני המנועים האלה? נתמקד תחילה במנוע הבונה הרים - במנוע שמפעיל את הטקטוניקה. מקור האנרגיה של מנוע זה נמצא בעומקו של כדור הארץ.



איור 2: סכמת המבנה הקונצנטרי של כדור הארץ. הקרום - החלק החיצוני (המסומן בשחור). פנימה ממנו המעטפת, ובמרכז הגלעין. הציור אינו מציג את קנה המידה האנכי הנכון. עוביים של החלקים השונים מופיע באיור 15. החיצים מסמנים את כיווני הזרימה במעטפת.

שם, עמוק בפנים, חם מאוד. מנין לנו?

מלועם של הרי געש כמו אתנה וִיזוֹב פורצת לבה חמה. בעבר פרצו לבות גם מהרי הגעש ברמת הגולן, בגליל, במכתש רמון. גייזרים בניו־זילנד ובקליפורניה פולטים אדים ומים חמים; מעיינות, כמו חמי טבריה, וקידוחים עמוקים, כמו בחמי יואב שליד קיבוץ נגבה, מצביעים על הימצאותם של מים חמים במעמקים; ככל שאנו יורדים לעומקם של מכרות, כמו מכרות הזהב בדרום אפריקה, הולכת הטמפרטורה ועולה.

אמנם הטמפרטורה עולה ככל שאנו חודרים לעומק כדור הארץ, אך קצב העלייה אינו אחיד אלא משתנה ממקום למקום: הוא נע בין 50°C (50 מעלות צלזיוס) לקילומטר ל- 20°C לקילומטר. בחלקו החיצוני של הכדור העלייה הממוצעת היא של בערך 30°C לקילומטר (ראו גם איור 31). בעומק רב יותר קצב עליית הטמפרטורה מתון יותר. במרכז כדור הארץ, בעומק 6,400 ק"מ, מגיעה הטמפרטורה כנראה ל- $5,000^{\circ}\text{C}$.

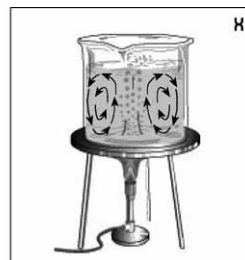
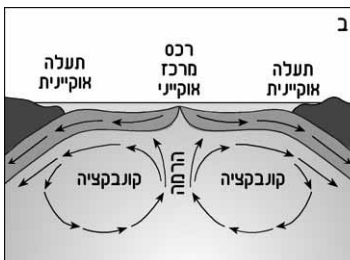
לחום הפנימי של כדור הארץ שני מקורות עיקריים: האחד הוא החום השאירתי - החום שנשאר מימי היווצרותו של הכדור. בהמשך נדון בדרך שבה נוצרה הפלנטה שלנו, אך נקדים ונאמר כי כדור הארץ נוצר בראשיתו מכמות גדולה מאוד של "פלנטיסימות", גופים מוצקים קטנים אשר התנגשו זה בזה, ולבסוף יצרו את כדור הארץ הקדום. כאשר גוף מוצק מתנגש באחר הופכת אנרגיית התנועה לחום. חשבו על החום הנוצר בהתנגשות מכוניות או על זה הנוצר כשכדור רובה פוגע במטרה. כשגוף מוצק פוגע בכדור הארץ במהירות האופיינית של 15-20 ק"מ בשנייה, הוא משחרר אנרגיה השווה בערך לפי 100 מן האנרגיה שתשתחרר מפיצוץ כמות TNT במשקל השווה למשקל הגוף הפוגע. התנגשויות כאלה גרמו לכדור הארץ להתחמם ובמידה ניכרת להינתק. החום שנוצר אז עדיין מזין את המנוע הפנימי שלו.

מקור נוסף לחום הפנימי של כדור הארץ הוא התפרקותם של יסודות רדיואקטיביים. בתהליך רדיואקטיבי גרעין אב מתפרק ליסוד אחר, גרעין בת, שהוא בעל מסה נמוכה משל גרעין האב. ההבדל במסה בין שני גרעינים כאלה הופך לאנרגיה (זוכרים את הנוסחה $E=mc^2$, שעל פיה האנרגיה שווה להבדל במסה כפול ריבוע מהירות האור?). ההבדל במסה הוא כמובן קטן למדי אך מהירות האור גדולה מאוד, כ-300,000 ק"מ בשנייה.

התפרקות גרעיני אורניום היא מקור האנרגיה בכורים גרעיניים, ולהבדיל - בפצצת האטום. גם בכדור הארץ משתחררת כך אנרגיה לא מעטה. בכדור הארץ נפוצים בעיקר שלושה יסודות רדיואקטיביים - אשלגן-40 (כלומר האיזוטופ של אשלגן שמסתו 40), אורניום ותוריום. שלושתם מتركזים (אמנם בריכוזים די נמוכים) בעיקר בחלק החיצוני ביותר של הכדור - בקרום שלו, אך החום שהם פולטים משמש לא רק מקור חום פנימי אלא גם מעין שמיכה חמה העוטפת את הכדור ומאטה את התקררותו בספקה לו אנרגיה כל הזמן.

שאלה חשובה היא כיצד מועבר החום מן העומק אל פני השטח. כדור הארץ מתקרר בשתי דרכים עיקריות: הולכה והסעה. נבהיר את

ההבדל ביניהן: כשמחממים מוט נחושת בקצהו האחד, קצהו השני מתחמם מהר למדי - הנחושת היא אפוא מוליך חום מצוין, ואנו אומרים שהחום המועבר בצורה זו מועבר על ידי הולכה. לעומת זאת, מים או שמן הם מוליכי חום גרועים, ובכל זאת כשאנו מניחים על האש סיר ובו מרק או שמן, המרק כולו מתחמם כעבור זמן מה באופן הומוגני. הכיצד? הנוזל שנמצא למטה, קרוב למקור החום, מתחמם - מתפשט - נעשה קל יותר - צף למעלה - שם הוא מתקרר - צונח שוב מטה - וחוזר חלילה עד שהמרק רותח כולו (ראו איור 3א). החום מובל כאן מלמטה למעלה לא על ידי הולכה (כמו במקרה הנחושת) אלא על ידי הסעה - קונבקציה. בסיר ייווצרו תאים של זרמים חמים עולים ותאים של זרמים חמים פחות - יורדים. הסלעים במעטפת, כמו המרק, הם מוליכי חום גרועים, על כן הם מתחממים, וכשהם מתחממים הם גם מתפשטים, וצמיגותם יורדת (אם כי נשארת גבוהה מאוד - הם צמיגיים הרבה יותר מכל נוזל שאנו מכירים מחיי היום-יום, אפילו יותר מדבש). אז מתאפשרת במעטפת כדור הארץ קונבקציה (איור 3ב). סלעי המעטפת זורמים אך כמובן לאט מאוד. זהו המנגנון העיקרי של העברת החום מפנים כדור הארץ לשטח פניו.

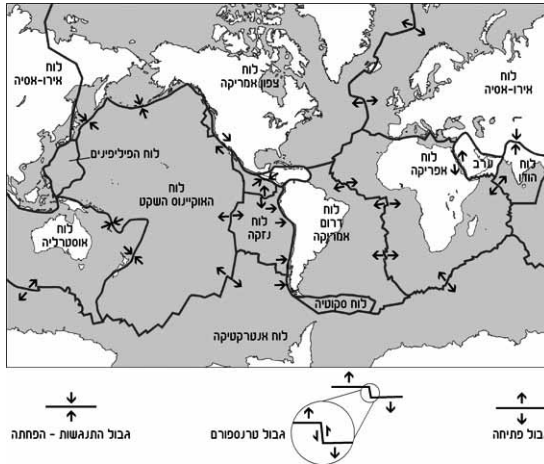


איור 3א: קונבקציה בכוס מים. מקור החום הוא למטה, במבער. הנוזל בבסיס מתחמם, נעשה קל יותר, עולה מעלה, מתקרר וצונח חזרה. איור 3ב: התמונה המקבילה במעטפת: כאן החומר הזורם הוא מוצק המתנהג כנוזל בעל צמיגות גבוהה מאוד. הזרמים העולים הם הכוח המניע לפתיחה ברכס מרכז אוקייני. הזרם הנחת מושך את הלוח שמעליו ויוצר אזור הפחתה, וביטוי המורפולוגי תעלה אוקיינית (שקע אוקייני). (ראו הסבר בהמשך)

מאמצע שנות השישים יש בידינו תיאוריה אשר מסבירה כיצד המנוע הפנימי מניע את התהליכים הטקטוניים בכדור הארץ. לתיאוריה זו קוראים תורת הלוחות או "טקטוניקת הלוחות" (Plate Tectonics). הופעתה של תורה זו בגיאולוגיה היתה מהפכנית. במובנים רבים היא אנלוגית למהפכה שהתרחשה בפיזיקה בראשית המאה העשרים, כאשר תורת היחסות איחדה את חוקי הפיזיקה המתארים את התנהגות המרחב, הזמן, המסה והתנועה. בבילולוגיה התרחשה מהפכה בעלת משמעות דומה עם פענוח מבנה הדנ"א באמצע המאה העשרים, תגלית אשר איפשרה לבילולוגים להסביר כיצד האינפורמציה הגנטית באורגניזמים עוברת מדור לדור.

עוד נחזור לתורת הלוחות מזוויות ראייה שונות. ונעשה זאת כי תורת הלוחות היא תורה מאחדת (Unifying Theory) הקושרת יחדיו תופעות מתחומים רבים מאוד במדעי כדור הארץ - הרי געש ומגנטיות, רעידות אדמה, תפוצת מאובנים והיווצרות של שרשרות הרים.

עיקרה של התורה בקביעה כי החלק הקשיח של כדור הארץ, קליפתו החיצונית, הליתוספירה, מחולק לכתריסר לוחות (ראו איורים 2, 4), אשר התנועה היחסית ביניהם - התנגשות, הפרדה, מַעֲבָר זה על פני זה - מכתיבה את התנהגות מכלול התופעות הגיאולוגיות שהזכרנו. תנועת הלוחות נגרמת על ידי זרמי הקונבקציה בעומק המעטפת, המשמשים "גלגלי שיניים" להנעת המכונה. כשלוחות מתנגשים, מתרוממים באזור התנגשותם הרים או נוצרות תעלות אוקייניות (שקעים אוקייניים). כשלוחות נפרדים, נוצרים רכסים מרכז אוקייניים. בגבול שבין הלוחות נוצרים הרי געש, והם אשר מעבירים חומר - לְבוֹת, אפר, גוֹזִים - מִפְּנִים כדור הארץ לפני השטח שלו. חומר זה משפיע על הרכבם של האוקיינוס ושל האטמוספירה.



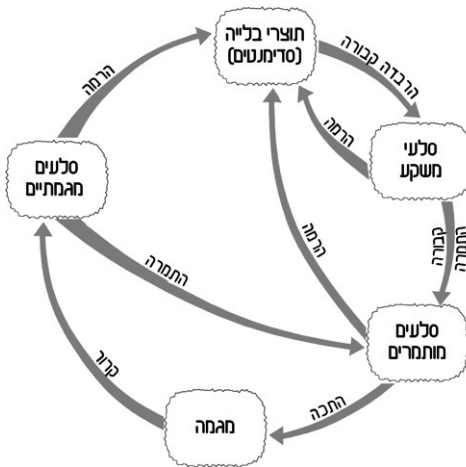
איור 4: מפת הלוחות הטקטוניים. שימו לב כי אין גבולות היבשות חופפים לגבולות הלוחות. רוצה לומר: אנו מדברים כיום על "טקטוניקת הלוחות", לא עוד על "נדידת יבשות". על גבי כל לוח החיצים מסמנים את כיוון תנועתו היחסית של כל לוח, ואורכם של החיצים מייצג את מהירות התנועה של הלוח. כמו כן מסומנים על גבי המפה שלושת טיפוסי הגבולות.

נעבור כעת למכונה השנייה, זו ההורסת את ההרים. כאן מקור האנרגיה, החום, רחוק הרבה יותר; זו השמש שלנו. מקורה של אנרגיית השמש דומה למקורה של האנרגיה הרדיואקטיבית. גם כאן הקשר בין מסה לאנרגיה ($E=mc^2$) הוא סוד העניין. אלא שכאן, במקום שיתפרק כל גרעין לשני גרעינים קלים יותר, ארבעה גרעיני מימן מתאחדים דווקא ועוברים חיבור (היתוך) לגרעין הליום. מסת גרעין ההליום נמוכה יותר מסכום מרכיביו, ועודף המסה הופך לאנרגיה. תהליך זה הוא מקור האנרגיה גם של פצצת המימן (לעומת פצצת האטום שהוזכרה בראשית פרק זה). את האנרגיה הזאת השמש פולטת על ידי קרינה. כמחצית מהקרינה נפלטת בתחום ספקטרום האור הנראה - אור השמש. יתר הקרינה נפלט באורך גל ארוך יותר - אינפרא אדום, וקצר יותר - אולטראסגול.

כמות הקרינה הממוצעת שכדור הארץ מקבל מהשמש היא כ-340 ואט לכל מטר רבוע בשנה. כלומר, כמות אנרגיה המקבילה לשלוש-ארבע נורות חשמל של 75 ואט. השוו זאת ל-0.06 ואט למ"ר בשנה (פחות מעשירית), המגיע לפני כדור הארץ מהעומק, מהחום הפנימי של הכדור. כל האנרגיה הזאת מוכרחה להיות מוקרנת חזרה לחלל, שאם לא כן היה כדור הארץ מתחמם והולך. אם כן, מקור האנרגיה של ה"מכונה ההורסת" הוא לכאורה ניכר יותר מזה של "המכונה הבונה".

השמש מחממת את פני השטח, גם את האוויר וגם את פני האוקיינוסים. החימום גורם לתנועתו של האוויר ויוצר את משטר הרוחות. חימום האוקיינוס מאדה מים, והם עולים, יוצרים עננים, מתקררים בעלייתם, מובלים על ידי הרוחות מקו המשווה לעבר הקטבים, שוב הופכים לנוזל בהתקררותם ומורידים גשם. הגשם יוצר את הנהרות ואת זרימת המים העיליים. יחד עם הפחמן הדו-חמצני המומס במי השטח, המים הללו גורמים לבליית הסלעים, להריסתם המכנית ולהמסתם. כוח הכובד הוא אשר גורם למים לזרום מן האזורים המורמים לעבר הים, ולהוביל עימם את מוצרי הבליה של הסלעים. בים שוקעים מוצרי בליה אלה בצורת משקעים (סדימנטים), וברבות הימים, לאחר דחיסה והתקשות, הם הופכים לסלעי משקע. שתי "המכונות" שהזכרנו משולבות זו בזו. באזורים שבהם מתנגשים הלוחות (הנקראים גם אזורי הפחתה) סלעי המשקע שנוצרים מהרס ההרים נסחפים על ידי מכונת טקטוניקת הלוחות לפני כדור הארץ. כך נקברים הסלעים בעומק רב, עד שהם מתחממים מאוד, מופעל עליהם לחץ גבוה והם הופכים לסלעים מטמורפיים - סלעים שהיו במקורם מגמתיים או סדימנטריים ושונו בהשפעת לחץ גבוה או טמפרטורה גבוהה (או בהשפעת שניהם). כשהם נקברים עוד יותר עמוק, הם מותכים, הופכים למגמות, וברבות הימים לסלעים מגמתיים - לעתים לסלעים פלוטוניים, המתגבשים במעמקים, לעתים לסלעים וולקניים, המתפרצים לפני השטח.

כך תפעלנה שתי המכוונות שתיארנו בשני מחזורים (ראו איור 5):



איור 5: מחזור הסלעים. בחלקו התחתון של האיור מתואר "שלב הבנייה" - יצירתם של ההרים, הבקעים והתעלות האוקייניות על ידי "מנוע" החום הפנימי של כדור הארץ. בחלק העליון מתואר "שלב ההרס" - בליית הסלעים והובלת תוצרי הבליה לאגני השקעה (הימים והאגמים) הנמצאים בבסיס הניקוז. תהליך זה ניזון מה"מנוע" שמפעילה השמש.

הסלעים המורמים נהרסים ונקברים באזורי ההתנגשות אך חוזרים לפני השטח. מחזוריות מאפיינת גם את המים - הם מתאדים לעננים, יורדים כגשם וזורמים כנהרות. "מכונת החום הפנימי" מרימה את ההימלאיה, ואילו "מכונת השמש" יוצרת את הגנגס והאינדוס, את היאנג־צה' והמאקונג ואת יְתֵר הנהרות המנקזים (והורסים) את ההימלאיה.

מאבק ניטש אפוא בין המכונה הבונה הרים ועמקים לזו ההורסת אותם. שתי המכוונות פועלות, לעתים בו בזמן, ובכל רגע אחת מהן בעמדת עדיפות. כאשר ידה של מכונת הבנייה על העליונה, אנו רואים תבליט נוף תלול, גבוה ומצוקי, כמו מצוק ההעתקים בבקע ים המלח ובהרי השדרה המרכזית של ישראל - הר הנגב, הרי יהודה,

השומרון, הגליל והחרמון. כשידה של מכונת ההרס על העליונה, אנו חוזים בנוף מישורי כמו זה המאפיין את המדבריות של מרכז אוסטרליה.

ההווה הוא מפתח לעבר - ואולי לא?

הגיאולוגיה היא ביסודה מדע המבוסס על תצפיות. לפיזיקאי היפותזות עבודה, ועל פיה הוא עורך ניסוי בתנאים מבוקרים. מרבית המשתנים בניסויי הם קבועים וניתנים לשליטה. על פי תוצאות הניסוי הוא יכול לקבל את היפותזת העבודה שלו או לדחותה. הגיאולוגים, להבדיל, עומדים אל מול ניסוי שכבר הושלם. בניסוחו של מורי יעקב בן-תור, מלאכתו של הגיאולוג דומה ביותר לזו של הבלש: הוא מגיע אל זירת הפשע ועליו לפענח את אשר קרה. עם זאת אין אנו הגיאולוגים חסרי אונים לגמרי, ואלה הסיבות לכך:

א. עומדים לרשותנו אמצעי תצפית ההולכים ומשתכללים. אנו בודקים את הסלעים במחשופיהם בשדה (במצוקים, במחצבות, בחציבות כבישים) וממפים אותם. אנו יכולים לצפות בסלעים אלה גם מהאוויר ואף מן החלל, לצלמם באורכי גל שעינינו אינן רגישות להם, לקדוח לעומק רב ולבדוק את תכונותיהם המגנטיות או את צפיפותם. אנו יכולים לבדוק כל סלע ומינרל באמצעים שונים - לערוך אנליזה כימית מפורטת ורגישה מאוד וגם אנליזה של הרכבם האיזוטופי (ראו שיחות 10, 12).

ב. במידה רבה גם גיאולוגים יכולים לבצע ניסויים - הדמיות של תופעות שונות. לדוגמה, כדי להסביר את סדר התגבשותם של סלעים מגמתיים (סלעים שנוצרו מהתקררות של חומר מותך -

גרניט, בזלת ודומיהם) אנו יכולים להתיך סלעים בטמפרטורות גבוהות (או להכין נתכים דמויי נתך טבעי) ולעקוב אחרי התגבשותם כתוצאה משינויים בלחץ, בטמפרטורה, בתכולת המים ועוד.

ג. עומדים לרשותנו גם חוקי הטבע, שאותם למדנו או במקרים נדירים גילינו. לדוגמה, אפשר למדוד את יחסי הגרעינים הרדיואקטיביים הרלוונטיים בסלע, לעקוב במעבדה אחר קצב דעיכתם של גרעינים אלה (ראו שיחה 10) וכך לקבוע את גיל הסלעים. ידיעת "חוקי המשחק" מאפשרת לנו גם לבנות מודלים קונספטואליים, ולפעמים ספרתיים, על נייר או במחשב, מודלים המדמים תהליכים גיאולוגיים שונים: קימוט סלע, אידוי מי ים, התנגשות מטאוריט בכדור.

בסופה של המאה השמונה-עשרה, בתקופה שבה ניסחו אנשים בעלי ראייה היסטורית יוצאת דופן את אותו מסמך נפלא שהוא החוקה האמריקאית, והאספה הלאומית בפריז הכריזה על הצהרת זכויות האדם והאזרח, ומוצרט כתב את "חליל הקסם" - איש-איש וציון הדרך שבו יבחר - עדיין קיבלו מרבית האנשים, ובהם רוב רובם של אנשי המדע, הנחות שתוך כמה עשרות שנים התבררו כשגויות.

אמרו כי כדור הארץ צעיר, בן כמה אלפי שנים, לכל היותר כמה עשרות אלפי שנים. אמרו כי התופעות הפיזיות שאנו רואים על פני כדור הארץ - הרים, עמקים, שרשרות הרים - הן תוצאה של אירועים קיצוניים, בלתי רגילים, כגון המבול. רוב החוקרים הוסיפו ואמרו כי ככלל, הגורם העיקרי שפועל על כדור הארץ הוא מים, שכן מים יכולים להרוס יבשה ואף לבנות יבשה על ידי השקעת מוצקים מתוכם. זרם מחשבה זה, שייחס למים חשיבות עליונה, נקרא **נֶפְטוֹנִיזְם** (על שם נפטון, אל המים הרומי). בדומה לחישוב הפשטני שערכנו בשיחה הראשונה, גם התהליך שתיארנו כאן הוא "חד-כיווני" - כל התהליכים שעל פני הארץ מכוונים ליצירת מישור שטוח שמפלסו כמפלס הים. על כן, העולם יש לו ראשית

ויש לו אחרית, וחץ הזמן הוא כיוונה של ההיסטוריה. ומכאן שלפי תפיסה זו אין הבדל עמוק יותר מזה שבין אתמול למחר. יתר על כן, כיוון שכך, אין חוקי הטבע קבועים בזמן: חוקים שחלו בעבר אינם תקפים היום. לתפיסה ההיסטורית הזאת יש שורשים במקרא: בריאת העולם - אברהם אבינו - מתן תורה - בניית בית המקדש - חורבן הבית - בוא המשיח ("אחרית הימים") הוא סדר הדברים המוצג במקרא והתחושה ההיסטורית מרכזית למקרא.

ההנחות שמנינו לא נבעו מטעונום תיאולוגיים. בין הטעונום היו גם אגנוסטיקנים רבים, שהאמינו רק במה שנתפס על ידי החושים וראו בדעותיהם דעות המבוססות על המדע בלבד. כדי להסביר את כל תופעות הטבע, אמרו, אין לנו ברירה אלא להניח כי בעבר התרחשו אירועים קיצוניים, קטסטרופות, והדרך היחידה לפענוחם היא במציאת תיעוד מתאים. תיעוד כזה, בהעדר טוב ממנו, הוא המקרא. בנייהפלוגתא של חוקרים אלו כינו אותם **קטסטרופיסטים**. כינוי זה נחשב תחילה כינוי גנאי, אך התקבל לאחר מכן גם על ידי **הקטסטרופיסטים עצמם**. תורתם כונתה **קטסטרופיזם**.

קטסטרופיסטים רבים המשיכו לטעון את טיעוניהם גם במהלך המאה התשע-עשרה, ובהם רבים שתרמו תרומה נכבדה לגיאולוגיה בראשיתה, וראש וראשון להם איש המדע הצרפתי המבריק ז'ורז' קובייה (Georges Cuvier).

במידה רבה היה לקטסטרופיסטים "אידאולוג" - ענק הפיזיקה של המאה התשע-עשרה, מאבות התרמודינמיקה - הלורד קלווין (Lord Kelvin). קלווין חישב את גיל כדור הארץ על פי מפל החום הקיים היום (השתנות החום כפונקציה של העומק) ומצא כי הוא נע בין 20 ל-100 מיליון שנה, וכנראה נוטה לגיל הצעיר יותר. בעקבות כך באה טענתו הפילוסופית של קלווין ולפיה אם חוקי הטבע נשמרו בזמן, כלומר אם חוקי התרמודינמיקה היו תקפים תמיד, הרי **שקצב** התהליכים לא היה יכול להישמר: העמודה הגיאולוגית היתה

1 לפני שזכה בתואר האצולה לורד היה שמו ויליאם תומסון (W. Thomson).

חייבת להיווצר בזמן קצר יחסית ובעקבות אירועים קטסטרופליים רבים.

בני-הפלוגתא של הקטסטרופיסטים זכו כבר מראשיתו של הוויכוח לשני מנהיגים בולטים מאוד, האחד הוא ג'יימס האטון (James Hutton), איש הרנסנס הסקוטי של סוף המאה השמונה-עשרה, והשני הוא בן דורו של דרווין ומי שהפך למנסחה המצוין של תורתו של האטון ולמפיצה העיקרי - צ'רלס לאייל (Charles Lyell). טענותיהם הבסיסיות התבססו על עקרון האחידות (Uniformity), ולכן נקראו הם **אוניפורמיטריאנים** או **אקטואליסטים** ותורתם - **אוניפורמיטריאניזם**. טיעוניהם היו הפוכים לאלה של הקטסטרופיסטים כמעט בכל עניין ועניין. הבה נכיר כמה מהם:

א. ראשית לכול הם טענו שכדור הארץ עתיק, בן מיליוני שנים. מיליוני שנים?! פרימו לוי כתב בסיפורו "הכוכב השל" כי הדיבור על כוכבים גורם לנו להרהר שוב בביטויי הפלגה רבים שאנו משתמשים בהם בחיי היום-יום: האמבטיה חמה, האוורסט עצום, הפירמידות נבנו לפני זמן רב מאוד... כאשר אנחנו עוסקים באסטרונומיה או בגיאולוגיה אנו זקוקים למושגים אחרים של זמן. האוניפורמיטריאנים החלו לדבר על כך שכדור הארץ והסלעים המרכיבים אותו הם בני אלף אלפי שנים, ולא אלף אלפים קראו האנשים מיליון. כך נכנס במאה ה-18 המספר מיליון ללקסיקון המספרים השימושיים, וכשנזקקו האנשים למושג של אלף מיליונים, טבעו את המונח ביליון, ובארצות אחרות מיליארד. היום אנו מקשיבים לחדשות על השינויים בבורסות העולם ומתוודעים לסכומי הכסף העצומים שמחליפים שם ידיים או נעלמים, וברור לנו כי גם ללא הגיאולוגים היינו נזקקים למושגים כמו מיליארד ואלף מיליארד - טריליון. (הגירעון של ארצות-הברית עמד בתחילת המאה ה-21 על כ-14 טריליון דולר). הגיאולוגיה היתה אפוא המדע הראשון שלא היה יכול להסתפק ביחידות הזמן המקובלות - שניות, דקות, שעות, ימים, שנים - והוסיף עליהם

מושגים כמו "עידן", "תור", "תקופה", "גיל", שבתחילה סימנו פרקי זמן ארוכים מאוד אך בלתי מוגדרים, ולאחר מכן נמצאו דרכים לקבוע את משכם - ובכך עוד נדון.

ב. טענתם השנייה של האוניפורמיטריאנים היתה כי אין צורך באירועים קיצוניים כדי להסביר את התופעות הגיאולוגיות שאנו רואים. "ההווה הוא מפתח לעבר" הוא הניסוח הפשוט והפופולרי של עיקרון האחידות. משמעות הדבר היא שתהליכים גיאולוגיים המתרחשים היום, כמו תהליכים של יצירת נוף, התרחשו גם בעבר ובקצב דומה. כלומר התהליכים היו אֵיִיִים מאוד, אלא שעמד לרשותם זמן ארוך מאוד. ואם ההווה הוא מפתח לעבר, הרי חץ הזמן נעשה חשוב פחות. אמרנו שההבדל בין אתמול למחר הוא עצום? לא נכון. העניין החשוב הוא קיומו של מחזור הזמן - מעגל הזמן, כפי שתיאר זאת איש הארוורד המנוח סטיבן ג'. גולד בסדרת הרצאות הארוורד-ירושלים (שניתנו בזמנו באוניברסיטה העברית). כלומר - הקטסטרופיסטים הדגישו את הרגעים המכריעים בהיסטוריה של כדור הארץ, ואילו האטון וחבריו האוניפורמיטריאנים הדגישו את קביעותם של התופעות והחוקים החוזרים על עצמם. כמאמר קהלת: "סֹבֵב סֶבֶב הוֹלֵךְ הָרוּחַ וְעַל-סִבִּיבֹתָיו שֶׁב הָרוּחַ" (קהלת א, ו) ו"מֶה-שֶּׁהָיָה הוּא שֶׁיִּהְיֶה" (קהלת א, ט). מכאן גם הגיע האטון למסקנה קיצונית מאוד: מכיוון שכל התהליכים מחזוריים, אמר, אין הוא רואה סימן לתחילה ולא רמז לסוף.

ג. הטענה השלישית של האוניפורמיטריאנים היתה כי המנוע שמניע את כל המחזורים האלה אינו המים הזורמים אלא הכוחות הפנימיים המרימים הרים, מחדירים גרניט ממעמקי כדור הארץ לתוך שרשרת הרים, יוצרים הרי געש. כלומר לא כוחותיו של אל המים נפטר מעצבים את פני האדמה אלא אלה של אל המעמקים - פלוטו. על כן דגלו אנשים אלה בפּלוטוֹניזם.

חסידיה של כל אחת מן האסכולות הם חסידיו של אחד משני המנועים שהזכרנו: השמש - המניעה את תהליכי בליית הנוף,

והחום הפנימי - המניע את תהליכי דחיפת ההרים מעלה. אפשר לומר שבגיאולוגיה בראשיתה, כמו במדעים רבים בהתהוותם, היו העובדות מעטות והדעות מרובות, והיא התאפיינה ב"מחנאות" רבה: פלוטוניזם נגד נפטוניזם, קטסטרופיזם נגד אקטואליזם... לא היתה זהות מלאה בין הנפטוניסטים לקטסטרופיסטים. היו גם צירופים שונים שבוודאי לא התקשו להעלות על הדעת.

לקראת סופה של המאה התשע-עשרה ובראשית המאה העשרים היה ניצחונם של האוניפורמיטריאנים (האקטואליסטים) ברור ומובהק. הקביעה כי "ההווה הוא מפתח לעבר" הפכה לקביעה בסיסית בגיאולוגיה. עוד במחצית המאה העשרים, כשבני דורי ואני למדנו גיאולוגיה, היה זה עיקרון מרכזי והאטון היה גיבור הסיפור. אך כשמדובר באחידות, למה הכוונה? לעתים משכו את ההנחות האקטואליסטיות די רחוק:

אין חולקים על כך שההנחה בדבר אחידותם של חוקי הטבע (אוניפורמיות) הכרחית לכל דיון: תמיד זרמו המים מלמעלה למטה, ותמיד נפלו תפוחים על ראשם של היושבים מתחת לעץ. תמיד נשבר האור בטיפות המים, ולכן האדום הוא תמיד בצידה החיצוני של הקשת בענן (גם בזו הראשונה שחזה בה נוח) והסגול בצידה הפנימי. יש בידינו גם עדויות מצוינות התומכות בהנחה כי קצב הדעיכה של יסודות רדיואקטיביים, לדוגמה, קצב דעיכתו של אורניום-238 (^{238}U) לעופרת-206 (^{206}Pb), נשאר גם הוא קבוע בזמן.

אך מה ביחס לאחידות התהליכים? האם אנחנו יכולים להניח בביטחון מלא כי מעולם לא התרחש מאורע גיאולוגי שכיום אינו מתרחש או אינו ידוע לנו? זה קצת יותר מפוקפק... ומה בדבר אחידות קצב התהליכים? ובניסוח קיצוני: אחידות מצב. האם העולם נראה תמיד פחות או יותר כפי שהוא נראה היום והאם הוא השתנה באותו קצב?

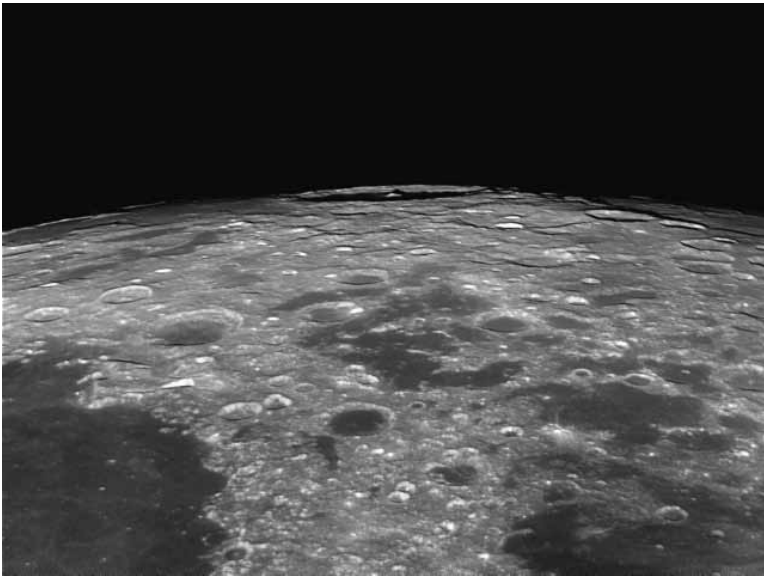
הנחת אחידות מובילה במקרים רבים למסקנות נכונות, להבנה טובה של הטבע, אך יש שהיא גורמת אכזבות: לדוגמה, בעמק צ'וק דאונס (Chalk Dawns) שבמרכז אנגליה ניסו מדענים להעריך כמה

זמן היה נחוץ כדי ליצור עמק רחב זה. הצמידו דלי לקיר העמק, אספו במשך שנה את החומר שהצטבר בדלי, העריכו את נפח העמק הקיים (השווה לכמות החומר שאופל בעבר), וכך חישבו את זמן היווצרותו של העמק. הערכת הזמן שאליה הגיעו היא 45 ביליון שנה! כלומר, גילו של העמק הוא פי עשרה מגיל כדור הארץ כפי שהוא מוערך היום. החוקרים שגו, כמובן, הם לא הביאו בחשבון שהעמק לא נוצר אט-אט, בקצב של היום, אלא מהר - קרחון שהתקיים שם בעבר הוא שיצר אותו. אלא שהיום אין קרחונים יבשתיים ענקיים. אם כן, התהליכים הפועלים כיום אינם בהכרח אלה שפעלו בעבר.

