

סלעי הפוספט של ישראל

דויד סודרי

מבוא

הזרחן (P), מרכיב עיקרי של סלעי הפוספט הסדימנטריים (פוספוריטים), הוא היסוד ה־11 בשכיחותו בקרום כדור הארץ (כ־0.1% בממוצע). בסלעי יסוד וסלעים מטמורפיים ריכוזו בדרך כלל 0.07%–0.14%. בסלעי משקע (קרבונטים, חולות, חרסיות) הריכוזים נמוכים הרבה יותר, למעט בפוספוריטים, שם ריכוזו הזרחן מגיע עד כ־15%. בסלעי היסוד ובסלעים מטמורפיים הזרחן מצוי בעיקר כמינרל פלואוראפטיט $[Ca_{10}(PO_4)_6F_2]$, ובפוספוריטים כקרבונט־פלואוראפטיט $[Ca_{10}(PO_4)_6(CO_3F)_xF_{2-x}]$. צורה מינרלית אחרת שבה מופיע הזרחן ונפוצה בעולם החי הוא המינרל הידרוקסיאפטיט $[Ca_{10}(PO_4)_6OH_2]$. מינרל זה הוא המרכיב העיקרי של שלד האדם ושיניו וכן של שאר החולייתנים. עקב הראקטיביות הכימית הגבוהה של הזרחן הוא אינו מצוי בטבע כיסוד חופשי, אלא מופיע בתרכובות מינרלוגיות יחד עם יסודות אחרים (חמצן, סידן, פלואור, אלומיניום ועוד).

הזרחן הוא יסוד חיוני לכל צורות החיים. בין היתר, הוא מרכיב חשוב של החומצות הגרעיניות DNA ו־RNA, של האנזימים ושל הפוספוליפידים, הבונים את הקרומיות העוטפות את תאי החי. לזרחן יש תפקיד מרכזי במשק האנרגיה של התא. המיטוכונדריום, 'תחנות הכוח' של התאים בעלי הגרעין, מייצרות באמצעותו מולקולות Adenosine tri-phosphate – ATP – (ה'מטבע' האוניברסלי של האנרגיה בצומח ובחי), המספקות אנרגיה מטבולית לפעילות התא.

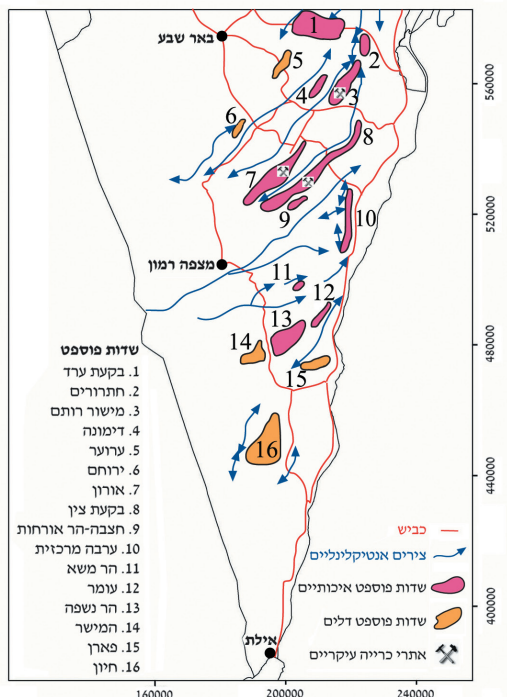
* דויד סודרי הוא חוקר במכון הגאולוגי בירושלים, משרד התשתיות.

הזרחן הוא אחד משלשת הנוטריינטים העיקריים, לצד חנקן ואשלגן, החיוניים לצמח, וזה חייב למצותו מהאדמה כדי שצמיחתו תהיה אפשרית. ללא אספקה סדירה של זרחן לשכבת האדמה לא ניתן לקיים את החקלאות האינטנסיבית ההכרחית לימינו ולא יהיה מזון לבהמה ולאדם. ואולם, בניגוד לחנקן, ובמידה מסוימת גם לאשלגן – המצויים בטבע בכמויות בלתי נדלות כמעט – זמינות הזרחן בטבע מצומצמת הרבה יותר. סלעי הפוספט שעל פני השטח ובבטן האדמה הם המקור היחיד בעולמנו לאספקה כלכלית של זרחן לצורכי האדם. זהו משאב טבע המצוי בכמויות סופיות, וכמקור של זרחן אין לו תחליף כלכלי אחר בטבע. רוב הפוספט המופק בעולם (85%) הוא ממקור סדימנטרי, והשאר מקורו בסלעי יסוד וסלעים מטמורפיים (14%) – בעיקר קרבונטיים מהפרוטרוזואיקון ו-guano (1%) – סלעי גיר שהוחלפו על ידי לשלשת של עופות ימיים, עשירת זרחן, באיים סוב־טרופיים. ישראל, בדומה לשכנותיה (ירדן, סוריה, מצרים, סעודיה), התברכה במרבצים גדולים של פוספט סדימנטרי. מרבצים אלה מצויים בחלקים שונים של הנגב (איור 1), ואחדים מהם מנוצלים כיום באינטנסיביות.

