

## שיטות חדשות לחקר אקלימי העבר בארץ-ישראל

דיון לציון שישים שנה לפעילותו המדעית של פרופ' דב אשבל

אבינעם דנין  
אברהם פאהן  
פאול גולדברג  
זאב משל



פרופ' דב אשבל

הדיון נערך בירושלים, על-ידי המרכז לחקר תולדות ארץ-ישראל ויישובה של יד יצחק  
בן-צבי והאוניברסיטה העברית, ירושלים, בי' בסיוון תשמ"ב (1.6.1982)

# בליית סלעי-גיר ואבנים על-ידי חזויות וכחוליות – אמצעי לחקירת אקלימי העבר

אבינעם דנין

מבוא

מזה עשרות שנים מנסים חוקרי הארץ לברר מה היו תנאי האקלים בה בתקופות העתיקות. חוקרים רבים הסבירו תופעות של פריחה יישובית או ריקנות מיישוב, כאילו הם תוצאה של אקלים גשום, או שחון, בעבר. לעומתם, דחו חוקרים אחרים הנחות אלו מכל וכל. נימוקים גיאולוגיים, עלייה וירידה במיפלי ים-המלח, הוכחות הידרולוגיות, מחקרים דנדרוכרונולוגיים (חקר גיל העצים ותנאי גידולם על-פי הטבעות השנתיות בגזעם), שרידי צמחים שהתגלו בחפירות וידיעות שנשאבו ממקורות היסטוריים – כל אלה שימשו כהוכחות לכאן ולכאן בידי החוקרים, אך עדיין המחלוקת מרובה מן ההסכמה (בייחוד כשמדובר באלפי השנים האחרונות).

עבודה זו מציגה מכשיר נוסף לבירור תנאי האקלים בעבר. אין כאן לפי שעה פתרון מלא ותור-משמעי, אלא רק כיוון-מחשבה והצבעה על שיטה שטרם נוצלה. אמצעי זה – אם יפותחו ויעובד – ייתן בידינו עוד דרך לפתרון שאלה רבת-חשיבות זו.

סלעי-גיר ודולומיט קשים המצויים בכל חבלי הארץ מאכלסים על-פניהם ועל שכבותיהם העליונות אורגניזמים ירודים – כחוליות וחזויות. אלה נראים כקרום בצבעים שונים, ותנאי הכרחי להתפתחותם הוא שממוצע הגשם השנתי באזור יהיה 50 מ"מ ומעלה – תנאי המתקיים ברוב חלקי הארץ. פעילותם על-פני הסלע והאבן מביאה לבלייתם של הסלעים. כל אחת משלוש קבוצות האורגניזמים בהן נדון להלן יוצרת דגם-בלייה טיפוסי וייחודי לה. חלזונות מקבוצות שונות מכרסמים את שכבת הסלע העליונה, ניזונים מהכחוליות והחזויות שבתוכה ובונים את שילדם מן הגיר שקלטו. כך גם החלזונות תורמים ליצירת דגם-בלייה טיפוסי להם על-פני אבנים וסלעים.<sup>1</sup>

התנאים להתפתחות של כל אחת מקבוצות האורגניזמים הללו מוגדרים באופן חד למדי, ועל כן הם יכולים לשמש כעדות לתנאים ששררו במקום חיותם בעבר. עדות זו קיימת אפילו אלפי שנים לאחר שנקברו האבנים בתוך קיר של אתר בנוי, או כוסו באדמה למשך תקופות ממושכות. הכרת תנאי הגידול של האורגניזמים הירודים בכל אחד מאזורי האקלים השונים של הארץ כיום עשויה לסייע ללימוד תנאי האקלים המדויקים השוררים כיום במקומות בהם אין תחנות מטיאורולוגיות; בדומה לכך, בליית האבנים של אתרים ארכיאולוגיים ופריהיסטוריים שונים עשויה להצביע על האקלים בתקופה שבה ניבנה האתר ועל קצב כיסויו על-ידי האדמה.

1 ראה: מ' אבנימלך, 'שבלולים יבשתיים' זוללי-סלעים" ופעולתם הגיאולוגית', הטבע והארץ, ו (1939), עמ' 203-210; 271-274.

מטרת מחקרנו היא להציג מספר צורות-בלייה ביולוגיות של סלעי-גיר ואבנים באקלים מדברי ובאקלים ים-תיכוני, ולהראות את הקשר בינו לבין גורמי הסביבה. המחקר מבקש להציג את המשמעות הנובעת מחקר צורת הבלייה ללימוד אקלים העבר באתרים ארכיאולוגיים פריהיסטוריים ועל-גבי סלעים כהרי הארץ.

### התשתית ובתי הגידול של האורגניזמים הירודים

כמות המים העומדת לרשות האורגניזמים הירודים בתוך הסלע משתנה מכמות אפסית על סלעי-צור, דרך 0.5-2 אחוז על סלעי-גיר קשים, ועד מעל ל-20 אחוז בסלעי-קירטון (גיר רך). הבדלים אלה יוצרים מיגוון של בתי-גידול. ענייננו העיקרי הוא בסלעי הגיר הקשים, שמהם נחצבו אבני-בניין הנפוצות ביותר בכנייני הארץ. קיבול המים של הסלע הטרי עשוי לנוע, כאמור, בין 0.5 ל-2 אחוז ממשקל הסלע. האורגניזמים הגדלים על-פני האבן (כמ"מ העליון) מרככים את הקשר בין גבישי הסלע ומגדילים לעתים פי שניים ויותר את קיבול המים של פני השטח.

פני הסלעים הם בית-גידול יבש למדי בכל חלקי הארץ. הסלע מתחמם לאיטו בשעות היום ופולט את החום בשעות הלילה, ועל כן הוא מונע לרוב הצטברות של טל עליו. בגלל קיבול המים הנמוך של הסלע, נקלטת על פניו כמות המים הקטנה בעיקר בימים של גשם, אך גם אז המים מתייבשים במהרה. בגבעות שדה-בוקר שבנגב נרטבים פני הסלע מהגשם למשך כ-70 שעות-יום בשנה. אבנים שנגזרו מסלעי-גיר אלה מתקררות בשעות הלילה ובמשך כ-130 מתוך 200 לילות-הטל שבנגב פניהן נרטבים בטל. הטל מרטיב אבנים אלו למשך 250-400 שעות-יום במהלך השנה, ואם נוסיף לכך את הגשם, הרי אבנים אלו רטובות כסך-הכול בשעות האור 320-470 שעות בשנה. אל העמקים שבין גבעות אלה מתרכז אוויר קר ולח, וכמות הטל שם רבה יותר. זמן ההרטבה השנתי של פני הסלע בשעות היום מגיע ל-470-670 שעות. יחסים כמותיים דומים להם מתקיימים גם באזורים אחרים של הארץ שיש בהם טל. סביר להניח שבהרים גבוהים, שעננים נמוכים נתקלים בהם לעתים מזומנות, הלחות העומדת לרשות הצמחים שעל הסלע גבוהה יחסית. כאשר כמות הטל קטנה וזניחה, מקבלים סלעים גדולים ואבנים את אותו מספר שעות-לחות במשך השנה. המיפנה בו נמצאים הסלעים משפיע גם הוא במידה רבה. הקרינה על-פני סלעים אנכיים או קירות הפונים דרומה בחורף, בין ספטמבר למארס, מתחילה בזריחה ומסתיימת בשקיעה. קיר-סלע מאונך הפונה צפונה אינו מקבל בתקופה זו אף קרן-אור ישירה.<sup>2</sup> גם פני-סלע מושפעים מושפעים במידה ניכרת מהמיפנה כלפי השמש והקרינה בעונה הלחה.