הדיון בסוגיה שהעלינו קיבל מפנה בחמישים השנים האחרונות, ולאו דווקא במחקר כדור הארץ. ב-4 באוקטובר 1957 שילחו הסובייטים לחלל את הלוויין המלאכותי הראשון של כדור הארץ, ספוטניק-1. ב-20 ביולי 1969 נחתו האסטרונאוטים האמריקאים של החללית אפולו 11 על פני הירח. שני אלה הם סימני דרך בהכרת האדם את החלל ואת הלוויין הטבעי של כדור הארץ - הירח. במסגרת תוכניות אלה למד האדם דברים רבים מאוד. התברר כי פני הירח מכוסים במספר עצום של מכתשים בגדלים שונים (ראו איור 6), וכי מקורם של מכתשים אלה במוצקים בגדלים שונים - מטאוריטים למיניהם - אשר התנגשו בירח. לימים התברר כי גם הכוכבים חמה, נוגה ומאדים נפגעו על ידי מטאוריטים (אימפקטים), והגיאולוג האמריקאי יוג'ין שומייקר (Eugene Shoemaker) קבע כי, "פגיעות על ידי גופים מוצקים הן אחד התהליכים הבסיסיים במערכת השמש".

אם כך, הרי גם כדור הארץ איננו יוצא מן הכלל; גם בו פוגעים גופים כל הזמן. חישבו ומצאו כי 150 מטאוריטים בערך, שמשקל כל אחד מהם יותר מחצי קילו, נופלים בשנה על פני כדור הארץ. לא את כולם מוצאים, שכן רובם קטנים, אך מדי פעם, לעתים נדירות יותר, נופל מטאוריט גדול. יש שפגיעת מטאוריט בירח או במאדים מעיפה לחלל רסיסים, ואלה נופלים לבסוף על כדור הארץ. ואכן נמצאו בכדור

הארץ מטאוריטים אחדים שיש הוכחות מצוינות לכך שהם באו מהירח וממאדים. ב-1908, למשל, פגע גוף מן החלל בטינגוויסקה שבסיביר, ולפני כ-50,000 שנה פגע מטאוריט ברזלי באריזונה שבמערב ארצות הברית. אכן, במקומות שונים בעולם נמצאו מכתשי פגיעה כאלה, שנוצרו בעבר הגיאולוגי הרחוק יותר. בצפון ארצות הברית ובקנדה נשתמרו מכתשי ענק כאלה באזורים שבהם הפעילות הטקטונית כמו גם קצב הבליה אטיים מאוד. ברור כי ככל שהמטאוריט הפוגע בכדור הארץ גדול יותר, יהיה אירוע פגיעתו נדיר יותר: כ-150 פגיעות כאלה בשנה מביאות לכדור הארץ גופים שמשקלם נמדד בקילוגרמים. פעם או לכל היותר כמה פעמים ב-50 אלף שנה פוגע בכדור הארץ מטאוריט שמסתו 300,000 טונות (המסה המוערכת של הגוף שפגע במכתש שבאריזונה), ולכן אל לנו להתפלא אם פעם ב-100 מיליון שנה פוגע בכדור הארץ מטאוריט ענקי ומשפיע על כדור הארץ השפעה עצומה.



איור 6: צילום של פני הירח המכוסים מכתשים שנוצרו מפגיעת מטאוריטים. צולם ב-12 בדצמבר 2008. המקור: NASA-USGS.

דוגמה פופולרית לגישה קטסטרופית כזאת להיסטוריה הגיאולוגית היא הניסיון לפענח את חידת ההכחדה הגדולה שהתרחשה לפני כ-65 מיליון שנה. אז נעלמו בזמן קצר מאוד כ-80% מן המינים שעל פני כדור הארץ. מועד ההכחדה נקבע כגבול בין תור הקרטיקון לטרציאר (שלישון). מי שזכה ליחסי הציבור הטובים ביותר בין הנכחדים היו אהובי הילדים - הדינוזאורים. ב-1980 גילו לואיס אלוורז (Luis Alvarez), חתן פרס נובל בפזיקה, בנו הגיאופיזיקאי וולטר ושותפיהם למחקר כי שכבת החרסית של גבול קרטיקון-טרציאר מועשרת במתכת אירידיום (Ir), שאופיינית למטאוריטים ונדירה יחסית בכדור הארץ. על כן הם הציעו כי ההכחדה העצומה, שבמהלכה נכחדו גם הדינוזאורים, נגרמה מפגיעת מטאוריט בכדור הארץ. גיאופיזיקאים גם זיהו מכתש שנוצר מפגיעה זו. המכתש מלא היום במשקעים (סדימנטים) והוא קבור בתת-קרקע שמתחת לחצי האי יוקטן שבמקסיקו. זהו מכתש צ'יקשולוב (Chicxulub).

התפתח אפוא הנאויקטסטרופיזם, הקטסטרופיזם החדש. משנתקבלה האפשרות שאכן התרחשו פגיעות גדולות, גם אם הן נדירות, הרחיקו אנשים לכת: כיום מקובלת הדעה כי גם הירח נוצר כאשר גוף גדול - גדול ככוכב הלכת מאדים - התנגש בכדור הארץ הקדום מאוד. הירח הוא רסיס של התנגשות זו.

היכן אנו עומדים כיום בחלוף הוויכוחים הסוערים? נוכל לסכם זאת כך:

1. **ההווה הוא מפתח לעבר** - אין ספק שאחדות החוקים קיימת במובנה הצר. חוקי הטבע התקפים היום היו תקפים גם בעבר. ברור כי תמיד פעל כוח הכובד, תמיד זרמו המים מלמעלה למטה.
2. **אמרתו של האטון כי "אין סימן לתחילה ולא רמז לסוף"** אינה מדויקת. אמנם כדור הארץ קדום מאוד, אך תחילה יש לו והיא תוארכה; הוא נולד על פי תארוך זה לפני 4,560 מיליון שנה.
3. **הקביעה כי כל התהליכים מתרחשים בקצב שאנו רואים כיום**

נכונה בדרך כלל, אך לא תמיד. לעתים מתרחשים אירועים פתאומיים או קצרים יחסית - פעילות קרחונים, פגיעות גופים שמימיים, הכחדות של אורגניזמים, וגם שיטפונות ענק, התפרצויות ענק של הרי געש ופריחות פתאומיות של אורגניזמים. יש מי שאמר כי תולדות כדור הארץ דומות לחייו של החייל: תקופות ארוכות של שעמום ואירועי פחד וזוועה קצרים ביניהן...

בראשית: כדור הארץ הקדום - מערפילית לפלנטה

בשיחות הקודמות עסקנו בחלק מתכונותיו של כדור הארץ. דנו במבנהו באופן כללי ביותר ועסקנו מעט גם בדרך שבה אנו מפענחים את קורות העבר. עוד נדון בחומרים המרכיבים את כדור הארץ, אך בשיחה זו נספר איך התחיל הכול וכיצד הגיע כדור ארץ למצבו היום - פלנטה משוכבת קונצנטרית (כלומר בעלת קליפות סביב המרכז בדומה לביצה) שאוקיינוס ואטמוספירה תומכים בחיים על פניה.

כפי שנראה באחת השיחות הקרובות, נוכל להעריך טוב יותר את הרכב כדור הארץ אם נבחן את הרכב המטאוריטים ואת הרכבה של השמש. לשני אלה נפנה גם כשנרצה לפענח את אשר היה בראשית. על פי הבנת האסטרופיזיקאים היום, בראשית היה המפץ הגדול (Big Bang). היקום שלנו החל בהתפוצצות קוסמית לפני 13.7 מיליארד שנה בערך. לפני כן היו כל החומר והאנרגיה דחוסים לתוך נקודה קטנה לאין שיעור, וממנה החל היקום להתפשט ולהתקרב. הפיזיקאים עוסקים לא מעט בהבנת הדברים שקרו בשלוש הדקות הראשונות שלאחר אותו מפץ גדול. כיום מוסכם על הכול כי כמה דקות לאחריו היה היקום כולו מורכב מגרעיני מימן (ומקצת הליום) בלבד. במשך מאות אלפי שנים התחברו אלקטרונים לגרעינים אלה, והיקום התמלא באטומי מימן ובקצת הליום. מחומר התחלתי זה

נוצרו בכוכבים היסודות הכימיים כולם. את האנרגיה של הכוכבים מספק היתוך (fusion) - מיזוג של יסודות קלים לכבדים יותר. גם בשמש שלנו הריאקציה העיקרית היא היתוך (חיבור, מיזוג). ארבעה אטומי מימן מתאחדים ויוצרים אטום הליום אחד (זו הריאקציה המתרחשת בפצצת מימן). כל יתר יסודות הטבלה המחזורית נוצרים בכוכבים על ידי ריאקציות בטמפרטורות גבוהות מאוד, שוב על ידי היתוך או על ידי קליטת נויטרונים. לענייננו חשוב לציין כי היסודות הכימיים נוצרו. הם לא היו קיימים תמיד - והא ראייה: יסודות רדיואקטיביים קצרי חיים, שקרוב לוודאי היו קיימים ביקום הצעיר, נעלמו ואינם. דוגמה לכך היא יוד, שמסתו האטומית היא 129 (^{129}I), ואלומיניום, שמסתו 26 (^{26}Al), לעומת האלומיניום הרגיל, שמסתו האטומית 27. בכדור הארץ הצעיר סיפקה דעיכתם של יסודות קצרי חיים אלה חלק חשוב מכמות החום, אלא שהם נעלמו ונותרו רק בנותיהם הרדיוגניות, כלומר אלה שהן תוצאה של דעיכה רדיואקטיבית. רק יסודות רדיואקטיביים ארוכי חיים מאוד (כגון האורניום, התוריום והאשלגן-40) עדיין מצויים בטבע.

היסודות הכימיים נוצרים בכוכבים בדרך של היתוך גרעיני. היתוך אפשרי רק בטמפרטורות גבוהות מאוד (מיליארדי מעלות), כאלה השוררות בעומק הכוכבים. בהתפתחותם הכוכבים מתפוצצים, מפזרים את היסודות הכימיים בחלל, ומיסודות אלה נוצרים כוכבים אחרים. כמה מכוכבים אלו, כלומר כוכבים מדור שני, יתפוצצו אף הם, ויווצרו משרידיהם כוכבים מדור שלישי, וכן הלאה. השמש שלנו, למשל, היא כוכב מדור שלישי. מימן והליום הם אבני הבניין הבסיסיות של היקום, והם נפוצים בו יותר מכל היסודות האחרים. גם פחמן, חמצן וצורן נפוצים מאוד וכן ברזל ומגנזיום. למסקנה כי השמש היא כוכב מדור שלישי מגיעים בגלל תפוצתם הגבוהה יחסית של יסודות כבדים (לדוגמה ברזל וניקל) בה. אלא שתופעות ותהליכים אלה הם מתחום האסטרופיזיקה, ולא הגיאולוגיה.

הגיאולוגים שואלים את עצמם שאלות העוסקות ביצירתה של מערכת השמש, ובמיוחד שאלות העוסקות ביצירתן של פלנטות. מחקרים אסטרונומיים בחמישים השנים האחרונות החזירו את העוסקים בתחום לעמנואל קאנט, הפילוסוף בן המאה השמונה-עשרה, ששיער כי מערכות שמש מתחילות במה שקוראים "ערפילית" (Nebula) - עננים עצומים של גז, מימן והליום בעיקר, שלהם נוסף מעט אבק של שאר היסודות.

ערפילית כזו מסתובבת ותוך כדי סיבוב מקבלת צורה של דיסק שטוח. בהשפעת הגרביטציה חומר נודד לעבר מרכז הדיסקה ונעשה צפוף וחם מאוד - מגיע למיליוני מעלות. זה מה שקוראים פרוטו-שמש (קדם-שמש). בטמפרטורות האלה מתחיל היתוך הגרעינים, אותה משפחה של תגובות המתרחשת בפצצת מימן. בתהליך זה מסה הופכת לאנרגיה ($E=mc^2$), והשמש שלנו פולטת אותה כאור וכחום. עיקר החומר של הערפילית מתרכז בפרוטו-שמש. שארית החומר, שמצוייה באזורים החיצוניים של הדיסקה, מתחילה להתקרר. וכשהיא מתקררת היא עוברת למצב נוזלי ואף מוצק. כשהטמפרטורה יורדת מתגבשות ראשונות התרכובות בעלות נקודת ההתכה (שהיא גם נקודת ההתמצקות) הגבוהה ביותר. במקרה של ערפילית השמש מתברר כי הראשונים להתגבש היו מינרלים של מגנזיום ומינרלים עשירי סידן ואלומיניום. אלה חלקיקי אבק המתנגשים זה בזה ומתחברים לחלקיקים גדולים יותר, המכונים **פלנטיסימות** (או פלנטיסימלים - Planetisimals). חלקיקי פלנטות בסדר גודל של קילומטרים בודדים. תהליך זה נמשך כמה מיליוני שנים - זמן קצר מאוד ביחס לגיליה של מערכת השמש. חלק מן הפלנטיסימות נזרקות החוצה ממערכת השמש, חלק נופלות לתוך השמש. אך רובן ממשיכות להתנגש, ולעתים הן מתרסקות ומתפרקות, אך לעתים הן מתנגשות ומתחברות ביניהן, גלילות לגופים מוצקים גדולים יותר - פרוטופלנטות - וסופן שהן הפלנטות של מערכת השמש שלנו. חלק מהפלנטיסימות שורדות בגודלן הקדום. אלה הם האסטרואידים וכוכבי השביט (Comets).

נוצר הבדל עקרוני בין הפלנטות הפנימיות - חמה, נוגה, ארץ, מאדים, שכולן באותו הגודל בערך, לבין הפלנטות החיצוניות - צדק, שבתאי, אורנוס ונפטון. הפלנטות החיצוניות, שהן ענקיות ומורכבות בעיקר מגזים ומסוגי קרח, הן גדולות דיון כדי שהגרביטציה שלהן תחזיק את כל המרכיבים הקלים והנדיפים האלה. לעומתן, הפלנטות הפנימיות קטנות יותר ומורכבות מסלעים וממתכות. פלנטות אלה גדלו קרוב דיון לשמש, באזור חם מאוד, והחומרים הנדיפים, אלה שהופכים לגזים, ברחו מהן לעבר הפלנטות החיצוניות. כך סולקו המימן, ההליום, המים, הפחמן החד-חמצני ונשארו הסיליקטים (תרכובות של צורן עם חמצן) והמתכות, בעיקר ברזל וניקל.

באזור שבין הפלנטות הפנימיות לחיצוניות - בין מרס (מאדים) ליופיטר (צדק) - נותר מספר די גדול של גופים קטנים יחסית (300 מהם גדולים מ-100 ק"מ, יותר מ-10,000 גדולים מ-10 ק"מ) - אלה האסטרואידים. האסטרואידים מתנגשים זה בזה, ומרבית המטאוריטים המגיעים לכדור הארץ - האבנים הנופלות אלינו מן השמיים - מקורם בריסי התנגשויות כאלה. כעת אנו יודעים כי המטאוריטים, וכמוהם גם כדור הארץ ומוצקים אחרים במערכת השמש, החלו להיווצר לפני כ-4,560 מיליוני שנים (באחת השיחות הבאות נראה כיצד הצליחו לתארך אירועים אלה) וגדלו לגודל פלנטות מהר מאוד; על פי חישובים תיאורטיים ב-10 מיליון שנים בערך.

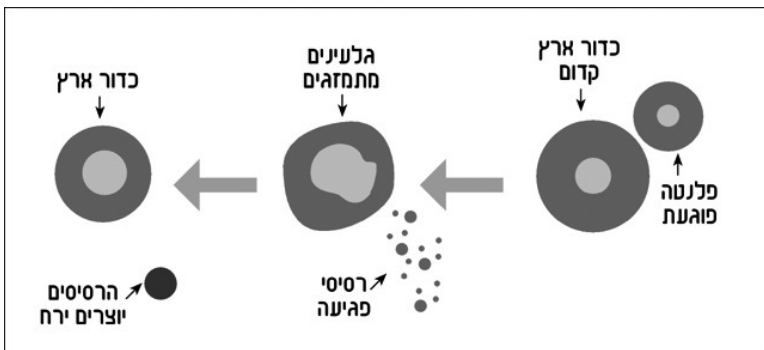
זה עתה אמרתי שהכדור התחיל מפלנטה חמה. אך היום אנו מדברים על פלנטה סלעית, כחולה במבט מן החלל, ועליה חיים! הדעה הרווחת היא כי פלנטה זו היתה אחידה פחות או יותר בהרכבה ובמבנה שלה. כפי שנראה ביתר פירוט בשיחות הבאות, הכדור הזה שלנו בנוי קליפות-קליפות: גלעין מתכתי המורכב מברזל וניקל, סביבו מעטפת המורכבת בעיקר מסיליקטים של מגנזיום וברזל, סביבה קרום המורכב מסיליקטים של אלומיניום, של מגנזיום ושל סידן, ואת כל אלו עוטפים אוקיינוס ואטמוספירה (המורכבים מחמצן, מימן, חנקן וגזים אחרים). איך נעשתה הפלנטה האחידה משוכבת?

התשובה: **הכדור עבר דיפרנציאציה**, משורש different - הפיכה של גוף אחיד למדי לגוף בעל מרכיבים נבדלים, שונים. כבר הזכרנו כשדיברנו על מקור החום של כדור הארץ כי אותן התנגשויות של פלנטיסימות שיחררו אנרגיית חום רבה מאוד. נוסף על אנרגיה זו היו בכדור הארץ, כפי שהזכרתי קודם, יסודות רדיואקטיביים רבים יותר מאלה המצויים בו היום - קצרי החיים שבהם דעכו זה מכבר. כדור הארץ התחמם והותך באופן חלקי, במילים אחרות הוא נעשה "רך". וכך חומר כבד כגון ברזל היה יכול לשקוע, "ליפול" פנימה לעבר מרכז הכדור וליצור שם את הגלעין הברזלי. הזכרנו כבר כי משערים שבשלב הזה שוב התנגש כדור הארץ בגוף גדול יחסית, שגודלו בערך כגודל מאדים. התנגשות זו יצרה רסיסים רבים, והם נזרקו לחלל, החלו לנוע במסלול סביב כוכב הלכת ארץ ושם התחברו ויצרו את הירח שלנו (ראו איור 7). תסריט זה באשר לאופן היווצרותו של הירח מסביר כמה עובדות (או לפחות מתאים להן). נמנה שלוש:

1. לירח צפיפות נמוכה יותר מזו של כדור הארץ (3.3 גרם לסמ"ק לעומת 5.5 גרם לסמ"ק של כדור הארץ). הסיבה להבדל זה היא שבירח אין ברזל, שכן בזמן ההתנגשות כבר "הוחבא" הברזל עמוק בגלעין כדור הארץ. לכן הירח קרוב בהרכבו להרכבה של מעטפת כדור הארץ.
2. סלעי הירח העתיקים ביותר צעירים אך במעט מגיל כדור הארץ - 4.47 לעומת 4.56 מיליארדי שנים.
3. העדות החזקה ביותר למקור המשותף של הירח וכדור הארץ היא ההרכב האיזוטופי הזהה של החמצן בשני הגופים (כלומר היחסים בין האיזוטופים ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O).

מקורם של האטמוספירה ושל האוקיינוס נשאר סלע מחלוקת בין חוקרים במשך שנים רבות. שתי האפשרויות הקיצוניות הן: (א) האטמוספירה נוצרה יחד עם כדור הארץ המוצק כשזה נוצר (אטמוספירה ראשונית); (ב) האטמוספירה הצטברה אט-אט בשל

אובדן גזים מן המעטפת לאחר שאבדה כל האטמוספירה הראשונית. עדות לאפשרות השנייה אנו רואים בגזים הרבים הנפלטים היום מהרי הגעש: מים, חנקן, פחמן דו-חמצני, גזים של תחמוצות גופרית, גזים אצילים כגון ארגון וקסנון. אלא שבמשך הזמן התברר כי גזים אלה ממוחזרים. כלומר, רובם כבר ראו את פני כדור הארץ אך הם הוחזרו אל תוכו בתהליך הפחתת הלוחות ונפלטו שוב וכל זאת יותר מפעם אחת. היום, על סמך מחקרים רבים, בעיקר אלו המודדים את תפוצתם של איזוטופים של הגזים האצילים ארגון וקסנון, אנו חושבים שכ-85% מן האטמוספירה נוצרו ב-10 מיליון השנים הראשונות של חיי כדור הארץ. רק 15% מהאטמוספירה נוצרו מאז ואילך.



איור 7: הצגה סכמטית של היווצרות הירח כתוצאה מהתנגשותו של כדור הארץ הקדום בגוף שגודלו כגודל מאדים. מרסיסי הפגיעה נוצר הירח.

האטמוספירה הקדומה של כדור הארץ לא היתה זהה לזו של היום. ההבדל העיקרי הוא בזה שלא היה בה מרכיב חשוב מאין כמוהו: אותם 21% גז חמצן חופשי, שבהם תלויים כיום החיים על כדור הארץ. המעבר לאטמוספירה עשירה בחמצן חופשי החל כנראה לפני כ-2,300 מיליון שנה. לפני כן היתה האטמוספירה מורכבת ממים, מפחמן דו-חמצני (CO_2), מפחמן חד-חמצני (CO), מגופרית דו-חמצנית (SO_2) ומעוד גזים מחזרים. יצירת החמצן החופשי קשורה

כנראה להופעת החיים הפרימיטיביים ביותר על פני כדור הארץ, בדמות בקטריות פוטוסינתטיות, המטמיעות פחמן ופולטות חמצן. עד כה סיפרנו בקיצור רב את ראשית תולדותיו של כדורנו. כבר הזכרנו ועוד נפרט באחת מהשיחות הבאות כי גיל כדור הארץ הוא 4.56 מיליארדי שנים. בפרק זה עסקנו רק בספרה האחרונה של מספר זה, כלומר בשישים מיליון השנים הראשונות. בזמן זה הוכנה התשתית להפיכתו של הכדור לפלנטה שתוכל לתמוך בחיים שעתידים להתפתח עליה.

הסיפור של ראשית החיים בכדור הארץ וביקום טומן בחובו ודאי את אחת השאלות המרתקות ביותר שאפשר לעסוק בהן, אך זה כבר סיפור אחר.

רעידות אדמה

כשאני פוגש חבר או חברה מימי בית-הספר שאיתם לא התראיתי שנים ומגלה להם כי בינתיים נעשיתי גיאולוג, עולות בדרך כלל שתי שאלות: "מה עם נפט?" ו"נו, תהיה פה רעידת אדמה?" בנפט נעסוק בשיחה האחרונה בקובץ זה. עתה נפנה לרעידות האדמה. רעידות אדמה הן מתופעות הטבע המאיימות ביותר על האדם. הפחד מפניהן הוא לא רק חוויה רגשית מפחידה מאוד, שהרי אין זה נעים להתעורר באמצע הלילה ולגלות כי כל מה שחשבנו שהוא קבוע ויציב - הקירות, הרהיטים, העצים - אינו כזה. רעידות אדמה הן גם אסון הטבע שגורם לנזק הגדול ביותר בחיי אדם וברכוש.

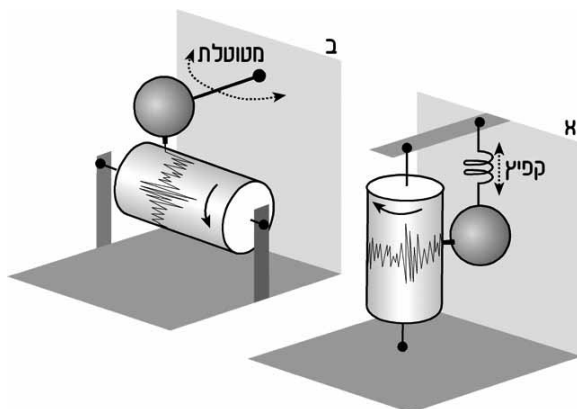
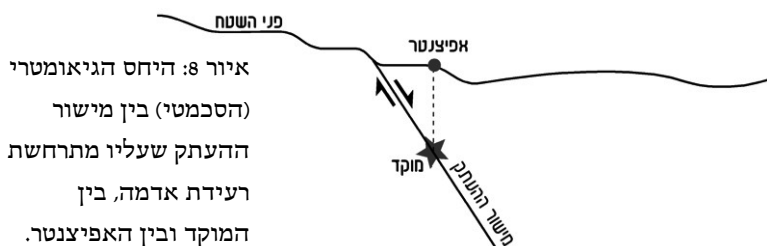
ב-28 ביולי 1976 ב-3:42 בלילה היכתה רעידת אדמה בחופה המזרחי של סין. העיר טאנג-שאו, בעלת אוכלוסייה של כמיליון תושבים, היתה הנפגעת העיקרית. ממשלת סין דיווחה על כ-250,000 קורבנות אדם. כולנו עוד זוכרים את 26 בדצמבר 2004, היום שבו התרחשה רעידת אדמה ענקית ממערב לאי האינדונזי סומטרה. היא גרמה לגל צונאמי ענקי שפגע בכל החופים מתאילנד עד אפריקה. מספר הקורבנות הוערך ביותר מ-300,000 בני אדם. וכמובן עוד טרי בזיכרוננו אסונה הגדול של יפן, כשהוכתה פוקושימה ברעידת אדמה באפריל 2011.

בפרק זה נכיר כמה עובדות הקשורות ברעידות אדמה. ננסה להבין כיצד הן מתרחשות, היכן, באיזו עוצמה, ואם אפשר

להתכונן לקראתן או למנוע אותן. בשיחה הבאה נראה כיצד הגלים הסייסמיים שרעידות אדמה יוצרות מהווים אמצעי יעיל מאוד ועיקרי ללימוד מבנהו הפנימי של כדור הארץ.

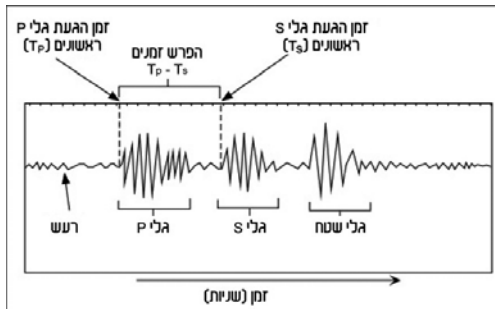
רעידת אדמה מתרחשת כאשר גושי סלע (גושי לוחות) זזים זה ביחס לזה. סלע הנמצא במאמץ (stress), כלומר נתון בלחץ מכוון (בניגוד ללחץ המקיף שהוזכר בשיחה 1) מגיב בכך שהוא עובר מַעֲוֹת (strain). מאמץ יכול להיות של מתיחה, של לחיצה או של גזירה. בתחילה המַעֲוֹת אלסטי, ומשמעות הדבר היא שכאשר המאמץ מסולק חוזר המוצק למצבו הקודם. לדוגמה, אם נפעיל כוח על לוח דיקט, תחילה יתכופף הלוח ויתעוות, ואם הכוח לא יהיה גדול מדי, יחזור הדיקט למצבו הקודם ברגע שנרפה ממנו. אך ייתכן שבנקודה מסוימת נעבור את חוזקו של הדיקט, ואז הוא ייכנע ויישבר. נוכל לעקוב אחרי שתי צורות של שחרור אנרגיה שהושקעה במאמץ: קצות הדיקט הנשבר יתנדנדו, ותשתחרר אנרגיה בצורת גלי קול - כלומר נשמע את השבירה. הנה הנמשל בכדור הארץ: כאשר לוחות הכדור נעים זה ביחס לזה נוצרים מאמצים. בעומק כדור הארץ החומר חם וזורם, כלומר פלסטי, ולכן הוא מגיב למאמצים בזרימה. אך בחלקו החיצוני של הכדור הסלעים צפידים, קשיחים. מאמצים המופעלים עליהם הולכים ומצטברים עד נקודה שבה הסלע כושל, נשבר וזז. בשלב זה משתחררת אנרגיה רבה. בדומה לשחרור האנרגיה האקוסטית בשבירת הדיקט, אנרגיה משתחררת כאשר שני גושי הסלע מוסטים זה ביחס לזה. במקרה זה האנרגיה היא סייסמית ולא אקוסטית. ותוך כדי כך נוצרות תנודות, ויברציות, ומתפשטים גלים הנקראים **גלים סייסמיים**. גלים אלה עלולים להיות הרסניים. מכאן והלאה, לאחר אותו כשל של הלוחות, אותה תזוזה, ההיכוך שבין הלוחות שזזו שוב מוֹנֵעַ מהם להמשיך ולזוז, ושוב מצטבר מאמץ עד נקודת הכשל הבאה, שיוצרת רעידת אדמה חדשה. **השבירה אינה מתחילה בכל מקום בבת אחת.** לנקודה שבה מתחילה התנועה שבין שני הגושים אנו קוראים **מוקד**. ברעידת אדמה המוקד נמצא בדרך כלל על פני מישור השבר שעל פניו נעו שני הגושים, בעומק כלשהו מתחת פני השטח. לנקודה מעל

המוקד שנמצאת על פני כדור הארץ קוראים **אפיצנטר** (ראו איור 8). לכאורה, אילו היה הסיפור שסיפרתי נכון לגמרי, היינו יכולים לצפות שמאמץ ייבנה באופן מחזורי באזורים המועדים לרעידות אדמה, ואף ישתחרר באופן מחזורי. אלא שאין הדברים כה פשוטים - לא כל המאמץ משתחרר בכל אירוע של רעידה, כנראה קורים שם עוד דברים שאינם ברורים לנו, ולכן החיזוי אינו אפשרי.



איור 9: מבנה סכמטי של הסייסמוגרף. כדי לרשום את תנועת הסלע במרחב יש לעשות שימוש בשלושה רכיבים הרושמים תנועות בשלושה כיוונים ניצבים: באיור 9א המסה תלויה על קפיץ, והאיור מתאר סייסמוגרף הרושם רק תנועות אנכיות, תנועות מעלה-מטה של הסלע שמתחתיו. באיור 9ב מתואר הסייסמוגרף הרושם רק את רכיבי התנועות האופקיים של הסלע (צפון-דרום, מזרח-מערב), ובו המסה תלויה על ציר הנע רק בכיוון הרצוי. שלושת הסייסמוגרפים מתארים יחד את כלל תנועת הסלע שאליו הם מעוגנים.

המכשיר החשוב ביותר לחקר רעידות אדמה הוא הסייסמוגרף (ראו איור 9). אם היה לנו סייסמוגרף אידיאלי הוא היה מכשיר רישום המחובר למסגרת קבועה ויציבה מחוץ לכדור הארץ. בזמן רעידת אדמה היה מכשיר כזה רושם את שינויי המרחק בינו לבין האדמה הרועדת. כיום עדיין בלתי אפשרי לבנות מכשיר המנותק מכדור הארץ, אף שעם התקדמותן של טכנולוגיות החלל מתקן כזה הוא כבר בהחלט לא דמיוני. הפשרה בינתיים היא לתלות כדור כבד על קפיץ - כלומר לתלות אותו כשהוא מחובר באופן רופף מאוד לאדמה. כשהאדמה נעה, הכדור נוטה להישאר יציב. כך מושגת המטרה שהצבנו לעצמנו - למדוד את שינויי המרחק בעזרת מכשיר רישום (עט או מחשב). אם נתלה את הכדור על ציר במקום על קפיץ, יאפשר הדבר לרשום את תנודות הקרקע האופקיות. בשיטות אלקטרוניות אפשר להגדיל את תנועת רשם המכשיר הרבה מונים. סייסמוגרפים מודרניים מודדים אפוא תנועה של עד מיליארדית (ביליונית) המטר; תזוזות מסדר גודל של אטומים בודדים! המוצר הגרפי המתקבל מסייסמוגרף מזכיר באופן רופף רישומים רבים של שינויים כנגד זמן - כגון אק"ג (אלקטרוקרדיאוגרמה) (ראו איור 10).

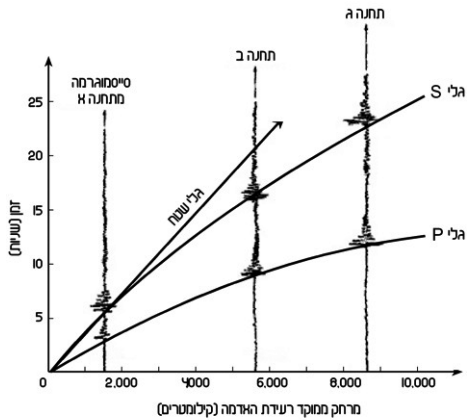


איור 10: הצגה סכמטית של סייסמוגרמה. ראשונים מגיעים גלי P, אחריהם גלי S, ולבסוף גלי השטח. ההפרש בזמן ההגעה של גלי P ושל גלי S הוא שמזהה את המרחק של מוקד רעידת האדמה מן התחנה הסייסמית. מִשְׁרָעַת (אמפליטודת) הגלים, בהתחשב במרחק התחנה מהמוקד, היא המזהה את מגניטודת (עוצמת) רעידת האדמה.