תולדות החיפוש אחר סלעי הפוספט בישראל

הראשון שדיווח על קיומן של תופעות פוספט בישראל היה לואי לארטה (Lartet) בשנת 1868, שהבחין בהם בסביבות ראש זוהר. שנים לאחר מכן (1903) תיאר מקס בלנקנהורן (Blanckenhorn) תופעות פוספט נוספות בשטחים אחרים של מדבר יהודה (מר סבא, בית לחם, יריחו) ובעבר הירדן. לדבריו, ניתן להבחין בקיומה של 'חגורת פוספט' הנמתחת מסוריה לעבר הירדן ומשם למרחב פלסטינה עד למצרים. על בסיס ממצאיו גילו לאו פיקרד (Picard) וז'ון-ויליאם אוונס (Evans), בשנת 1928, תופעות פוספט נוספות בחתך הסנון, לאורך כביש ירושלים-יריחו, אחדות מהן עם ריכוז תחמוצת זרחן (P_2O_5) עד 24%. ממצאיהם וממצאי גאולוגים אחרים, ג'ורג' סטנפילד בלייק (Blake) ונתן שלם (Shalem), שתיארו תופעות פוספט דומות בשטחים שונים של מדבר יהודה, סוכמו בדו"חות ממשלתיים של שלטונות המנדט. ערכן הכלכלי של תופעות פוספט אלה הוטל בספק. בהערכותיו על פוטנציאל משאבי הטבע של פלסטינה ציין סידני-הרברט שאו (Shaw) שלפוספט של מדבר יהודה יש ערך כלכלי מוגבל. הוא אף הוסיף, בדברי ההסבר שלו על המיפוי הגאולוגי שערך

בדרום פלסטינה, שלא נמצאו בחלק זה של האזור שכבות פוספט כלשהן בחתך הקרטיקון העליון או הפאליאוקן.



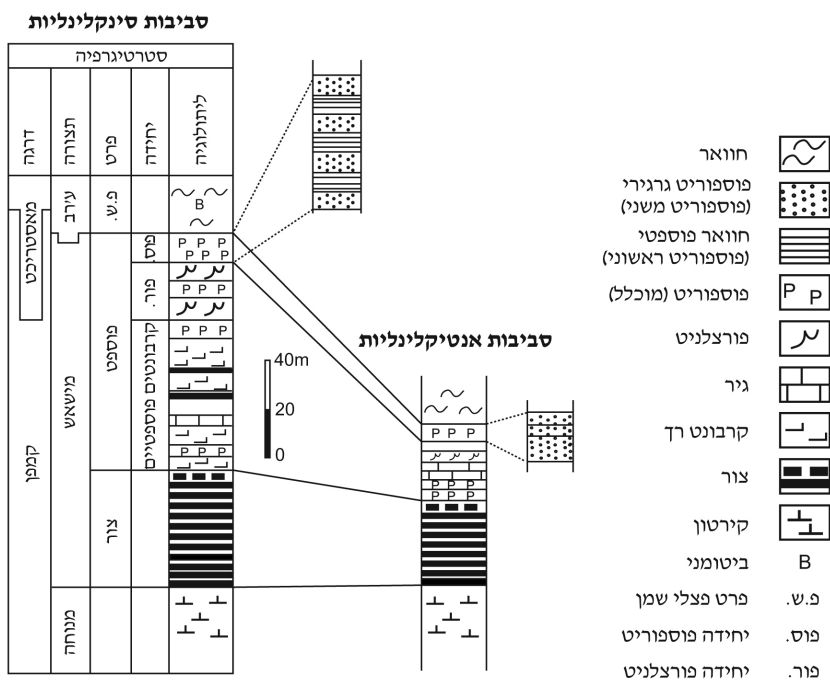
איור 1: מפת מיקום של שדות הפוספט בנגב.