בדיוננו נתייחס בעיקר לבתי הגידול הנזכרים בטבלה שלהלן.

2 ראה: ד' אשבל, עצמת קרני השמש — טמפרטורת האדמה, ירושלים 1942.

## האורגניזמים המצויים על הסלע או בתוכו

נתאר כאן את האורגניזמים שפעילותם בולטת ביותר – פחוליות (ציאנובקטריות – Cyanobacteria), חזויות אַנדוליתיות ('חזויות תוך-האבן' Endolithic Lichens) וחזויות אֶפיליתיות ('חזויות פני-האבן' Epilithic Lichens). אמנם ספרות המחקר מדווחת גם על פעילות של חיידקים ופטריות על-פני הסלע, אך לא נתייחס אליהם כאן. המשותף לשלוש הקבוצות הוא, שהאורגניזמים השייכים אליהן מסוגלים לעמוד בשינויים ניכרים החלים בתכולת המים שבגופם; הם חיים במצב של יובש כמעט מוחלט מחד, ובמשקל כבד פי כמה ממשקלם היבש לאחר ספיגה מלאה של מים מאידך. בהירטבם הם תופחים ומחדשים מייד את פעילותם הפיסיולוגית, שהיתה רדומה במצב יבש<sup>3</sup>. זמן התפיחה המצטבר המצוי באזורים שונים ובכתי-גידול שונים של הארץ הוא המשפיע על תפוצת צמחים אלה. רישום בלייתם בסלע מתפתח במשך תקופות של מאות שנים; הבדלים שנתיים לא באים לידי ביטוי.

הכחוליות גדלות בבתי הגידול השחונים ביותר שבאזורנו. הן כונות מושבות כדוריות שקוטן 0.5-0.05 מ"מ, על כן הן נראות כגרגרים שחורים על-פני הסלע, אשר בהירטבם הם תופחים ונראים שחורים למדי. אם גדלות כחוליות אלה בין גבישי הסלע, הן מרופפות את הקשר בין הגבישים על-ידי פעילות כימית, ועל-ידי תפיחתן בהרטבה. כאשר טיפות-הגשם מכות על הגבישים הרופפים, הגבישים נעקרים בקלות יחסית והאצות צומחות לתוך המקום שנתפנה. צורת הבלייה שהן משאירות משתנה בהתאם לטיב בית הגידול. בסלעים משופעים באזורי השפלה, בחלק הגשום של הארץ, הן גדלות על-פני כל שטח הסלע. ועל כן הבלייה שהן גורמות קשה להבחנה.

במקומות שבהם פני הסלע אנכיים, או על-פני קירות של בניינים, באזורים גשומים, קיים ניקוז יעיל של מי הגשם וכמות המים העומדת לרשות הכחוליות היא מועטה. במקומות אלה הכחוליות מתבססות רק באתרים שקועים על-פני הסלע או הקיר. פעילותן המתמשכת במקומות אלה גורמת ליצירת גממיות. אם גממיות אלה נוצרות עקב פעילות הכחוליות, הרי שהיאחזותן של מושבות ספורות גורמת להמשך מואץ של העמקת השקעים. הכחוליות ממשיכות לרופף את הקשר שבין גבישי הסלע, והבלייה היא מהירה; באתרים המוגבהים שבין הגממיות, בהם הכחוליות אינן פעילות, הבלייה איטית ביותר. בדיקת עומק הגממיות מתחת לפני הסלע המסותתים באתרים עתיקים בעלי גיל שונה במרחב ירושלים מראה שקצב החדירה של הכחוליות בגממיות הוא כ-5 מיקרון (0.005 מ"מ) לשנה או – 1 מ"מ עומק ב-200 שנה<sup>4</sup>.

גם באזורים שחונים (פחות מ-200 מ"מ גשם בשנה) נוצרות גממיות כאלה, עקב פעילות הכחוליות. אלה פעילות על פני סלע משופעים הפונים דרומה. עומק הגממיות שם עשוי להיות 5-30 מ"מ. אם גממיות אלה מתפתחות לאורך 'עורקים' שבסלע, הן מתחברות לתעלות בעומק הנזכר.

3 ראה: מ' אבן ארי, ל' שגן ונ' תדמור, הנגב, מלחמת קיום במדבר, ירושלים 1980.  
4 בבדיקותינו במקומות שונים בירושלים מצאנו כי עומק חדירת הכחוליות היה כדלקמן: 2 מ"מ מתחת לסימני הסיתות באבני חומת ירושלים מזמן סולימן המפואר; 4 מ"מ בקיר בניין קבר עלא א-דין בן עבדאללה אל-כבכיה שלידי בריכת ממילא (נבנה בסוף המאה ה"ג); כ-10 מ"מ בקירות קבר בני חויר מימי בית-שני שבנחל קדרון; 12 מ"מ בקיר הסמוך לקבר 'בת פרעה' מימי בית-ראשון שבכפר השילוח. מבחינה סטטיסטית נמצא מיתאם גבוה ומובהק בין עומק הבלייה ובין גיל האתר. וראה: A. Danin, 'Weathering of Limestone in Jerusalem by Cyanobacteria', *Zeitschrift für Geomorphologie* [in press]

הקשר בין דגמי-בלייה ביולוגית של אבני-גיר קשות, אקלים, ממדי האבן ועמדתה הטופוגראפית

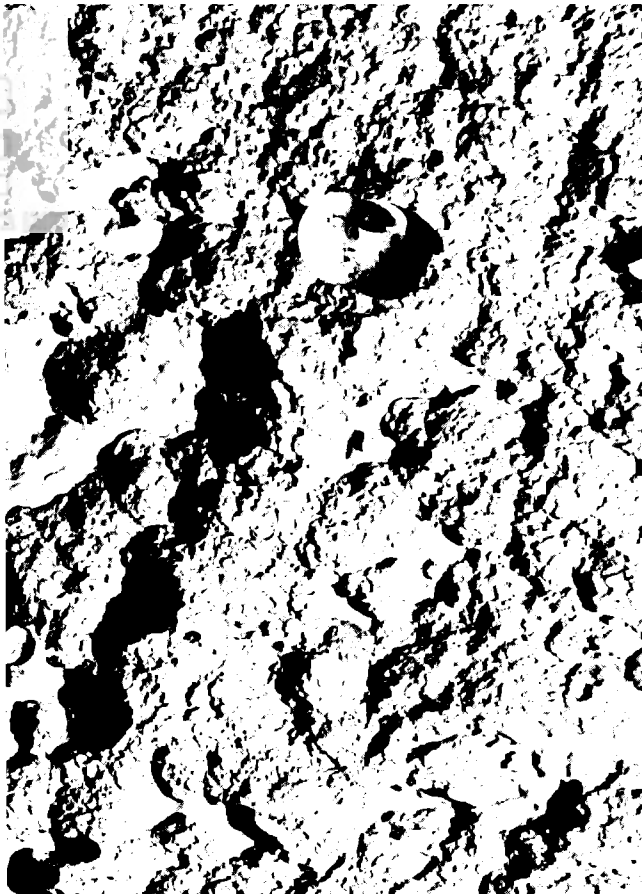
אבני קיר-בית	סלעים		אבנים		אזור ואקלים	
	מיפנה הסלע		גודל אבנים (נפח)		משקעים (מ"מ גשם ולילות- טל בשנה)	אזור
(מיפנה צפון- מערבי)	מיפנה דרומי	מיפנה צפוני	אבנים גדולות מ-10 סמ"ק ועד 10,000 סמ"ק	אבנים קטנות מ-10 סמ"ק		
	גממיות	פני-סלע מחוספסים****	גממיות*		100 מ"מ גשם; לילות-טל ספורים	מדברי שחון (בקעת ים-המלח)
	גממיות	דגם-הרכבה	דגם-הרכבה***	נקבים**	70 מ"מ גשם; 200 לילות טל	מדברי (באר-רסיסים; ניצנה)
	גממיות	פני-סלע חלקים*****	דגם-הרכבה	נקבים	100 מ"מ גשם; 200 לילות-טל	מדברי (שדה-בוקר)
גממיות	דגם-הרכבה	פני-סלע חלקים	דגם-הרכבה	נקבים	500 מ"מ גשם; טל מרובה	ים-תיכוני (הרי-הודה)
גממיות	פני-סלע מחוספסים	פני-סלע חלקים	דגם-הרכבה	נקבים	500 מ"מ גשם; כמות טל לא-ידועה	ים-תיכוני (השפלה)