התקינו סייסמוגרף במקום כלשהו, והוא יתחיל מהר מאוד ברישום תנועות קרקע הנגרמות על ידי גלים סייסמיים. גלים אלה יגיעו לסייסמוגרף מרעידת אדמה במקום כלשהו בכדור הארץ, והם יגיעו בשלוש קבוצות נפרדות (ראו איור 10): ראשונים יגיעו גלים שנשמנם באות הלטינית P כנגד שני מאפיינים שלהם: הם מהירים יותר, ומגיעים ראשונים (Primary). הם דומים באופיים לגלי קול - נדחסים ומתפשטים (Push-Pull). מהירותם במוצקים תלויה בסוג המוצק שדרכו הם עוברים. בגרניט מהירות גלי P היא בערך 5 ק"מ בשנייה, בערך פי 15-20 ממהירות הקול באוויר. אחריהם מגיעים הגלים המסומנים ב-S. וגם פה המשמעות כפולה: S כנגד Secondary - הם מגיעים שניים כי מהירותם בכל חומר קטנה ממהירותם של גלי ה-P (בערך 60% ממהירותם); ו-S כנגד Shear ("לגזור" באנגלית), ואכן אלו גלי גזירה, כי כמו בשעת גזירה במספריים הם מניעים את החומר לא במקביל לכיוון התקדמות הגל, אלא בניצב לו. הטיפוס השלישי של גלים הוא גלי שטח - אלה האטיים מכולם. הם אינם מתקדמים דרך כדור הארץ אלא קרוב לפני שטחו.

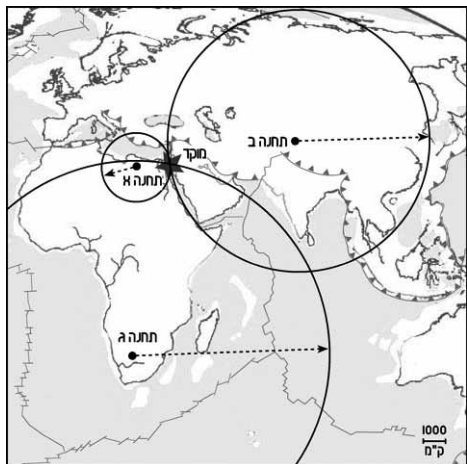
בניתוח הסייסמוגרמה אפשר לקבוע מהו המרחק אל האפיצנטר ואל מוקד רעידת האדמה. באופן דומה אנו מעריכים את המרחק מן המקום שבו הבריק ברק בזמן סערה: מכיוון שמהירות האור גדולה ממהירות הקול, ככל שהברק רחוק יותר כן יגדל הפרש הזמן בין הרגע שבו נראה את הברק לבין הרגע שבו נשמע את הרעם. בדומה לכך, כשיודעים את מהירויות שני טיפוסים הגלים, ומודדים על גבי הסייסמוגרמה את הפרש הזמנים בין הגעתם של גלי P והגעתם של גלי S, אפשר לחשב את המרחק מן התחנה אל המקום שבו התרחשה הרעידה (ראו איורים 10, 11).

איור 11: קביעת מרחקן של
שלוש תחנות סייסמיות
ממוקד רעידת אדמה כשלב
במיקום מוקד הרעידה.
ציר Y בשרטוט מתאר את
הפרש הזמנים שבין הגעתם
של גלי P להגעתם של גלי
S בכל תחנה ותחנה.



כאשר מרחק כזה מחושב ביותר משלוש תחנות אפשר למקם בדיוק
רב למדי את האפוצנטר ואת עומק המוקד (ראו איור 12).

איור 12: חיתוך בין לפחות
שלושה כדורים (או מעגלים)
בעלי רדיוס המייצג מרחק
מתחנת המדידה, ממקם
את המוקד (או האפוצנטר).
שינויים באופי מסלולי
הגלים משלוש התחנות
יגרמו לכך שהמעגלים לא
יפגשו בדרך כלל בנקודה
(כפי שמסומן באיור זה,
המתאר מצב "אידיאלי")



אלא יסמנו אזור. הוספת מעגלים (או כדורים) מתחנות רבות יותר ישפרו את
יכולתנו לקבוע את מיקומו של המוקד.

מה עוד אנו יכולים ללמוד על רעידת אדמה? אפשר לחשב את עוצמתה, או את מה שמכונה המגניטודה שלה. כאן נפגוש במושג שאתם שומעים בוודאי לעתים קרובות - סקאלת ריכטר או סולם ריכטר. זאת על שם הסייסמולוג (מי שעוסק ברעידות אדמה) צ'רלס ריכטר (Charles Richter), אשר קבע את הסקאלה בשנות השלושים של המאה הקודמת. ריכטר חישב את המגניטודה (עוצמת הרעידה) על פי מידת ההסטה המקסימלית של מחט הסייסמוגרף, ותוך התחשבות במרחק שבין מוקד הרעידה לתחנת הרישום (ראו איור 10). אם שתי רעידות התרחשו באותו מרחק מתחנת רישום, והאחת גדולה מן השנייה במגניטודה אחת, למשל, האחת 6 בסקאלת ריכטר והשנייה 7 בסקאלת ריכטר, הרי תנועת הקרקע וכתוצאה מכך ההסטה שתירשם בסייסמוגרמה של הרעידה השנייה תהיה גדולה פי עשרה מן ההסטה שתירשם בסייסמוגרמה של הרעידה הראשונה. היחס בין מגניטודה לבין הסטת המחט בסייסמוגרמה הוא לוגריתמי. גם כמות האנרגיה המשתחררת ברעידת אדמה מתייחסת למגניטודה ביחס לוגריתמי: ברעידה במגניטודה 5 משתחררת פי כ-30 יותר אנרגיה מאשר ברעידה במגניטודה 4; במגניטודה 6 פי כ-900 מאשר במגניטודה 4.

מגניטודה של רעידה היא מאפיין של הרעידה ולא של מידת הנזק שהיא גורמת. הנזק נמדד בדרך כלל בשיטות סובייקטיביות: ברעידות קלות חלונות זכוכית מתנדנדים, בחזקות יותר רהיטים זזים, בחזקות עוד יותר בתים נפגעים, וברעידות האדמה ההרסניות ביותר מרבית המבנים שמעל פני הקרקע ומתחתם נפגעים קשות. אמנם מידת הנזק תלויה במגניטודה, אך לא פחות מזה במרחק מהמוקד. רעידה במגניטודה 8 היא אסון נורא עבור אנשים הגרים קרוב למוקד הרעש, אך אלו שחיים רחוק ממנו לא ירגישו בה כלל. רעידת אדמה בסין, למשל, לא תורגש בתל אביב. היחס בין המושג "מגניטודה" ובין המושג "נזק" כמוהו כיחס שבין "הספק של רדיואטור", או של תנור חשמלי, הנמדד בוואטים, לבין "טמפרטורת החדר", הנמדדת במעלות ותלויה כמובן בגודל החדר, בטיב הבידוד, במרחק של נקודת המדידה ממקור החום ועוד.

גם תכיפות רעידות האדמה תלויה בעוצמתן: ככל שהמגניטודה גדולה יותר, האירוע נדיר יותר. בשנה מתרחשות בעולם כמיליון רעידות בעוצמה מעל 2 בסולם ריכטר, 100,000 בעוצמה מעל 3 בסולם ריכטר, 1,000 בעוצמה מעל 5, כעשרה רעשים בעוצמה מעל 7. רעידות בעוצמה רבה יותר מ-8 בסולם ריכטר מתרחשות בעולם בערך אחת לשלוש שנים. הרעידה החזקה ביותר שנרשמה מאז החלו להפעיל סייסמוגרפים התרחשה בצ'ילה ב-1977, ועוצמתה היתה 9.5 בסולם ריכטר.

כאמור, נזקה של רעידת אדמה אינו בהכרח ביחס ישר לעוצמתה. רעידת האדמה והצונאמי הקשור בה שהתרחשו ב-11 באפריל 2011 בפוקושימה (שהיו כשלעצמם רעש עוקב של הרעידה שהתרחשה ב-11 במרץ 2011 ומוקדה היה בטוהוקו), הפכו לאסון נורא מכיוון שהכורים הגרעיניים של פוקושימה נמצאו קרוב מאוד למוקד הרעידה, במרחק 36 ק"מ בלבד, וגם הם נפגעו ברעידה. בעת כתיבת שורות אלה, באוקטובר 2011, עדיין לא התאוששה יפן מן האסון. מוקדי רעידות האדמה אינם ממוקמים אקראית על פני כדור הארץ. הם מרוכזים מאוד סביב האוקיינוס השקט וכן לאורך הגבול בין הודו לסין ולמרגלות ההימלאיה. מוקדים רבים, אך פחותים מאלה שלמרגלות ההימלאיה, נוכל למצוא גם לאורך בקע הירדן, שאותו נוהגים לכנות "השבר הסורי-אפריקאי". באחת השיחות הבאות נראה כי תפוצתם הגיאוגרפית של מוקדי הרעידות חשובה מאוד להבנה כיצד כדור הארץ פועל. המתאם בין תפוצת מוקדי רעידות האדמה לגבולות הלוחות הוא אפוא מרכיב עקרוני בתורת הלוחות.

האם אפשר למנוע רעידות אדמה? התשובה לכך היא "לאו" מפורש. האנרגיה המשתחררת ברעידת אדמה היא כה גדולה, שוות ערך לפיצוץ אלפי מג'טון של TNT, עד שאין כל סיכוי להשפיע ולו במעט על התרחשותן. האם אפשר לחזות רעידות אדמה? אפשר לחזותן בטווח רחוק מאוד. אפשר לסמן את האזורים המועדים לרעידות.

בקליפורניה, בפרו וביפן, למשל, הרעידות נפוצות מאוד. הן נפוצות פחות בעמק הירדן, במפרץ אילת ובעוד אזורים הנמצאים בגבולות הלוחות. לא סביר כי רעידת אדמה תתרחש במרכז רוסיה או בקנדה, אך גם לכלל זה היו יוצאים מן הכלל. באזורים המועדים לרעידות אפשר לחקור את "תקופת החזרה" של רעידות - כל כמה זמן בערך הן מתרחשות שוב. זאת אפשר לקבוע הן בעזרת רישומים היסטוריים והן על ידי זיהוי של נזקים שהסבו רעידות בעבר הגיאולוגי הקרוב מאוד. בכך עוסק מדע הפליאואסיסמולוגיה. דוגמה נפלאה לכך היא זיהוי קיר שהוסט במבצר עטרת הצלבני, שליד גשר בנות יעקב. קיר המבצר הצלבני שהרס צלאח־א־דין הוסט 1.5 מטר ברעידת אדמה שהתרחשה ב-20 במאי 1202. רוני אלנבלום ואמוץ עגנון מהאוניברסיטה העברית ושמואל מרקו מאוניברסיטת תל אביב הם שחקרו את המבצר ואת ההסטה שהתרחשה כתוצאה מרעידת האדמה.

אם נדע בקירוב כל כמה זמן מתרחשת רעידת אדמה באזור נתון כלשהו, הרי שככל שעבר זמן ארוך יותר מהרעידה האחרונה, כן רבים הסיכויים להתרחשות רעידה נוספת בזמן הקרוב, שכן המאמץ בסלעים מצטבר והולך. הדיוק בחיזוי כזה הוא נמוך מאוד - עד 50%. כך רעידת אדמה בעוצמה 6 בסולם ריכטר, הצפויה להתרחש בארץ במחזוריות כל מאה שנה, יכולה להתרחש בפועל כל חמישים עד מאה וחמישים שנה. שיטה לחיזוי קצר טווח, חיזוי של רעידת אדמה שתתרחש עוד ימים מספר, עדיין לא קיימת וספק רב אם תימצא. שיטות רבות נוסו: שיטות המודדות שינויים במפלסי מים במעינות או שינויים בריכוז גז רדון במי תהום וכן צברים תכופים של רעידות קטנות. ובכל שיטת חיזוי היחס בין התרעות שווא להתרעות אמת גבוה מאוד. כלומר, אולי יהיה אפשר לחזות בעתיד רעידת אדמה שתתרחש בטווח של שבוע באזור מיושב בצפיפות. אך מחירה של התרעה כזו יהיה עשר התרעות שווא, שאחריהן לא תתרחש כל רעידה. האם אנו מוכנים לפנות עיר של 100,000 או של מיליון תושבים בכל פעם שנקבל התרעה כזו?

לאחרונה מצטיירת אפשרות להתריע התרעה קצרת מועד מאוד - של עשרות שניות, כמהירותם של הגלים הסייסמיים. כלומר להתריע על גלי השטח העתידים להגיע כבר בהגיע גלי ה-P. גם בהתרעה כזו יש תועלת, אפשר להפסיק בזמן זה את פעולתם של כור גרעיני או של תחנת כוח חשמלית, לנתק צינורות גז או לפתוח דלתות של מעליות ברביקומות.

אם לא למנוע ואף לא לחזות, מה בכל זאת אפשר לעשות? אפשר להתכונן לרעידות. באזורים המועדים לכך יש לבנות נכון. מבנים צריכים לעמוד בתקנים שנבדקו ונמצאו עמידים בפני רעידות אדמה; יש להכין את האוכלוסייה להתנהגות נכונה בזמן רעידה; יש לתכנן מבעוד מועד צירי פינוי שישמשו במצבים שבהם כבישים וגשרים נפגעים. בשנים 1968-1969 התרחשו שתי רעידות אדמה בהפרש של כשנה זו מזו, הראשונה בארמניה והשנייה בצפון קליפורניה, שתיהן בעוצמה 6.9 בסקאלת ריכטר ושתיהן באזורים מיושבים בצפיפות. בראשונה נהרגו יותר מ-25 אלף איש; בשנייה - 16 אנשים בלבד(!). הסיבה לכך היא שבארמניה נבנו המבנים תוך התעלמות מתקנים של בנייה ראויה, קבלנים מושחתים השתמשו בחומרים באיכות נמוכה. יותר מכך, יש דברים שאסור לבנות. אם יש בידנו עדויות כי לאורכו של שבר (העתק) התרחשו רעידות אדמה ב-100,000 השנים האחרונות - ניטיב לעשות אם לא נבנה עליו תחנת כוח, סכר או כור גרעיני. ושוב - מוטב לנו ללמוד מניסיונה של יפן בפוקושימה.

אנו חיים באזור מועד לרעידות אדמה. הרעידה הגדולה האחרונה התרחשה בארץ ב-1927 ופגעה בשכם, בירושלים, בצפת, ברמלה וביריחו. רעידה נוספת בוא תבוא. אין זו שאלה אם תבוא אלא מתי תבוא, ואם יש מסר מעשי לסדרת שיחות זו הרי הוא שעלינו להיות מוכנים, וכאזרחים טובים עלינו לוודא שגם רשויות המדינה ערוכות לכך.

אין תוכו כברו

על גבי כל חבילת מזון שאנו קונים כיום מחייבים החוקים את היצרנים להדפיס את הרכב המוצר: כך וכך נתרן, כך וכך סוכר... אילו נדרשנו לתקן דומה לגבי כדור הארץ, האם היינו עומדים בו? האם יש לנו אפשרות להעריך היטב מהו הרכבו הכימי של כל הכדור? מובן שהתשובה התמימה יכולה להיות: צאו החוצה, קחו חופן סלע, שלחו אותו למעבדה, שם יבדקו את הרכבו הכימי - והרי לכם ההרכב. אלא שכמובן תישאל השאלה הטריטוריאלית - והסלע מהיכן הוא? שהרי במקומות שונים סלעים שונים: בירושלים אבן גיר, בטבריה בזלת, באילת גרניט.

אך נניח שנצליח למצוא ממוצע כלשהו להרכב כל הסלעים שעל פני השטח, האם אלה מייצגים את כל הכדור? בידנו עדויות רבות ומגוונות לכך שהתשובה לשאלתי היא בהחלט לא. אין תוכו של כדור הארץ כברו. כבר הזכרנו כי המבנה הקליפתי הקונצנטרי הוא תוצאה של דיפרנציאציה מוקדמת של הכדור, וכי אנו מבדילים בשלוש קליפות עיקריות שכאלו: קליפה חיצונית - הקרום, קליפה פנימית יותר - המעטפת, ובמרכז כדור הארץ - הגלעין (ראו איורים 2, 13, 15).

נמנה את שתי החשובות שבעדויות למבנהו הקליפתי של כדור הארץ:

עדות חשובה ראשונה באה מבחינה של צפיפות הסלעים. הצפיפות, כלומר המשקל הסגולי של סלע ממוצע הנמצא על פני השטח הוא פחות מ-3 גרם לסמ"ק. במילים אחרות, בממוצע משקלו של סנטימטר מעוקב של סלע שנרים מפני השטח או נביא ממחצבה או ממכרה הוא פחות משלושה גרם. חישוב צפיפותו של כדור הארץ כולו מסובך יותר, אך לא הרבה יותר. כמאה שנה אחרי שניסח ניוטון את חוקו השני, המתאר את המשיכה בין גופים שונים בגלל כוח הכבידה (גרביטציה), מצא אנגלי אחר, הנרי קוונדיש (Henry Cavendish), את צפיפותו הממוצעת של כדור הארץ - כ-5.5 גרם לסמ"ק, כמעט פי שניים מצפיפות הסלעים על פני השטח. קוונדיש מצא זאת בעזרת ניסוי חכם, וחלקכם אולי זוכרים אותו מבית הספר התיכון - שני כדורים כבדים בעלי מסה שונה התלויים על חוט.

הבעיה המתעוררת כאן דומה לזו שבה נתקל לפעמים המוכס: אדם נבדק במכס ופותח מזוודה וגלויים בה לעין בגדים וכרית ואולי כמה ניירות - עצמים קלים למדי. והנה מנסה המוכס להרים את המזוודה, והיא כבדה מאוד. מתברר כי ידידנו הנוסע החביא משהו כבד מאוד (מטילי זהב? אורניום?) בתחתית המזוודה, אולי בדופן כפולה שלה. כלומר בתוך כדור הארץ, באזור שאין לנו גישה אליו, יש חומר או חומרים צפופים מאוד. נבהיר כאן שתי נקודות:

א. אזור כדור הארץ הנגיש לבדיקה הוא דק מאוד. המכרות העמוקים ביותר עומקם 4-5 ק"מ בערך, הקידוחים העמוקים ביותר חדרו לעומק של 12 ק"מ. יש מקומות שבהם הובאו סלעים לפני השטח מעומק רב (הם מכילים יהלומים המעידים על לחץ גבוה). אך בכל המקרים לא מצאנו מידע על יותר מ-200 הק"מ העליונים. רדיוס כדור הארץ הוא כ-6,400 ק"מ, הקליפה הנגישה היא אפוא דקה מאוד. דומה הדבר לניסיון לקבוע את אופיו של אבטיח שקוטרו חצי מטר מבדיקת קליפתו.

ב. עם הירידה לעומק כדור הארץ עולה הלחץ, ובלחץ גבוה חומרים נדחסים ונעשים צפופים יותר, אך חישובו ומצאו שהגדלת הלחץ עם העומק, אינה הסבר מספיק לצפיפותו הגבוהה של

כדור הארץ (5.5 גרם לסמ"ק). דרוש עוד משהו שיסביר את ההבדל הגדול שבין צפיפותם של הסלעים על פני כדור הארץ לבין צפיפותו הממוצעת של הכדור כולו, כלומר יש פה סתירה לכאורה או לפחות אי-התאמה לכאורה. רבים מן הגילויים, גדולים כקטנים, שורשיהם בסתירות או בפרדוקסים לכאורה, ובסתירה שצינו כאן נתקל לראשונה הפיזיקאי הגרמני אמיל וייכרט (Emil Wiechert, 1861-1928). כדי לפתור אותה לא הפנה וייכרט את עיניו לתוך האדמה אלא אל השמיים - לחלל. הוא הניח כי בקירוב אין כדור הארץ כולו שונה מאוד בהרכבו מכלל מערכת השמש. אם כן, מה הרכב המוצקים במערכת השמש? עד סוף המאה העשרים היו המטאוריטים הנופלים אל כדור הארץ מן החלל המוצקים החוץ-ארציים היחידים הזמינים לאדם. רוב המטאוריטים הרכבם דומה (בקירוב גס) להרכבו של סלע בזלתי, אחרים עשויים תערובת של שתי מתכות כבדות, ברזל וניקל, שצפיפותן בסביבות 8 גרם לסמ"ק. על כן כבר ב-1896 הציע וייכרט היפותזה נועזת: מה שגורם לצפיפות הגבוהה של כדור הארץ הוא ברזל וניקל מותכים שבראשית חייו של הכדור חילחלו תחת השפעת כוח הכובד אל מרכז כדור הארץ. כפי שצינו בשיחה הקודמת, סברה זו מקובלת כיום.

נחזיר את מבטנו לכמה דקות השמימה. אמרנו כי ראוי להניח כי הרכב מערכת השמש מכתוב בדרך כלשהי את הרכב כדור הארץ. ובכן ממה מורכבת מערכת השמש? 99.9% מהמסה שלה היא השמש עצמה. כל כוכבי הלכת מהווים רק כעשירית האחוז ממסת מערכת השמש. אם נוכל לקבוע ממה מורכבת השמש - אנו בדרך הנכונה. את הרכב השמש אפשר להעריך היטב מבדיקת הספקטרום שלה (קשת הצבעים). כלומר מבחינת האופן שבו מתפרק אור השמש לרכיביו על ידי מנסרה. כל צבע בספקטרום השמש (כל אורך גל) מאפשר לנו לזהות יסוד כימי אשר לוהט בשמש ונמצא במעטפת הגזית המעט קרה יותר שמסביב לשמש. לדוגמה, להבת כיריים של גז, כשנכניס לתוכה גרגר מלח בישול (המכיל נתרן), תיצבע

בצהוב. נתרן שמתחמם זורח בצהוב, נחושת - בירוק, סידן - באדום. די מוקדם התברר גם כי כל יסוד כשהוא במצב של אטומים בגז מעורר, בולע אור באותו אורך גל שבו הוא פולט אור כשהוא מעורר. עוצמתו של כל פס בליעה כזה בספקטרום השמש פרופורציונית לתפוצתו של היסוד התורם את הצבע. כלומר הפלא ופלא - אנו יכולים לקבוע את הרכבה של השמש, אותו כדור לוחט בשמיים, באמינות גבוהה יותר מזו שבה אנו יכולים לקבוע את הרכבו של כלל כדור הארץ.

נשאיר את עינינו צופות בשמיים. אף המטאוריטים באים משם. נסטה למעט רכילות בעניין מוצאם של המטאוריטים. ב-1809 נפל מטאוריט בקונטיקט שבמזרח ארצות-הברית. בנג'מין סילימן (Benjamin Silliman), פרופסור לגיאולוגיה בִּייל, החל לחקור אותו, והשמועה אומרת כי כאשר הובא הדבר לידיעתו של נשיא ארצות-הברית השלישי תומס ג'פרסון, הוא העיר בחרוז כי "קל יותר להאמין שפרופסור ינקי (ג'פרסון היה איש הדרום) מרמה מאשר שאבנים נופלות מהשמיים". שש שנים קודם לכן דווח על כמה אבנים שנפלו מן השמיים ליד העיירה לֶאגֶל (L'Aigle), כ-140 ק"מ מצפון-מערב לפריז. מעטים האמינו לדיווח כי כל העדויות באו מפי איכרים בורים ולא מפי אנשים מכובדים. האקדמיה הצרפתית שלחה אפוא מדען צעיר - ז'אן בטיסט ביו (Jean-Baptiste Biot) שמו, פיזיקאי חשוב ברבות הימים - לבדוק את העניין. ואכן, הדו"ח שלו החל במילים "אבנים נפלו בסביבות לאגל ב-25 באפריל 1803". לקראת סוף המאה התשע-עשרה היה ברור כי מטאוריטים באים מן החלל, וכי רובם אבניים (דמויי סלעי בזלת) ומיעוטם ברזליים (עשויים מתכות שנוצרו מערבוב של ברזל וניקל).

כאמור, מרבית המטאוריטים אבניים. מכל 100 מטאוריטים נופלים, כ-80 שייכים לסוג מיוחד של מטאוריטים אבניים, שאנו מכנים **פונדריטים**, על שם כדורים זעירים המופיעים בהם ומכונים פונדרולות. מטאוריטים אלה עשויים בעיקר מינרלים סיליקטיים, והם דומים קצת לבזלות, אך דומים יותר לסלע מוכר בכדור הארץ -

הפרידוטיט (שהרכבו הכימי הוא בעיקר סיליקט של מגנזיום וברזל, עם מעט אלומיניום, סידן ונתרן). יש דרכים להבדיל בין מטאוריטים שהם פרימיטיביים מאוד, כלומר שמאז היווצרותם לא עברו כל שינוי, לבין אלה שעברו שינויים, כלומר חוממו, הותכו או התנגשו בגופים אחרים. נמצא כי הכונדריטים כוללים בתוכם את המטאוריטים הפרימיטיביים ביותר, וכי הרכבם הכימי של אותם מטאוריטים פרימיטיביים דומה מאוד להרכבו של החלק הלא-נדיף של השמש שלנו. מובן שקיים הבדל עקרוני אחד: את השמש מרכיבים בעיקר מימן והליום, שני גזים נדיפים מאוד אשר סביר כי לא יימצאו בגוש סלע מוצק. הדמיון בין הרכב המטאוריט להרכבה של השמש הוא מפתח לחקר הרכבו של כדור הארץ, שכן עיקר המסה של מערכת השמש מרוכז בשמש עצמה.

ממה מורכבים אפוא המטאוריטים שלא השתנו? 99% מהם עשויים משמונה יסודות בלבד: ברזל (Fe), חמצן (O), צורן (Si), מגנזיום (Mg) - ארבעת אלה מהווים 90% ממסת הכדור - וכן ניקל (Ni), גופרית (S), סידן (Ca) ואלומיניום (Al). כמו כן יש בהם מעט נתרן (Na). כל יתר היסודות בטבלה המחזורית, זהב וכסף ואורניום וזרחן ואבץ, כמוהם כתוספת קמצוץ פלפל ומלח למרק. חקר המטאוריטים הוא כיום תחום מחקר חשוב מאוד במדעי כדור הארץ.

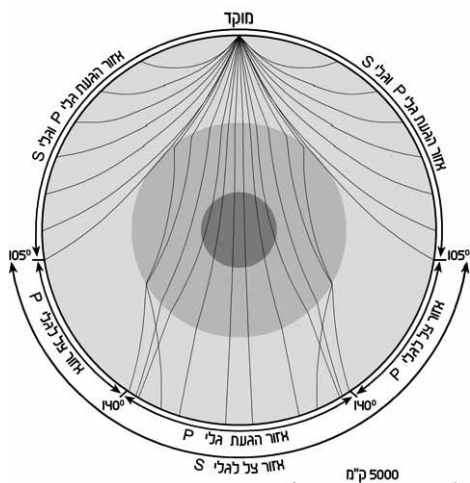
אם כן, אנליזה כימית של הכונדריטים נותנת בידינו הערכה בנוגע להרכבו של כלל כדור הארץ ולריכוזי היסודות השונים בו. אך אין זה הרכבו של החלק הנגיש בכדור - הקליפה החיצונית של כדור הארץ, הקרום. כאן היסוד הנפוץ ביותר אינו ברזל אלא חמצן, שלושת היסודות הנפוצים בו ביותר הם חמצן, צורן ואלומיניום. מתברר, כפי שכבר הזכרנו, שהכדור הופרד בשלבים שונים לחלקיו השונים (דיפרנציאציה) וכי עיקר הברזל נמצא עמוק בפנים כדור הארץ.

הבה נפנה כעת לעדות נוספת למבנהו הקליפתי של כדור הארץ.
על מנת לזהות קליפות אלה אין ברירה אלא לחזור ולהפנות מבטנו פנימה אל תוך הכדור המוצק. דבר זה נעשה בעזרת גלים סייסמיים,

גלים הנוצרים, כפי שתיארנו בשיחה הקודמת, בזמן רעידות אדמה. מכאן בא עיקר העדויות על מבנהו הפנימי של כדור הארץ. סייסמולוגיה לגיאולוג כמוה כרדיולוגיה לרופא: רעידות אדמה יוצרות גלים, וגלים אלה עוברים דרך כדור הארץ כמו גלי רנטגן או גלים אולטרסוניים, ומספקים לגיאולוג מידע על "מה שיש בפנים". כמו שיש טומוגרפיה של גוף האדם יש כיום גם טומוגרפיה סייסמית של כדור הארץ. "תמונת רנטגן" של כדור הארץ.

כשמתרחשת רעידת אדמה משתחררת אנרגיה עצומה. לדוגמה, רעידת האדמה שפגעה קשות בשכם ב-1927 היתה בעוצמה של 6.25 בסקאלת ריכטר. האנרגיה שהשתחררה בה היתה אקויוולנטית לפיצוץ של כ-2 מגטון (2 מיליון טונות) TNT. לשם השוואה, פצצת הגרעין שהרסה את הירושימה היתה בעוצמה של 15 קילוטון (15 אלף טונות) TNT. כלומר, רעידת האדמה שפגעה בשכם שיחררה בסך הכול פי 130 אנרגיה מפצצת הירושימה. כפי שכבר אמרנו בשיחה הקודמת, אנרגיה זו מתפשטת בתוך כדור הארץ בצורת גלים. נזכיר כאן שוב את שני טיפוסי הגלים, גלי P וגלי S. גלי P, המגיעים ראשונים לסייסמוגרף ונעים דרך פנים כדור הארץ, הם מהירים יותר, ודומים במהותם לגלי קול, העברת שינויים בהם נעשית בלחץ; דחיסת האנרגיה ושחרורה. כמו גלי קול מהירותם תלויה בחומר שבו הם עוברים. באוויר מהירותם מאין (0.3 ק"מ בשנייה). במים, שהם צפופים יותר מהאוויר, מהירותם גדולה פי חמישה. ובסלעים גלי קול עוברים עוד יותר מהר: בגרניט, למשל, מהירותם היא 6 ק"מ בשנייה (21,600 קמ"ש!); גלי S, האטיים יותר, הם גלי גזירה, כלומר הם דוחפים חומר בניצב לכיוון התנועה שלהם. מה שמייחד גלי S הוא שמהירותם בנוזל או בגז היא אפס. כלומר, הם אינם עוברים דרך נוזל.

גם גלי P גם גלי S נשברים ומוחזרים כמו גלי קול או גלי אור. מתכונות אלה של הגלים ועל סמך שורת תצפיות אפשר להגיע למסקנות מרחיקות לכת באשר למבנה העומק של כדור הארץ.



איור 13: התנהגות של גלים סייסמיים הנוצרים ברעידת אדמה. שימו לב לעדות הסייסמית לקיומו של גלעין חיצון נוזל. גלי S אינם עוברים בו, וזהו מקורו של אזור הצל של גלי S, ושל גלי P. אזור הצל של גלי S משתרע מ- 105° ממוקד הרעידה עד 105° ("הנקודה הנגדית" למוקד היא במרחק זוויתי של 180°). אזור הצל של גלי P משתרע בין 105° ל- 140° בגלל שבירתם של גלים אלה בגלעין החיצון (והשוו לאיור 2).

כשמתרחשת רעידת אדמה (וראו גם איורים 10, 11) אנחנו מצפים כי הגלים המהירים יגיעו ראשית לנקודות קרובות למוקד הרעידה ורק לאחר מכן לנקודות מרוחקות יותר. העניין ברור לכאורה - פגז קטיושה הנורה מלבנון עובר מעל מטולה לפני שהוא מגיע לחיפה. למעשה לא זה מה שקורה. לפעמים הגלים הסייסמיים מגיעים לנקודה רחוקה לפני שהם מגיעים לנקודה קרובה יותר. מסתבר כי המסלול לנקודה הרחוקה עובר דרך סלעים צפופים יותר, שבהם הגלים נעים מהר יותר. המסקנה הנובעת מתצפית זו היא שהחומר בעומק דחוס יותר, וכולו מוצק (ראו איור 13).

בניתוח רעידת אדמה שהתרחשה ב-26 בדצמבר 2004 בטיוואן נמצא כי גלי S נעלמו במרחק של כ-11,600 ק"מ מהמוקד (או 105°

מעלות ממנו; המוקד הוא נקודת ה-180,0 מעלות ממנו הוא הצד השני של כדור הארץ, (ראו איור 13). גלי ה-S נקלטו בכל אסיה, באירופה, במרבית אפריקה, באוסטרליה וכן בצפון אמריקה ובמערבה, אך לא נקלטו בדרום ארצות-הברית ובמזרחה, במרכז אמריקה ובדרומה וכן במרבית האוקיינוס האטלנטי ומזרח האוקיינוס השקט. כלומר האזור הזה נמצא **בצילם** של גלי ה-S. כפי שרואים באיור 13, במרכז יש חומר שאינו נותן לגלים לעבור; גלי S נתקלים בנוזל ואין הם יכולים לעבור דרכו. דרום אמריקה נמצאת אפוא בצילם של גלי ה-S שנוצרו ברעידה של טיוואן. אציין שוב: עיקרו של כדור הארץ מוצק, ואפשרית בו זרימה אטית מאוד של מוצק, המתנהג כנוזל בעל צמיגות גבוהה מאוד. אך בעומק של כ-2,900 ק"מ מתחיל הגלעין החיצון הנוזלי. בשיטות דומות של ניתוח גלים סייסמיים מגיעים למסקנה כי עמוק עוד יותר, בעומק של 5,150 ק"מ, עובר החומר שוב למצב מוצק - זהו הגלעין הפנימי של כדור הארץ.