תופעות פוספט בעלות ערך כלכלי התגלו רק מאוחר יותר, במהלך המיפוי הגאולוגי של הנגב שערכו יעקב בן-תור (Bentor) ועקיבא פרומן (Vroman) בשנות החמישים והשישים. חתכים מועשרים בפוספט נמצאו בחתך הקמפן באחדות מהסינקלינות של הנגב. בן-תור (1953) אף הצביע על הקשר בין הטקטוניקה לבין תפוצתם של סלעי הפוספט בנגב, וזאב רייס (Reiss) (1962) הגדיר את הביז'סטרטיגרפיה שלהם. מרבץ הפוספט הכלכלי הראשון שהתגלה היה בסינקלינת אורון בשנת 1950, ושנתיים לאחר מכן החלה כריית הפוספט שם. סקרי פוספט נרחבים בוצעו לאחר מכן בחלקים שונים של הנגב על ידי המכון הגאולוגי ואנשי חברת הפוספטים בע"מ (קודמתה של חברת 'רותם אמפרט' של היום). סקרים אלה הביאו במהלך השנים לגילויים של מרבצי פוספט נוספים, בין היתר במישור רותם, בקעת צין, בקעת ערד, שולי הערבה ובנגב המרכזי. מחקרים פטרוגרפיים, מינרלוגיים וגאוכימיים שבוצעו בפוספוריטים של

הנגב תרמו במקביל מידע רב על הרכבם, השתנותם במרחב ותנאי היווצרותם. כיום מתנהלת כריית הפוספט בשלושה אתרים עיקריים בנגב הצפוני – בקעת אורון, בקעת צין ומישור רותם (איור 1), שבו גם נמצא מפעל המייצר חומצה זרחתית ודשנים מתוצר ההשבחה של הפוספוריט הגולמי משלושת אתרי הכרייה.

מיקום גאולוגי של סלעי הפוספט בזמן ובמרחב

סלעי הפוספט הכלכליים של ישראל (הכדאיים לניצול) נמצאים בעיקר בנגב הצפוני והמרכזי והנם חלק מחגורת הפוספט היסודית המשתרעת מעיראק עד מרוקו,



איור 2: ליתוסטרטיגרפיה של תצורת מישאש ושינויים פאציאליים (התקצרות ניכרת של החתך והתגברות המרכיב הפוספטי) מהאגנים (סינקלינות) לאזורים המוגבהים של הנגב (אנטיקלינות).

לאורך השוליים הדרומיים של ים תטיס. חגורת פוספט זו התהוותה בשלבי זמן שונים, החל מהטורון (טורקיה) עד איאוקן תחתון (טוניסיה, אלג'יריה ומרוקו), והיא מכילה כמויות עצומות של סלעי פוספט – יותר מ-60% מכמויות הפוספט הידועות בעולם. הפוספוריטים של ישראל, בדומה לאלה שבארצות השכנות (סוריה, ירדן, מצרים), נוצרו בקמפן העליון. הם מצויים בחלקה העליון של סדרת סלעים ששקעו מתוך ים רדוד ופורה (תצורת מישאש; איור 2), יחד עם צור, פורצלניט, וקרבוניט עשיר בחומר אורגני, היוצרים אסוציאציה אופיינית לרבים ממשקעי הפוספט בעולם, בעבר ובהווה (Kolodny & Garrison, 1994).

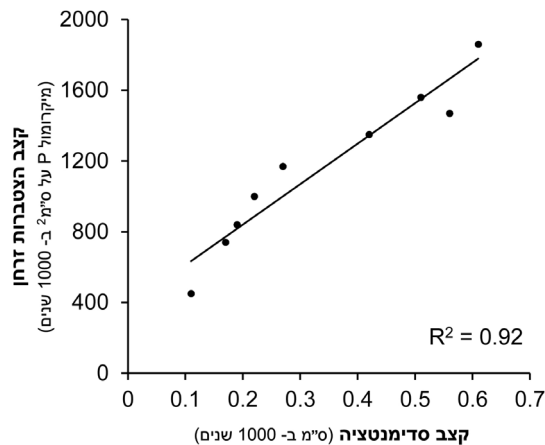
גורמים טקטוניים ופאלאוקנוגרפיים ששררו בנגב בתקופת הקרטיקון העליון השפיעו רבות על משטר ההשקעה של תצורת המישאש. בתקופה זו היה הנגב חלק מאגן מקומט קלות, שהשתרע משולי המסיב הערבו-נובי בדרום לתוך ים תטיס הפתוח בצפון-מערב. קימוט האזור החל בסוף הקנויאק, כחלק מהיווצרותה של 'קשת הקימוט הסורית', ונמשך בתקופות מאוחרות, כתוצאה מלחצים טקטוניים שפעלו על כל הלבנט. קימוט זה שינה את התבליט המתון ששרר עד אז ויצר סדרת קמרים מתונים (אנטיקלינות), וביניהם קערים (סינקלינות), שבשוליהם הצטברו מרבית משקעי הפוספט (תיבה 1).