- \* גממיות — תוצר-בלייה של פעילות כחוליות.
- \*\* נקבים — של גופי-פרי של חזזיות אנדוליתיות.
- \*\*\* דגם-הרכבה — התעלות שבמיפגש בין מושבות החזזיות האנדוליתיות יוצרות דגם המכונה 'דגם דמו משחק-הרכבה' ('jigsaw puzzle')
- \*\*\*\* תוצר בלייה של כחוליות, ללא גממיות.
- \*\*\*\*\* תוצר בלייה של חזזיות אפיליתיות.

להערכת טיב בית הגידול שבו האורגניזמים הללו פעילים, מסתייעים במדד שהוא זמן תפיחה מצטבר שנתי בשעות-אור (Photo-cumulative imbibition time להלן: 'זמן תפיחה שנתי'). בעקבות תצפיות ומדידות, זמן התפיחה השנתי של הכחוליות בהר הנגב מוערך ב-60-70 שעות לשנה.

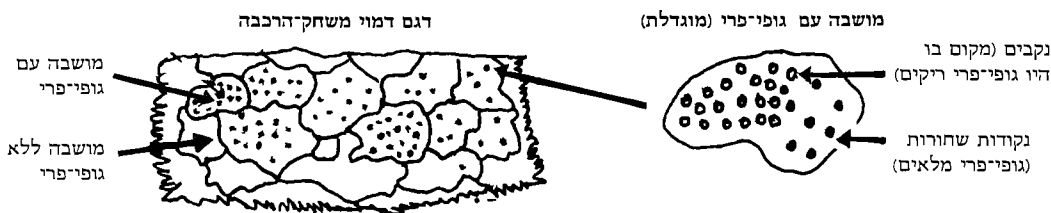
5 סלעים מתחממים לאט בשעות היום ומתקררים לאט בלילה. מידות החום הגבוהות שלהם מונעות הצטברות טל על פניהם במרבית לילות הטל. אבנים קטנות מתחממות מהר ומתקררות מהר, ועל כן גם מצטבר על פניהן טל לילות מרובים יותר בשנה. זו הסיבה לכך שאבנים מנותקות מאכלסות חזזיות אנדוליתיות באזורי מדבר שבהם יש טל.

חזויות אַנדוליתיות זקוקות לתנאים לחים יותר מן הכחוליות, וכך מוצאים שחזויות אלה שולטות על-גבי סלעים בחלק הגשום וההררי של הארץ או על-גבי אבנים מנותקות במדבר. זמן התפיחה השנתי של חזויות אלה הוערך בהר-הנגב ב־300-500 שעות. גם החזויות, ככחוליות, מרופפות את הקשר בין גבישי הסלע; פני הסלע שמעל החזויות מוסרים בהדרגה, כמתואר לגבי בליית הסלע על-ידי כחוליות. בתחום המפגש בין שתי מושבות, המסת התשתית היא נמרצת יותר. אם מסירים בסכין שכבה של 1 מ"מ המאוכלסת בחזויות, או פחות מזה, מוצאים מתחת לקווי המיפגש בין המושבות פסים בהירים. אלה הם קווי ההמסה הנמרצת של הסלע בהם מצויים רק קורי הפטריה המרכיבה את החזויות. מלבד זאת, יש המסה של התשתית סמוך לגופי הפרי של החזויות, שקוטרם כ־1 מ"מ. אלה מצויים בעומק קטן מאוד. אם האבן מתהפכת כתוצאה מדריכה של בעלי-חיים העוברים על המדרון, או מסיבה אחרת, פני האבן שהיו מאוכלסים חזויות פונים אל הקרקע, וכעבור מספר שנים החומר האורגני נרקב, והמקומות שבהם הומסו פני האבן מותירים תעלות ונקבים. חלזונות אוכלים את החזויות ביחד עם הסלע, ובמידה שהסלע קשה הם שבים לחפור בפסי המיפגש בין המושבות החזויות. ייתכן כי

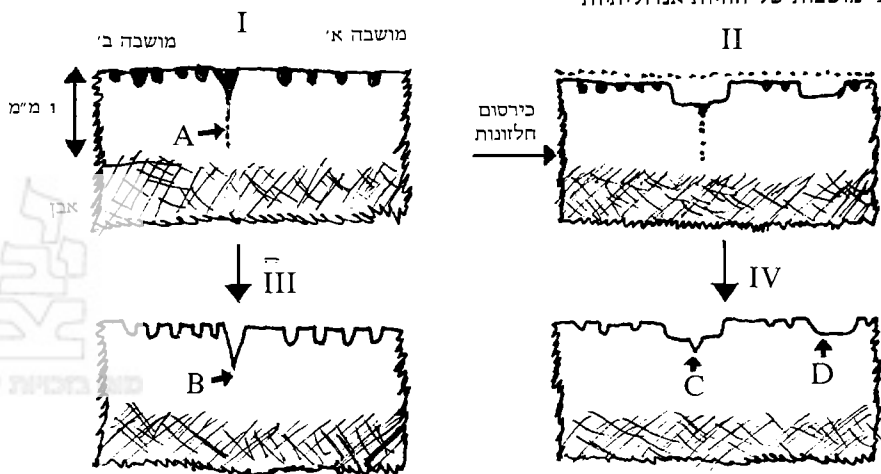


גממיות על-פני סלע באקלים מדברי, תוצר פעילות של כחוליות (החילזון) – בקוטר 1 ס"מ – לקנה-מידה בלבד

סלע המאוכלס חזזיות אנדוליתיות (מבט מלמעלה)



חתך רוחב באבן במקום מיפגש בין שתי מושבות של חזזיות אנדוליתיות



II. I — כאשר החזזיות חיות  
 IV. III — לאחר מות החזזיות והירקבן

במקום המיפגש בין שתי מושבות נוצר פס לבן (A); עם מות החזזיות והירקבן מתפתחת במקום תעלית (B) — תעליות שנוצרו מהמסת חזזיות וכירסום חלזונות — C — תעליות שנוצרו מכירסום חלזונות בלבד — D

תופעה זו קשורה בכך שהחלזונות מעדיפים את הפטריות שבחזזית. לאחר שהחזזיות נאכלות, הן צומחות מחדש ומעמיקות. בביקור הבא החלזונות מעמיקים ומרחיבים את התעליות. כאשר האבן נהפכת והחומר האורגני נרקב, מתגלים שני טיפוסים תעליות שנוצרו על-ידי כרסום החלזונות — הרוכ הוא אלה שבהם היו כבר תעליות של חזזיות, והמיעוט הוא אלה שבהם החלזונות פתחו תעלית חדשה.