אם כן, למדנו משהו על מבנה הכדור. אנו מזהים שינויים במהירויות הגלים, הן האטיים הן המהירים, גם בחלקו החיצוני של כדור הארץ:

בעומק משתנה - כ-7 ק"מ מתחת לאוקיינוסים, כ-40 ק"מ מתחת ליבשות, כ-70 ק"מ מתחת לשרשרות ההרים הגבוהים - יש פגיעה במהירות הגלים. שני טיפוסי הגלים מגבירים מהירותם. מעבר חד זה, מעבר של אי-רציפות, הוא הגבול בין קרום כדור הארץ למעטפת שלו. אם נצליב את מה שלמדנו על הרכב כדור הארץ עם מה שאמרנו כעת על מצב הצבירה שלו נראה כי מבנה כדור הארץ כמבנה ביצה (פחוסה) אם כי מורכבת מעט: לכדור שלנו יש חלמון פנימי נוסף. **קרום כדור הארץ** (קליפת הביצה) הוא דק מאוד, בסך הכול פחות מ-1% ממסת הכדור, קילומטרים עד כמה עשרות קילומטרים. **מעטפת כדור הארץ** (חלבון הביצה) מהווה את עיקר נפחו של הכדור (כ-2/3 ממנו, עוביה כ-3,000 ק"מ), ומעטפת זו מוצקה. שתי קליפות אלה עשויות מינרלים סיליקטיים שונים. הקרום עשוי מחומר שהרכבו הכימי הרכב ביניים - בין גרניט לבזלת,

המעטפת מורכבת מסלעים שדי דומים לאותם סלעים שהובאו מן הירח (סלעים פרידוטיטיים). גלעין כדור הארץ הוא החלק הפנימי ביותר (חלמון הביצה). הנמשך עד מרכז כדור הארץ ומהווה כשליש ממסתו. הגלעין מורכב מברזל ומניקל, ולהם נוסף כנראה יסוד קל, חמצן או גופרית. ברזל וניקל הם מן היסודות הנפוצים בקוסמוס - בשמש ובמטאוריטים. הגלעין החיצון עשוי ברזל-ניקל נוזלי, וזרמי המערבולת בו הם כנראה מקורו של השדה המגנטי של כדור הארץ. לסיכום: בקירוב ראשון כדור הארץ הוא בעל מבנה קונצנטרי, כלומר בנוי כמה קליפות העוטפות מרכז משותף. בקירוב ראשון זה, חתך לעומק שנערוך בכל מקום בכדור יהיה זהה לחתך בנקודה אחרת - כדור הארץ הוא בעל סימטריה כדורית עד מרכזו. ומדוע בקירוב ראשון? משום שעוד נראה כי זהו קירוב פשטני מדי שכן לא כל החתכים זהים. פלחים שונים של הביצה או האבטיח שתיארנו ייראו שונים מעט זה מזה. לדוגמה, יהיה הבדל בין מבנה הכדור שמתחת ליבשות לזה שמתחת לאוקיינוסים.

הנה הכרנו די עובדות על כדור הארץ כדי שנוכל לגשת בשיחה הבאה להצגת תורה המאחדת אותן למקשה אחת - תורת הלוחות.

תורת הלוחות - טקטוניקת הלוחות

עד כאן שוחחנו מספיק כדי שיהיה אפשר להציג סוף־סוף את מה שאנו מכנים התורה המאחדת - מבנה לוגי שלם המסביר תופעות רבות מאוד הנצפות בכדור הארץ. בשיחה זו נציג את הדברים כפי שהם מקובלים כיום; בשיחה הבאה נחזור קצת להיסטוריה של המדע. דיברנו על כך שכדור הארץ בנוי קליפות - גלעין, מעטפת וקרום - הנבדלות זו מזו בהרכבן הכימי: הגלעין עשוי בעיקרו ברזל וניקל, המעטפת עשויה בעיקרה סיליקטים של מגנזיום וברזל, והקרום עשוי סיליקטים של אלומיניום, ברזל ומגנזיום. סיליקטים הם מלחים המורכבים מצורן, חמצן ומתכת כלשהי. בשיחה זו נדון ביחסי הגומלין בין חלקי הכדור השונים על פי שני קריטריונים:

כדור הארץ מאוּזָר, כלומר בנוי אזורים קונצנטריים (ראו איורים 2, 13, 14 ו-15), לא רק מבחינת הרכבו הכימי אלא גם מבחינת חוזקו, רוצה לומר - מבחינת האופן שבו מגיב החומר למאמצים. חוזק של חומר תלוי גם בהרכבו (הלִבְנָה חזקה, הסבון חלש) וגם בטמפרטורה שלו (השעווה הקרה חזקה, השעווה החמה חלשה). חלקו החיצוני של כדור הארץ מתנהג קצת כמו כדור שעווה. כאשר פני הכדור מתקררים המעטפת נעשית קשיחה, צפידה, ואילו פנים הכדור, אם נשאר חם, הוא רך יותר, חלש, מסוגל לזרום. לחלק החיצוני הקשיח אנו קוראים ליתוספֶּרָה (ליתוס - אבן וספֶּרָה - כדור). לחלק הפנימי,

הרך יותר, שאחוז מסוים ממנו גם מותר, אנו קוראים אסתנוספּרה (אסתנאס - חלש, והרופאים מבינים אולי מכירים את הסינדרום האסתנו-אמוציונלי, הלוא הוא חולשה כללית). הליתוספּרה כוללת את הקרום ואת החלק העליון של המעטפת, עד עומק ממוצע של כ-100 ק"מ. כשמופעלים על הליתוספּרה מאמצים היא מתנהגת כמעט כמו לוח קשיח ושביר. האסתנוספּרה לעומתה (בעומק של 100-200 ק"מ בערך) זורמת ומסיעה איתה את הלוחות הליתוספריים. כפי שכבר ציינו, גם המעטפת העמוקה יותר, המוצקה כולה, זורמת לאט מאוד ומסיעה חום (קונבקציה).

העיקרון המרכזי של תורת הלוחות הוא שהקליפה הליתוספרית אינה קליפה רציפה. היא שבורה לכתריסר לוחות גדולים, אשר נעים על פני כדור הארץ בקצב של כמה סנטימטרים בשנה, בערך כקצב גידול הציפורניים שלנו. הלוחות הליתוספריים מוסעים אפוא על גבי האסתנוספּרה.

נמנה אחדים מן הלוחות (ראו איור 4): הלוח הגדול ביותר הוא הלוח הפסיפי, הוא כולל את מרבית האוקיינוס השקט אך לא את כולו - גבולו המזרחי באמצע האוקיינוס, ברכס המזרח-פסיפי (שהוא חלק מן הרכס המרכזי אוקייני העובר כמעט בכל האוקיינוסים, ואותו עוד נזכיר בהמשך). כמה מהלוחות נקראים על שם היבשה שהם מכילים, כגון לוח צפון אמריקה, לוח דרום אמריקה, לוח אוסטרליה, לוח אירואסיה, לוח ערב ולוח אפריקה. אף לא אחד מהלוחות חופף ליבשת. כך לדוגמה, לוח צפון אמריקה כולל את כל היבשת של צפון אמריקה, אבל במזרחו הוא מגיע עד אמצע האוקיינוס האטלנטי, עד הרכס המרכזי אטלנטי.

אם כן, הקביעה הראשונה של תורת הלוחות היא שהליתוספּרה אינה רציפה אלא מורכבת לוחות-לוחות.

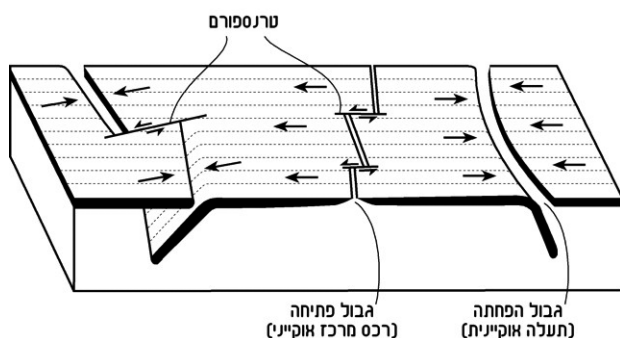
הקביעה השנייה היא שכמעט כל הפעילות הגיאולוגית (יצירת הרים, פעילות געשית, רעידות אדמה וכולי) מתרחשת בגבולות שבין הלוחות. תנועה יחסית בין לוחות אפשר לסכמה בשלושה סוגים של גבולות (ראו איורים 2, 14, 17 ו-18):

א. **גבול הפרדה (או פתיחה)** - גבול שלאורכו שני לוחות מתרחקים זה מזה, וליתוספירה חדשה נוצרת ביניהם (שטח הלוחות גדל). זהו גבול בונה.

ב. **גבול התנגשות (או גבול הפחתה)** - גבול שבו שני לוחות מתנגשים ושטח הלוחות הכולל קטן. זהו גבול הורס.

ג. **גבול ניטרלי** - גבול שלאורכו שני לוחות נעים זה על פני זה אופקית מבלי לשנות את שטחם. גבול כזה מכונה גבול טרנספורם (transform).

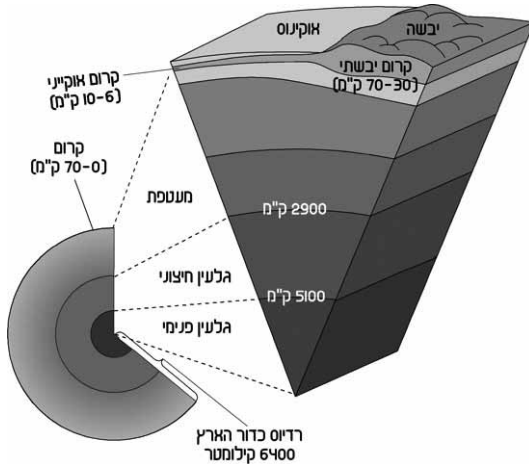
וכמו בכל ניסיון להסביר או לפשט את הטבע הצגתי פה טיפוסי קצה. בכדור הארץ האמיתי ניתקל גם במצבי ביניים שונים.



איור 14: טיפוסי גבולות בין לוחות טקטוניים (על פי Isacks, B., J. Oliver, and L. R. Sykes (1968), Geophys. Res., 73(18), 5855–5899). שימו לב לכיווני החיצים על פני העתקי הטרנספורם, המעתיקים גבולות הפרדה והתנגשות. בקטע שבין שני קטעי גבול הפרדה מועתק, מגמת ההעתקה הפוכה מזו הנראית על פי כיוון ההיסט של הרכס עצמו (ראו גם איור 19).

כשידיברנו על מבנהו הפנימי של כדור הארץ "איימתי" עליכם כי הקירוב הכדורי-סימטרי של מבנה הכדור אינו מדויק. אכן כך הדבר: אם נחתוך פלח של הכדור ביבשת, הקרום היבשתי שיתגלה בו יהיה עבה הרבה יותר מהקרום שיתגלה בפלח דומה שנחתוך

באוקיינוס (ראו איור 15). עוביו של הקרום היבשתי הממוצע הוא כ-40 ק"מ, ואילו של זה האוקייני כ-7 ק"מ. הקרום היבשתי אינו רק עבה יותר מהקרום האוקייני אלא גם קל יותר וחלש יותר. לכן ההתנהגות בגבולות הלוחות תלויה מאוד באופי הקרום המגיב: אם יבשתי הוא או אוקייני (ראו איורים 16 ו-17).



איור 15: חתך דרך פלח כדור הארץ באזור יבשתי לעומת חתך דרך פלח באזור אוקייני. עוביו של הקרום מוגזם מאוד בסכמה ביחס לעובי הגלעין והמעטפת. שימו לב להבדל בעובי: עוביו של הקרום האוקייני כ-6 עד 10 ק"מ, ואילו עוביו של הקרום היבשתי מגיע ל-30-70 ק"מ. גם הרכב הקרום היבשתי שונה מזה האוקייני: הראשון קרוב להרכב גרניטי וצפיפותו כ-2.7 גרם לסמ"ק, הרכב הקרום האוקייני קרוב להרכב בזלתי וצפיפותו כ-3 גרם לסמ"ק.

נחזור לסוגי הגבולות: יש שני טיפוסים של גבול הפרדה, גבול הפרדה של קרום אוקייני וגבול הפרדה של קרום יבשתי.

גבול הפרדה של קרום אוקייני (ראו איור 16) הוא ביטוי למה שקראו התפשטות קרקעית הים (seafloor spreading). בגבול הפרדה כזה הלוחות מתרחקים זה מזה, חומר עולה מן המעטפת ובונה רכס, רכס מרכז אוקייני. זהו מבנה מורם ארוך מאוד, הנמשך דרך כל האוקיינוסים. קטע

אחד שלו הוא הרכס המרכזי האטלנטי, ובקטע זה הוא מקביל לקו המֶתאר של חופי אפריקה וחופי אמריקה (הצפונית והדרומית). והרכס ממשיך הלאה אל האוקיינוס הארקטי, נחשף קצת על גבי האי באיסלנד, וממשיך אל הרכסים המרכזי האוקייניים באוקיינוס ההודי ובאוקיינוס השקט. הגבול מסומן על גבי המפה כאזור עשיר בפעילות וולקנית - הלבנות יוצרות את הקרקעית החדשה. כתוצאה מאותה פעילות מתרחשות גם רעידות אדמה שמוקדיהן רדודים. כך נפרדות והולכות יבשות אירוי-אסיה ואפריקה מיבשת אמריקה (הצפונית והדרומית). קרקעית הים שנוצרת במרכז האוקיינוס האטלנטי היא הצעירה ביותר, ואילו זו שליד היבשות (לאורך חופה המזרחי של אמריקה וחופן המערבי של אירופה ואפריקה) היא העתיקה ביותר. יש מי שאמר כי המבקש לאפיין את כדור הארץ לנוסע מן החלל, יאמר כי זה כדור ששליש ממנו יבשות, רובו אוקיינוסים, ובאוקיינוסים עובר רכס מרכזי שבראשו עמק. מדובר אפוא בתופעה מרכזית על כדור הארץ שלנו.

איור 16: סכמת גבול פתיחה

בקרום אוקייני ויבשתי. 16א.

שימו לב כי בשיא הרכס

נוצר עמק מרכזי המופיע

ברכס לכל אורכו. בסכמה

זו מודגשת התכת הקרום

העליון העולה והופעת

דייקים בזלתיים ושפכי לֶבָה

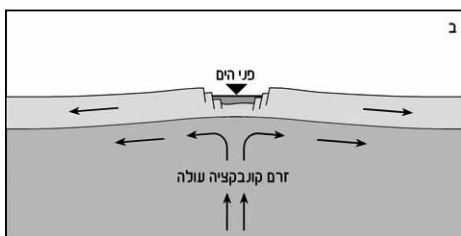
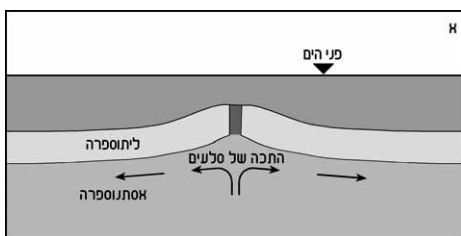
בראש הרכס. הרכס החם

גבוה והאוקיינוס שמעליו

רדוד. כאשר הקרום מתקרר,

בהתרחקו ממקום יצירתו,

הוא מתכווץ, ועומק המים



מעליו גדל והולך. 16ב. גבול פתיחה בקרום יבשתי. נוצר בקע, ואליו יכול

לחדור ים, כפי שקרה בים האדום.

גבול הפרדה (או פתיחה) של קרום יבשתי משמעו ביקוע של יבשה (ראו איור 16ב). גבול כזה מופיע בכמה מקומות בעולם והוא בא לידי ביטוי בעמקי בקע (Rift Valleys), כגון הבקע המזרח אפריקאי, המרשים מאוד בנופיו, שממשיך גם בים האדום - שם האוקיינוס פולש אל תוך הבקע.

כיצד מתארת תורת הלוחות את התופעות המתרחשות בגבול שבין הלוחות?

כפי שצינו באחת השיחות הקודמות, חום במעטפת מובל אל פני השטח על ידי קונבקציה ויוצא ברכסים שבגבולות ההפרדה. החום גורם ל"התנפחות" החומר, ולכן נוצר רכס מרכז אוקייני. כשליתוספירה חדשה שנוצרה ברכס המרכז אוקייני מתקררת, היא גם מתכווצת, וכתוצאה מכך האוקיינוס הולך ומעמיק ככל שמתרחקים מהרכס.

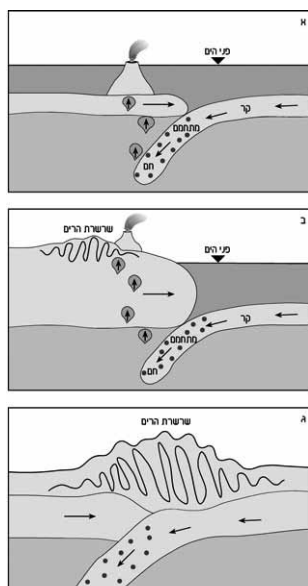
באופן כזה קרום חדש נוצר כל הזמן. אילו היה זה כל הסיפור כולו ולוחות היו גדלים וגדלים כל הזמן, היה כדור הארץ צריך להתנפח כל הזמן. אלא שלוחות גם נהרסים.

וכאן נפנה לדון בטיפוס הגבול השני שהזכרנו - גבול ההתנגשות (או גבול ההפחתה). כששני לוחות מתנגשים זה בזה, צונח אחד מהם אל מתחת לשני. באנגלית קוראים לתהליך כזה Subduction. נדמה לי שחברי ומורי פרופ' רפי פרוינד הוא שהציע בזמנו לקרוא לתהליכי צניחת הלוחות הפחתה². ההתנגשות יכולה להיות בין לוח אוקייני ללוח אוקייני אחר (ראו איור 17א). הלוח הפסיפי, לדוגמה, מתנגש בלוח האמריקאי והתנגשות זו יוצרת את האיים האלאוטיים. גם באזור יפן מתנגשים שני לוחות אוקייניים. בהתנגשות בין שני לוחות אוקייניים קורים כמה דברים: ראשית, צניחתו של לוח אחד מתחת לאחר יוצרת תעלה עמוקה (שקע אוקייני). תעלת מריאנה,

2 לטעמי, רפי היה הגיאולוג הישראלי המעניין ביותר ומי שהבין ראשון את חשיבותה של טקטוניקת הלוחות בהבנת הגיאולוגיה של אזורנו. הוא היה גם פופולריזטור נדיר באיכותו בתחום הגיאולוגיה. רפי מת בגיל צעיר מסרטן.

למשל, היא ביטוי לצניחתו של הלוח הפסיפי אל מתחת ללוח הפיליפינים. תעלה זו היא המקום הנמוך ביותר על פני כדור הארץ ועומקה 11 ק"מ מתחת לפני הים. שנית, הלוח הצונח נושא עימו לעומק גם סלעים המכילים מים. בעומק הלחץ גובר והמים משתחררים ועולים אל האסתנוספירה שמעל. עובדה היא כי סלעים רטובים ניתכים בטמפרטורות נמוכות יותר מסלעים יבשים. לכן נוצרות באזורים כאלה התכות - מגמות, והתכות אלה סופן לעלות אל פני השטח בהרי געש. כך נוצרת שרשרת הרי געש, הידועה בכינוי קשת איים. קשתות איים מפורסמות הן יפן, הפיליפינים והאיים האלאטיים. ושוב, צניחת לוח תחת משנהו מלווה ברעידות אדמה שמוקדיהן הולכים ומעמיקים עם העמקת הלוח (ראו איור 17). רעידות האדמה הגדולות וההרסניות בפיליפינים וביפן (ושוב נזכיר את רעידת פוקושימה, הזכורה לרע) הן רעידות בגבולות ההתנגשות שהוזכרו כאן.

איור 17: חתכים סכמטיים של גבולות התנגשות. א. לוח אוקייני מתנגש בלוח אוקייני. הלוח התחתון מתחמם, מגמות קלות עולות לפני השטח ויוצרות קשת איים, כמו הפיליפינים או האיים האלאטיים. ב. לוח ובו קרום אוקייני מתנגש בלוח בעל קרום יבשתי. דוגמה לכך היא הרי האנדים. ג. לוח יבשתי מתנגש בלוח יבשתי (למשל, לוח הודו בלוח אירואסיה), ונוצרת שרשרת הרים כמו ההימלאיה או האלפים. על גבי הלוח הצונח מסומנים מוקדי רעידות האדמה, כפי שזוהו על ידי נְדָטִי וְנִינֶוֹף (ראו בעמוד 79).



• מוקד רעידת אדמה
• מנהיג עולה

התנגשות יכולה להיות גם בין לוח אוקיינוס ולוח יבשתי (ראו איור 17ב). כאן ברור כי הלוח היבשתי, הקל יותר, הוא זה שיורכב על הלוח האוקייני; הלוח האוקייני יצנח מתחתיו. בהתנגשות כזאת יידחסו שולי היבשת ויורמו, ושרשרת הרים חופית תיווצר. כאלה הם הרי האנדים בדרום אמריקה, בגבול לוח אמריקה ולוח נאזקה של דרום מזרח הפסיפי (הלוח נקרא על שם אזור ועיר בפרו, Nazca). רעידות האדמה התכופות בצ'ילה מתרחשות בשל גבול התנגשות זה.

התנגשות יכולה להיות גם בין שני לוחות יבשתיים (ראו איור 17ג). דוגמה מרשימה מאוד לתהליך כזה היא ההתנגשות של לוח הודו בזה של לוח איוראסיה. והתוצאה: לוח איוראסיה רוכב על לוח הודו. הקרום מוכפל בעוביו ונוצרת שרשרת ההרים של ההימלאיה. רעידות האדמה בשולי ההימלאיה והאלפים (טורקיה, איטליה, סין) הן אפוא תוצאה של התנגשות בין לוחות יבשתיים.

ולבסוף נפנה לדון בסוג הגבול השלישי, הוא הגבול הניטרלי. בגבול זה לוחות עוברים זה על פני זה אך שטח הלוחות אינו משתנה. זהו גבול שמכונה גם **גבול העתק טרנספורם** (ראו איורים 14 ו-18). גבול כזה אנו מוצאים לאורך רכסים מרכז אוקייניים שבהם רציפות הרכס נפסקת וגבול הפתיחה של הרכס מוסט בצורה דמוית מדרגה (ראו איורים 14 ו-18). בין שני מקטעים כאלו נמצא גבול טרנספורם. קטע הטרנספורם שבין שני קטעי הרכס המוסט מסומן ברעידות אדמה. שם חל החיכוך בין הלוחות. גבול כזה אנו מכירים גם קרוב לבית. לוח ערב ומה שנקרא תת-לוח סיני של לוח אפריקה, מוסטים זה ביחס לזה לאורך בקע הירדן, הנקרא גם בקע ים המלח ("השבר הסורי אפריקאי" בספרי הלימוד הישנים בגיאוגרפיה).

מה שמאפיין את כל טיפוסים הגבולות הוא רעידות האדמה המופיעות לאורכם. בגבולות פתיחה מוקדי הרעידות רדודים. בגבולות התנגשות מלווים מוקדי הרעידות את הלוח הצונח, כלומר המוקדים מפורזים על מישור משופע של אותו הלוח הצונח מתחת לאחר. מוקדי הרעידות מסמנים את החיכוך בין הלוח

הצונח לסביבתו, ומיפוי מוקדי רעידות האדמה כמוהו כמיפוי אזור הפחתה. מוקדי רעידות האדמה על העתקי טרנספורם הם רדודים או שעומקם בינוני.

כאמור, גבול הלוחות וגבול היבשות אינו חופף. החוף המזרחי של ארצות-הברית, לשם דוגמה, אינו חופף לגבול של לוח, שכן הלוחות צפון אמריקה ודרום אמריקה משתרעים מהרכס המרכזי-אטלנטי עד לחופן המערבי של האמריקות (ראו איור 4). שם, במערב, גבול היבשת חופף פחות או יותר לגבול הלוח האמריקאי. בדרום אמריקה גבול היבשת הוא גבול התנגשות, ובצפון אמריקה גבול היבשה הוא גבול טרנספורם בין לוח צפון אמריקה ללוח הפסיפי, ולאורכו של גבול זה העתק הטרנספורם של סן אנדריאס (San Andreas).

הוזכר כבר כמה פעמים כי תורת הלוחות היא בגדר מהפכה מדעית שהתרחשה בשנות השישים של המאה העשרים. לאמיתו של דבר אין קביעה זו מדויקת. כבר בראשיתה של המאה העשרים הציע המטאורולוג הגרמני אלפרד וֶגְנֶר תיאוריה הכוללת רבים מהטיעונים המרכזיים של תורת הלוחות ושמה "נדידת היבשות". מדוע נדחתה תיאוריה זו בראשית המאה, ואילו בשנות השישים נתקבלה גם נתקבלה תורת הלוחות? על כך בשיחה הבאה.

וגנר צדק. מדוע לא נתקבלה דעתו?

בשיחה הקודמת נוסחו עיקרי תורת הלוחות: מספר לא גדול של לוחות ליתוספריים, וביניהם שלושה טיפוסי גבולות - בונה, הורס וניטרלי. ציינו שתי תופעות הקשורות בגבולות הללו: רעידות אדמה ופעילות געשית. טקטוניקת הלוחות מתארת תהליך דינמי שאנו נמצאים כעת בעיצומו. כיום הרכס המרכזי האטלנטי הוא גבול פתיחה המרחיק את לוח אמריקה, לוח אפריקה ולוח אירואסיה זה מזה. אפשר לגלגל את הסרט הזה אחורה: לפני כ-200 מיליון שנה נגעו אפריקה ודרום אמריקה זו בזו. כלומר לפני כ-200 מיליון שנים לא היה האוקיינוס האטלנטי קיים. אמנם העקרונות של תורת הלוחות נוסחו ופותחו בשנות השישים של המאה העשרים, אבל רבים מהם נולדו כמה עשרות שנים קודם לכן. כבר אז אנשים לא מעטים שמו לב לכך שמתארי קווי החוף של היבשות, בעיקר אלו של אפריקה ושל דרום אמריקה, מתאימים זה לזה כמו בתצורף (פאזל). כבר במאה ה-19 היו חוקרים אחדים, ובהם אלכסנדר פון הומבולט (Alexander von Humboldt), חוקר הטבע הגרמני הדגול, שחשבו שבעבר הרחוק היו היבשות של חצי הכדור הדרומי - דרום אמריקה, אפריקה, אנטרקטיקה, אוסטרליה וערב - יבשה אחת. ב-1915 פירסם המטאורולוג הגרמני אלפרד וגנר (Wegener) את ספרו "מקור היבשות והאוקיינוסים", ובו הרחיב מאוד את רעיון איחוד היבשות והפרדתן: הוא הציע כי עד לפני כ-270 מיליון שנים היו כל היבשות

חלק מיבשת־על אחת שאותה כינה פנגיאה (Pangea). בשלב מסוים החלה יבשת־על זו להתפרק לשתי יבשות, צפונית ודרומית. הצפונית כונתה בפיו לאוראסיה (Laurasia) והדרומית - גונדוונה (Gondwana). בשלב מאוחר יותר החלו להתפרק גם שתי תתי־יבשות האלה, ונוצרו היבשות המוכרות לנו כיום.

לא רק ההתאמה בין קווי החוף הדריכה את וגנר. היה לו גם נימוק גיאולוגי כבד משקל: מאובנים דומים למדי מתקופות עתיקות נמצאו באפריקה ובדרום אמריקה. ובעיקר תמכו בנימוקיו המאובנים היבשתיים שנמצאו בלאוראסיה אך לא בגונדוונה, או להפך. צמח הגלוסופטריס (Glossopteris), למשל, וגם מאובנים של זוחלים גדולים (כמו Mesosaurus Cynognathus, Lystrosaurus), נמצאו בסלעים בני למעלה מ-200 מיליוני שנים בכל חלקי גונדוונה, אך לא בלאוראסיה. גם אופי הסלעים עצמם במערבה של דרום אפריקה דומה עד להדהים לאלה שבחוף הנגדי - במזרח ברזיל.

במיוחד הרשימו את וגנר המטאורולוג עדויות פליאואקלימיות - עדויות לכיפת קרח שכיסתה את דרום אמריקה, את אפריקה, את הודו ואת אוסטרליה בתקופת הקרבון (לפני כ-320 מיליוני שנים, ראו איור 24). מה יכול להסביר כיפת קרח ענקית כזו? האם כל כדור הארץ קפא אז? רעיון זה לא התיישב עם הימצאותם של צמחייה טרופית ושל בעלי חיים משווניים במה שהיום הוא אזור הים התיכון. יתר על כן, כאשר קרחונים נעים הם שורטים את הסלעים שמתחתם, ועל פי כיווני השריטות למדו החוקרים לזהות את כיוון תנועת הקרחונים. והנה בדרום אפריקה - באותם סלעים מתקופת הקרבון - מראות השריטות כי הקרחונים הגיעו ממערב. אלא שהיום מה שנמצא ממערב לאזור הנדון הוא האוקיינוס האטלנטי. מאין הגיעו אפוא הקרחונים? הדרך היחידה ליישב את כל הסתירות שהזכרתי היא להניח כי היתה קיימת אותה יבשת־על. וגנר אכן הניח זאת. אך לשם כך הוא היה צריך להניח גם כי היבשות יכולות להיות מוסטות אופקית אלפי קילומטרים על פני הכדור. וגנר הניח אף זאת. והוא הציג את רעיונותיו בספרות לקהל הרחב. בתחילה התרשמו

מהם לא מעט גיאולוגים. אך עם חלוף הזמן גברה ההתנגדות לתאוריית "נדידת היבשות", בעיקר מצידם של הגיאופיזיקאים, בעיקר בארצות הברית. הם חזרו במובן מסוים על השגיאה שעשה הלורד קלווין חמישים שנה קודם לכן, כאשר התעלם מעדויות גיאולוגיות לגילו העתיק של כדור הארץ. קלווין עמד על דעתו כי אין גילו של הכדור יכול לעלות על 100 מיליון שנה מפני שלא היה לו הסבר לגיל עתיק יותר. קלווין טעה. הגיאופיזיקאים טענו כי לא ייתכן שהיבשות תוסענה על גבי חומר קשיח - והרי לא היה ספק כי המעטפת קשיחה, האופן שבו עברו גלים סייסמיים דרכה העיד על כך.

התומכים בווגנר הלכו אפוא ונתמעטו. בכנס החברה הגיאולוגית האמריקאית שנערך ב-1926 התנגדו רוב המרצים לרעיון "נדידת היבשות". מסקנה הגיונית מאוסף מרשים של תצפיות נשללה מן היסוד מפני שלא היה מכניזם ברור שיסביר את התופעות הנצפות. במובן מסוים היה כאן ניצחון של התיאורטיקנים על התצפיתנים. "מכיוון שאיננו מבינים כיצד קרה הדבר, אנו אומרים שהוא לא קרה כלל וכלל". היו גם סיבות פסיכו־סוציולוגיות להתנגדות - וגנר היה מטאורולוג, לא גיאולוג. אלפי גיאולוגים עבדו עבודה קשה - בנעליים גבוהות ובתרמילים מלאי סלעים - מיפו, בדקן, הגדירו שנים הרבה, ובדרך כלל העזו להסביר רק תופעה אחת או שתיים בשטח התמחותם. הדרך "הנכונה" ליצור מדע היתה לטעמם זו: לבדוק הרבה בדיקות, למפות הרבה שטחים - ואז לנסות להכליל. והנה בא זה, המטאורולוג, החובבן, ובכמה שנות עבודה, תוך הסתכלות מועטה במפות וקריאה מועטה של ספרות, מציע הסבר כולל של העולם, מציג תיאוריה כוללת ורק אז מחפש לה תימוכין. הדבר נראה כמעט בלתי מוסרי.

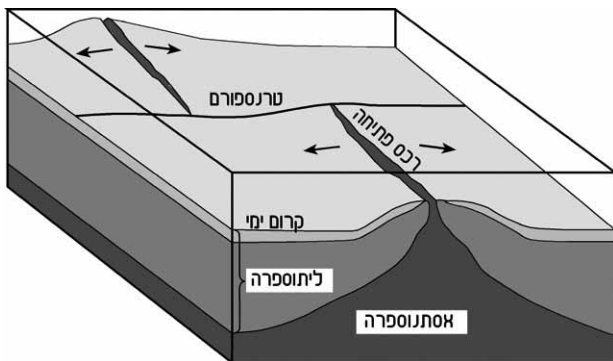
אם כן, ערב מלחמת העולם השנייה היתה תורת "נדידת היבשות" חשובה כמתה. רק כמה גיאולוגים עקשנים המשיכו לדבוק בה: הבולטים ביניהם היו קבוצה של דרום אפריקאים שסירבו להתעלם מן העובדות שעלו מהשדה. היו גם ניסיונות להציע מכניזם לתנועת היבשות. החל בסוף המאה התשע־עשרה נמצאו עדויות רבות לכך שקרום כדור הארץ (אז לא ידעו על קיומה של הליתוספירה) נמצא

במצב איזוסטטי, כלומר הוא צף על פני מה שמתחתיו כשם שקרחון או אונייה צפים על פני המים. כל מי שראה מכלית נפט מתרוממת בנמל לאחר שרוקנה מן הנפט שבתוכה, מכיר תופעה זו. ואכן בסקנדינביה הראו כי לאחר שנסוגו הקרחונים מחצי האי בתקופת הקרח האחרונה - נסיגה שהחלה לפני כ-11 אלף שנה (לשם שינוי אנו מדברים באלפים ולא במיליונים) - התרוממו חופי סקנדינביה; והם התרוממו משום שמשא הקרח הוסר מעל חצי האי. לא זו בלבד שנמצאה הוכחה לכך שמשאו מסוגל להציף יבשה, אלא שב-1935 הראה הגיאופיזיקאי חיים פקריס³ כי חומר כזה, המסוגל להציף את סקנדינביה, הוא גם בעל צמיגות המאפשרת זרם קונבקציה אטי מאוד (ראו איור 3). אלא שבתקופה ההיא מעטים שמו לב לחישוביו של פקריס. ונדגיש: אין מדובר כאן בקונבקציה בנוזל, אלא בזרימה אטית מאוד של מוצק. והיתה גם דמות ענק אחת שהמשיכה לתמוך בווגנר, אחד הגיאולוגים הגדולים של כל הזמנים, האנגלי ארתור הולמס (Arthur Holmes), שגם קידם רבות את הניסיונות לקבוע את גיל כדור הארץ (ראו שיחה 10). ב-1945 כתב הולמס ספר נפלא, 'מבוא לגיאולוגיה', ובו הוקדש פרק לנדידת היבשות, לתיאור זרמי קונבקציה ולרעיון "התפשטות קרקעית האוקיינוסים". כשהתחלתי ללמוד גיאולוגיה באוניברסיטה העברית, השתמשנו רבות בספרו של הולמס, אך כולנו נטינו להתעלם מן הפרק על נדידת יבשות - עיסוקו בנדידת היבשות היה בעינינו מעין "תחביב", ראינו ברעיונותיו משובה של מחבר.