תיבה 1

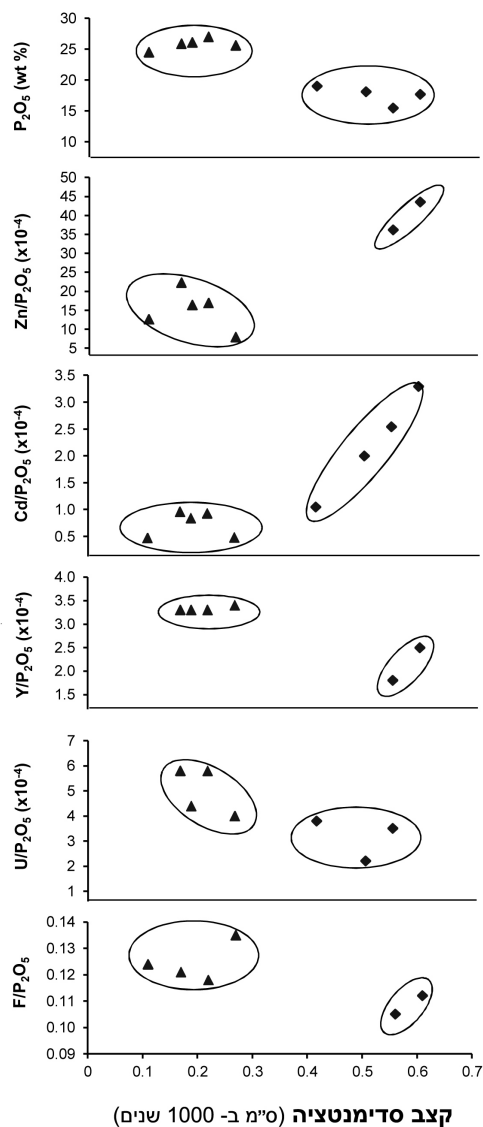
היכן נמצא הפוספוריט האיכותי של הנגב ?

נטען בעבר שמשקעי הפוספט של הנגב הצטברו בעיקר בקערים הסינקלינליים של הקמפן המפרידים בין שורת המבנים האנטיקלינליים. טענה זו נכונה בעיקרה. חתך הפוספט מפותח הרבה יותר במרכז הסינקלינות מאשר בשוליים של האנטיקלינות. הקורלציה החיובית המצוינת בין קצבי הסדימנטציה לבין קצבי הצטברות הזרחן (איור 7) היא עדות נוספת לכך. בסינקלינות של הנגב קצבי הסדימנטציה בפרט הפוספט (ס"מ ל-1,000 שנה) וקצבי ההצטברות של הזרחן (מיקרומול של P על ס"מ² ב-1,000 שנה) הם יותר מפי שניים מהקצבים הנמדדים בשולי האנטיקלינות. ואולם, קצב הצטברות של זרחן גבוה אינו בהכרח יוצר פוספוריט איכותי. תנאי עיקרי ליצירת פוספוריט איכותי הוא קצב סדימנטציה נמוך, המאפיין יותר את שולי האנטיקלינות. באזורים אלה קצב הסדימנטציה הנמוך נובע מפעילות מוגברת של זרמי קרקע ונברנים, שפוררו והרסו את

רובדי 'האפטיט הראשוני' שמהם נוצר סלע הפוספוריט, תוך שטיפתה החוצה של הפרקציה הדקה (קרבונטית ופוספטית) לכיוון מרכזי הסינקלינות והשארית רוב הפרקציה הפוספטית, הגסה יותר, מאחור. נוסף על כך, קצב סדימנטציה נמוך גרם לאוורור מוגבר של סדימנט הפוספט הבוצי בקרבת קרקעית הים, ועל ידי כך לחמצון סולפידים וחומר אורגני שאריתי ולסילוק חלקי של מתכות כבדות מזיקות (איור 8; ראו הסבר בגוף הטקסט). הקצב הנמוך של הסדימנטציה גורם גם לכניסה מוגברת של פלואור לתוך שריג האפטיט ובכך תורם לייצובה המינרלוגי בסדימנט הקרקע. מנגנון זה יצר עם הזמן בשולי האנטיקלינות שכבות פוספט מועשרות בזרחן ויחסית נקיות מיסודות רעילים. אמנם שולי האנטיקלינות צברו הרבה פחות זרחן מאשר מרכז הסינקלינות, אך הפוספוריט שנוצר שם הוא באיכות גבוהה יותר. יצוין שרוב הפוספוריט המשובח שהתגלה בנגב נמצא דווקא בשולי האנטיקלינות (שדות חצבה, עין עקרב, המכתש הקטן, הר אורחות, עין עופרים) ולא במרכז הסינקלינות.