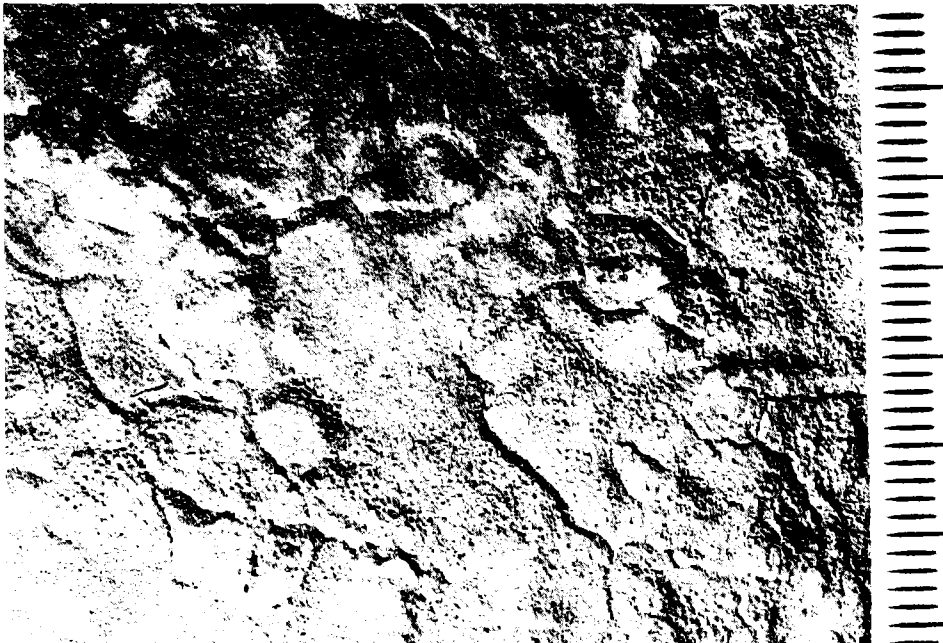
חזויות אפיליתיות גדלות על-פני הסלע או האבן ומגינות עליהם מפני בלייה פיסיקאלית על-ידי טיפות-הגשם. הסלע או האבן נותרים חלקים. חזויות אלו מתפתחות על סלעים משופעים הפונים צפונה גם במדבר וגם באזורים לחים. בהר-הנגב הן מתפתחות על אבנים בעמקים מקומיים שבהם מצטבר אוויר קר ולח. במקומות אלה זמן התפיחה השנתי של החזויות האפיליתיות מגיע ל- 700-500 שעות.

### השימוש בבלייה ביולוגית של אבנים לקביעת תחומי אקלים כיום

בהרי-יהודה (למשל בין הר-טייסיים לירושלים) ובהרי הגלבוע והגליל, בהם נערכו בדיקות ראשונות, נמצא שהסלעים המשופעים מאוכלסים בחזויות אנדוליתיות. לעומת זאת, נמצא שבמקומות נמוכים – למשל, בשער-הגיא – הם מאוכלסים בכחוליות. אם נקבע את זמן התפיחה המצטבר לגבי החזויות והאצות בהרי החבל היס-תיכוני ואת השפעת העננות והשמים על זמן התפיחה, אפשר יהיה לאתר, בעזרת בליית הסלעים, את התחום המדויק של שני טיפוסים האקלים הללו בתוך האזור היס-תיכוני. יכולה להיות לכך חשיבות, ואין זה מן הנמנע שאפשר יהיה להשתמש בידע זה להתאמת גידולים חקלאיים שונים.

בהר-הנגב אפשר לאתר, בעזרת אבנים המאוכלסות על-ידי חזויות אנדוליתיות, את גבול האזור שבו כמות הטל דומה לזו של שדה-בוקר ועבדת, ובתוך האזור הזה אפשר למפות את תזוומיהם של העמקים שבהם מצטברת לחות אוויר גבוהה. לערך זה עשויה להיות חשיבות לגבי יישוב חקלאי, למשל לגבי מיקום חממות.

סימני-בלייה שנותרו בצידה התחתון של אבן בהר הנגב, אשר היתה מאוכלסת בחזויות אנדוליתיות





## שימוש בבלייה ביולוגית של סלעים ואבנים להבנת אקלים העבר

סלע שבלה כתנאים מדבריים ונוצרו בו תעלות או גממיות שעומקן 5-30 מ"מ, ואחר-כך התכסה באדמה, מראה את הבלייה המדברית, גם אם יחשפוהו אלפי שנים לאחר-מכן. כך נמצאו סימני-בלייה מדברית, הקשורה כנראה בתקופה של 10,000-12,000 שנה לפי זמננו, בירושלים, שפלת-יהודה, הכרמל, הגליל העליון המערבי והמזרחי, מדבר-שומרון ומדבר-יהודה.<sup>6</sup>

באופן דומה, סימני-בלייה ים-תיכונית הררית בתקופה שבאה לאחר התקופה ה'מדברית' הנזכרת, נמצאו על סלעים שנחשפו לאחר כיסוי ממושך באדמה במזרח-שומרון, בעין-פואר שבואדי קלט, בשדה-בוקר, בעבדת ובהר-רמון. האקלים השחון של סביבת מעלה-תמר, ממערב לים-המלח, אינו מאפשר כיום התפתחות חזויות אנדוליתיות על אבנים מנותקות. סימני הבלייה שנמצאו על האבנים הללו, ובעיקר מצידן התחתון המכוסה, מראים על כך שאקלים האזור בעבר היה לח יותר ואיפשר קיום חזויות ממין זה.

עד כה בדקנו רק מעט אתרים ארכיאולוגיים, ואף אלה בעיקר במדבר. כאשר האדם מלקט אבנים ומכניסן לקיר ביתו, האבנים אינן מקבלות אור, והאורגניזמים הירודים מתים ומותרים את סימני הבלייה האופייניים. באופן זה יש בדינו דגימה של האקלים עד יום בניית הבית, ואפשר להשוות אקלים זה עם אקלים זמננו. על מצד-תמר, למשל, ידוע שנבנה במאה השלישית לספירה. הבלייה על האבנים שנמצאו בתוך הקירות זהה לבלייה של האבנים הפזורות כיום מחוץ לאתר. כולן מצטיינות בדגמי-בלייה של חזויות אנדוליתיות אשר מתו, ופני-אבן המכוסים כיום בפטינה עתירת-תחמוצות-ברזל. עולה מכאן שהאקלים בתקופה של בניית המצד היה דומה באופן כללי לאקלים היום.<sup>7</sup>

באתר באר-רסיסים מתקופת הברונזה התיכונה א' (2,000-2,200 לפני-הספירה) נבדקה בליית האבנים שנחפרו לאחרונה.<sup>8</sup> בגלל העדרה של בלייה ביולוגית על בסיסם של עמודים בבניינים שחלקם החשוף מעל האדמה נמצא בלוי, הסקנו כי האתר התכסה במשך פחות מ-200 שנה לאחר נטישתו. על אבנים הפזורות בסביבות האתר נמצא אותו טיב בלייה המצוי באבנים שנתגלו בקירות הבניינים. גם סלעים בסביבת האתר וסלעים שחלקים מהם שולבו בתוך הבנייה מראים אותו טיפוס בלייה. מכך אנו מסיקים שהאקלים בבאר-רסיסים לפני 4,000 שנה היה דומה לאקלים ההווה. האבנים בסביבת אתר הר-חרף, שמלפני 9,000-10,000 שנה, מכוסות חזויות אנדוליתיות; אך בתוך האתר עצמו לא היתה כל אבן שנשאה את סימני הבלייה של חזויות אלו. האבנים העתיקות היו חלקות, כדוגמת האבנים החלקות המכוסות חזויות אפיליתיות בבסיס המדרון של שדה-בוקר. מאחר שהחזויות האנדוליתיות קיימות באזור שבו יש 320-470 שעות-תפיחה שנחיות, וחזויות אפיליתיות קיימות באותו אזור, בתחתית המדרון, שם יש כ-670 שעות כאלה, ברור שחל שינוי