כאלה היו פני הדברים ב-1958. עשור מאוחר יותר היתה תיאוריית הלוחות - טקטוניקת הלוחות, לתורה המובילה והמקובלת, למודל הסטנדרטי של הגיאולוגיה. מה גרם אפוא למפנה קיצוני זה? נדמה לי כי התפתחויות בשלושה תחומים עיקריים הן שאיפשרו את התפנית: התפתחויות בגיאופיזיקה, במיפוי קרקעית האוקיינוס, ובמחקרים העוסקים במגנטיות.

3 חוקר ב-MIT ומי שייסד לאחר קום המדינה את המחלקה למתמטיקה שימושית במכון וייצמן.

ראשית, נפנה לכמה תגליות בגיאופיזיקה, אותו שטח שממנו באו המתנגדים העיקריים לתורת הלוחות. ציינו כבר כי במשך הזמן התברר כי כדור הארץ אינו בעל סימטריה כדורית ממש, שכן מבנה הקרום ביבשה שונה ממבנה הקרום באוקיינוס. שני גיאופיזיקאים, האחד יפני ושמו ודטי (Wadati) והשני אמריקאי ושמו בניוף (Benioff), בחנו בשנות ה-30 במקביל את מיקומם של מוקדי רעידות האדמה שהתרחשו ביפן, בצילה ובאינדונזיה. כל אחד מהם גילה שהמוקדים נופלים על מישור הנוטה אל מתחת לפני היבשת (ראו איור 17). גילו ולא ידעו להסביר מדוע תופעה זו מתרחשת. לכשתבוא תורת הלוחות ותסביר כי זו נטייתו של הלוח הנוחת באזור הפחתה, יתקבל ההסבר בברכה. סייסמולוג אמריקאי אחר, בֶּנו גוטנברג (Beno Gutenberg), גילה כי גם הקביעה הכללית כי כל מעטפת כדור הארץ מוצקה וצפידה "כמעט" נכונה: בערך בעומק 100 ק"מ יש אזור שהוא "חלש" קצת יותר, על כן המהירויות הסייסמיות בו אטיות יותר. אזור זה יזכה ברבות הימים בכינוי אסתנוספרה, האזור שעליו נעים הלוחות (ראו גם איור 31).

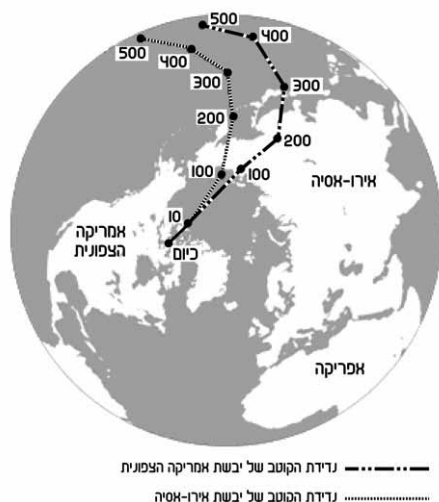


איור 18: חתך סכמתי של הרכס המרכזי האוקייני ובראשו עמק מרכזי. הרכס מוסט על ידי העתק טרנספורם. העתק טרנספורם הוא תופעה גיאומטרית המאפיינת את כדור הארץ ובה הלוחות נעים. שימו לב, ממבט ראשון נראה כי מדובר ב"הסטה שמאלית" (הגוש שמול הצופה נע שמאלה). לאמיתו של דבר מדובר ב"הסטה ימנית", כפי שמראים החיצים המורים על כיוון התנועה בין שני קטעי הרכס המועתק (ראו גם איור 14).

לחיוזוק תיאוריית נדידת היבשות תרמו כאמור גם התפתחויות במיפוי קרקעית האוקיינוס. לאחר מלחמת העולם השנייה ובעקבות מלחמת הצוללות ופיתוח המכשור שהיה כרוך בה, התפתחה מאוד גם הגיאולוגיה הימית. וכך, באמצעות מכשור שהיה אז חדיש, מופו קרקעיות האוקיינוסים והוכרו בהן תופעות חשובות. אחת מהן היא הרכס המרכזי האוקייני. בראש הרכס יש שקע, מעין אוכף או בקע הנמשך לכל אורכו (איור 18). הרכס המרכזי האוקייני נמשך כמעט ברציפות ועובר בכל האוקיינוסים המקיפים את הכדור. הקטע האטלנטי של הרכס, לשם דוגמה, עובר במרכז האוקיינוס האטלנטי ומקביל לקו החוף של אירופה ושל אפריקה מצידו האחד, ולקו החוף של צפון אמריקה ודרום אמריקה מצידו השני. ברבות הימים יוכר רכס גלובלי זה כגבול הפרדה של לוחות. כמו כן נתגלו התעלות האוקייניות העמוקות (שקעים אוקייניים), ובבוא היום יראו בהן ביטוי לאזורי הפחתה.

ואולי המכרעת שבהתפתחויות ובתגליות שהובילו לקבלת תורת הלוחות היתה בתחום מדידת התכונות המגנטיות של סלעים. דיברנו על כך שהגלעין החיצוני של כדור הארץ הוא ברזלי ונוזלי. מקורו של השדה המגנטי של כדור הארץ הוא בזרמי הברזל המותך שבגלעין החיצון. זו גם כנראה הסיבה לכך שמיקומם של הקטבים המגנטיים נע עם הזמן, אם כי לאט. כבר לפני למעלה ממאה שנה היה ידוע כי סלעים רבים רוכשים תכונות מגנטיות שניתנות למדידה. לבה לא יכולה לרכוש שדה מגנטי. אך כשהלבה מתקררת ומצויה מתחת לטמפרטורה מסוימת - הידועה בכינויה טמפרטורת קירי (על שם מסייה פייר קירי Pierre Curie, ולא מדאם מארי קירי) - המינרלים המגנטיים בסלע (בעיקר תחמוצת הברזל מגנטיט) מתארגנים כך שהסלע כולו רוכש את השדה המגנטי שבו התקרר. בשנות הארבעים והחמישים של המאה העשרים פותחו מכשירים רגישים מאוד למדידת תכונות מגנטיות של סלעים. נולד מדע הפליאו־מגנטיות. סלעים רבים נמדדו באירופה והתברר כי בעבר הגיאולוגי הקוטב המגנטי לא היה ממוקם במקום שבו הוא נמצא כיום. לסלעים מכל גיל היה קוטב מגנטי שונה. אמרו: הקוטב נדד.

אבל כשמדרו את "נדידת הקטבים" הזאת גם באמריקה, התברר כי מסלולי הנדידה של הקוטב, כפי שמופו ביחס לשתי היבשות - אירופה ואמריקה - שונים למדי זה מזה (ראו איור 19). כלומר לא הקוטב נדד: היבשות הן שנדרו! וגנר כנראה צדק! יתר על כן, השחזורים שנדרשו משיקולים פליאומגנטיים היו קרובים להפליא לאלה של וגנר.



איור 19: מפת מסלול נדידתו של הקוטב המגנטי הצפוני כפי ששוחזר ממדידות באירופה, לעומת מסלול נדידתו של קוטב זה כפי ששוחזר ממדידות בצפון אמריקה. שני המסלולים היו צריכים לחפוף בעולם שבו מיקומן של שתי היבשות האלה קבוע. חוסר החפיפה הוא הוכחה אחת לתנועה אופקית של היבשות (הלוחות). המספרים על גבי המסלולים מראים את גיל הסלעים שבהם נקבע מיקום הקוטב. מובן שכיום המסלולים מתלכדים: הקוטב המגנטי, כפי שנקבע מכל מקום על פני כדור הארץ, אחד הוא.

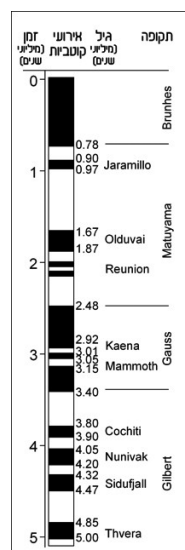
במחקרים פליאומגנטיים לא היה סוף להפתעות: התברר כי אחת לפרק זמן שאורכו נע בין כמה מאות אלפי שנים לכמה עשרות מיליוני שנים, השדה המגנטי של כדור הארץ מתהפך: הצפון הופך לדרום והדרום לצפון. בסדרות של שפכי לבות שנערמו זה על גבי זה (כמו

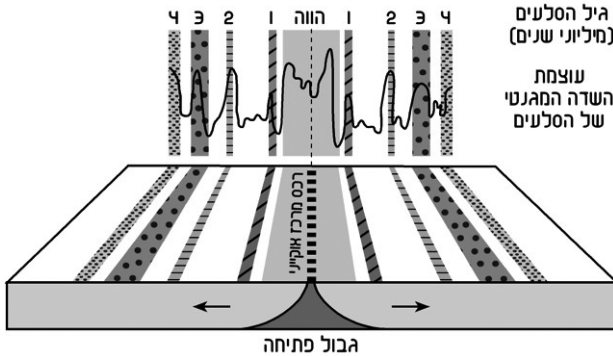
ברמת הגולן) הצליחו החוקרים לקבוע מה היה סדר ההיפוכים האלה: כששילבו מידע שעלה ממדידות פליאומגנטיות עם מידע שעלה מתאריך לבות התברר כי הפעם האחרונה שבה התהפך השדה וחזר להיות "נורמלי" (כלומר חזר להיות כפי שהוא היום) היתה לפני 780,000 שנה בערך. לפני כן, וליתר דיוק מלפני 2.5 מיליון שנים ועד לפני 780,000, היה השדה "הפוך" (עם אירועי "נורמליות" קצרים בתוך התקופה "ההפוכה" (ראו איור 20); ולפני כן, מלפני 3.35 מיליון שנה עד לפני 2.5 מיליון שנה, הוא היה "נורמלי" (במצבו כיום). וכך הלאה. בשנות השישים החלו למפות את עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ באוקיינוסים (כאמור, במידה רבה בעזרת מכשור שפותח לשם מעקב אחר צוללות). שני מדענים אנגלים מקיימברידג', פרד ויין (Fred Vine) ודרמונד מתיס (Durmond Matthews), הציעו ב-1963 הצעה נועזת: אם נקבל שתי הנחות, **האחת** שברכס המרכז האוקייני נוצרת כל הזמן קרקעית אוקיינית בזלתית חדשה, כלומר "קרקעית האוקיינוס מתפשטת" (Sea-floor spreading), וקרקעית בזלתית זו רושמת בתוכה את כיוון השדה המגנטי בעת שנתקרה מתחת לטמפרטורת קירי, **והשנייה**, שתוך כדי התפשטות זו מתחלף השדה המגנטי של כדור הארץ מדי פעם, הרי החילופים גורמים לכך שפעם השדה המגנטי הנורמלי הממגנט את הסלעים **מחזק** את השדה הכללי העכשווי, ופעם, כששדה כדור הארץ הפוך, הוא **מחליש** אותו. כלומר, בעולם שבו קרקעית האוקיינוס מתפשטת והשדה המגנטי מחליף קוטביות נצפה לא רק לחתך עמודי כמו שתיארתי (וראו איור 20) אלא לרצועות של שדה מחוזק ומוחלש, סימטריות משני צידי הרכס. אם נצבע על גבי מפה רצועות של אנומליות חיוביות בשחור ורצועות של אנומליות שליליות בלבן - תיראה התבנית כעור זברה. ואכן, שלוש שנים מאוחר יותר מופו תבניות כאלה על קרקעית האוקיינוס (ראו איור 21).

אישור זה של היפותזת ויין ומתיס היה סימן הדרך בהפיכתה של תורת הלוחות לתורה המאחדת של הגיאולוגיה. בעשור שלאחר מכן נוסחה התורה כפי שהיא מוכרת לנו כיום בשורה של עבודות המסכמות אספקטים שונים שלה. כל תיאוריה מתחזקת מאוד אם

אפשר לתכנן ניסוי או תצפית שעשויים לדחותה או לחזקה. מאז 1968 נבדקה טקטוניקת הלוחות על ידי כמות עצומה של קידוחים בעומק הים (יותר מ-1,200 קידוחים). התיאוריה צופה כי הקרקעית האוקיינית תהיה צעירה ביותר ברכסים המרכז אוקייניים ועתיקה ביותר בשולי היבשות. דרישה זו לא נסתרה אפילו במקרה אחד. יתר על כן, חקר גלעיני הסלע שהוצאו בקידוחים אלה הראה כי לא נמצאו בכל קרקעיות האוקיינוסים סלעי משקע העתיקים מגיל טְרִיאָס (כלומר עתיקים מ-200-250 מיליוני שנה, ראו איור 24), ואילו על היבשות נמצאו סלעים עתיקים הרבה יותר. כלומר האוקיינוסים כפי שאנו מכירים אותם כיום הם יצירה גיאולוגית צעירה יחסית - תוצאת פירוקה של פאנגיאה. במשך השנים הוכנסו בתורת הלוחות לא מעט שיפורים ותיקונים. התברר, למשל, כי ההנחה בדבר קשיחותו המוחלטת של פנים הלוח לעומת המופליות של גבולותיו פשטנית מדי. אך נותר הדבר הבסיסי: טקטוניקת הלוחות הפכה את הגיאולוגיה מאוסף ענקי של עובדות הבאות משטחים שונים ומשונים לתורה קוהרנטית, מאחדת, אשר כל תופעה שמתגלה צריכה להיבדק לאורה.

איור 20: סדר היפוך הקטבים המגנטיים בחמישה מיליון השנים האחרונות. קוטב נורמלי מסומן בשחור, קוטב הפוך בלבן. התקופות שבהן היה הכיוון המגנטי רציף (נורמלי או הפוך) מכונות על שם חוקרי מגנטיות דגולים - ברונס, מאטויאמה, גאוס, גילברט. אירועי היפוך קצרים נקראים על שם המקומות שבהם זוהו כיווני קוטב אלה - אולדובאי באפריקה, מאמות בקליפורניה וכולי.





איור 21: הצגה סכמטית של "תבנית הזברה" משני צידי רכס מרכז אוקייני. הסכמה האנכית מראה את עוצמת האנומליות המגנטיות. לעומתה מראה הסכמה האופקית (מבט מפה) את סימטריות האנומליות משני צידי הרכס. סימטריה זו היא תוצאה של שילוב בין קרקעית אוקיינית מתפשטת לבין היפוך כיווני השדה המגנטי. בתקופות המסומנות בפסים שחורים (שדה "נורמלי", כלומר ככיוון השדה העכשווי), השדה המושרה על ידי הבזלות מגביר את העוצמה הנמדדת, ובתקופות המסומנות בלבן (שדה "הפוך" מזה העכשווי) - השדה המושרה על ידי הבזלות מחליש אותה.

גיאולוגיה כמדע היסטורי - סֶטְרִיגְרַפִּיָּה

גיאולוגיה היא מדע היסטורי, והיסוד ההיסטורי שבה הוא המייחד אותה מבין כל מדעי הטבע. בגיאולוגיה לא שואלים רק מה קרה וכיצד קרה אלא גם מתי קרה. נעיין בכמה דוגמאות ליסוד היסטורי זה:

בירושלים היה ים. אפשר לשאול איזה מין ים הוא היה: מה היתה טמפרטורת מימיו? עד כמה היה מלוח? מי חי בו ועד כמה הוא היה ים פורה? ומה שקע בו? חולות? אבני גיר? וחשוב מאוד לשאול - מתי? מתי התרחשו התופעות הללו?

בגליל היו הרי געש. אפשר לשאול כיצד נראו ואיך התנהגו: איזו לבה התפרצה מהם? עד לאן זרמה ומה היתה מהירות הזרימה שלה? האם לוותה בהתפוצצויות, כמו אלו המאפיינות את התפרצותו של הר סנט הלן במערב ארצות הברית, או שמא היתה זו זרימה שקטה, כמו זו המאפיינת את התפרצותו של הר הגעש קילֵאוֹה שבהוואי? ושוב עולה שאלה חשובה: מתי פעלו הרי הגעש בגליל? לפני היות הים בירושלים? לאחר מכן?

בים שבירושלים שקעו אבני גיר. ברבות הימים חצבו מהן את אבני הכותל המערבי. גם בקהיר היה פעם ים, וגם בים שבקהיר שקעו אבני גיר. מהן חצבו ברבות הימים את אבני הבנייה של הפירמידות. ובכן, מי קדם למי? הים שבירושלים או זה שבקהיר?

הזמן בגיאולוגיה הוא אפוא בעל חשיבות עליונה. יש האומרים בבדיחות שמה שירוק הוא בוטניקה, מה שמתרוצץ - זואולוגיה, מה שמסריח - כימיה, מה שלא עובד - פיזיקה. אם כך אפשר לומר גם שמה שיש בו מוקדם ומאוחר הוא גיאולוגיה. נתן אלתרמן ידע להעריך זמן:

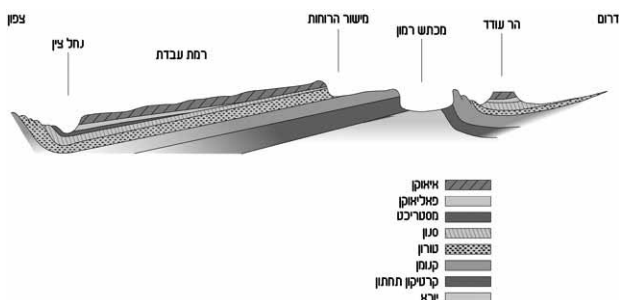
לא קרונות המטען אל הדרך שבים.
לא שירם העמום על פנינו הושט.
כך נוסע הזמן. הוא יקר ושביר.
הובילוהו לאט. הובילוהו לאט.
(מתוך "ער הלילה", בוכבים בחוץ, 1938)

כבר במאה ה-11 הכיר אבן סינא הפרסי איש בוכרה (Avicenna) בכך שיחידות סלע שוקעות אופקית, זו על גבי זו, במקביל לפני שטח כדור הארץ, ולכן ברצף שכבות בלתי מופרעות השכבה התחתונה היא העתיקה ביותר. זהו עיקרון ההרבדה. סלעים משוכבים שוקעים בתוך גופי מים או ביבשה. הם יכולים להיות סלעי משקע או סלעים וולקניים. למה הדבר דומה? לערימת דפים שאנו כותבים עליהם (רצוי בצד אחד) ומניחים אותם זה על גבי זה, ולחלופין לעוגת שכבות. במילים אחרות, שיכוב סלעים מבטא סדר אירועים, מן העתיק אל הצעיר. מכאן הענף בגיאולוגיה המכונה סטרטיגרפיה, מלשון Stratum, שפירושו שכבה.

נביט בשני חתכים גיאולוגיים ידועים בארץ (ראו איורים 22 ו-23):

1. חתך מכתש רמון-עבדת (איור 22). במרכז מכתש רמון הסלעים הם העתיקים ביותר, כשעולים צפונה לעבר מצפה רמון - אנשי בית-הספר לקצינים ייזכרו ודאי בנוף המוכר להם - השכבות כמעט אופקיות, והן הולכות ונעשות צעירות יותר ככל שמתקדמים צפונה לשדה בוקר. שכבות אלה הן כמעט בלתי

מופרעות. הן עשויות להיות גם מופרעות: מוטות, קמוטות (כמו בדוגמה שבאיור 23) או שבורות.



איור 22: חתך גיאולוגי סכמטי ממרכז מכתש רמון עד רמת עבדת. שימו לב כי המכתש הוא תופעה מורפולוגית בלבד. גיאולוגית זהו קמר (אנטיקלינה), שהשכבות צונחות ממרכזו החוצה, ובמרכזו נחשפות השכבות העתיקות ביותר. בשיא הקמר נחפר על ידי ארוזיה מכתש ענקי. ממרכז המכתש, מערבה וצפונה נוטות כל השכבות מערבה, וככל שמתקדמים מערבה על פני השטח, כן נחשפות שכבות צעירות יותר. ראש המצוק של קירות נחל צין הוא מתקופת האיאוקן. קנה המידה האנכי מוגזם מאוד, כדי להדגיש את נטיית השכבות. (למשמעות גילן של התקופות השונות ראו איור 24).

נחזור רגע לדימוי של ערימת הדפים: נאסוף את הערימה לספר ונעמיד את הספר על מדף, ישר או מוטה על צידו. כעת העמודים העתיקים (הראשונים) יימצאו בצד ימין (בספר הכתוב בשפה לטינית) או בצד שמאל (בספר הכתוב עברית). בספר נטוי - אם נעשה חתך במישור אופקי או מפותל הנוטה אף הוא, נוכל ליצור מצב שבו כאשר ננוע לאורך המישור החותך מלמעלה למטה נעבור מדפים צעירים לעתיקים יותר או להפך - מצעירים לעתיקים יותר. נסו זאת ותיווכחו.

מונחים אופקית על המדף, אחר כך הם הועמדו אנכית (או בהטיה) ועליהם הונחו עוד כמה ספרים אופקיים. מתקבלת אפוא אי התאמה בשיכוב. במקרים רבים אחרים לא נראה הבדלי נטייה בין חבילות השכבות אך נראה אי התאמה ארוזיבית. אם נחזור למשל הספר - ייתכן שנקרעו דפים או חסרים דפים בספרנו. יש שנרגיש בחסרונם רק מתוך ההקשר: בדף אחד קראנו שהזוג הצעיר צועד לחופתו, והנה כבר בדף שלאחריו אנו מתוודעים לגירושו של בנם השני, ואותו כלל לא הכרנו, על אחת כמה וכמה לא ידענו שהתחתן.

נחזור לנמשל הגיאולוגי. שלבי יצירת אי ההתאמה יכולים להיות שלבים של בנייה, הרס ושוב בנייה. בהשקעת הסלעים נאגר מידע, בהרס סלעים נעלם מידע. וכאשר נעלם מידע אין אנו יודעים מתוך הרישום אם נעלם הרבה ממנו או מעט, אם נקרעו מן "הספר" שני עמודים או מאה, אם המידע החסר מקביל לעשר שנים או לעשרה מיליון שנים. אי התאמה יכולה להיווצר גם במצבים שבהם בפרק זמן לא ידוע אמנם לא הוסרו סלעים אך גם לא נוצרו סלעים חדשים. למזלנו, יש מי שעוזר לנו להתגבר על הבעיה: מאובנים של בעלי חיים ושל צמחים. כל האורגניזמים עוברים אבולוציה. ואבולוציה היא חד-כיוונית. דרווין, שב-2009 חגגנו מאתיים שנה להולדתו, גילה שמינים מופיעים, פורחים, נכחדים ואינם מופיעים שוב. הדינוזאורים נכחדו ולא ישובו. הכחדתם אירעה זמן רב לפני הופעתו של האדם הניאנדרתלי, ולכן לא ייתכן כי נמצא באותה שכבה בלתי מופרעת גם דינוזאור וגם אדם ניאנדרתלי. האבולוציה נותנת חץ לזמן. למזלנו, מאובנים לא מעטים עונים על שתי דרישות: הזמן שבין פריחתם להכחדתם הוא קצר יחסית לזמן קיומה של כלל עמדות הסלעים, והם נפוצים בשטחים נרחבים מאוד, באסיה ובאפריקה, באירופה ובאמריקה, באוסטרליה ואף באנטרקטיקה. אלה בדרך כלל מאובנים ימיים הצפים על פני המים למרחקים גדולים, וכך מהווים סמנים טובים לגיל הגיאולוגי (ראו אזור 24).

בסלעי משקע שנמצאים נמוך מאוד בטור הסלעים, כלומר בסלעים עתיקים מאוד, אין מאובנים ברורים הניתנים לזיהוי

כאורגניזמים - אמנם יש בהם אצות מאובנות, אך לא מאובנים של אורגניזמים בעלי שלד. אלה הופיעו בפריחה פתאומית, גלובלית, והיו עשויים קרבונט, פוספט או תחמוצת צורן. המאובנים בוני השלד הראשונים קרובים לפרוקי הרגליים (Arthropoda) המוכרים לנו היום. גופם מחולק לשלוש אונות. אלו הטרילוביטים והם הופיעו, פרחו ונכחדו. אחריהם הופיעו יצורים דמויי תולעים - קווצי העור (Echinodermata) - גרפטוליטים, אחריהם דגי סחוס, ואחריהם דגי העצם. בשלב מסוים הופיעו האמוניטים - רכיכות בעלות קונכייה דמויות הנאוטילוס המודרני (אף כי הן לא בדיוק קרוביו) - שהם בעלי מגוון רחב מאוד של מבנה וצורה (ראו איור 24). בשלב מאוחר יותר הופיעו הדינוזאורים - קבוצה של בעלי חיים קטנים וגדולים, טורפים וצמחונים, עפים, שוחים והולכים על שתיים ועל ארבע. אבולוציה רבה חלה בקבוצת מאובנים של אורגניזמים חדיתאיים ימיים, הפורמיניפרים, שהם סמן סטרטיגרפי יעיל מאוד.

גיל (מיליוני שנים)	עידן	תקופה	גיל
1.6	קנזוזאיקון	מיוקן	מספריקט
		איואקון	קמפן
100	מזוזואיקון	קרטיקון עליון	סנטון
		תחתון	קוניאק
200		יורא	טורון
		טריאס	קנומן
300	פלאוזואיקון	פרם	
		קרבון	
דבון			
סילור			
500		אורדוביק	
570		קמבריום	

איור 24: העמודה הסטרטיגרפית. כל תקופה גיאולוגית מאופיינת במאובן מנחה (מדגמי בלבד). הגילים ("המוחלטים") במיליוני שנים יידונו בשיחה 10.

על פי מאספי מאובנים חולק החתך הגיאולוגי ליחידות זמן או לתקופות גיאולוגיות. לדוגמה, סדרת הסלעים שבהם הופיעו הטרילוביטים מיוחסת לזמן הקמבריום, הגרפטוליטים (Graptolites) מיוחסים לזמן הסילור, דגי העצם לזמן הדבון, מינים מסוימים של אמוניטים לתקופת היוקא, מינים אחרים לתקופת הקרטיקון. כשיחפשו גיאולוגים בעתיד מאובנים מנחים למאה ה-20, הם יוכלו להיעזר בבקבוק הזכוכית של קוקה קולה, הבקבוק הקלסי, המפותל. מוצר זה משתמר היטב (ועל כן גם מזהם את סביבת חיינו), והוא יסמן כנראה היטב את התקופה שבין 1915 ובין שנות השישים של המאה העשרים, שהרי בשנות השישים שונתה צורת הבקבוק, וכך גם בשנות התשעים, כשהחלה חברת קוקה קולה לייצר בקבוקי פלסטיק ופחיות משקה.

המאובנים אמורים להופיע בסדר מסוים. אם על שכבה שבה טרילוביטים מונחת שכבה ובה דינוזאורים או יונקים - סימן שחלק מעמודת הסלעים חסר.

באי התאמה (ראו איור 25), הפער החסר בסדר המאובנים מספר אלו שכבות חסרות, והראשון שהכיר בכך היה כנראה ג'יימס האטון (James Hutton). האטון היה בן דורם של גדולי הרנסנס הסקוטי משלהי המאה השמונה-עשרה, ראשית המאה התשע-עשרה, ובהם המשורר רוברט ברנס (Robert Burns), הפילוסוף והכלכלן אדם סמית (Adam Smith) וכן הפילוסוף, ההיסטוריון והכלכלן דייוויד יום (David Hume). ב-Siccar Point שעל חוף הים שליד אדינבורו, ראה האטון אי התאמה זויתית יפה מאוד וגם הסביר את חשיבותה (איור 25).



איור 25: אי ההתאמה הזוויתית המפורסמת ב-Siccar Point שליר אדינבורו (אי ההתאמה של האטון). כאן הבין האטון לראשונה את משמעות הרישום החסר באי התאמות סטרטיגרפיות, ומכאן את אורכו העצום של הזמן הגיאולוגי. בין השקעת הסלעים מתקופת הסילור (קרוב לסלעים המוטים אנכית) להשקעת הסלעים הכמעט-אופקיים מתקופת הדבון עברו כ-80 מיליון שנה, ובהן הוטו הסלעים מתקופת הסילור ונגדעו למישור אופקי ועליו הושקעו הסלעים מתקופת הדבון, שאף הם הוטו קלות. מישור אי ההתאמה מסומן בקו לבן (ראו איור 24 לזיהוי התקופות וגילן).

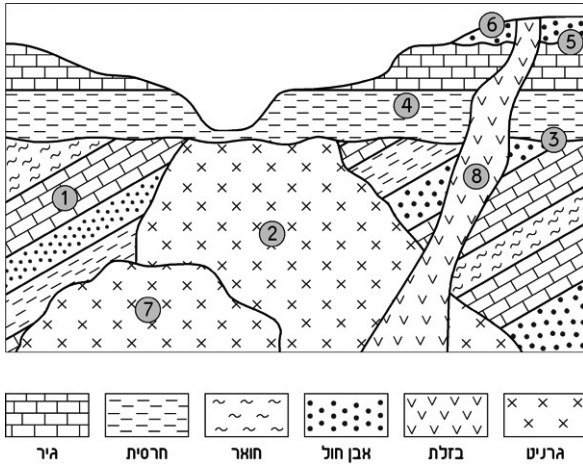
מאובנים מאפשרים להשוות גם בין גילן של שכבות שונות במקומות מרוחקים: הזכרנו את אבני הגיר שבסביבות קהיר. באבני גיר אלה נפוצים מאוד מאובנים של חד-תאיים מממלכת הפורמיניפרים, משפחה של מאובנים דמויי מטבע - הנומוליטים (Numulites). בארץ מוצאים מאובנים כאלה בסלעים הבונים את רמת עבדת ואת רמת צין. סלעי עבדת ואבני הגיר של קהיר הם אפוא בני אותו גיל, זכר לאותו אוקיינוס שכיסה פעם את אזורנו, והם צעירים בהרבה מסלעי הגיר של ירושלים, שבהם שולטים פורמיניפרים כגון המיליולידים (Miliolids) והאלבאולינידים (Alveolinids), המסמנים את תקופת קנומן-טורון.

ראינו שהמאובנים מאפשרים לחוקר לקבוע את הגיל היחסי של הסלעים, לגלות פרקי זמן חסרים בהיסטוריה הגיאולוגית וגם לבדוק התאמה בין סלעים באתרים שונים. האטון והגיאולוגים שבאו בעקבותיו צ'רלס לאייל (Charles Lyell) וצ'רלס דרווין (Charles Darwin) הגיעו על סמך בחינת אי התאמות להכרה כי הזמן הגיאולוגי הוא זמן ארוך מאוד: מיליונים רבים מאוד של שנים. לסיכום, נגענו היום בִּמְשַׁתְנָה שהוא אולי המשתנה החשוב והחמקמק ביותר בגיאולוגיה - הזמן. למדנו להכיר מוקדם ומאוחר ולהעביר באופן כללי קווים או מישורים שווי זמן, כלומר להשוות גילים סטרטיגרפיים במקומות שונים. בשיחה הבאה נדון באפשרות למדוד זמן במושגים מוחלטים יותר: לבחון לא רק מי קדם למי, אלא גם מהו גילו של כל סלע.

מדידת גיל מוחלט

בעיניי, ואין זו דעת יחיד, התרומה החשובה ביותר של הגיאולוגיה לתרבות האדם (רוצה לומר לתרבותו של האדם המערבי בן ימינו) היא מושג "הזמן העמוק" (Deep Time) - מושג שטבע הסופר האמריקאי ג'ון מקפי (John McPhee). כבר נגענו בנושא זה כמה פעמים בשיחותינו, ועוד נחזור לדון בו מזוויות שונות.

ציינו את מהותה ההיסטורית של הגיאולוגיה כמדע, את חשיבותו של הזמן בה, הזמן הארוך מאוד. אמרנו גם כי בסלעים משוכבים יש בידינו כמה מכשירים לקביעה של סדר אירועים, של מוקדם ומאוחר, של גילם היחסי של סלעים. ואף ציינו שני מכשירים עיקריים בתארוך יחסי זה: עיקרון ההרבדה והמאובנים.