איור 7: קצב הצטברות הזרחן כנגד קצב הסדימנטציה בשדות הפוספט של הנגב. קצב הסדימנטציה נמדד על בסיס העובי וקצב הצטברות הזרחן על בסיס ריכוז הזרחן באותה יחידה סטריגראפית – יחידת הפוספוריט (לנתונים מפורטים של השדות השונים, ראו טבלה 3 בתוך Soudry et al., 2012). קורלציה מצוינת קיימת בין שני הפרמטרים. קצבי ההצטברות הגבוהים של הזרחן מאפיינים את הסינקלינות של הנגב, אך הפוספוריט הנוצר שם איכותי פחות מהפוספוריט הנוצר בשולי האנטיקלינות. הגורם העיקרי להעלאת איכות הפוספוריט בשולי האנטיקלינות הוא הירידה בקצב הסדימנטציה (ראו איורים 6 ו-8).



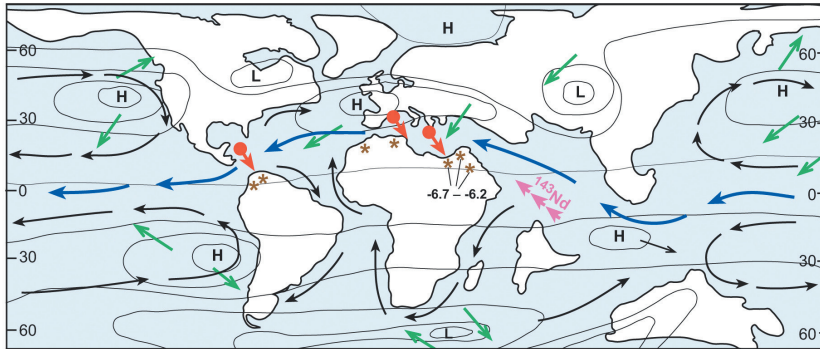
איור 8: קצב הסדימנטציה כנגד פרמטרים גאוכימיים אחדים בשדות הפוספט של הנגב. מעוינים – פוספריט ראשוני, משולשים – פוספריט משני. ירידה בקצב הסדימנטציה גורמת לעליה בריכוז הזרחן, הפלואור, האורניום, האיטריום והאדמות הנדירות ולירידה בריכוז הקדמיום והאבץ.

שני פרטים עיקריים מרכיבים את תצורת מישאש בנגב (איור 2): פרט הצור, בחלק התחתון של התצורה, מורכב משכבות של צור מסיבי, ופרט הפוספט, בחלקה העליון, המכיל, נוסף על פוספוריט, חילופים של קרבונט, צור ופורצלניט. חילופי ליתולוגיות אלה משקפים שינויים מחזוריים בפוריות של ים המישאש וברמות החמצן בעמודת המים, יחד עם שינויים בעצמת האוורור של סדימנט הקרקע ופעילות זרמי הקרקע. רוב הפוספוריט הכלכלי של הנגב מרוכז ביחידת הפוספוריט המונחת בחלקו העליון ביותר של פרט הפוספט. עובי יחידה זו 3–15 מ' ברוב הנגב הצפוני והמרכזי. היא מורכבת מכמה שכבות של פוספוריט גרנולרי ('פוספוריט משני') מועשרות בזרחן ומנוצלות באתרי הכרייה, וביניהן שכבות של חוואר פוספטי למינרי ודל זרחן ('פוספוריט ראשוני'), המכיל עדשות ורבדים דקיקים של 'אפטיט ראשוני'. שכבות אלה נחשבות בדרך כלל לפסולת כרייה ('שכבות ביניים טפלות'). שינויים חריפים חלים בהרכב הליתולוגי של תצורת המישאש במרחב: פרט הפוספט מצטמצם והולך כלפי האנטיקלינות, ובמקביל מתעצם המרכיב הפוספטי בחתך. סיבה עיקרית לכך הן תנודות טקטוניות, שהתרחשו תוך כדי הסדימנטציה של פרט הפוספט והחריפו שוב ושוב את התבליט. כתוצאה של כך נגרמו סילוק דיפרנציאלי והובלה של המשקע הקרבונטי הדק משולי האנטיקלינות אל מרכז הסינקלינות.