6 ראה: A. Danin, R. Gerson, K. Marton & J. Garty, 'Patterns of Limestone and Dolomite Weathering by Lichens and Blue-Green Algae and their Palaeoclimatic Significance', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 37 (1982), pp. 221-223

7 A. Danin & R. Gerson, 'Weathering Patterns of Stones in and Near Archaeological Sites as Indicating Palaeoclimates in the Negev', 1983 (manuscript)

8 ראה: R. Cohen & W.G. Dever, 'Preliminary Report of the Second Season of the "Central Negev Highlands Project"', *Bulletin of American Schools of Oriental Research*, 236 (1979), pp. 41-79

אקלימי ניכר מאז תקופת האתר בהר-חריף, הידועה בספרות המחקר הפריהיסטורית כ'תקופת התרבות החריפאית', עד היום. ייתכן ששעות הפעילות הרבות התקבלו על-ידי עננות מוגברת שגרמה לשיעור לחות גדול יותר על-גבי האבנים, או שתקופה גשומה יותר הביאה לאותה תוצאה. על-כל-פנים ברור ש'התקופה החריפאית' באזור הר-חריף היתה לחה יותר מזו הנוכחית. ככל שנמשיך לבדוק את בליית האבנים באתרים ארכיאולוגיים לעומת סביבתם, נוכל להבין טוב יותר את התנאים האקולוגיים של העבר. יחד עם נתונים המתקבלים מתחומים אחרים, נוכל לברר וללמוד על הסיבות להתיישבות האדם או לנדודיו באזורים שונים בארץ.



## ביבליוגראפיה נבחרת

א' דנין, 'צבען של חומות ירושלים ואבניה', קרדום, 23-21 (1982), עמ' 68-74.  
 א' קושניר, 'מחקרים בחזויות אנדוליתיות בישראל', חיבור לשם קבלת התואר דוקטור, אוניברסיטת תל-אביב, תל-אביב 1979.

- A. Danin, *Desert Vegetation of Israel and Sinai*, Jerusalem 1983.  
 A. Danin, 'Weathering of Limestone in Jerusalem by Cyanobacteria', *Zeitschrift für Geomorphologie* [in press].  
 A. Danin, & J. Garty, 'Distribution of Cyanobacteria and Lichens on Hillsides of the Negev Highlands and their Impact on Biogenic Weathering', *Zeitschrift für Geomorphologie* [in press].  
 A. Danin, R. Gerson, K. Marton & J. Garty, 'Patterns of Limestone and Dolomite Weathering by Lichens and Blue-Green Algae and their Palaeoclimatic Significance', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 37 (1982), pp. 221-223.  
 J. Gat & M. Magaritz, 'Climatic Variations in the Eastern Mediterranean Sea Area', *Naturwissenschaften*, 67 (1980), pp. 80-87.  
 M. Magaritz & J. Heller, 'A Desert Migration Indicator — Oxygen Isotope Composition of Land Snail Shells', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 32 (1980), pp. 153-162.  
 D. Neev & J. Hall, 'Climatic Fluctuations During the Holocene as Reflected by the Dead Sea Levels', *International Conference of Terminal Lakes*, Ogden (Utah) 1977.

# הדנדרוכרונולוגיה כשיטה לחקירת אקלימי העבר

אברהם פאהן

ההתעניינות בתולדות האקלים נובעת הן מתוך סקרנות מדעית טהורה, העשויה לתרום גם להבנת תהליכים היסטוריים, והן מתוך מניעים מעשיים. דיון זה מוקדש לכבוד שישים שנות פעילותו המדעית של פרופ' דב אשבל, חוקר אקלים הארץ וסביבתה.\*

פרופ' אשבל שייך לדור המייסדים של המדע המתחדש בארץ-ישראל ומי שהקים את החוג למטאורולוגיה וקלימאטולוגיה באוניברסיטה העברית; רבים מחוקרי האוניברסיטה דהיום, ואף אני בתוכם, נמנו עם תלמידיו.

התעניינותו של דב אשבל בקלימאטולוגיה חרגה מגבולות התחום המקצועי הצר. הוא פעל ליישום הידע שרכש בתחום זה לכיוונים שונים אחרים, כגון חקלאות ותכנון בנייני-מגורים ומיבני-תעשייה. כך, למשל, מחקריו על עוצמת הקרינה האולטרה-סגולית באזורים השונים של הארץ איפשרו בזמנו להוציא מסקנות לגבי חשיפת גוף האדם לשיזוף.

הידע על מחזורים אקלימיים בעבר עשוי לאפשר חיזוי שינויים אקלימיים בעתיד. מאמצים רבים נעשים, כדי לגלות שינויים אקלימיים בעבר, בעזרת שיטות שונות, כגון גיאולוגיות, פליאונטולוגיות, אנליזה של גרגרי אבקה (פאלינולוגיה) ודנדרוכרונולוגיה.

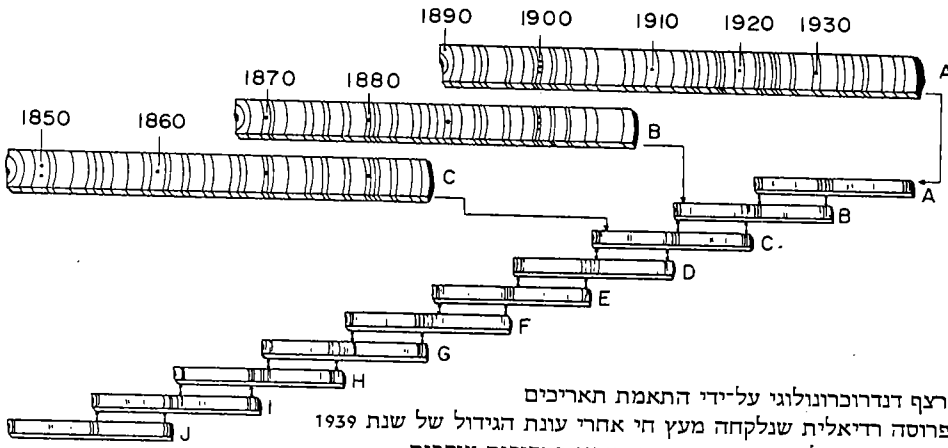
כדיוננו הציג ד"ר אבינעם דנין שיטה מקורית, חדשה ומעניינת לחקירת אקלימי העבר, בעזרת צורות בליית סלעים ואבנים על-ידי חזזיות ואצות.

לכל אחת מן השיטות יש יתרונות וחסרונות, אך בשילוב תוצאות המחקרים השונים נוכל אולי להגיע לידע מדויק יותר.