איור 26: חתך גיאולוגי סכמטי המדגים יחסים בין סלעי משקע לסלעים מגמתיים וכן אי התאמה ארוזיבית. פירוש סביר לחתך הנצפה: ראשית שקעה (אופקית) סדרת סלעי המשקע המסומנת ב-[1]: אבן גיר (המציצה בפניה השמאלית תחתונה של האיור), מעליה חרסית, מעליה אבן חול, שוב גיר ומעליו חוואר. הסדרה הסדימנטרית בצד ימין של החתך שונה מזו שבצידו השמאלי, אם כי הסדרה חול-גיר-חרסית מופיעה בשני הצדדים. האם מוסתר העתק ביניהם ולכן מצד ימין נחשף חתך עבה יותר הכולל שכבות צעירות יותר? כפי שרואים באיור, לאחר ששקעה סדרת סלעי המשקע חדר אליה גרניט [2]. אז הוטה כל הגוש (או שמא ראשית הוטה ואחר כך חדר אליו הגרניט) ועבר ארוזיה, והארוזיה יצרה מישור, ובאים לידי ביטוי בו אי התאמה ארוזיבית וזוויתית [3]. מעל אי ההתאמה שקעו (שוב אופקית) שכבות של חרסית [4] ושל גיר. ואז עבר שוב האזור ארוזיה, ונוצרה אי התאמה ארוזיבית [5] (אך לא זוויתית), ומעליה שקעה שכבת החול [6]. באי התאמה זו [5] נכיר לא מתוך הפרעת השיכוב האופקי אלא על פי יחסי המאובנים בין שכבה [4] ושכבה [6]. לדוגמה, אם שכבה 4 היא מגיל קמבריום, ושכבה 6 מגיל יורא משמע חסרות בחתך שכבות שגילן אורדוביק, סילור, דבון, קרבון, פרם ואף טריאס (ראו גם איור 24), כלומר חסר כאן כל עידן הפליאוזואיקון, וכן סלעים מגיל טריאס. חסרות כאן אפוא כ-300 מיליון שנים. בסוף חדר מְחָדֵר בעל אופי בזלתי [8] את כל הסדרה. תְּאֹרֶךְ גילם המוחלט (ראו

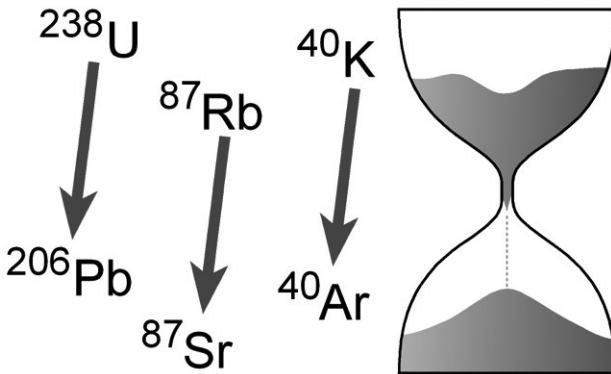
הטקסט להלן) של הגרניט [2] והבזלת [8] יהווה גבול עליון ותחתון לגילה של הסדרה כולה. תָּאָרוֹךְ עשוי לענות גם על השאלה: מתי חדר הגרניט המסומן [7]? ידוע שהוא חדר לאחר הגרניט המסומן [2], אך האם זה התרחש לפני השקעת אבן החול שבסדרה [1]? או שמא הוא חדר מאוחר יותר, וחדירתו נעצרה בחרסית של סדרה [1]?

אבל איך נקבע את גילם של סלעים שאין הם מרובדים וגם אין בהם מאובנים של אורגניזמים כלשהם? (ראו איור 26). כאלה יש רבים ודוגמה להם הם הגרניטים של אזור אילת, ועוד סלעים פלוטוניים רבים (שנקראים, כזכור, על שם אֶל המעמקים הרומי פלוטו). אלה סלעים שלא שקעו במים, ולא נוצרו על פני היבשה, אלא התגבשו מנתך חם מאוד, ממגמה, בעומק רב, בלחץ ובטמפרטורה גבוהים, ולכן אין בהם מאובנים. לא זו בלבד, אלא שבמקרים אלה הסלע הצעיר ביותר הוא זה החודר אחרון מלמטה לתוך סלעים קיימים (ראו איור 26). איך נקבע יחסי גיל בסלעים אלה?

ועוד: **האם נוכל לבטא גיל במושגי זמן המוכרים לנו, בשנים ובימים?** שני מושגי הזמן האלה הם מחזוריים; יום הוא זמן המחזור שבו כדור הארץ סב על צירו, ושנה היא הזמן שבו כדור הארץ מקיף פעם אחת את השמש. ולכן נדע שעברו עשר שנים אם נספור עשר הקפות של כדור הארץ סביב השמש. אך כיצד נספור את ההקפות? היינו רוצים כי בתום כל הקפה יסומן פס על קיר דמיוני, וכך תיווצר אט־אט "טבלת ייאוש", מאלה המוכרות לאסירים או לחיילים ותיקים. במובן מסוים אנו חוזרים כאן להבחנה שבין מחזור הזמן לִחֵץ הזמן. במקום שעון מחזורי אנו זקוקים לשעון חד־כיווני.

משל טוב לשעון כזה הוא שעון החול (ראו איור 27). במכשיר שכזה יש שני תאים - עליון ותחתון, וחול זורם מן העליון לתחתון בקצב ידוע שאינו בהכרח קבוע. גם בשעוני חול שונים הקצב אינו זהה, אך הוא ידוע היטב. אפשר לסמן שנתות על גבי התאים וכן לבנות את השעון בגודל רצוי ובמהירות זרימת חול רצויה, וכך למדוד כל פרק זמן שנבחר על פי הצטברות החול בתא התחתון, על פי גריעת

החול מהתא העליון, או על פי יחס כמויות החול שבין שני התאים (ראו איור 27).



איור 27: "משל שעון החול" הנמשל לתא החול העליון - איזוטופי-אב רדיואקטיבי כגון ^{238}U , ^{87}Rb או ^{40}K . התא התחתון מדמה את איזוטופ הבת היציב, במקרה זה ^{206}Pb , ^{40}Ar , ^{87}Sr (ראו טקסט).

שעון החול הוא המשל, והנמשל הוא דעיכת גרעינים רדיואקטיביים. גרעינים שיש בהם מספר זהה של פרוטונים אך מספר שונה של נויטרונים הם איזוטופים. איזוטופים של יסודות רבים הם רדיואקטיביים, אחרים הם יציבים ואינם דועכים.

אטום רדיואקטיבי הוא אטום שבגרעינו יש צירוף לא יציב של פרוטונים ונויטרונים, וכך הגרעין (שאנו קוראים לו גרעין אב) מתפרק או דועך לגרעין או לאטום אחר (גרעין בת), שהוא יציב יותר.

קצב הדעיכה הרדיואקטיבי תלוי רק באופי הגרעין ובמספר הגרעינים שנוכחים. כלומר, קצב ההתפרקות של גרעינים רדיואקטיביים - ומדובר במספר עצום של גרעינים, מיליוני מיליונים, 10 בחזקת 20 או יותר - תלוי בסוג הגרעין ובמספר הגרעינים ולא בטמפרטורה או בלחץ בהם הם נתונים או בגילם.

גרעיני אטומים אינם מזדקנים. קצב הדעיכה של מיליון גרעיני ^{14}C

שיצרנו זה עתה, למשל במאיץ או בכור גרעיני, זהה לקצב הדעיכה של מיליון גרעיני ^{14}C שנוצרו לפני תקופת הקרח האחרונה (14 הוא מספר הפרוטונים + מספר הנויטרונים = מספר מסה).

קצב דעיכת גרעינים רדיואקטיביים אינו זהה בכל הגרעינים. כל סוג גרעין וקצב דעיכתו. הקצב אף אינו קבוע בכל גרעין, הוא מעריכי (אקספוננציאלי). כלומר בדעיכה רדיואקטיבית אחוז הגרעינים הדועכים ביחידת זמן קבוע, אך לא מספרם. הדבר דומה במהופך לצבירת ריבית דריבית בבנק:

נניח שבהולדת בני אני רוצה לפתוח לו חשבון חיסכון. אני משקיע 10,000 שקל, והייתי רוצה שבבוא היום יוכפל הסכום הבסיסי ובני יקבל מן הבנק 20,000 שקל. דבר זה תלוי כמובן בריבית: אם אקבל 1% ריבית, יוכפל הסכום לאחר 69 שנים, לקראת גיל הפנסיה של בני. אם תהיה הריבית של 5%, יוכפל הסכום כשבני יהיה בן 14, קצת לאחר בר המצווה שלו. ואם אשיג ריבית של 10% הרי שכבר בסיימו את כיתה א', בגיל 7, יזכה הבן בסכום כפול מזה שאביו השקיע. מובן שבעבור שבע שנים נוספות יוכפל שוב הסכום ויעמוד אז על 40,000 שקל. כמה שקלים ייתוספו אפוא בשנה? הדבר תלוי בסכום ההשקעה ההתחלתי ובריבית שעליה סיכמתי עם הבנק.

אם ארצה להשתמש בהשקעתי לצורך מדידת זמן, אוכל בכל זמן שארצה לגשת לבנק לברר כמה כסף נוסף, וביודעי את הריבית - לחשב את הזמן שעבר מאז ההשקעה.

נחזור לעניין הדעיכה הרדיואקטיבית. בדעיכה רדיואקטיבית "הריבית" שלילית, ובמקום זמן הכפלה אנחנו מדברים על זמן מחצית חיים. לגרעינים שונים אוכלוסיות גדולות שיגיעו למחצית ממספר הגרעינים ההתחלתי לאחר פרקי זמן שונים, כלומר הם בעלי מחציות חיים שונות.

באנלוגיה לשעון החול - אוכל למדוד את הזמן שעבר מן הרגע שבחרתי בו להיות רגע "ראשית המדידה", ובתנאי שיתקיימו התנאים הבאים:

- א. אדע כמה חול היה בתא העליון ובתא התחתון ב"ראשית הזמן".
- ב. אמרוד את החול בתא התחתון ובתא העליון, שכן בכל זמן שאת "גילו" ארצה לקבוע כל גרגר בתא התחתון בא מן התא העליון.
- ג. **אבחר בשעון הנכון:** סטופר למדידת זמן השחייה של מייקל פלפס (Phelps), האלוף האולימפי באולימפיאדות אתונה ובייג'ין, ולוחות מחשבי קצין לקביעת יום ביאת המשיח.
- ד. **אוודא שהשעון תקין,** שלא בורח חול מאחד התאים החוצה דרך סדק כלשהו, וגם לא מיתוסף חול, מלבד החול הזורם מן התא העליון לתחתון. במילים אחרות, אוודא שהמערכת סגורה.
- ה. **אגדיר את האירוע הנמדד היטב.** במשל שעון החול: אדע מתי הפכתי את שעון החול: כשהוצאתי ביצה מן המקרר, כשהכנסתי אותה למים או כשהמים רתחו?

גם בנמשל הגיאולוגי יש משמעות לידיעה "מתי הפכנו את שעון החול": כלומר מה אנו מְתַאָּרְכִים. האם את הזמן שבו התקררה המגמה דיה והסלע נעשה מוצק? או את הזמן שבו הסלע חומם שנית ועבר גיבוש מחדש למינרלים חדשים, מה שמכנים מטמורפוזה?

משנתמלאו התנאים הדרושים, נוכל לְתַאָּרְךְ אובייקט כלשהו. איך בוחרים גרעין רדיואקטיבי מתאים לְתַאָּרוֹךְ של אירוע? האם נבחר בפחמן-14 (^{14}C), שמחצית חייו 5,700 שנה, למדידת פרקי זמן ארוכים מאוד? נראה שלא, שהרי לא חשוב בכמה גרעיני ^{14}C התחלנו, אחרי 100,000 שנה לא תיוותר מהם שארית שאפשר למדוד, שלא לומר אחרי מיליון שנה. על כן, העובדה שבאבני הכותל אין פחמן-14 מעידה בביטחון כי גילן של האבנים הללו גדול מ-100 אלף שנה. אם כן, מהו גילן? השעון הזה כבר חדל מפעול. 100 אלף ואלף מיליון - היינו הך הוא לצורך זה. מובן שעובדה זו אינה מלמדת דבר על זמן בניית הכותל, אלא רק על גיל הים שבו שקעו אבני הגיר, שהן אבני הבניין של הכותל.

לעומת זאת נוכל למדוד בעזרת פחמן-14 את גילן של המגילות הגנוזות ונמצא כי הוא בסביבות 2,000 שנה, או את גיל משקעי תצורת הלשון סמוך לים המלח (הסלעים הלבנים שלמרגלות מצדה, לדוגמה) ונמצא כי הם החלו להצטבר לפני כ-70 אלף שנה וכי השקעתם נסתיימה לפני כ-15 אלף שנה.

יש בידינו מבחר לא קטן של שעונים שלהם קצבי פירוק שונים: הפירוק (הדעיכה) הוא מגרעין אב לגרעין בת או באנלוגיה לשעון החול מתא עליון לתא תחתון. אורניום-238 (^{238}U) דועך, כלומר הופך, לעופרת-206 (^{206}Pb), שמחצית חייה ($t_{1/2}$) היא כ-4,500 מיליוני שנים; אשלגן-40 (^{40}K) דועך לארגון-40 (^{40}Ar), שמחצית חייו היא 1,250 מיליוני שנים; רובידיום-87 (^{87}Rb) דועך לסטרונציום-87 (^{87}Sr), שמחצית חייו היא 47,000 מיליוני שנים. ברור על כן כי לא נוכל למדוד בעזרת אורניום-238 הדועך לעופרת-206 את גיל המגילות הגנוזות - מעט מדי השתנה בשעון האטי הזה באלפיים שנה.

מבחר השעונים מאפשר שימוש בשיטות רבות ושונות לתארוך. נוצר כאן מדע חדש ומרתק, הגיאוכרונולוגיה, אשר עוסק בתארוך אירועים שונים מאוד שנתרחשו בתקופות שונות, מקביעת גיל היקום עד קביעת גילן של שוניות אלמוגים מתות.

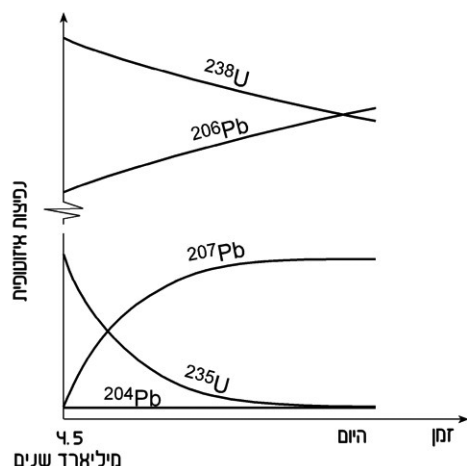
בבחירת השיטה הנכונה הצליחו גיאוכימאים ישראלים לקבוע את גילם של סלעים רבים מאוד. אנו יודעים כיום כי הגרניטים באזור אילת הם בני כ-600 מיליון שנה, הבזלות במכתש רמון בנות 130 מיליון שנה ואילו הבזלות בגליל בנות 13 עד 3.5 מיליון שנה. לגילים אלה, הנקבעים בעזרת שעונים רדיואקטיביים והמבטאים גיל בשנים, אלפי שנים או מיליוני שנים, אנו קוראים "גילים מוחלטים" להבדילם מן הגילים היחסיים שנקבעים בשיטות סטרטיגרפיות.

נחזור לאורניום-238 (^{238}U). זהו האיזוטופ הנפוץ של אורניום. לאורניום איזוטופ נוסף בטבע, אורניום-235 (^{235}U), שמחצית חייו אינה 4,500 מיליון שנה אלא רק 710 מיליון שנה, כלומר חייו קצרים

בהרבה. לכן מרביתו כבר דעכה, והוא מהווה רק 0.7% מן האורניום הטבעי.

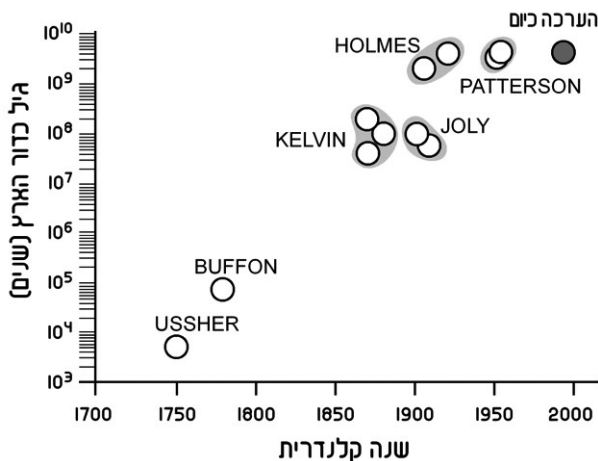
לאורניום-235 תכונה מרתקת: כשמקרינים אותו בנויטרונים הוא מתבקע ומשחרר אנרגיה רבה. על כן הוא חיוני להפעלת כורי כוח גרעיניים, וגם לייצור פצצות גרעין (יש כאן פגיעה בשמו הטוב של היסוד החשוב הזה, אורניום. השאלה החשובה היא מה עושים אתו. הקשר בין גרעין אורניום להירושימה, לנגסקי ולאחמדינג'אד הוא בערך כמו הקשר בין כוח הכבידה לגיליוטינה, שהסכין שבה נופלת בתאוצה ועורפת את ראשו של המוצא (להורג). על כן חשוב להעשיר את האורניום הטבעי באיזוטופ הנדיר ^{235}U לפני שיהיה אפשר לנצלו לייצור של אנרגיה גרעינית. והיתר הלא כתוב מדי שבוע במוספי העיתון העוסקים באיראן ובהעשרת אורניום.

שני איזוטופי האורניום הם זוג יפהפה: שני איזוטופים של אותו יסוד (^{238}U ו- ^{235}U) הדועכים בקצב שונה (כלומר שיש להם מחציות חיים שונות) לשני איזוטופים של יסוד אחר - העופרת (^{206}Pb ^{207}Pb) (ראו איור 28). בטיפול נכון בתכונה מקסימה זו אפשר להגיע להישג אינטלקטואלי עצום של המאה העשרים והוא קביעת גיל כדור הארץ ומערכת השמש. ארתור הולמס, שכבר הזכרנו אותו לטובה בפרק קודם, היה מן הראשונים שניצלו תכונה זו של מערכת האורניום-עופרת לתארוך כדור הארץ. המשיך במפעל זה הגיאוכימאי האמריקאי קליר פאטרסון, שהיה הראשון שקבע את גיל הכדור קרוב מאוד לערך המקובל היום: 4,560 מיליון שנה (ראו איור 29).



איור 28: סכמת דעיכה של שני האיזוטופים של אורניום (U) לשני איזוטופים של עופרת (Pb). שני עקומי הדעיכה כמו גם שני עקומי צמיחת העופרת הם לוגריתמיים - בפרקי זמן שווים דועך חלק (אחוז) קבוע של מספר האטומים שנותרו. מחצית החיים של ^{235}U קצרה יחסית לגיל כדור הארץ (0.71 מיליארד שנה), ואילו מחצית חייו של ^{238}U ארוכה יותר (4.5 מיליארד שנה). על כן האורניום ^{235}U דעך כשכדור הארץ היה צעיר, אז גם גדלה במהירות כמות העופרת ^{207}Pb . לעומתם האורניום ^{238}U מהווה את עיקר האורניום כיום, ועיקר העופרת הנוספת למאגר מתכת זו הוא ^{206}Pb .

4,560 מיליון שנה הוא גילו של כדור הארץ. זו אינה תיאוריה אלא עובדה מדודה. לאחרונה הצליחו לתארך בשיטות דומות את גילם של הגופים המוצקים הראשונים במערכת השמש, והם אותם רכיבי מטאוריטים, כונדריטים, שהזכרנו באחת השיחות. גיל זה נקבע בדיוק מדהים, $4,567.2 \pm 0.5$ מיליון שנים!!! דיוק של מחצית מיליון שנים, בהקשר של מיליארדי שנים. מה משמעותו של גיל זה? זהו הזמן שבו לכדור הארץ ולמטאוריטים, כלומר לגופים המוצקים במערכת השמש, היה הרכב איזוטופי זהה של עופרת. זמן זה מתאים בערך לגיל ההתמצקות של כדור הארץ.



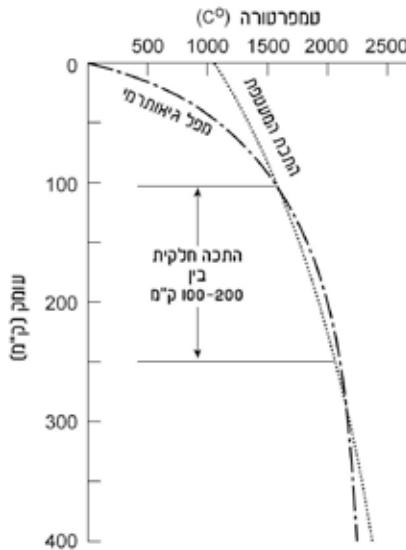
איור 29: השינוי בהערכת גיל כדור הארץ בשלוש מאות השנים האחרונות. שימו לב כי האורדינטה (ציר Y) היא לוגריתמית, כלומר כל יחידה בה היא מכפלה ב-10 של היחידה הקודמת, כך ההערכת הגיל של קלווין היא של כ-100 מיליון שנה, ואילו מהולמס ואילך הוערך הגיל באלפי מיליוני שנים. לא היה שינוי גדול בהערכת הגיל עד 1850. במאה השנים שלאחר מכן השתנתה ההערכה במידה מהפכנית (ההערכה גדלה כל הזמן), ונשארה ללא שינוי בחמישים השנים האחרונות.

אמור מעתה: כדור הארץ הוא בן 4.56 מיליארד שנה. היה מי שאמר כי אין זה מן הנימוס לשאול גבירה כמו אדמתנו לגילה, אך יש מקרים שבהם הסקרנות עולה על הנימוסים הטובים, וטוב שכך.

הרי געש, לְבוֹת - מַגְמוֹת

במסגרת תוכניתנו "הפחד את המאזין" (ובמהדורה המודפסת - הפחד את הקורא) נדון בשיחה זו בהרי געש. הרי מרעידות אדמה כבר הוזהרנו, ועל צרות אחרות אנחנו שומעים מדי שעה בחדשות וקוראים בעיתונים. ובכל זאת, כדי להמתיק את הגלולה, אָמְהַל נושא זה בשיחה על כלל הסלעים המגמתיים, אותם סלעים הנוצרים על ידי התגבשות מתוך נתכים (מגמות הנמצאות בעומק כדור הארץ) ומתוך לְבוֹת (שהן מגמות שהצליחו להגיע לפני כדור הארץ).

באחת השיחות הקודמות הדגשתי כי מעטפת כדור הארץ מוצקה כולה. זאת אנו יודעים מתוך התנהגות הגלים הסייסמיים בעוברם דרכה (ראו איור 13). והנה אני מציין סלעים המתגבשים מנתך, כלומר מנוזל שמקורו בהתכת סלעים אחרים. משפט זה לכאורה מאמת את הרגשתם האינטואיטיבית של רבים כי "שם בפנים" הכול לבה אדומה רותחת. אך שני המשפטים הם משפטי אמת: הכדור מוצק והסלעים המגמתיים מתגבשים מנתך.



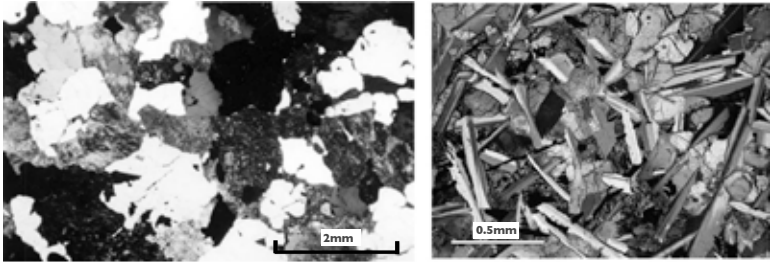
איור 31: המפל הגיאותרמי ועקום התכת המעטפת ב-400 ק"מ החיצוניים של כדור הארץ. העקום הגיאותרמי מראה את שינוי הטמפרטורה עם ההעמקה לפני כדור הארץ. הקו העשוי נקודות נקודות מסמן את הטמפרטורה שבה מותכת המעטפת, כלומר את הופעת הנתך הראשון של המעטפת המוצקה. האזור בין נקודות החיתוך של שני הקווים, שבו הטמפרטורה במעטפת גבוהה מהטמפרטורה הנדרשת להתכת המעטפת, הוא אזור ההתכה החלקית של המעטפת, בקירוב אזור האסתנוספירה.

על פני כדור הארץ רוב הסלעים ניתכים בטמפרטורות של כ- $1,000^{\circ}\text{C}$ עד $1,200^{\circ}\text{C}$. בתוך כדור הארץ ככל שעולה הלחץ עולה גם טמפרטורת ההתכה, כלומר אותה טמפרטורה שבה המוצק ניתך. אמנם גם טמפרטורת הסלעים עולה, ואפילו בקצב מהיר מזה שבו עולה טמפרטורת ההתכה עם הלחץ, אך בתנאים הרגילים השוררים ברוב המקומות הסלעים אינם ניתכים. להתכת סלע דרושים תנאים מיוחדים.

להתכה של סלעים בעומק יש סיבות אחדות: ירידת לחץ, תוספת מים או תוספת חום. נדון בכל אחת מהן:

1. **ירידת לחץ:** במקומות מסוימים, למשל מתחת להוואי או מתחת לרכסים המרכז אוקייניים, סלעי המעטפת המוצקים נעים ועולים כחלק מהזרימה במעטפת. גוש סלעים בגודל של עשרות קילומטרים או יותר אינו מספיק להתקרר תוך כדי עלייתו. עם עליית הגוש יורד הלחץ בו. ועם הירידה בלחץ גם טמפרטורת ההתכה יורדת, ולכן יגיע שלב שבו יתחיל הסלע להינתך. אמרתי "יתחיל" כי סלע אינו ניתן כולו כמו שעווה או קרח. הוא בנוי מכמה מינרלים וניתן על פני טווח טמפרטורות רחב, שעשוי להגיע למאות מעלות. יש מינרלים שניתכים בטמפרטורה נמוכה יותר מאחרים, והרכב הנתך שונה מהרכב הסלע, שניתך רק בחלקו. היה מי שדימה זאת להכנסת עוגיות ובהן שבבי שוקולד לתנור: בשלב מסוים השוקולד יותך אך העוגייה עדיין תהיה שלמה. הדימוי אינו מוצלח במיוחד. טוב ממנו, אך פחות ברור לקהל הרחב, הוא דימוי של מסג (או סגסוגת) של בדיל-עופרת. חוטי הלחמה רבים מורכבים מ-50% בדיל ו-50% עופרת. אך כשמתחילים לחמם, הרי בהגיע המלחם ל- 183°C נוצר נתך ראשון והרכבו 62% בדיל ו-38% עופרת. יתר על כן: ללא קשר להרכבו של המסג המקורי הנתך הראשון הוא תמיד זהה: 62% בדיל ו-38% עופרת.

כמה מן הסלע ניתן? יש מקרים שבהם רק אחוז או שניים ממנו ניתכים, ויש שכמעט כל הסלע ניתן ורק שרידים ממנו נשארים מוצקים. בכל מקרה, הנתך הנוצר הוא המגמה. המגמה צפופה פחות מהסלע ולכן היא עולה. כאשר היא מצטברת היא לוחצת, פורצת סדקים בסלעים ועולה בהם מעלה. לעתים הסדק המלא במגמה (הנקרא דִּיק) מגיע אל פני השטח, והמגמה פורצת דרכו ויוצרת הרי געש וזרמים של לבה (לבה הוא שמה של מגמה שזורמת על פני השטח). הסלעים הנוצרים מהתקררותה של הלבה נקראים סלעים וולקניים על שמו של אל האש הרומי וולקן. יש שהמגמה אינה מצליחה לפרוץ אל השטח, היא מתקררת לאטה בעומק ויוצרת סלעים פלוטוניים, על שמו של פלוטו, אל המעמקים.



איור 32: צילום של בזלת (מימין) וגרניט (משמאל) במיקרוסקופ באור מקוטב. הסלעים מלוטשים עד עובי של 0.03 מ"מ. בעובי כזה הסלע שקוף. שימו לב כי קנה המידה בשני הצילומים שונה: בעוד שגבישי הבזלת כולם קטנים באורכם מחצי מ"מ, גבישי הגרניט מגיעים לגודל של 1.5 מ"מ. גם ההרכב הכימי והמינרלוגי של שני הסלעים שונה.

ניתן להבחין בין סלעים וולקניים וסלעים פלוטוניים על סמך קריטריון פשוט, והוא גודל הגבישים (ראו איור 32): בסלע וולקני כגון בזלת, שאנו מכירים מהגליל, מהגולן וממכתש רמון, הגבישים קטנים מאוד ונראים רק במיקרוסקופ. לעתים חלק מהנתך אף נותר לא מגובש - זגוגיתי. לעומת זאת בגרניט, סלע פלוטוני שאנו מכירים מהרי אילת, הגבישים גדולים למדי, ממדיהם כמה מילימטרים ולעתים גם כמה סנטימטרים. אנו מבחינים בהם גם ללא זכוכית מגדלת. הבזלת התגבשה מהר כשלבה נשפכה על פני השטח, והגבישים לא הספיקו לגדול. לעומתה הגרניט הפלוטוני התקרר אט-אט, משמע התקרר בעומק וגבישיו גדלו.

עיקר הוולקניזם בכדור הארץ מתרחש ברכסים המרכזי האוקייניים, כגון הרכס המרכזי אטלנטי או המזרח פסיפי, שאותם כבר הזכרנו כמה פעמים. סלעי המעטפת העולים ניתכים בשיעור של 5% עד 20% ונוצרת מגמה, והמגמה מתפרצת ומתקררת במהירות לסלע בזלת. סלע זה בונה את קרקעית האוקיינוס. אותה מגמה מתגבשת גם בעומק לסלע גס - גביש המורכב מבזלת ומגֶפְרוֹ (הגברו הוא סלע פלוטוני בעל הרכב של בזלת). הבזלת והגֶפְרוֹ בונים את הקרום האוקייני.

2. **תוספת מים:** הורדת לחץ היא הדרך העיקרית להתיך סלעי מעטפת אך קיימות דרכים נוספות, אחת מהן היא תוספת מים. הוספת מים לסלע מורידה את טמפרטורת ההתכה. סלעי הבולת שבונים את הקרום האוקייני צוברים אל תוכם מים. ה"מסוע" של זרימת המעטפת מסייע את הקרום האוקייני לעבר אזורי הפחתה (ראו איור 14), ושם צונחים סלעי הבולת בחזרה לעומק ומתחממים. החימום מוביל ליציאת תמיסות מימיות ולזרימתן אל סלעי המעטפת שמעל הקרום הנוחת. אם להתכת המעטפת היבשה שמתחת לרכסים נדרשות טמפרטורות של 1400°C - 1300°C , תוספת המים מאפשרת להתיך את המעטפת כבר ב- 1100°C . סלעים בעומק של כמאה קילומטר שמצויים ב- 1200°C היו מוצקים לפני הוספת המים אך ניתכים בעקבות ההוספה. כך נוצרים הסלעים המתפרצים בכל הרי הגעש שמסביב לאוקיינוס השקט (בצפון אמריקה ובדרום אמריקה, ביפן, בפיליפינים, באינדונזיה, וגם אלו שביוון, באיטליה או באיים הקריביים). גם כאן הסלע הנוצר מהתכת המעטפת הוא בזלת. אולם במקרים רבים המגמה מתקררת תוך כדי עלייה, מגבשת לגבישים שונים והרכבה משתנה. במגמה בזלתית יש כ-50% של תחמוצת צורן (SiO_2) - סיליקה - ותוך כדי גיבוש היא עולה ל-60% ולעתים אף ל-70%. המגמה מכילה גם כמה אחוזים של מים שמומסים בתוכה, ולאלו תפקיד נכבד בתהליך ההתפרצות.

"התפקיד" הראשון שממלאים המים הוא הורדת טמפרטורת ההתכה של הסלע. תפקידם השני הוא ריסוק המגמה. גם כאן ליירידת הלחץ תוך כדי עליית המגמה משמעות מרכזית. כאשר הלחץ יורד יכולתה של המגמה להמיס בתוכה מים קטנה, ועודף המים יוצר בועות של אדים בתוך המגמה. התהליך דומה לזה שמתרחש בעת פתיחת בקבוק משקה מוגז; גם במקרה זה כשהפקק נפתח והלחץ יורד, הגז המומס במשקה יוצר בועות והנוזל מקציף. הקצפת המגמה מגדילה את נפחה ודוחפת אותה חזק כלפי מעלה. הגז בבועות מתפשט ובמקרים רבים מביא

לקריעת המגמה. הגז שמשחרר, מתפשט במהירות ומאיץ את שברי המגמה אל פני השטח ואל תוך האטמוספירה. זהו המנגנון של התפרצויות וולקניות אלימות.

3. **תוספת חום:** הקוראים תוהים בוודאי אם מגמה אינה נוצרת פשוט מחימום של סלע. זה נראה לנו פשוט כי אנו חיים על פני כדור הארץ, כלומר בעולם של לחץ קבוע פחות או יותר, אולם בפנים כדור הארץ קל יותר להעלות על הדעת שינוי לחץ בעקבות התנועה של סלעי המעטפת (כחלק מהקונבקציה במעטפת). קשה למצוא מקור חום שיחמם סלע אחד יותר ממשנהו. אף על פי כן יש אזורים שבהם נוצרות התכות עקב חימום, וזו כאמור הסיבה השלישית ליצירת נתכים.