תהליך היווצרות הפוספוריט בנגב

שילוב של גורמים טקטוניים ואוקיינוגרפיים ששררו באזורנו בתקופת הקמפן הביאו להצטברות מסיבית של משקעי פוספט. בתקופה זו, בעקבות תנועתה של יבשת אפריקה ביחס לאירואסיה, הפכה התטיס למעין זרוע ימית ארוכה וצרה ('appendix') שחיברה בין האוקיינוס השקט לאטלנטי. מיקומה הפאליאוגאוגרפי של התטיס בקרטיקון העליון בקו רוחב נמוך של 8° – 15° צפון, העלייה הגלובלית של מפלס הים באותה תקופה, הפרשי טמפרטורה גדולים יותר בין קו המשווה לקטבים, התעצמות הרוחות הקבועות (trade winds) עקב ההתקררות הגלובלית לאחר תקופת הסנטון וכן התעצמות הקשר בין האוקיינוס האטלנטי הצפוני לדרומי עקב התרחבותו הגדלה והולכת – כל אלה יחד גרמו להגברת זרימתם של מי העומק באוקיינוסים, ובהמשך להתגברות זרם התטיס הסובב עולם (Tethyan Circumglobal Current) החל מסוף הקנומן (איור 3). האצת זרם זה הביאה לכניסה מוגברת של מי האוקיינוס

השקט לים התטיס ולהגברת הצירקולציה הימית בתוכו. עדות לכך הוא שינוי חריף בהרכב האיזוטופי של הניאודימיום בפוספוריטים של דרום התטיס במהלך הקרטיקון (Soudry et al., 2006). בעוד בקרטיקון התחתון ההרכב האיזוטופי של הניאודימיום $\epsilon_{Nd(T)}$ באפטיט הוא -12.8 עד -10.9, מסוף הקנומן עד המאסטריוט הוא 'קופץ' ל-7.1 עד -5.9, הרכב המתקרב לזה מי האוקיינוס השקט (תיבה 2).



→ כיוון רוחות → ^{143}Nd ניאודימיום רדיוגני → Upwelling → זרם התטיס
★ הצטברות פוספט $\epsilon_{Nd(T)}$ הרכב איזוטופי של הניאודימיום בפוספט המזרח-תיכוני -6.7 – -6.2

איור 3: שחזור פאליאוקיינוגרפי והתהוות משקעי הפוספט לאורך השוליים הדרומיים של התטיס בקרטיקון העליון (מזרח התיכון, דרום אמריקה) ובאיאוקן (צפון אפריקה). להסבר – ראו גוף הטקסט.

תיבה 2

ניאודימיום (Nd) כסמן לצירקולציה ימית

היחס בין האיזוטופים של ניאודימיום ($^{143}Nd/^{144}Nd$) במשקעים ימיים מאפשר לעקוב אחר שינויים בצירקולציה הימית. היחס $^{143}Nd/^{144}Nd$ בסלעי משקע מוכתב על ידי היחס $^{143}Nd/^{144}Nd$ המקורי של הסדימנט וגילו הגאולוגי. האיזוטופ הרדיוגני ^{143}Nd נוצר מפירוק רדיואקטיבי של ^{147}Sm , כך שסלעים עם יחס Sm/Nd גבוה יציגו עם הזמן יחס $^{143}Nd/^{144}Nd$ גבוה. עקב הפרקציונציה הרבה של האדמות הנדירות במהלך היווצרות הקרום היבשתי מתוך שכבת המעטפת העליונה, היחס Sm/Nd בסלעי הקרום היבשתי נמוך יותר מזה שבקרום האוקייני. ההרכב האיזוטופי של הניאודימיום במי הים משקף אפוא את תרומתם היחסית של שני מקורות האספקה העיקריים של