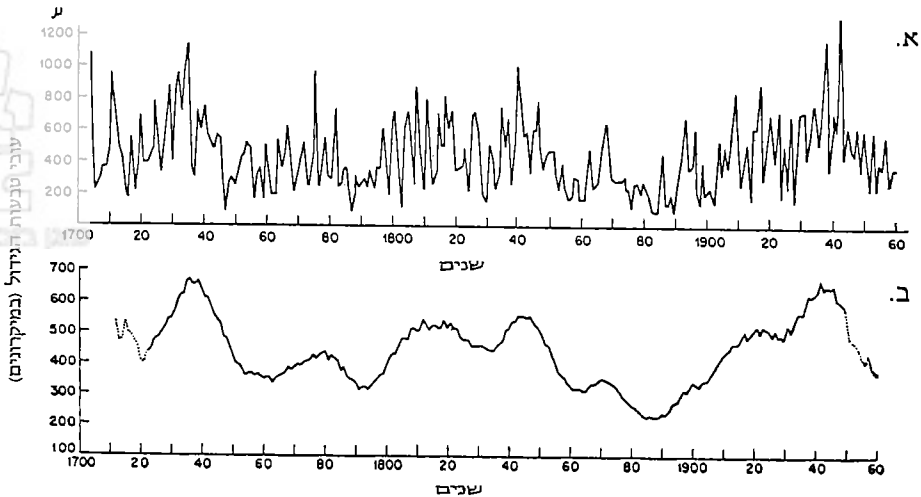
אחת השיטות האמינות יחסית היא הדנדרוכרונולוגיה. שיטה זו מבוססת על ההנחה, שהגדילה השנתית ברוחב גזע העץ עומדת ביחס ישר לתנאי הסביבה. גדילה שנתי זו מתבטאת בחתך רוחב של העצה של צמחים מאזורים בעלי אקלים עונתי טבעת, המכונה 'טבעת שנתי'. כל טבעת מורכבת מאזור כהה יותר (של עצה בעלת תאים רחבים יותר) ואזור בהיר יותר (עצה בעלת תאים צרים יותר).

הדנדרוכרונולוגיה מתאימה במיוחד למחקר תולדות האקלים באזורים אֶרֶיִיִים (שחונים) או ארִיִיִים-למחצה, בהם המשקעים הם הגורם המגביל את גידול הצמחים. באזורים אלה אפשר להבחין בהבדלים ניכרים בעובי הטבעות השנתיות. תופעות לא-רגילות של אקלים יכולות לגרום,

\* על-אודות חלקו של פרופ' אשבל בחקר האקלים בארץ-ישראל וביכליזוגרפיה נבחרת של כתביו, ראה כמדור 'מידע', להלן.



יצירת רצף דנדרוכרונולוגי על-ידי התאמת תאריכים  
 A – פרוסה רדיאלית שנלקחה מעץ חי אחרי עונת הגידול של שנת 1939  
 B-J – דוגמאות שנלקחו מבתיים ישנים שנבנו בתקופות עוקבות



א. עקומה המייצגת נתונים אבסולוטיים של תנודות בעובי הטבעות השנתיות בגזע של זוגן השיח  
 ב. עקומה של תנודות בעובי הטבעות השנתיות בגזע זוגן השיח. כל נקודה בעקומה היא ממוצע של 21 שנה (עשר שנים לפני השנה הנתונה ועשר שנים אחריה)

בשנים מסוימות, להופעת 'טבעת מדומה' (נוספת לטבעת הרגילה של העץ), או לכך שהטבעת השנתית לא תופיע כלל באזורים מסוימים של העץ.  
 על-מנת למנוע טעויות בייחוס הטבעות לשנים המתאימות וכדי לזהות את 'הטבעות המדומות' ומיקום הטבעות החסרות, פיתחו את השיטה של התאמת תאריכים (cross-dating). שיטה זו מבוססת על העקרון, שכאשר הגדילה של צמחים אחדים מושפעת על-ידי שינויים אקלימיים שווים, יתפתחו בתקופות זהות טבעות בדגם דומה. התאמת התאריכים נערכת באמצעות השוואת טבעות רבות בין עצים שונים הגדלים באותו אזור (ראה ציור לעיל). קביעת כרונולוגיה אמינה על-פי חתך מסוים של עץ באזור מסוים מאפשרת לקבוע את תאריכי מהלך-חיייהם של עצים אחרים, על-



צילום מיקרוסקופי של חתך-רוחב בעצה משוית של גזע זוגן השיח (בהגדלה פי 25). ניתן לראות הברלים ניכרים ברוחב הטבעות השנתיות השונות

ידי השוואה זהירה ומדויקת עם החתך הנ"ל. בעזרת שיטת התאמת התאריכים ניתן להוסיף לכרונולוגיה הידועה סדרה של דוגמאות קדומות יותר ויותר של עצים שמועד כריתתם בלתי-ידוע, וכך ליצור סדרה כרונולוגית המגיעה עד לתקופות קדומות מאוד.

בעזרת הדנדרוכרונולוגיה אפשר, כאמור, לבדוק אם באזור מסוים היו שינויים אקלימיים במשך תקופות ארוכות, ואם הם שינויים מחזוריים. כדוגמא למחקר דנדרוכרונולוגי, אביא כאן את תוצאות המחקר שנעשה בנגב על זוגן השיח (ראה ציורים).<sup>1</sup> ממחקר זה וממחקרים אחרים אפשר להסיק שקיימת מחזוריות אקלימית. ניכרים מחזוריים של 90-100 שנים, ובתוכם ייתכן שקיימים שלושה מחזוריים משניים, קטנים יותר. אני סבור שתנודות אקלימיות קטנות כאלו היו קיימות במשך אלפיים או שלושת אלפים שנה לפני זמננו. אלה שינויים קלים למדי, ואילו שינויים קיצוניים לא הובחנו בתקופה של כשלושת אלפים השנים האחרונות. חומר צומח שהובא לפני מחפירות ארכיאולוגיות, היה בדרך-כלל של עצים הגדלים גם היום. אחת הבדיקות שערכתי היתה של עץ מפוחם שהובא מסיני, כנראה מלפני חמישה-עשר אלף שנים. עץ מפוחם זה, שטבעותיו השנתיות היו לפעמים צרות יותר ולפעמים רחבות יותר, היה ערער. זאת אומרת שגם בתנאים ששררו אז בסיני יכול היה הערער לגדול, וגם אז היו תנודות אקלימיות, אבל היו אלה תנודות קלות שלא פגעו ביכולת התפתחותו של הערער.

לבסוף נציין, שכמו בכל השיטות, גם לדנדרוכרונולוגיה יש חסרונות; השגיאות כאן יכולות לנבוע בעיקר ממחלות, מזיקים, או פגיעות של אדם ובעלי-חיים, אך נראה ששגיאותיה של שיטה זו קטנות יותר מאלה של שיטות אחרות, ויש בה תרומה מהותית להכרת אקלימי העבר והשפעתם על מהלך חיי צמחים.

1 A. Fahn, N. Wachs & C. Ginzburg, 'Dendrochronological Studies in the Negev', *Israel Exploration Journal*, 13 (1963), pp. 291-299

# חקר שינויי האקלים בעיני הגיאולוג

פאול גולדברג

רוצה אני לברך את אבינעם דנין על הרצאתו שבה הציג אמצעי חדש בעל ערך רב, שיעזור בפיענוח שינויי האקלים אשר אירעו בעבר.

חייבים אנו לזכור כי לכל שיטת מחקר ולכל תחום — בין אם זואולוגיה, בוטניקה או גיאולוגיה — יש נקודת-מוצא מבוססת ובעלת אוריינטציה מסוימת. ענייננו כאן הוא בתוצאות פליאו-אקלימיות, אך הדבר נכון לגבי כל שטח שהוא. אין ספק שהשוואה בין תוצאות של שדות-מחקר שונים הינה מעניינת ומועילה. אדון כאן בכמה מן הנקודות אותן העלה אבינעם דנין, המתייחסות לאקלים הקדום, ואציגן כפי שהן נראות בעיני הגיאולוג. בהשוואה למסקנות העולות מן המחקר הגיאולוגי, ישנן נקודות של הסכמה, נקודות 'נייטראליות' ודברים המוטלים בספק.