סלעי הקרום היבשתי עשירים בסליקה ובמים וניתכים בטמפרטורות של 700°C – 900°C בערך, בעומק העולה על 1.5 ק"מ, ולעתים בעומק רב הרבה יותר. בזלות העולות מהמעטפת ומצטברות מתחת לקרום, או פורצות לתוכו ונעצרות בעומק, הן חמות דיין (1200°C) כדי לחמם את סלעי הקרום ולהביא להתכתם. המגמה הנוצרת מהתכה של סלעי קרום עשירה מאוד בסליקה וצמיגה מאוד. אמנם תכולת המים הגבוהה מקטינה את הצמיגות, אך עדיין היא גבוהה בהרבה מזו של בזלת, ולמגמה קשה להיחלץ מהקרום. בדרך כלל היא אינה מגיעה אל פני השטח אלא מתקררת ומתמצקת בעומק הקרום. הסלע שנוצר הוא גרניט, וכבר ציינו שגבישיו גדולים. אמנם הגרניטים נוצרים בעומק, אך הם עולים לפני השטח בעקבות התרוממות של הקרום והסרה בבליה של הסלעים שמעליהם. באזורנו הם נחשפים כאמור באזור אילת, בסיני ובדרום ירדן. ככלל אלו הם הסלעים המגמתיים הנפוצים ביותר בקרום היבשתי, לעומת הבזלת והגברו הבונים את הקרום האוקייני. הסיבה לתפוצתם הרבה של שני הרכבי סלעים אלה היא היותם הנתך הראשון שנוצר בהתכת סלעים נפוצים (היזכרו במשל שהובא לעיל שבו הנתך הראשון תמיד זהה: 62% בדיל ו-38% עופרת), הבזלת (הוולקנית) היא נתך חלקי ראשון של מעטפת, ואילו הגרניט (הפלוטוני) הוא נתך ראשון של קרום

רטוב. ההרכב השונה (ובעיקר תכולת תחמוצת הצורן, הסיליקה) מביא לצמיגות שונה. המגמה הבולתית הלא־צמיגה, הנוזלית יותר, פורצת ויוצרת סלע וולקני. המגמה הגרניטית צמיגה לרוב, אינה מצליחה לפרוץ לפני כדור הארץ ומתגבשת בעומק כסלע פלוטוני. גם מגמות בהרכב גרניטי מצליחות לעתים להתפרץ. יש שהמגמה מצטברת בעומק רדוד (קילומטרים בודדים) ומשם נשלח סדק אל פני השטח ונפתח צינור וולקני שבו יכולה המגמה לעלות ולהתפרץ. לעתים ההתפרצות וירידת הלחץ במאגר התת־קרקעי של המגמה, המכונה תא המגמה, מובילים להתמוטטות תקרתו של התא ולהתפרצות גדולה של רוב המגמה שנאגרה בו. התוצאה היא שקע גדול, דמוי קְדֵרָה, המכונה קְלֵדְרָה. קלדרה מוכרת לרבים היא זו שנוצרה מהתמוטטות הר הגעש תֶּקָה באי סנטורני שביוון לפני כ-3,650 שנה. ההתמוטטות לוותה בחדירתם של מי ים אל תא המגמה ובפיצוץ שפלט שפע אפר וולקני (מגמה מרוסקת). האפר הוולקני קבר את היישוב באי ושלח גלי צונאמי, ויש אומרים כי הם פגעו והחריבו את מרכז התרבות המינואית באי כרתים. ייתכן ששקיעת מרכז האי, כלומר יצירת הקלדרה והתמלאותה במי הים, היא ששימשה בסיס לאגדת אטלנטיס. בארכיון הגיאולוגי מוכרות קלדרות רבות, רובן בגודל של כמה קילומטרים. אלו מעידות על התפרצויות אשר פלטו קילומטרים מעוקבים אחדים של אפר וולקני. חלק מהחומר נשבר לגושים בגודל של סנטימטרים אחדים - פומיס. סלע וולקני זה הוא נקבובי מאוד עד כי הוא צף על פני המים. משתמשים בו בתעשיית הַמְלֵט, וכן כחומר שחיקה - החל בשפשוף מכנסי ג'ינס כדי שייראו משומשים ובלויים וכלה בהסרת עור קשה מעקבי רגליים. אבני פומיס מאותה התפרצות של סנטורני שהזכרתי הגיעו בציפה אף לחופי הארץ.

יש התפרצויות געשיות גדולות יותר. בהתפרצות הר הגעש פִּינְטוּבוֹ ב-1991 נפלטו כ-8-10 ק"מ מעוקבים של סלעים ואפר. ההתפרצות יצרה ענן של אפר ואֵירוֹסוֹלִים (תרחיף של טיפות קטנות של חומצה או של תמיסות מרוכזות אחרות), והוא סבב את כדור

הארץ כולו (בחצי הכדור הצפוני) והביא לירידה של כחצי מעלה בטמפרטורה הממוצעת של אותה שנה. אצלנו בישראל היתה זו שנה גשומה במיוחד.

יש גם התפרצויות-על (סופר התפרצויות), התפרצויות ענקיות, כמו אלו שאירעו בילוסטון (Yellowstone) שבצפון-מערב ארצות הברית לפני 0.6, 1.2 ו-1.8 מיליוני שנה. התפרצויות אלה יצרו קלדרות בשטח של מאות קמ"ר ופלטו בסך הכול כ-7,000 ק"מ מעוקב של חומר. ללא כל ספק היתה להתפרצויות אלו ולדומותיהן השפעה הרסנית על אמריקה הצפונית. סביר שהן לוו בירידה של כמה מעלות בטמפרטורה בכל חצי הכדור הצפוני.

אירועים כאלו מסכנים את קיום הציוויליזציה האנושית כולה. ילוסטון והקלדרה של קמפי פלגרי (Campi Flegrei), שמצפון לנפולי שבאיטליה, הם דוגמאות מוחשיות לאירועים שמתרחשים מדי כמה עשרות אלפי שנים ומותירים את עקבותיהם ברישום הגיאולוגי. אירועים גדולים פחות (כמו פינטובו או סנטורינו) תדירים יותר, והתפרצויות שפולטות אפר במשך יום או יותר קורות גם כיום כמעט מדי שבוע. רובן מתרחשות במקומות מרוחקים ומהוות סיכון רק לתנועת מטוסים, אך לעתים יש צורך גם בפינוי של תושבים שחיים בקרבת הר הגעש.

ב-1991 פונו כרבע מליון איש מאזור הפינטובו, וחיים רבים ניצלו. גם בקבול (Rabaul) שבגינאה החדשה, בהר סנט ה'לן שבארצות-הברית ובמונטסֶרַט (Montserrat) שבאיים הקריביים הצליחו הוולקנולוגים (חוקרי הרי הגעש) להתריע בזמן ולהביא לפינוי תושבים מאזורים מסוכנים. ההתרעות ניתנות על סמך אירועים סייסמיים - רעידות אדמה חלשות - המלווים את תנועת המגמה, על סמך התנפחות הרים ועל סמך שינויים בכימיה של מי מעיינות ושל גזים שפורצים מסדקים לפני ההתפרצות. הרי געש "מפטפטים" סייסמית כל הזמן. קצב הפטפוט גובר לפני התפרצויות. כיום אנו מנסים לא רק לנטר את קצב הפטפוט, אלא גם להבין את שפתו כדי שנוכל לשפר את יכולת ההתרעה. כלומר בניגוד למקרה רעידות

האדמה, יכולת ההתרעה מפני התפרצויות וולקניות אינה רעה, וכנראה עוד תשתפר.

כפי שהזכרנו כשעסקנו ברעידות אדמה, גם פעילות וולקנית מתרחשת בעיקרה לאורכם של גבולות הלוחות. בזלת נשפכת בעיקר לאורך גבולות פתיחה - רכסים מרכז אוקייניים. בגבולות התנגשות, בעיקר בהתנגשות בין לוח אוקייני ולוח יבשתי, כלומר באזורי הפחתה, הלוח האוקייני נוחת אל מתחת ליבשת וסוחף איתו גם קרקעית אוקיינית, גם במקרה זה כאמור התפרצויות וולקניות מלוות את ההפחתה.

לסיכום, למדנו כי הטמפרטורות בפנים כדור הארץ מאפשרות התכה רק במקומות מסוימים. הסיבות ליצירת מגמות הן הורדת לחץ מסלעים חמים, הוספת מים וכן חימום סלעי קרום כדור הארץ על ידי בזלות שמקורן במעטפת. התכת סלעי מעטפת יוצרת נתכים בעלי הרכב בזלתי, והם מתקררים לבזלת וגִּבְרוּ ברכסים האוקייניים ובנקודות חמות. התכת סלעי קרום מובילה בדרך כלל ליצירת גרניטים. מגמות בעלות הרכב גרניטי הן צמיגות, עולות לאטן ובדרך כלל מתמצקות בעומק. אם המגמה הגרניטית מתפרצת, בועות מים שנוצרות בתוכה מובילות להתפרצות אלימה ולפיזור אפר ופומיס על פני שטח גדול. התפרצויות כאלו משפיעות על האטמוספירה, והתפרצויות ענקיות, שלמזלנו לא אירעו בזמנים ההיסטוריים, עשויות להביא לשינוי אקלים קיצוני (למשך שנים בודדות), שינוי שעלול להפר את השלווה היחסית שבה אנו חיים כיום.

פליאוי־אקלים

באחת השיחות הראשונות הזכרנו את שתי "מכונות החום" המניעות את כל התהליכים בכדור הארץ: החום הפנימי של הכדור, שהוא המנוע הטקטוני, הבונה הרים ומסיע לוחות, וחום השמש, שהוא המנוע המאדה מים, מניע רוחות והורס הרים. מרבית שיחותינו הוקדשו לפעולותיה של מכונת החום הפנימי: רעידות אדמה, הרי געש, המבנה הפנימי של הכדור, תנועת הלוחות. בשיחה זו אנסה לפצות קצת את השמש על קיפוחה. מרק טוויין אמר שהכול מדברים על מזג האוויר, ואיש אינו עושה דבר בעניין... אהיה גם אני אחד המדברים.

מה שאנו רואים וחשים בחוץ הוא **מזג האוויר**. הוא כולל את הטמפרטורה שבחוץ, הלחות, הרוחות, הקאות. **האקלים** הוא ממוצע של מזגי האוויר על פני תקופה ממושכת. מזג האוויר נקבע מדי יום על ידי שינויים בטמפרטורה, בלחות האוויר ובצפיפותו. אלו קובעים את השינויים היומיים בלחץ האוויר, וזה מכתיב את משטר הרוחות ואת תנועות מסות האוויר.

את האקלים באזור מסוים קובעים מיקומו על פני כדור הארץ, השינויים ביחסים בין כדור הארץ לשמש, וכן גורמים מקומיים ובעיקר טופוגרפיה. מכיוון שאני גיאולוג, לא נעסוק הרבה באקלים דהיום. כמו שעסקנו בשיחות קודמות בפליאור־מגנטיות ולא

במגנטיות של היום, כך נעסוק בשיחה זו בפליאו-אקלים, באקלים העבר.

הנתונים הבסיסיים ביותר של כל משטרי האקלים על פני כדור הארץ הם כמות קרינת השמש שהכדור מקבל והולכת החום על פני הכדור. השמש היא כוכב צהוב שכמחצית מהאנרגיה שהוא פולט היא בתחום הנראה (זה לא מקרה, העין שלנו הסתגלה אבולוציונית להגיב לתחום זה של ספקטרום השמש). כל מטר מרובע של כדור הארץ מקבל בשנה כ- 340 W (ואט) אנרגיה. מכיוון שהטמפרטורה הממוצעת של הכדור נשארת קבועה פחות או יותר, אנו יודעים כי הכדור פולט בממוצע אותה כמות אנרגיה - 340 W/m^2 (ואט למטר מרובע). אילו לא היתה לכדור שלנו אטמוספירה, הרי האוקיינוס הכחול, כיפות הקרח הלבנות והעננים הלבנים היו מחזירים חלק גדול מאוד מהאנרגיה הפוגעת. טמפרטורת פני השטח היתה מגיעה במקרה כזה למינוס 19 מעלות צלזיוס(!), וכל האוקיינוסים היו קופאים. למעשה, הטמפרטורה הממוצעת על פני השטח היא $+14$ מעלות צלזיוס. הבדל זה של 33 מעלות הוא תוצאה של "אפקט החממה", שהרבה מדובר בו היום. אפקט זה נגרם על ידי גזי החממה. גזי החממה הם אדי מים, פחמן דו-חמצני (CO_2), מתן (CH_4), חמצן דו-חנקני (N_2O) ואוזון (O_3) הנמצאים באטמוספירה בריכוזים נמוכים וכן 78% חנקן וכ-21% חמצן. גזים אלו קולטים את הקרינה ארוכת-הגל (באינפרא אדום) החוזרת מכדור הארץ והופכים אותה לחום, וכך גורמים לטמפרטורה של כדור הארץ להיות גבוהה יותר ב-33 מעלות מן הצפוי בכדור חסר אטמוספירה. בנוסף לכמות האנרגיה שקולט כדור הארץ מושפע האקלים גם מצורת החלוקה של אנרגיה זו על פני הכדור. הכמות הגדולה ביותר של קרינת שמש מוקרנת באזור קו המשווה. הקטנה ביותר - בקטבים. הרוחות וזרמי האוקיינוס הם המובילים את החום מקו המשווה לעבר הקטבים. כיצד מיוצב אקלים כדור הארץ כך שאפקט החממה מעלה את טמפרטורת פני השטח ב-33 מעלות? התשובה לשאלה זו סבוכה מאוד. מספר רב של היוזונים חוזרים (Feedbacks) חיוביים ושליילים

משפיעים כאן, ולא כולם ברורים. מחד גיסא, העלאת הטמפרטורה על ידי גזי החממה מגדילה את כמות אדי המים באוויר, ואלה, בהיותם גז חממה, מעלים את הטמפרטורה עוד יותר. זה היזון חוזר חיובי. מאידך גיסא, עם עליית הטמפרטורה גם נוצרים יותר עננים, ואלה מחזירים קרינת שמש, וכך הטמפרטורה יורדת - והרי לפנינו היזון שלילי. וזוהי רק דוגמה אחת. קיצורו של דבר, קשה מאוד להבין את מערכת האקלים. קשה עוד יותר לחזות שינויי אקלים, בעיקר בימינו. אילוצים של המערכת, כגון פעילות האדם ובעיקר שריפת פחם ונפט, מעלים את ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה ובכך מגבירים את אפקט החממה. בניסיונות לחזות שינויים אקלימיים בעתיד נצטרך לשנות קצת את ה"קביעה" שקבענו בתחילת סדרת שיחות זו. אמרנו כי "ההווה הוא מפתח לעבר" אבל אפשר לומר גם ש"העבר הוא מפתח לעתיד". רוצה לומר: לימוד שינויי האקלים בעבר הגיאולוגי יעזור בפענוח שינויי האקלים הצפויים בעתיד. זוהי אחת הסיבות לעניין הרב שמגלה הקהילה המדעית והסביבתית במחקרים אלו.

אכן אקלימי העבר היו שונים מהאקלים העכשווי. העדויות לכך הן רבות. למשל, בתקופת הקרטיקון (שנמשכה מ-145 עד 65 מיליון שנה לפני זמננו) חיו דינוזאורים בחוג הארקטי ותנינים באזור סיביר. נמצאו מאובנים המעידים על כך. גם בארץ אנו מוצאים עדויות לכך שהאקלים בעבר הגיאולוגי היה שונה: שכבה של חרסית דמוית צור שגילה כ-200 מיליון שנה נמצאה במכתש רמון, והיא כנראה קרקע עתיקה מאובנת, עשירה באלומיניום (לטריט) ונחשבת למוצר בליה אופייני של אקלים טרופי.

שינויי האקלים הדרמטיים ביותר הם הופעתן של תקופות קרח. אלה תקופות שבהן כדור הארץ מתקרר, ומים מועברים מהאוקיינוסים אל כיפות הקרח שבקטבים ובסביבתם. כמו כן עולה אז כמות הקרח הימי, ושלג רב יורד על היבשות בחורף, רב מזה המפשר במשך הקיץ. לכן מצטברים קרחונים יבשתיים. תקופת הפליסטוקן (שהחלה כ-2.6 מיליון שנה לפני זמננו) מאופיינת במחזוריות ברורה

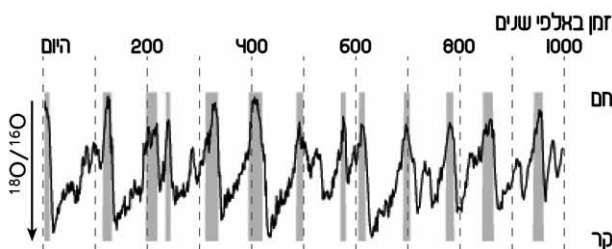
(20 מחזוריים בערך) של תקופות קרח קרות (גלציאלים), ושל תקופות בין-קרחוניות חמות יותר (אינטר-גלציאלים). תקופת הקרח האחרונה נסתיימה בנסיגת הקרחונים הגדולה לפני כ-14,000 שנה. בשיאה, לפני כ-21,000 שנה, היה נפח הקרח על פני הכדור כמעט פי שלושה מנפחו היום. קרחונים כיסו חלק גדול מחצי הכדור הצפוני (צפון אירופה וצפון אמריקה).

להצטברות הקרח היו תופעות נלוות: המים שהצטברו בקרחונים לא הגיעו לאוקיינוסים. על כן ירד מפלס מי האוקיינוס בכ-120 מטר. בין היתר נחשף מצר פרינג שבין אלסקה וסיביר, ואיפשר בכך נדידת בעלי חיים מאירואסיה לאמריקה.

דרך כמותית להערכת שינויי טמפרטורה בעבר הגיאולוגי נמצאה במחקרי ההרכב האیزוטופי של היסודות חמצן ומימן. נזכור כי דרך כמותית למדידת זמן קשורה בהרכב האیزוטופי של היסודות הכבדים - הרדיוגניים עופרת, ארגון וסטרונציום - ובהרכבם האیزוטופי של אבותיהם הרדיואקטיביים - אורניום, אשלגן ורובידיום. כאן נדון באיזוטופים יציבים של יסודות קלים. לחמצן שלושה איזוטופים יציבים, לא רדיואקטיביים, כלומר איזוטופים שמספר הנויטרונים בכל אחד מהם שונה, אך בכולם הגרעינים נשארים יציבים ולא מתפרקים. אלה הם חמצן-16 (^{16}O), הנפוץ, חמצן-17 (^{17}O) וחמצן-18 (^{18}O), שנמצא בכדור הארץ בערך ביחס של 1 ל-500 לחמצן-16. מדידת היחסים בין איזוטופים אלה בקרח או בקונכיות גיריות מאפשרת לשחזר את הטמפרטורות ששררו בזמנים קדומים.

נתחיל בקרח. הרולד יורי (Urey), סם אפשטיין (Epstein) וחוקרים נוספים מצאו כי השוואה בין הרכבם של אדי מיס להרכבם של מיס נוזליים שנמצאים איתם בשיווי משקל, מראה שבאדי המים יש קצת פחות מהאיזוטופ ^{18}O . לכן בגשם יש פחות ^{18}O מאשר בים. ומכאן גם הקרח מדולדל ב- ^{18}O ביחס למי האוקיינוס. על כן בתקופה גלציאלית (קרחונית), כשקרח, שהוא דל ^{18}O , מסולק מהאוקיינוס, מתעשר האוקיינוס ב- ^{18}O . חוקיות דומה נצפית ביחס למרכיב השני של המים (H_2O) - המימן. אלא שכאן אדי המים והקרח

מועשרים במימן ביחס למימן כבד ^2H (דאוטריום). כלומר בהגדלת נפח הקרח בתקופה קרחונית מתעשר האוקיינוס ב- ^{18}O ובדאוטריום, ואילו הקרח מתעשר יחסית ב- ^{16}O וב-H (מימן רגיל). מדידת יחסי $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ויחסי $^2\text{H}/\text{H}$ בקרח עתיק, מהווה פליאותרמומטר: ריכוז גבוה יותר של ^{18}O הוא סימן לאקלים קר יותר. הרוסים, וגם האמריקאים והאירופים, קדחו בקרח האנטרקטי⁴, וכן בקרחון של גרינלנד (קידוח אירופי ואמריקאי), עד לעומק שבו גיל הקרח כ-800 אלף שנה. בדיקה של ההרכב האיזוטופי של מימן וחמצן והצגה גרפית של הרכבים אלה מול גיל הקרח מראה התבנית של "שן-המשור" (ראו איור 33). השינויים בהרכב האיזוטופי משקפים את המעברים מגלציאל (תקופה קרה) לאינטרגלציאל (תקופה חמה יותר) וחוזר חלילה.



איור 33: שינוי ביחס בין ^{18}O ל- ^{16}O בגלעין מתוארך של קרח אנטרקטי. השינויים משקפים את שינויי הטמפרטורה על פני כדור הארץ. ציר ה-Y כאן הפוך: היחס $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ עולה כלפי מטה (כמסומן בחץ). ציר X הוא ציר הזמן. כל מחזור בגרף משקף מחזור של גלציאל (תקופת קרח) - אינטרגלציאל (תקופה בין-קרחונית). בכל מחזור ההתקררות אל שיא התקופה הקרחונית אטית, ואילו ההתחממות מהירה מאוד, מכאן תבנית שן המשור.

הטמפרטורה יורדת לאט יחסית, והטמפרטורה הנמוכה ביותר שוררת בשיאה של תקופת הקרח, אך היא עולה מהר מאוד בעת

4 הקידוח הרוסי מכונה וסטוק, האמריקאי Dome-C, והאירופי EPICA.

הפשרת הקרחונים. את המחזוריות הזאת ניסו להסביר בגורמים רבים. ההסבר המוצלח ביותר הוא כנראה זה שהציע לראשונה הגיאופיזיקאי הסרבי מילנקוביץ', ועיקרו שינויים מחזוריים בכמות החום שכדור הארץ מקבל מהשמש. כמות אנרגיה זו משתנה בהתאם לשינויים במסלולו של כדור הארץ סביב השמש - יש שהוא מעגלי יותר ויש שהוא אליפטי יותר; כך משתנה המרחק בין כדור הארץ והשמש. השינוי מחזורי, ואורך המחזור הוא כ-100,000 שנה. שינוי אחר ביחס בין כדור הארץ והשמש הוא שינוי מחזורי בנטיית ציר כדור הארץ ומישור הסיבוב שלו. זמנו של מחזור זה 41,000 שנה. נוסף על שני אלה ציר כדור הארץ סובב במקום בתנועה דמוית סביבון ש"רוקד", ומחזור סביבוני כזה נמשך 23,000 שנה. שלושת מחזורי מילנקוביץ' - של 100 אלף שנה, 41 אלף שנה ו-23 אלף שנה - זוהו בהיסטוריה של סדימנטים אוקיאניים משני מיליון השנים האחרונות, וגם בגלעיני הקרח של אנטרקטיקה וגפןלנד, שגילם כמה מאות אלפי שנים. השינויים בטמפרטורה משיא של תקופת קרח לשיא של תקופה בין-קרחונית מוערכים ב-6 עד 8 מעלות צלזיוס. בגלעיני הקרח נלכדו בוועות אוויר, ומדענים הצליחו לבדוק את הרכבו הכימי של האוויר ה"מאובן" בהן. מתברר כי בתקופות הקרח הריכוז של גזי החממה CO_2 ומתן היה נמוך יותר מאשר בתקופות הבין-קרחוניות. ההבדלים האלה בריכוז CO_2 אינם הסיבה למחזורי הקרחונים, כאמור הסיבה היא כנראה אסטרונומית. אך השינויים בתכולה זו של CO_2 ודאי משפיעים על הטמפרטורה הגלובלית - שוב עניין של היזון חוזר.

לפני תקופת הפליסטוקן (לפני כ-2.6 מיליון שנה) היו עוד כמה תקופות קרחוניות בכדור הארץ: למשל, לפני כ-630-850 מיליון שנה (הפרה-קמבריום) ולפני 430-460 מיליון שנה (תקופת סילור-אורדוביק), וכמה אירועים קרחוניים התרחשו בין 350 ל-260 מיליון שנה לפני זמננו (תקופת קרבון-פרם). בעשורים האחרונים עוררה פולמוס רב ההיפותזה כי לפני 650 מיליון שנה בערך היה כדור הארץ כולו - אף באזור המשווני - קפוא. מצב זה כונה "ארץ כדור

שלג" (Snowball Earth). סביר שבמרבית תולדותיו לא היה בכדור הארץ קרח.

מלבד אותם בעלי חיים וצמחים המעידים על אקלים חם בקווי רוחב גיאוגרפיים גבוהים, יש עוד עדות חזקה מאוד לשינויי טמפרטורה בעבר הגיאולוגי. ושוב באים לעזרתנו איזוטופים של חמצן. כאמור, גם הרכבו האיזוטופי של שלד גירי (הבנוי מקרבונט הסידן) יכול להיות מד טמפרטורה. כאשר שוקע שלד גירי (כגון קונכייה) במי ים, היחס בין ^{18}O ל- ^{16}O בשלד גבוה יותר מן היחס ביניהם במי הים. בכמה גבוה? תלוי בטמפרטורה שהשלד נוצר בה. ככל שהטמפרטורה עולה, כן קטן אחוז ^{18}O בשלד, וכן נעשה היחס בין שני האיזוטופים של חמצן בקונכייה דומה יותר ליחס ביניהם במי הים. בדיקות בשיטה איזוטופית זו הראו באופן בלתי תלוי כי טמפרטורות מי הים לפני 100 מיליון שנה, כלומר בתקופת הקרטיקון, שבה שקעו, לדוגמה, כל סלעי הרי ירושלים ומדבר יהודה, היו באופן משמעותי גבוהות יותר מזו היום. העולם כולו היה חם יותר, וגם שוויוני יותר: משמע ההבדל בטמפרטורה בין קו המשווה לקטבים היה קטן יותר משהוא היום (30°C בערך). הקטבים היו חמים יותר ב- 20°C בקירוב. מאז הלך העולם והתקרר, וההבדלים בין הקטבים לאזור הטרופי הלכו וגדלו.

מה היתה הסיבה לאקלים הקרטיקוני החם יותר? על כך עדיין נמשך הדיון. אך אין כמעט ספק שבמידה רבה גרם לכך הרכב שונה של האטמוספירה הקרטיקונית. היה אז הרבה יותר CO_2 באוויר. בכמה יותר? יש מעריכים בין פי ארבעה לפי שמונה. אמנם לא מדובר בנפחים עצומים: היום יש באוויר כ-350 נפחים של CO_2 למיליון נפחים של אוויר. כלומר CO_2 המוכל במטר מעוקב (קוב) של אוויר ימלא בקירוב בקבוק בירה (שנפחו 350 סמ"ק) בלחץ אטמוספירה אחת. מסתבר כי אילו דגמנו מטר מעוקב של אוויר בקרטיקון, היה ה- CO_2 שבו ממלא בקבוק גדול של מים מינרליים שנפחו כליטר וחצי.

אנחנו יודעים כיום, על סמך הבנת הפיזיקה של האטמוספירה

והודות לניסיון שהצטבר בחמישים השנים האחרונות, כי עליית ריכוז ה- CO_2 באוויר גורמת להתחממות כדור הארץ. והנה ניתוח העבר הגיאולוגי מאשש סברה זו. תאמרו: מה נורא כל כך? כבר היו זמנים, כגון הקרטיקון, שבהם היה יותר CO_2 באטמוספירה והיה אף חם יותר! זה נכון, אלא שאז לא היו בני אדם על כדור הארץ ולכן זה לא הפריע להם. יתר על כן, בעבר הגיאולוגי השינויים בריכוז CO_2 באטמוספירה היו אטיים. במאה השנים האחרונות אנו מעלים ריכוז זה במהירות רבה הרבה יותר. האם אנו באמת רוצים לבדוק אם ילדינו ונכדותינו יסתגלו לשינויים כאלה בקלות?

“בשביל מה זה טוב?”

בתריסר השיחות שהיו לנו עד כה סקרנו מבחר של נושאים בגיאולוגיה - ראינו כיצד פועלת טקטוניקת הלוחות ואיך מתרחשות רעידות אדמה והיכן. ראינו גם כיצד ניתכות מגמות ומתפרצים הרי געש. כמו כן ניסינו לענות על שאלות כמו מנין לנו מה היו אקלימי העבר ומנין לנו מה גילם של סלעים ומה גילו של הכדור. עסקנו במידת מה גם בהתפתחותה של המחשבה הגיאולוגית: דיברנו על קטסטרופיזם מול אוניפורמיטריאניזם, ועל תיאוריות שונות העוסקות בתנועות אופקיות בכדור הארץ, מנדידת היבשות ועד תורת הלוחות.

בכל אלה הדגשתי את היופי ואת הקסם שבהבנת הדברים. כמה נפלא הוא הדבר, שאנו מסוגלים לקבוע בדיוק רב מאוד את גילו של כדור הארץ, את גילה של מערכת השמש או את מבנהו של כדור הארץ בעומק כה רב של למעלה מ-6,000 ק"מ.

עם זאת, לא הדגשתי די את ההיבט היישומי של הדברים, לא עסקתי די בשאלה “בשביל מה זה טוב?” אקדים ואומר: אינני מצטדק אף לא מתנצל. אינני מצטדק כי אינני מנסה לומר שראוי ללמוד על רעידות אדמה רק מפני שכך נדע לבנות מבנים שסיכוייהם לשרוד רעידות אדמה רבים יותר. חשוב ללמוד עליהן גם מפני שכך נוכל להבין תופעת טבע מופלאה, כך נוכל להבין את המבנה של פנים

כדור הארץ. ובכל זאת טוב לדעת כי יש למה שלמדנו גם היבט יישומי חשוב. למדנו, למשל, היכן הסבירות לרעידות גבוהה יותר והיכן היא פחותה, והדבר מאפשר לנו להתגונן מפניהן באזורים מועדים. גם אם אינני מתנצל - אינני מנסה להיות טהרן, שרוצה כי הידע שהוא רוכש לעולם לא יועיל לאיש. היותו של הידע הגיאולוגי לא רק מרתק מבחינה אינטלקטואלית, אלא גם בעל היבטים יישומיים. בשיחה זו נעסוק אפוא בהיבטים היישומיים של ידע זה.

היישום הבסיסי ביותר של ידע גיאולוגי הוא בחיפוש אוצרות טבע. עד ראשית המאה העשרים חיפשו כמעט רק מתכות למיניהן: נחושת, ברזל, בדיל, אבץ, כסף וזהב. בתייהספר הראשונים לגיאולוגיה נוסדו באזורי המכרות של אירופה, בראש ובראשונה בסקסוניה שבגרמניה. אזורי מכרות היו ידועים היטב מימי קדם: בקפריסין (וגם בתמנע) היו מכרות נחושת, בקורנוול מכרות בדיל, בסקסוניה מכרות כסף, בשוודיה מכרות ברזל. גם אבני בניין היו מצרך מבוקש למדי בעת שהתפתחו התרבות והכלכלה של האנושות, וגם כרייתן במחצבות הצריכה לא מעט ידע. מאמצע המאה התשע-עשרה החלו להתעניין גם במיקומם של מכרות פחם, ומסופה של מאה זו הפך הנפט (ואחר כך הגז) למוצר הטבעי המבוקש ביותר, שגם במצוד אחריו נזקקו לעזרת גיאולוגים.

היום אין כמעט יסוד בטבלה המחזורית שאין לו שימוש טכנולוגי, והטבלה כוללת גם יסודות שרבים בקושי שמעו את שמעם: גרמניום (Ge) הוא מרכיב חשוב בייצור מוליכים למחצה, ובייחוד טרנזיסטורים; אירופיום (Eu) משמש לייצורם של לייזרים, ושל חומר זורח במסכי טלוויזיה צבעונית; צריום (Ce) משמש לריתוך והוא מרכיב חשוב בסגסוגות פלדה.

את כל אלה למדו האנשים למצוא בסביבות גיאולוגיות שונות: יסודות קוֹרֵט רבים - כלומר יסודות הנמצאים בסלעים בריכוז הנמוך מ-100 גרם לטונה - מופיעים פעמים רבות בעורקים שבתוך סלעים מגמתיים. במקרים רבים אלה עורקים הידרותרמליים, כלומר עורקים שהמינרלים בתוכם שקעו מתוך תמיסות של מים

חמים. לעתים יש קשר בין עורקים כאלה לבין מְחַדְרִים מגמתיים שבהם מתגבשים סלעים, על פי רוב גרניטים.

כדי שריכוזים של מתכות ואל-מתכות יהפכו לִבְצָר, הם צריכים לעמוד בקריטריון כלכלי: ריכוזם צריך להיות כזה שיהיה אפשר להרוויח מהפקתם. מהו ריכוז זה? הוא משתנה עם שינויים החלים הן בטכנולוגיה הן בכלכלה. כך לפני 6,000 שנה היו רק גושי נחושת מתכתית נקיה או ברזל מתכתי בעלי עניין כלכלי לאדם. כמות המתכת שנמצאה באתר היתה בעלת חשיבות משנית. היום פחות מחצי אחוז נחושת בסלע הופך אותו לִבְצָר נחושת הראוי לניצול, בתנאי שיש זרבות מספיקות המצדיקות הקמת מפעלי העשרה באתר. נחושת צריכה להיות מועשרת בִּבְצָר בערך פי מאה מתפוצתה הממוצעת בקרום כדור הארץ, שבו יש ממנה בערך שש אלפיות האחוז (כ-60 גרם נחושת לטונה סלע). ברזל שתפוצתו הממוצעת בקרום היא כ-6% יהפוך לִבְצָר בתנאים העכשוויים של מיצויו מן העפרה, הובלתו ומכירתו, רק בתנאי שריכוזו יהיה כ-50% ממשקל הסלע, כלומר אם הטבע יעשירו בערך פי עשרה. כספית, אשר בסלעי הקרום תמצאו רק 2 מאיות גרם לטונה ממנה, צריכה להתעשר פי 100,000 כדי שיהיה כדאי לנצל במכרה.

אך דברים אלה משתנים עם הזמן: בסוף המאה העשרים דובר על כך שמתכת הכסף בעולם עומדת להיות מנוצלת עד סופה. כשליש ממתכת הכסף שהופק אז שימש בייצור סרטי צילום, וחברת קודאק החלה למחזר פילמים ישנים לשם הפקה חוזרת של מתכת זו. אלא שמאז נתמעט מאוד השימוש במתכת הכסף לצילום, שכן העולם עבר יותר ויותר לצילום דיגיטלי. גורלה של הנחושת היה דומה. עם הכנסת האלומיניום כתחליף לחוטי נחושת בהולכת חשמל, ירדה הדרישה למתכת זו וירדו מחיריה.

שינויים כאלה גורמים גם לעלייה ולירידה בכדאיות המחזור של חומרים שונים. עם הצמיחה המהירה של סין בשנים האחרונות עלה מחיר הברזל, וכדאיות מחזורו עלתה גם היא. צד אפל של מחזור הברזל אנו חווים בארץ: משום שמחירי הברזל גבוהים, כמעט

כל מה שעשוי ברזל ואינו מחובר חזק דיו לבטון, נגנב. ישמרנו האל ממחזור שכזה.