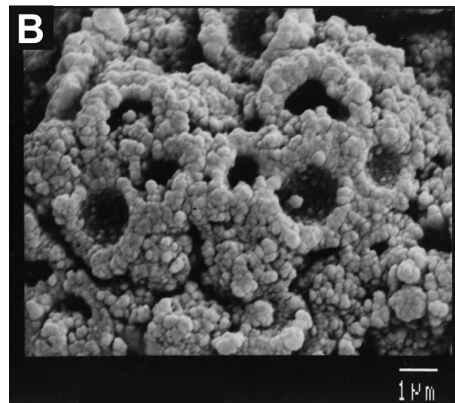
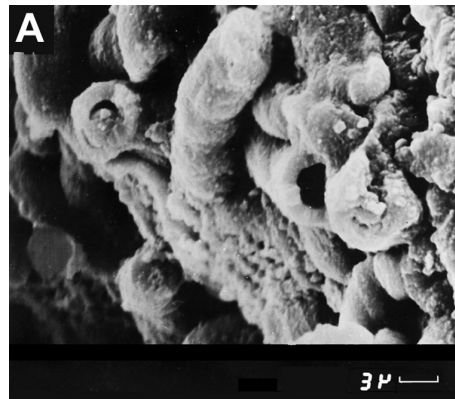
הניאודימיום לאוקיינוס – בלייה של הקרום היבשתי (יחס $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ נמוך) ושפיעת Nd מבולות רדיוגניות מהקרום האוקייני (יחס $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ גבוה יותר). נהוג לבטא את היחס $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ בסלעים כ- $\epsilon_{\text{Nd}(T)}$, המשקלל את הגיל הגאולוגי של הסלע (T) ופרמטרים אחרים (ראו Soudry et al., 2006). כיום, ϵ_{Nd} במי האוקיינוס השקט, הנקבע בעיקר על ידי בזלות רדיוגניות, הוא 2 ± -3 בעוד באוקיינוס האטלנטי, שם נקבע ϵ_{Nd} על ידי תוצרי בלייה היבשתיים העצומים המובלים אליו, הוא 2 ± -12 . הודות לזמן שהייה (residence time) הקצר מאוד של הניאודימיום במי הים (200–1,000 שנה בלבד), ערכוב גופי ים בעלי ערכי $\epsilon_{\text{Nd}(T)}$ שונים משתקף היטב בהרכב האיוטופי של הסלעים. בגלל הריכוזים הגבוהים של Nd בפוספוריטים, עשרות עד מאות ppm (Nd^{3+}) מחליף יון Ca^{2+} בשריג האפטיט, מתאימים הפוספוריטים למעקב אחר שינויים בצירקולציה הימית באמצעות שינויים בהרכב האיוטופי של הניאודימיום. הריכוז הנמוך של Nd במי הנקבוביות של הסדימנטים הימיים, יחד עם המובילות הגאוכימית הנמוכה מאוד שלו, מצמצמים את השחלוף האיוטופי במהלך הדיאגנזה ותורמים לשימור הסיגנל האיוטופי של מי הים בתוך האפטיט.

זרם התטיס ממזרח למערב, במקביל לשוליים הדרומיים של ים התטיס, הסיע את שכבת המים העליונה מערבה. כוח קוריוליס הסיט שכבת מים זו צפונה לכיוון ים התטיס הפתוח, ועל ידי כך נוצרה עלייה מוגברת של מי ים מהעומק (upwelling), שהוזרמו דרום-מזרחה מים התטיס הפתוח אל תוך אדן היבשת (איור 3). קימוט מדף היבשת העצים עוד יותר את עליית מי העומק על ידי הסטתו של זרם התטיס (topographically-induced upwelling). נוסף על כך, מיקום האזור בקו רוחב נמוך (8° – 15°) הקל עוד יותר את עליית מי העומק. בקווי רוחב נמוכים, מי הפיקנוקלינה (pycnocline), העשירים בנוטריונים, שוהים בעומקים רדודים, וכך מוזרמים ביתר קלות לאזור המואר של עמודת המים. מים עמוקים אלה, עשירים בזרחן ודלים בחמצן, הביאו לפריחה עצומה של פייטופלנקטון – בעיקר צורניות (diatoms) ודינופלגטים. יצרנים ראשוניים אלה (primary producers) מיצו את הזרחן המומס מתוך גוף המים, ולאחר מותם שקעו בהמוניהם על הקרקעית. רדידות גוף המים שכיסה את אדן היבשת, יחד עם דלילות החמצן במים שעלו מהעומק, צמצמו את ההתפרקות של מרבית הפלנקטון בתוך עמודת המים והביאו להצטברותו על הקרקעית כמשקע עתיר חומר אורגני.