אני מסכים בהחלט עם ההערכה כי התקופה שבין 10,000-12,000 לפני-הספירה היתה יבשה, ואילו התקופה שלאחריה — הנטופית — שבין 8,000-10,000 לפני-הספירה היתה רטובה יותר.<sup>1</sup> בפצאל שבעמק-הירדן יש לנו עדות טובה לאירווייה והשקעה במשך תקופות אלו, הנשויכות כפי הנראה בהתאמה לתקופת היובש ולתקופה הלחה שלאחריה. יתירה מזאת, באזור הר-חרוף שבנגב יש הוכחות טובות לשינוי אקלימי, המיוצג על-ידי הפסקה של הרבדת הלס בסביבות 8,000 לפני-הספירה ותהליך של פדוגנזה (יצירת קרקע) חזקה יחסית, שאינה דומה בשיעורה או בסגנונה לפדוגנזה כיום.<sup>2</sup>

עדויות אלו עדיין אינן מספקות, ויש לערוך עבודות-שדה ובדיקות מעבדתיות נוספות. יחד עם זאת, כבר עתה ניתן לראות כי שינוי זה מייצג שינוי משמעותי בדינאמיקה של היווצרות הנוף באזור הר-חרוף.

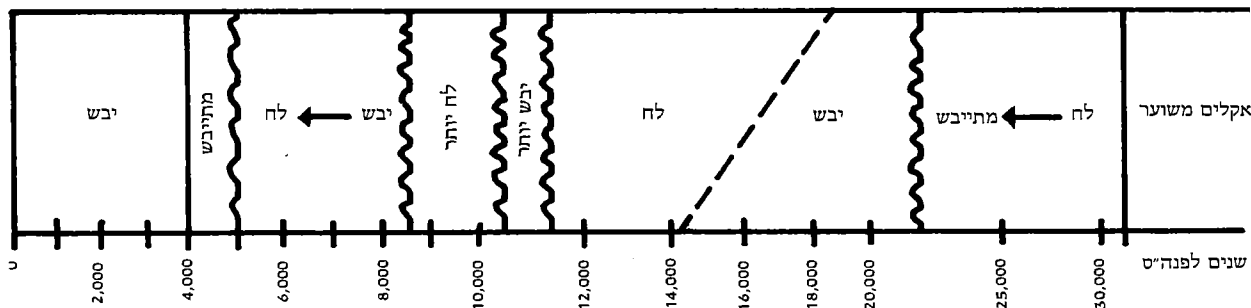
יש לציין כי מסקנות המחקר הפאלינולוגי (מחקר אבקת הצמחים) מן האתר הנטופי של ראש-חורשה ומאתר D15 בנחל-צין — שניהם בהר-הנגב — מצביעות על שלב לח בתקופה זו.<sup>3</sup> כאמור, ישנן כמה נקודות 'נייטראליות', ביניהן מחקר הבלייה הביולוגית על סלעים, אשר יכול לעזור ולהבהיר בעיות פליאואקלימיות המתעוררות במחקר הגיאולוגי. כך, למשל, קיימת הבעיה הקרויה 'המילוי ההיסטורי' — הצטברות סדימנטים פלוביאטיליים (= מילוי) המיוחסת לתקופות ההיסטוריות. ויטה-פינזי, שזיהה את התופעה ונתן לה את שמה,<sup>4</sup> מצא הצטברויות כאלו במקומות

1 ראה: P. Goldberg & O. Bar-Yosef, 'Environmental and Archaeological Evidence for Climatic Change in the Southern Levant', *British Archaeological Reports*, 133 (1982), pp. 399-414; J. Schuldenrein & P. Goldberg, 'Late Quaternary Palaeoenvironments and Prehistoric Site Distributions in the Lower Jordan Valley: A Preliminary Report', *Paléorient*, 7 (1981), pp. 57-71

2 על-פי תצפיות מערכת במקום.

3 ראה: A. Horowitz, *The Quaternary of Israel*, New York 1979

4 C. Vita-Finzi, *The Mediterranean Valleys*, Cambridge 1969



נסיון שיחזור שינויים  
פליאו-אקלימיים  
בארץ-ישראל  
בהסתמך על  
מימצאים  
סטראטיגרפיים  
מאזורים שונים

אחדים באגן היס-התיכון. כיום נראה כי המדובר ביותר משלב-מיליון אחד. באזורנו אירע המילוי ההיסטורי בין התקופה הרומית ל'מי-הביניים המאוחרים. עדויות לכך ישנן בשפע בצפון-מערב הנגב ובמזרח-סיני. שם קיימת הצטברות של סחף אדמה שהובא עם הגשם (סילט פלוביאלי) בעובי של 3-4 מטרים אשר תוארכה בתיארוך רדיומטרי של קרובן 14 ל-650-1750 לספירה. בעיה ראשונית שלא נפתרה לפי שעה היא, האם שלב זה של הצטברות סחף קשור בשינוי אקלימי, כלומר תולדה של תקופה גשומה יותר, או זוהי תוצאה של פעילות אנושית מסוימת – למשל, חקלאות. בתקופה הביזאנטית, שבה היה המדבר מיושב בצפיפות רבה, ידוע כי התושבים עסקו בבירוא הצמחייה הטבעית וחשיפה אינטנסיבית של הנוף. מחקר שיעסוק ב'בליית הסלע, אשר יתמקד באתרים ביזאנטיים, יעזור לנו אולי להעריך ולקבוע מי משתי ההנחות מתאימה כאן – מעורבות אנושית או שינוי אקלימי.

הערת האחרונה מתייחסת לחוסר-הסכמה הקיים, לפחות לפי שעה, בקשר למסקנות מסוימות בשני ענפי המחקר שבדיון. כך, למשל, מתחילה להצטבר עדות מנחל באר-שבע<sup>5</sup> ונחל-צין<sup>6</sup>, כי התקופה הכלקוליתית היתה באופן מובהק תקופה רטובה יותר. ניתן לראות זאת מנחל באר-שבע (אתר שקמים), שם ישנה השקעת ואדי נרחבת, וכן על-ידי בדיקת הפולן מנחל-צין.<sup>7</sup> שלב לח זה לא מיוצג עדיין במחקר בליית הסלע.

נשאלת השאלה, האם עבודה, שתיעשה בשדה-מחקר זה ותעסוק בתקופה זו, תהיה רגישה דייה למדוד את שינויי האקלים במרחק-זמן של אלף שנים, שהוא מרחב הזמן של התקופה הכלקוליתית; וזאת כדי לבדוק כמה רגישה שיטת מחקר זו לשינויי אקלים, או להיפך, מהו סדר הגודל של השינוי הנחוץ על-מנת שירגישו בו בדגם בליית הסלע.

ברור כי נחוצה עבודה נוספת בשדה-מחקר מבטיחה זה, אבל עלינו לברך על האפשרויות החדשות שנפתחו בפנינו.

5 על-פי תצפיות מערכת במקום.

6 הרוביץ, לעיל, הערה 3.

7 שם, שם.

## בלייה ביולוגית של פני-הסלע – מכשיר הדורש חידוד וכיול

זאב משל

שמחתי לשמוע במסגרת ה'קתדרה בעל-פה' של יד בן-צבי הרצאה שנישאה לכבודו של פרופ' אשבל, בנושא הקשור ל'מדעי הטבע' ולא ל'מדעי הרוח' – תחום שבו יד בן-צבי עוסקת בדרך-כלל.