הבאתי דוגמאות לשתי מתכות, הכסף והנחושת, ולשני תחליפים שנמצאו להן. אך יש מקרים שבהם אין ולא יכול להיות לחומר תחליף. זרחן הוא מרכיב של כל תא חי, ללא זרחן אין חיים. כדי להמשיך ולגדל גידולים חקלאיים חייבים לדשן שדות, ומרכיבים חיוניים בדשן הם זרחן ואשלגן. ישראל היא יצרנית של שני סוגי דשנים: הזרחניים - אלה הם הפוספטים, שאותם כורים באורון, בנחל צין ובנחל אפעז ומעבדים למוצרים מתקדמים במפעלי רותם; והאשלגן, המופק מים המלח בצורת אשלג (KCl).

אם כן, כמעט לכל יסודות הטבלה המחזורית מצא האדם שימוש. אך זאת יש לזכור, כל יסודות הטבלה המחזורית נמצאים בכל גוש גרניט. לכאורה אפשר לקחת גוש גרניט ולהפיק ממנו כל יסוד שנבחר. אלא שכאן מתערב בדרכנו חוק ממדע אחר - החוק השני של התרמודינמיקה. חוק זה משמעו כי מאוד לא סביר שנכניס כוס מים חמים לחדר קר, והחום יעבור מן החדר לכוס - זו תתחמם עוד יותר, והחדר יתקרר. כדי שזה יקרה עלינו להשקיע אנרגיה. כמו כן לא סביר שתמיסת מלח במים תפריד עצמה למלח נקי ולמים נקיים בלי שנשקיע בתהליך הפרדה זה אנרגיה. באופן דומה בגרניט, שיש בו כ-12% אלומיניום, עלינו להשקיע אנרגיה כדי שהאלומיניום יתרכז לכדי מתכת אלומיניום נקייה. אנו נתקלים בצורך למצוא מקורות לאנרגיה זו. בידי ישראל פָּצַר מצוין של אשלגן ושל המתכת מגנזיום. במי ים המלח יש כ-8 גרם לליטר אשלגן, וכ-51 גרם לליטר מגנזיום. לכאורה הפקת מגנזיום צריכה להיות כדאית יותר אלא שאת האשלג מפיקים בבריכות אידוי, ועלות ההפקה נמוכה מאוד, שהרי מי ים המלח הם תמיסה, והאנרגיה הנדרשת לצורכי ריכוז הבצר היא אנרגיית השמש, המסופקת חינם. לעומת זאת את המגנזיום יש לרכז כמלח באידוי, ואז להתיכו בתנורים הדורשים אנרגיה, ולהפרידו באלקטרוליזה, תהליך הדורש חשמל. וייצור חשמל דורש דלק. על כן כדאיות הפקת המגנזיום בים המלח תלויה מאוד במחירי הדלק בסדום.

במאה וחמישים השנים האחרונות הורגלה האנושות להשתמש באנרגיה שאנו קוראים לה **דלקים פוסיליים**, כלומר דלקים מאובנים - פחם, נפט וגז טבעי. בעצם מדובר ב"אור שמש מאובן" מתקופות גיאולוגיות קדומות: הפחם הוא תוצר של התאבנות ושינויים של צמחים, והנפט הוא תוצר של שינויים שעברו בעלי חיים וצמחים, על פי רוב ימיים, כלומר הוא חומר אורגני ש"התבשל" בעומק כדור הארץ לנפט. הצמחים הקדומים ייצרו את החומר האורגני בפוטוסינתזה, תוך ניצול אנרגיית השמש ובעלי החיים שניזונו מצמחים כאלה. הנפט והפחם נמצאים רק בסלעי משקע. היום אנו מבינים די טוב את התנאים שבהם נוצר נפט, כיצד הוא נודד, היכן הוא נלכד, היכן יש סיכוי טוב יותר למצוא אותו בקידוח בתת-הקרקע. הדרישה הבסיסית היא קיומה של עמודת סלעי משקע עבה. נפט, פחם, ריכוזים גבוהים של כל היסודות הכימיים שאנו זקוקים להם - כל אלה סופיים, מתכלים. והבעיה היא שאנו צריכים לספק את צרכיה של אוכלוסייה גדלה והולכת. אני נולדתי לפני 74 שנים. וכשנולדתי היו בעולם כ-2 מיליארד אנשים. היום יש יותר מ-6 מיליארד. פי שלושה, גידול של 300%. צריכת האנרגיה של האנושות עלתה בפרק זמן זה ב-1,000%, פי עשרה!!! לא נוכל לספק את צורכי האנרגיה הגדלים האלה על ידי שימוש בדלק פוסילי בלבד. אמנם יש מי שחושב כי כוחות השוק - היד הנעלמה של השוק - ידאגו לכול, אך כפי שראינו בשנים האחרונות יד זו אמנם נעלמה אך פחות יעילה משקיווה מי שקיווה. יתר על כן, התחזיות בדבר התכלותו של האוצר המתכלה ושמו נפט אכן מתגשמות. ב-1956 חזה הגיאופיזיקאי האמריקני קינג הוברט (King Hubert) כי ייצור הנפט בארצות-הברית יגיע לשיאו ב-1970, ולאחר מכן יתחיל לרדת. רבים לעגו לו. התברר שהתחזית היתה מדויקת מאוד. אם כי מוצאים מדי פעם שדות נפט (וגז) חדשים. אמנם שיטות ההפקה מתייעלות, אך ההערכות הן כי הנפט יספיק לאנושות לכל היותר עוד מאה שנה. פחם, פַּצְלִי שמן (שגם לישראל יש לא מעט מהם) ייתנו לאנושות עוד כמה עשרות ואולי עוד כמה מאות שנים של זמן נשימה.

השימוש באנרגיה שמקורה בדלקים פוסיליים מוגבל גם מכיוון אחר: כפי שנאמר בשיחתנו על האקלים, תוספת פחמן דו-חמצני לאטמוספירה גורמת להתחממות כדור הארץ. והנה עצם מהותו של תהליך שרפת הדלק הפוסילי הוא חמצון תרכובות שונות של פחמן, כלומר ייצור של פחמן דו-חמצני. כל עוד נמשיך להשתמש בדלק פוסילי, יהיה הכרח למצוא דרך להיפטר מפחמן דו-חמצני זה שלא על ידי שחרורו לאטמוספירה. דרך אחת שמוצעת לכך היא אגירת CO_2 בקידוחי נפט וגז שננטשו. לאחרונה, באוקטובר 2008, הופעלה בגרמניה תחנת הכוח הפחמית הראשונה, והיא אכן דוחסת את גז ה- CO_2 לתוך קידוח המצוי במרחק 350 ק"מ מהתחנה. זו היא תחנת הכוח המכונה Schwarze Pumpe. עדיין לא ברור כמה יעיל יהיה פתרון זה, שהוא רק בראשיתו, אך סביר למדי שיהיה זה אחד הפתרונות. וודי אלן אמר פעם על אוכל בחתונה יהודית שהוא גם לא טוב וגם אין מספיק ממנו. כך אפשר לומר גם על שימוש בדלק פוסילי: אין די ממנו, הוא עתיד להיגמר בעתיד הלא מאוד רחוק, והשימוש בו לא טוב כי הוא משחרר CO_2 ומזיק. ולא הזכרנו סיכונים הכרוכים בהובלת נפט באוניות וגם לא אסונות, כגון אסון האונייה Exxon Valdez, שנפגעה מול חופי אלסקה ב-1989 וזיהמה את כל חופיה, ואסונות הזיהום שהתרחשו בשעה שקדחו נפט במפרץ מקסיקו ובים הצפוני.

אמרתי כי אחסון CO_2 יהיה אחד הפתרונות. פתרונות אחרים יבואו ממקורות אלטרנטיביים: ניצול אנרגיית השמש והרוח, אנרגיה גיאותרמית ואנרגיה גרעינית; אלה הם מקורות האנרגיה שכדור הארץ, בהיותו מערכת ענקית, ניצל לבניית הרים ולהריסתם מאז ומעולם. ניצול אנרגיית השמש אפשרי במקומות עתירי שמש כמו ישראל. אנרגיה גיאותרמית תנוצל במקומות שהיא זמינה בהם, כגון צפון קליפורניה, איסלנד וניו-זילנד, שם קרבה להרי געש מאפשרת שאיבה של מים חמים ושל קיטור לשם ייצור חשמל. אנרגיה גרעינית (שגם בה השתמש הטבע כמקור לחום הפנימי של הכדור) יכולה אף היא להיות מנוצלת, וגם לשם כך אפשר להיעזר

בגיאולוגיה ובגיאולוגים, וכמובן בדיסציפלינות ובבעלי מקצוע אחרים. שהרי עקרון פעולתו של כור גרעיני הוא ביקוע האיזוטופ הנדיר של אורניום, U-235, על ידי הקרנתו בנויטרונים.

אם כן, הגיאולוגים ימצאו את האורניום, ואילו הפיזיקאים והכימאים יעשירו את האיזוטופ הנדיר. אך יש לזכור למקם את הכור הרחק מכל העתק פעיל, כי הרי רעידת אדמה הרסנית עלולה להיות כאן מסוכנת ביותר - היא תגרום לדליפת חומר רדיואקטיבי. וגורל הכור יהיה אולי כגורל הכור בפוקושימה... המהנדסים צריכים אפוא לבנות כור גרעיני בטוח, דומה יותר לזה שב-Three-Mile-Island, שבו תאונה לא הביאה לפגיעות בנפש, ופחות לזה שבצ'רנוביל, שהפך לאסון רבתי. אך גם לאחר בניית הכור יהיה צורך בגיאולוגים כדי שימצאו פתרון לסילוק הפסולת הרדיואקטיבית שלו, תהליך לא פשוט, שעדיין אין לו פתרון משביע רצון.

לסיכום, בסדרת השיחות שאפתי להציג חלק מהידע המרתק שרכש האדם בעזרת שיטת המדע; ידע על אודות הכדור שעליו הוא חי. בשיחתי האחרונה ניסיתי להצביע על מעט מן המשמעויות החברתיות של ידע זה. גם בידע הגיאולוגי התיאורטי גם בזה היישומי מרובים הפערים, החורים, חוסר הידע. חוסר ידע זה הוא אתגר עצום. אני מקווה שיהיו בין קוראיי הצעירים מי שיראו בסגירת פערי ידע אלה, בהבנה טובה יותר של האופן שבו פועל כדורנו וגם ביישום הידע לתועלתנו, אתגר מספיק כדי להקדיש לו את חייהם. העיסוק באתגר זה הוא עמוק, מרתק, מענג. וסלחו לי על הסלנג - כיף עצום. תודה.

ספרי אוניברסיטה משודרת

ארה"ב ממלחמת האזרחים למלחמה הקרה	אאוגניקה
גוטפלד ארנון	גראור דן, גראור מינה
ארכיאולוגיה ימית - פרקי מבוא	אבולוציה: מדארווין עד ה - DNA
רבן אבנר	גראור דן
אתגרים ופריצות דרך במדעי התעופה	אידאולוגיות במאה העשרים
מרחב שמואל	בכרך צבי
אתיופיה והמזרח התיכון	אידאולוגיות ניהול בעידן הרציונליות
ארליך חגי	שנהב יהודה
אתיקה ורפואה	איחוד וחירות בגרמניה מנפוליאון עד
הד דוד	ביסמארק
אתיקה צבאית	וולקוב שולמית
כשר אסא	איטליה מליברליזם לפאשיזם
בדמות עכביש היא טווה את חוטיה	בן-עמי שלמה
גרוסמק ציונה	אימונולוגיה
ביולוגיה מולקולרית	פרנסדורף אשר
הרצברג מקס	איראן - בין איסלאם למערב
ביולוגיה של זכרונות	מנשרי דוד
דודאי ידן	אלבר קאמי והפילוסופיה של האבסורד
ביטחון ותקשורת	שגיא אבי
המכללה לביטחון לאומי	אלברט איינשטיין - אחדות וריבוי
בניין הארץ	אגסי יוסף
תומרקין יגאל	אמונה ותבונה
בעקבות אל-אליס - מסעות לעולמו של	שוורץ דב
לואיס קרול	אמונתו של הרמב"ם
שפירא חיים	ליבוויץ ישעיהו
בקה הורמונלית של הפריון	אמונתו של הרמב"ם (אנגלית)
נאור צבי	ליבוויץ ישעיהו
בקשר לאלוהים	אמונתו של ישעיהו ליבוויץ
שושני יקיר	כשר נעמי
בראשית הייתה אפריקה	אנטישמיות מודרנית
צבר גליה	בכרך צבי
גוף ונפש - הבעיה הפסיכו-פיסית	אנטישמיות מודרנית (רוסית)
ליבוויץ ישעיהו	בכרך צבי
גיאולוגיה - עולם של תצפיות ומסקנות	אסטרופיסיקה
מזור עמנואל	שביב גיורא
גלובליזציה	אסלאם-יהדות - יהדות-אסלאם
חנין דב	לצרוס-יפה חוה
דממה וחירות ביוגה הקלאסית	אסתטיקה כתורת הביקורת
גרינשפון יוחנן	ברינקר מנחם
האבולוציה של האהבה	ארבעה משוורים
למפרט עדה	מוקד גבריאל

הים בראש ההר	האדם כישות משתנה
מרט יוסי	פירשטיין ראובן
הים שסביבנו - אקולוגיה וביולוגיה של הים	האיסלם
פישלזון לב	לצרוס-יפה חוה
היסטוריה ואידאולוגיה במקרא	האישה ודמוייה באומנות ימי-הביניים
אמית יאירה	כנען-קידר נורית
היסטוריונים והמהפכה הצרפתית	האמנות הגותית בימי-הביניים - מקתדרלה לעיר
צוקרמן משה	כנען-קידר נורית
היצירה השקספירית	האמנות הנוצרית בימי-הביניים - מושגי יסוד
עוז אברהם	כנען-קידר נורית
הכיתות בימי הבית השני	הארכיטקטורה כאמנות וכמדע
באומגרסן אלברט	אלחנני אבא
הלב והעורקים הכליליים	האתוס הליברלי בחברה האמריקאית
בנאי שמואל	נווה אייל
המאה האמריקאית	הביולוגיה של ההזדקנות
נווה אייל	גרשון דוד פרופ'
המהפכה הצרפתית	הגנטיקה החדשה ותורשת האדם
גראב ולטר	שילה יוסי
המודיעין והקברניט	הדמוקרטיה ונפתוליה
סדרת הביטחון הלאומי	אייזנשטדט נח שמואל
המורים החלוצים	הדת הסינית
הרמתי שלמה	שחר מאיר
המחלות האוטואימוניות	ההיסטוריה של הגנטיקה
שינפלד יהודה	יבלונקה חוה
המילים ככישוף והכישוף שבמילים	ההיסטוריה של הכימיה
ש. שפרה	חיות מיכאל
המין מתחיל במוח	הומאניזם - הרעיון ותולדותיו
נאור צבי	רפ אורי
המיסטיקה העברית הקדומה	הזיקנה כתופעה חברתית
דן יוסף	חזן חיים (עורך)
המיסטיקה העברית הקדומה (אנגלית)	החברה הישראלית - חלק א' - חברה בתהליכי
דן יוסף	גיבוש
המיתולוגיה של הרוע	אביב אביבה
שוהם ש.גיורא	החברה הישראלית - חלק ב' - מתחים
המלכודת הנאצית	ומאבקים
שלמה אהרונסון	אביב אביבה
המקורות היהודיים של הנצרות	החזית האזרחית - ניהול העורף בשעת חירום
פלוסר דוד	סדרת הביטחון הלאומי
המקורות היהודיים של הנצרות (אנגלית)	הטוב, הרע והעולם - מסע לאיראן הטרומ
פלוסר דוד	אסלמית
המשיחיות היהודית המודרנית	עילם גינדין תמר
דן יוסף	היבטים על טרור ומאבק בטרור
	המכללה לביטחון לאומי

המשפט הציבורי - היסודות בישראל
 שפירא עמוס, ברכה ברוך
 הנאורות החדשה
 אגסי יוסף
 הנדסה גנטית בצמחים
 גפני ידידיה
 הנצרות מראשיתה ועד הרפורמציה
 קליינברג אביעד
 הספרות האפוקליפטית בימי הבית השני
 ורמן כנה
 הסתיו בשירה העברית
 ברפורת זיוה
 העברית שלנו והעברית הקדומה
 רובינשטיין אליעזר
 העידן הגרעיני כהסטוריה מוסרית
 כהן אבנר
 הפזורה הספרדית המערבית
 קפלן יוסף
 הפיזיקה של האנרגיה
 אונא יששכר
 הפילוסופיה הפוסט מודרנית בראי עצמה
 דעואל לוסקי חיים
 הפילוסופיה והפסיכואנליזה של ז'אק לאקאן
 אפרתי דניאל, ישראלי יהודה
 הפילוסופיה של הטכנולוגיה
 אגסי יוסף
 הפילוסופיה של המודיעין
 בן ישראל יצחק
 הפיסיקה של המאה ה-17
 סמבורסקי שמואל
 הפיסיקה של המאה העשרים
 נאמן יובל
 הפרשנות הקדומה של המקרא
 מאק חננאל
 הציונות הדתית: תולדות ופרקי
 אידאולוגיה
 שוורץ דב
 הקפיטליזם של הידע
 מסרירון חגית
 הרנסנס האיטלקי
 ארבל בנימין
 הרפורמציה הפרוטסטנטית
 אליאב-פלדון מירי

השורשים התאולוגיים של הרייך ה-3
 שכטר רבקה
 השיח האנתרופולוגי
 חזן חיים
 השמש שלנו
 דר ארנון
 התא החי - מבנה ופעילות
 בן-שאל יהודה
 התנצרותה של אירופה
 רובין זאב
 התפתחות ותורשה
 ליבוביץ ישעיהו
 התפתחות כח המגן העברי 1907-1948
 פעיל מאיר
 ויכוחים על אמונה ופילוסופיה
 ליבוביץ ישעיהו, רביצקי אביעזר
 ויסות האנרגיה בגוף
 קרייצר פרי
 ז'אן פיאז'ה - פסיכולוגיה ומתודה
 פריד יהודה
 ז'ן פול סרטור: דרכי החירות
 ברנקר מנחם
 זהות יהודית בתקופה ההלניסטית
 מנדלס דורון
 זכויות אדם
 קאופמן אדי ד"ר
 זכויות אדם בישראל
 גבזון רות
 זכויות אדם במקרא ובתלמוד
 כהן ה. חיים
 זכויות אדם במקרא ובתלמוד (אנגלית)
 כהן ה. חיים
 זמן ותודעה - תהיות חדשות על חידות
 עתיקות
 אליצור אבשלום
 זמן עמוק וגיאולוגיה דינמית
 מרט יוסי
 זמן פסיכולוגי
 זכאי דן
 זן בודהיזם - פילוסופיה ואסתטיקה
 רו יעקב
 חומר ורוח - יסודו הרוחני של היקום
 שושני יקיר

יחסי הגומלין בין הדרג האזרחי-מדיני ובין הדרג הצבאי
 המכללה לביטחון לאומי
יסודות בכלכלה פוליטית
 גרינברג לב
יסודות הכלכלה נוסח ישראל
 פלסנר יקיר
יסודות המשפט
 דינשטיין יורם
יצירה והתגלות
 גיורא שוהם שלמה
ירושלים במאה ה-19
 בן-אריה יהושע
ירושלים במאה ה-19 (אנגלית)
 בן-אריה יהושע
כוכבים כפולים
 ליבוביץ אליה
כיבושה של האימפריה האצטקית
 מדין צבי
כיצד צמחה תרבות המערב
 נאמן שלמה
כלכלת המזרח התיכון בעת החדשה
 גילברגד
כלכלת ישראל - מוהיד המנהלת ליד הנעלמה
 שמחון אבי
כלכלת ישראל והביטחון הלאומי
 סדן עזרא
להיות בכושר מתאוריה למעשה
 לידור רוני (עורך)
לונדון מקום אנשים ואימפריה (1800-1960)
 מלמן בילי
למי הבכורה?
 מדזיני מירון
לקרוא סיפור מקראי
 אמית יאירה
מ'אומה' ל'לאום' - יהודי מזרח-אירופה - 1881-1772
 ברטל ישראל
מבוא לאקולוגיה
 כהן דן
מבוא לביטחון לאומי
 המכללה לביטחון לאומי

חורים שחורים - הגופים המוזרים ביותר ביקום
 פירן צבי
חורים שחורים וננסים לבנים
 שדה דרור
חידת ההזדקנות
 גרשון דוד
חירות על הלוחות
 אליאור רחל
חמש מאות שנה לגילוי אמריקה
 אליאב-פלדון מירי
חסידות אשכנז
 דן יוסף
חקר קרקעית הים
 בן-אברהם צבי
חשיבה וקבלת החלטות בספורט
 לידור רוני
טבע ומורשת - כבסיס לתכנון הארץ במאה ה-21
 מזור עמנואל
טבע, הסטוריה ומשיחיות אצל הרמב"ם
 פונקנשטיין עמוס
טבע, הסטוריה ומשיחיות אצל הרמב"ם (אנגלית)
 פונקנשטיין עמוס
טוב ורע בהגות היהודית
 רוזנברג שלום
טוב ורע בהגות היהודית (אנגלית)
 רוזנברג שלום
טייף, סטייה ויצירה
 גיורא שוהם שלמה
טלוויזיה גלובלית
 צוקרמן ארנון
יהדות ואלימות
 כשר אסא
יהודי אלג'יריה בעידן הצרפתי
 שרביט יוסף
יהודי תימן
 ניני יהודה
יהודים אנוסים ו"נוצרים חדשים" בספרד
 מיוחס ג'ינאו עליזה
יוספוס פלביוס
 פלוסר דוד

מהות התיאטרון	מבוא לחלקיקים אלמנטריים
זקס אריה	מאור אורי
מהי לוגיקה?	מבוא ללימודי משטרה ושיטור
בילצקי ענת	יחזקאלי פנחס
מהמנור אל האוניברסיטה - בין תיאולוגיה	מבוא למטפיסיקה ולפילוסופיית־הטבע של
לפילוסופיה בימי הביניים	אריסטו
שורץ יוסף	לנדא יהודה פרופ'
מהפכה ומהפכה שכנגד בספרד	מבוא לספרות הדקאדנס באירופה
אביב יצחק	בר־יוסף חמוטל
מהפכת הדפוס	מבוא לפילוסופיה מודרנית
אליאב־פלדון מירי	אגסי יוסף
מודיעין - הלכה למעשה	מבוא לפילוסופיות הקיום - אקזיסטנציאליזם
עמידרור יעקב	גולומב יעקב
מוצא החיים	מבוא לתולדות האימפריה העות'מאנית
פריי איריס	טולידאנו אהוד
מורשת ימי הביניים	מבוא לתולדות המתמטיקה חלק א':
שחר שולמית	הזמן העתיק וימי הביניים
מחזון למדינה - בעיות מרכזיות	אונגורו שבתאי
בתולדות הציונות	מבוא לתולדות המתמטיקה חלק ב': הרנסנס
עילם יגאל	והזמן החדש
מחנכים יהודים בתפוצות	אונגורו שבתאי
הרמתי שלמה	מבוא לתפילות ישראל
מחשבות אודות המוח - ציוני דרך בהבנת	מאק חננאל
פעילות המוח	מבוא לתקופת הרנסנס
לביא פרץ	הרסגור מיכאל
מחשבות על המציאות	מבוא לתקשורת
שושני יקיר	ברגר אוה
מחשבות על התבונה	מגדר וצבא
שושני יקיר	סדרת הביטחון הלאומי
מי התהום והאדם	מגילות מדבר יהודה והאיסיים
מזור עמנואל	פלוסר דוד
מיהו יווני? - אתניות וזהות	מגילות מדבר יהודה והאיסיים (אנגלית)
ביוון העתיקה	פלוסר דוד
מלכין עירד	מגמות יסוד בשירה המודרנית
מיעוטים במזרח התיכון	זנדבנק שמעון
אולמרט יוסף	מדינות ערב - תהליכים ובעיות יסוד
מלחמת יום הכיפורים ולקחיה	שקד חיים
המכללה לביטחון לאומי	מדע הנגיפים בעידן האיידס
מלכותו של הורדוס	יחיאל בקר
שטרן מנחם	מדרש האגדה
מלכותו של הורדוס	מאק חננאל
(אנגלית)	מדרש האגדה (אנגלית)
שטרן מנחם	מאק חננאל

ממושבות למלחמת אזרחים -

היסטוריה אמריקאנית עד 1861

גוטפלד ארנון

מסעות באורחות ההורשה של האדם

אשכנזי ישראל

מעולמם של החיידקים -

פרקים במיקרוביולוגיה

ציתרי נתן

מפורט ארתור עד הירושמה

מדזיני מירון

מציאות ובדין בחילופי האלף

קרן מיכאל

מצרים בפתח העידן המודרני

טולידאנו אהוד

מקבלת האר"י עד לחסידות

יעקובסון יורם

מקבלת האר"י עד לחסידות (אנגלית)

יעקובסון יורם

מראש-פינה ודגניה ועד דימונה

גורני יוסף

מראש-פינה ודגניה עד דימונה (אנגלית)

גורני יוסף

משיחיות ומיסטיקה

אידל משה

משלמה המלך עד שלמה ארצי מיונה הנביא

עד יונה וולך

בן מנחם

משמעות הצורה בצמחים

זקס צבי

משפטי גדל ובעיית היסוד של המתמטיקה

עברון ארנון

משפטי מפתח - ציוני דרך בבית המשפט

העליון

ברק-ארוז דפנה

נאציזם

נוימן בעז

נבואתו של ירמיהו

אביעזר מיכאל

נוסעים ונוסעות - סיפורי מסע בספרות

העברית החדשה

נוה חנה

נוער ופוליטיקה במזרח התיכון

ארליך חגי

ניטשה - עיונים בתרבות המערב

שיחור רחל

נפוליאון ותקופתו

גראב ולטר

נפש, אבל ושכול

ויצטום אליעזר

נצרות ופסיכיאטריה

רוטנברג מרדכי

נשים מופקות

אלמוג שולמית

נשף מסכות בעיר האלוהים - פלורליזם

וסובלנות בימי הבניים

שורץ יוסף

סביבות וירטואליות

פרידמן דורון

סגנונות בפרשנות המקרא בימי הבניים

פונקנשטיין עמוס

סוגיות בביקורת המקרא

הופמן יאיר

סוגיות בגיאופוליטיקה של המזרח התיכון

סופר ארנון

סוגיות וסוגים בשירת ילדים

ברוך מירי

סוף האלף הראשון

חן יצחק

סוציאליזם

דה-שליט אבנר

סוריה המודרנית

אולמרט יוסף

סין - מסורת מול שינוי

שיחור יצחק

סין במאה העשרים

שי אהרון

ספיריטואליזם ויהדות

וינרוט אברהם

ספרות פוליטית במאה ה-20

קרן מיכאל

עברית שפה מדוברת

הרמתי שלמה

עוד שיחות על דת האיסלאם

לצרוס-יפה חוה

עולמה של הצרעה המזרחית

ישי יעקב

פילוסופיה של המדע של אריסטו	עולמה של ספרות האגדה
בכלר זאב	שנאן אביגדור
פיסיקה גרעינית	עולמה של ספרות האגדה (אנגלית)
אשרי דניאל	שנאן אביגדור
פיסיקה תורות ומושגים	עולמו הספרותי של חורחה לואיס בורחס
בן-דב יואב	קורי ליאו
פיסיקה הקוונטים	עולמו של המשחק - פרקים במדעי ההתנהגות
אונא ישישכר	רפ אורי
פלמ"ח - הכח המגויס של ה"הגנה"	עולמו של קפקא
פעיל מאיר	לייב שרה
פמיניזם ויהדות - מהתנגשות להתחדשות	עידן האורות
קתה חנה	הרסגור מיכאל
פמיניזם, זכויות ומשפט	על המנהיגות הצבאית
קמיר אורית	המכללה לביטחון לאומי
פסיכולוגיה יהודית וחסידות	על כוח ואי אלימות - חיינו ומשנתו של
רוטנברג מרדכי	מהטמה גנדי
פסיכולוגיה של החלומות	גרינשפון יוחנן
גירא צבי	על שוטרים וגנבים - סוגיות
פסיכולוגיה של קריאה והבנת טקסט	בקרימינולוגיה
שימרון יוסף	טננבוים נ. אברהם
פסיכופורמקולוגיה - תרופות	על תופעת הכאב
והתנהגות	קרטו רפאל
יהודה שלמה	על תפיסת הנס במקרא
פסיכופתולוגיה - פגישה ראשונה	זקוביץ יאיר
פריד יהודה	על תפיסת הנס במקרא (אנגלית)
פסיכותרפיה אנליטית -	זקוביץ יאיר
אמנות הבלתי אפשרי	עלייתה של הפילוסופיה היוונית
הדר אורי	גליקר יוחנן
פרדוקסים	עלייתם ונפילתם של משטרים צבאיים
בילצקי ענת	באמריקה הלטינית
פרימיטיביזם - אידיאולוגיה ותשוקה בתרבות	קאופמן אדי
המודרנית	עצמאות תש"ח-תש"ט
ברקן אלעזר	פעיל מאיר
פרקי יסוד בדיני מקרקעין	עקרונות הלמידה - פרק בפסיכולוגיה
בניאן מוטי	ברוניץ שלמה
פרקי יסוד במדעי המחשב	פונדמנטאליזם ומודרניות
הראל דוד	נח אייזנשטדט שמואל
פרקי מבוא לאפלטון	פילוסופיה יהודית - קווי יסוד
גליקר יוחנן	בידרמן שלמה
פרקים בהמטולוגיה	פילוסופיה של החינוך - פרקי דיון
שינפלד יהודה	רפל דב, אגסי יוסף
פרקים בנוירופסיכולוגיה	פילוסופיה של המדע
בנטין שלמה	בכלר זאב

- פרקים בסוציולוגיה של האמנות**
צוקרמן משה
- פרקים בפילוסופיה של הדת**
שיחור רחל
- פרקים בשירה היהודית**
שולמן דוד
- פרקים בתולדות הפסיכולוגיה**
אלגום דניאל
- פרקים בתולדות הרעיון המדיני בימי הביניים**
מנשה סופיה
- פרקים בתולדות הרפואה הצבאית**
דולב ערן
- פרקים בתורת הנגפים**
בקר יחיאל
- פרקים בתורתו של ברוך שפינוזה**
בן-שלמה יוסף
- פרקים בתורתו של ברוך שפינוזה (אנגלית)**
בן-שלמה יוסף
- צדק במשפט**
כהן ה. חיים
- צה"ל - צבא העם או צבא מקצועי**
המכללה לביטחון לאומי
- ציון בציונות - המדיניות הציונית בשאלת ירושלים 1937-1949**
גולני מוטי
- צמיחתה של המדינה המודרנית**
בר-נבאלי
- קבוצות שוליים בימי הביניים**
שחר שולמית
- קוסמולוגיה**
שביב גיורא
- קוסמולוגיה ושפה**
שכטר רבקה
- קניין רוחני בעידן המידע**
אלקין-קורן ניבה
- קרוב ורחוק - על משנתו של עמנואל לוינס**
אפשטיין דניאל
- ראשית הבודהיזם**
בידרמן שלמה
- ריבוי פנים באמנות הייחוד**
קנוהל ישראל
- ריפוי בעיסוק - טיפול הומניסטי**
פריד אביבה
- רעיון, כוונה ומעשה בארכיטקטורה**
בליך בילו
- רפואה ונאציזם**
נדב דניאל
- רפואה שלמה - בין רופא למטופליו**
הלוי יונתן
- רציונליות וקדימה במדע**
וורם אריה
- רשמים בלי מסכות**
עזיקרי נסים
- שומנים וכולסטרול בגוף האדם**
איזנברג שלמה
- שחור לבן - לבן שחור - ראשי פרקים באפריקה של ימינו**
גולן תמר
- שחיתות שלטונית וביטחון לאומי**
יחזקאלי פנחס
- שיחות על הגיאולוגיה של ישראל**
פלכסר עקיבא
- שיחות על הפילוסופיה של המדע**
ליבוביץ ישעיהו, אגסי יוסף
- שיחות על מדע וערכים**
ליבוביץ ישעיהו
- שיחות על שינה וחלימה**
לביא פרץ
- "שירת החיים" - פרקים במשנתו של הרב קוק**
בן-שלמה יוסף
- "שירת החיים" - פרקים במשנתו של הרב קוק (אנגלית)**
בן-שלמה יוסף
- שלוש עשרה שיחות על אומנות המאה ה-20**
תומרקין יגאל
- תגובות בעת השואה**
באואר יהודה
- תגובות בעת השואה (אנגלית)**
באואר יהודה
- תולדות האדם הקדמון**
בלפר-כהן אנה
- תולדות המחשבה המדעית**
בכלר זאב
- תולדות העיתונות הערבית**
איילון עמי

תלישות והתחדשות
גוברין נורית
תלישות והתחדשות (אנגלית)
גוברין נורית
תמורות בחברה הישראלית
נח אייזנשטדט שמואל
תנועת החסידות בראשיתה
אטקס עמנואל
תפיסה ופסיכופיזיקה
אלגום דניאל
תפיסת האדם באידאולוגיה הנאצית
בכרך צבי
תקופת הגאונים - עם ישראל תחת שלטון
האסלם במאות ז-יב
ברקת אלינער
תרבויות קדומות ביבשת אמריקה
מגד נחום
תרבות הקפיטליזם
אילוז אווה

תולדות הפילוסופיה - מהרנסאנס ועד קאנט
שרפשטיין בן עמי
תורכיה במאה ה-20 - בין מודרניזציה
למסורת
שמואלביץ אריה
תורת המוסר - מבוא
כשר נעמי
תורת המפץ הגדול
פירן צבי
תורת הרבייה א'
קרייצר פרי
תורת הרבייה ב' - הריון ולידה
קרייצר פרי
תורתה של החסידות
יעקובסון יורם
תורתה של החסידות (אנגלית)
יעקובסון יורם
תזונה, מוח והתנהגות
יהודה שלמה