לא זכיתי להיות מתלמידיו הישירים של פרופ' דב אשבל, אבל כמו אצל רבים, כך גם בעיני הוא הצטייר כדמות החוקר שהציג מזיגה מלאה בין מדעי הרוח למדעי הטבע. מבחינה זאת, הנושא והתחומים שנדונו כאן הם דוגמא נאה למזיגה זו ברוח מחקריו של פרופ' אשבל. הנושא שאבינעם דנין הציג לפנינו מתקשר היטב לארכיאולוגיה, שכן הוא עשוי לפתח מכשיר כרונולוגי שהארכיאולוגים אולי יוכלו לנצל בעתיד. השאלה הגדולה היא, איך נכיל ונכון מכשיר זה. בעיה דומה קיימת גם לגבי הטכנולוגיה הוותיקה יותר של קביעת תאריך על-פי בדיקות פחמן 14, שכאילו כבר נתמסדו. לפני שנים אחדות ביצעתי חפירה בסיני והגשתי כמה מימצאים לבדיקות פחמן 14. היו בידי מושגים על התאריך המשוער של המימצא ורציתי לאשש תאריך זה על-פי הבדיקה הפיסיקאלית. בתשובה ענו לי הפיסיקאים, שאם יש לי השערה מבוססת על תאריך המימצאים, יש בכך משום ערך עצום עבורם, כי יהיה זה מפתח בידיהם לכייל את מערכת הבדיקות של שיטת פחמן 14 לגבי התקופות ההיסטוריות המאוחרות ביחס...

אבינעם דנין כבר הזכיר מחקרים מתחומים שונים שיכולים לעזור לנו בבדיקת הכרונולוגיה וההשתנות של אקלימי העבר; הוא הזכיר את סימני העלייה והירידה במיפלסי ים-המלח ואת המחקרים הדנדרוכרונולוגיים. בשיטה זו, האחרונה, סופרים ובודקים את הטבעות השנתיות בגזע העץ ואת עוביין, ועל-פי זה משחזרים את קיומן של שנים גשומות ושנים שחונות בעבר. חבל שאין בארץ עצים זקנים דיים, אבל בארצות-הברית נחקרו עצי סקוויה ענקיים וזקנים מאוד, שאולי אם היו בארץ דוגמתם, היו מגלים לנו מידע על ימי דוד המלך או תקופת בית-שני. כמו-כן נזכרו ברמז בבדיקות מורפולוגיות וגיאולוגיות של התפתחות קרקע והיווצרות טרסות, כדי לקבוע תאריכים. יש להוסיף על אלה את בדיקות הפולן, כלומר בבדיקת אבקת-צמחים, אשר פותחו גם בארץ בחמש-עשרה השנים האחרונות.

דנין העלה את השיטה של בבדיקת בלייה הנגרמת מפעילותן של חזזיות ואצות. אבל אם משווים תוצאות של שיטות שונות מתחום מדעי הטבע, המדויקים לכאורה, מוצאים שיש לפעמים סתירות פנימיות; גם חלק מן המסקנות שעלו כאן הערב אינן תואמות, למשל, את מסקנות החתכים שמצאתי במאמריו של אהרן הורוביץ, שנעשו לפי בבדיקות הפולן. מכאן יש להסיק כי לפי שעה



המכשירים האלה עדיין אינם מכילים כהלכה. אין בכך כדי לבטל את השיטה, אלא למקדנו בבעיה העיקרית שלפנינו: איך לכוון באופן טוב ואמין יותר את המכשיר שבידינו; כלומר, איך לקבוע את כל הגורמים והמשתנים האפשריים באופן שנהיה בטוחים יותר בתוצאה.

סיירתי לפני זמן-מה על גבעה אחת כנגב וראיתי את התופעות שאבינעם דנין תיאר כאן; הסתבר שיש הבדל בין בליית האבנים בראש הגבעה ובמדרונותיה השונים. והתברר שעל גידול החזויות משפיע המיפנה, הגובה, המיקום על המדרון וההתקררות של האבן בהתאם לגודלה; כמרו-כן הרי לכל אבן שמונחת על המדרון יש גם מיפנה דרומי ומיפנה צפוני, ומזרחי ומערבי. כיצד נדע שהאבנים שבדקנו לא התדרדרו בתקופה מסוימת ושינו כיוון או גובה? והרי שיקולים אלה די בהם כדי לשנות את התוצאה.

אלה רק חלק מן המשתנים שאפשר להעלות על הדעת. נשאלת אפוא השאלה, איך, למשל, אפשר לשחזר את ההיסטוריה של אבן במשך מאות ואלפי שנים לפני שהיא הוכנסה לקיר במיכנה מתקופת הברונזה התיכונה א' – לפני ארבעת אלפים שנה? אני חושש שבשלב הנוכחי עוד אין דרך להתחשב בכל הגורמים אשר השפיעו. מה שנותר לפיכך לעשות הוא לנצל את המימצאים הארכיאולוגיים עצמם מהתקופות השונות ולנסות לראות איזו תמונה אקלימית ואיזו תמונה סביבתית הם יוצרים. אבינעם דנין אכן הציג כאן דרך חדשה שאותה יש לנצל במשולב עם שיקולים אחרים. שמחתי לשמוע את מסקנות הבדיקה שעשה בבאר-רסיסים, הקובעות כי לפני ארבעת אלפים שנה, בתקופת הברונזה התיכונה א', היו תנאי אקלים די דומים לתנאים היום. לאותה מסקנה בקשר לאתרי אותה תקופה אני מגיע גם מכיוון אחר: ישנם הרבה מאוד אתרים קטנים ומפוזרים מתקופה זאת ולעומתם ארבעה-חמישה יישובים גדולים מכונסים – בבאר-רסיסים, אתר ירוחם, אתר ניצנה ואתר הר-ציד. אתרים גדולים אלה נמצאים כולם ליד בארות, ונדמה לי שאין זה מקרה. מותר להניח כי הבארות קדומות הן ונחפרו כבר לפני ארבעת אלפים שנה, אם לא קודם-לכן; אם ההנחה נכונה, הרי מסתבר כי גם בתקופה הקדומה ההיא אפשר היה להקים יישובים מרכזיים אך ורק ליד בארות. ומכאן שאין לדבר על אקלים גשום יותר בימים ההם (כמסקנתו של א' דנין משיטתו).

החוקרים בני זמננו, המנסים להסביר את חילופי התרבויות בהיסטוריה של הנגב בחילופי אקלים, אינם ראשוניים בכך. זכורים עוד מחקריהם של הנטינגטון ואחרים, שתהו על מציאותם של יישובים גדולים וחקלאות כנגב השחון. אנשים שאינם מכירים את הדברים היטב השתכנעו מן הנימוק, שהנגב השחון אינו מאפשר בניית ערים וחקלאות ממין זה, ועל כן יש לקבל את הדעה בדבר שינויי אקלים. אך כל המנסה לחקור וללמוד את שיטות החקלאות הקדומה כנגב חייב להיווכח שהיא הותאמה היטב לנגר העילי ולשטפונות כנחלים – תופעות הקשורות באקלים ההולם גם את זמננו. תושבי הנגב דאו הצליחו להתקיים בתנאים דומים לאלה של ימינו, וידעו לרתום אותם לצרכיהם. אם צריך היה אז לנקז לדונאם אחד של שטח מעובד מי נגר משטח הגדול פי שלושים, הרי יש בכך כדי להצביע על כמות משקעים נמוכה.

דומה כי לפי שעה אין ברירה – בייחוד אם עוסקים באזורים צחיחים – אלא להתמקד בניתוח המימצאים הארכיאולוגיים, כדי להגיע אל חקר תנאי הסביבה בעבר. באשר לכלים החדשים שהציג אבינעם דנין, יש להמתין עד שאלה יתחדרו ויכולו, ואז נוכל להפיק מהם את המידע החשוב לנו כל-כך.