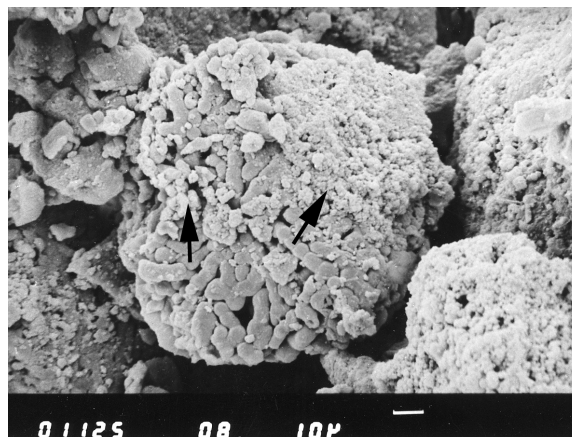
תנאי הרבדה אלה גרמו לצריכה מוגברת של חמצן ולהידלדלותו במשקע הקרקעית. בשל כך הצטמצמה פעילותם של מקרו־אורגניזמים בנתיים (החיים על הקרקעית ונוברים בתוכה) וגם התאפשרה התפתחות אינטנסיבית של מרבדים מיקרוביאליים (תיבה 3) על קרקעית הים ('יצרנים משניים'). אלה פירקו את המשקע האורגני הפלנקטוני והביאו לשחרור זרחן במי הנקבוביות של סדימנט הקרקע. ריכוז הזרחן במי הנקבוביות גדל והלך גם עקב אטימות המרבד המיקרוביאלי, שצמצמה את בריחת הזרחן המשוחרר חזרה לעמוד המים. כל זה הביא לשקיעה כימית מוגברת של אפטיט, בשלב הדיאגנטי המוקדם מאוד, להתגבשותו על דופנות שרידיהם של המיקרואורגניזמים (איורים 4, 5) ומסביב לחלקיקים אחרים (שלדי פורמיניפרה, שברי עצמות), ועל ידי כך ליצירת רבדים דקים של 'אפטיט ראשוני' בסדימנט הסמוך מאוד לקרקעית. עדות לתהליכי שקיעת האפטיט המוקדמים מאוד הוא השימור המצוין של שרידי המיקרואורגניזמים העטופים אפטיט (איור 4). גם באזורים שבהם נוצר היום פוספוריט (מדף יבשת של פרו־צ'ילה, נמיביה), אפטיט שוקע בדיאגנזה המוקדמת ביותר, בד בבד עם פירוק suboxic של חומר אורגני סמוך מאוד לקרקעית הים. רק שם, קרוב מאוד (סנטימטרים אחדים) למגע מי ים-סדימנט, התנאים הכימיים הנדרשים לשקיעה כימית של אפטיט (ריכוז גבוה של זרחן מומס, זמינות של פלואור, pH מעט חומצי, וריכוז נמוך של יון CO_3^{2-}) מתקיימים יחד במי הנקבוביות של סדימנט הקרקע.

ערבול הקרקעית על ידי מקרואורגניזמים הנוברים בקרקעית יחד עם פעילות מוגברת של זרמי קרקע פוררו את רובדי האפטיט הראשוני לגרגירים, תוך ערבובם עם שברי עצמות מובלים של חולייתנים ימיים וחלקיקי פוספט אחרים (תיבה 3) ושטיפה החוצה של המרכיב הקלציטי הדק מהסדימנט. טלטול וניפוי חוזרים ונשנים גרמו לריכוז גרגירי הפוספט שנוצרו וליצירת שכבות של פוספוריט גרנולרי ('פוספוריט משני'), המנוצל היום במכרות הפוספט של הנגב. תהליך זה הביא גם לשינויים רבים בהרכב הכימי של הפוספוריט ולשיפור איכותו והתאמתו התעשייתית (Soudry et al., 2013). המעבר מה'פוספוריט הראשוני' ל'פוספוריט המשני' מלווה בכמה שינויים: (א) גידול ניכר של ריכוז הזרחן בסלע הפוספוריט ובמקביל הקטנת המקטע הקרבונטי; (ב) קליטה מוגברת של יון קרבונט ופלואור בתוך שריג האפטיט; (ג) גידול בריכוז האדמות הנדירות, האיטריום והאורניום; (ד) ירידת בתכולת החומר האורגני השארת; (ה) ירידה בריכוז הקדמיום (יסוד רעיל) ומתכות כבדות אחרות. Zn , Cr , Ni , Cu , Mo , V (איור 6; לוח 1), הפוגמות באיכות החומצה הזרחתית.

איור 4: שרידי מיקרואורגניזמים – פילמנטים (A) וקוקואידים (B) – עטופי אפטיט הבונים רבים מגרגירי הפוספט של הפוספורים בנגב, ובשולי המבנים המוגבהים גם הפאזה הבין-גרגירית של אחדים מהפוספוריטים. השימור המצוין של שרידי המיקרואורגניזמים מעיד על תהליכי פוספטיזציה מוקדמים מאוד במהלך הדיאגנזה.



איור 5: גרגיר פוספט בנוי כולו משרידי מיקרואורגניזמים עטופי פוספט. גידול משנה סמיך של אפטיט קריפטו-קריסטליני על גבי חלק מהפילמנטים (צד ימני-עליון של התמונה) מסתיר חלקית את קיומם. גידול משנה נרחב יותר יהפוך אותו לגרגיר פוספט (peloid) וזה בהופעתו לגרגירי פוספט שנוצרו ממקורות אחרים.



תיבה 3

מהו מקורם של גרגירי הפוספט בפוספוריט של הנגב?

גרגירי הפוספט הבונים את הפוספוריט הכלכלי של הנגב כוללים בעיקר מרכיבים מעוגלים (גודלם לרוב 200–500 מיקרון) בעלי הופעה אחידה (peloids). הסיבה להופעתם האחידה קשורה בגיבוש קריפטו־קריסטליני (גבישים קטנים מאוד) של האפטיט הבונה את גרגירי הפוספט והממסך את מקורם. רובם יוחסו בעבר (בטעות) להפרשות של יצורים ימיים (fecal pellets) בנטיים ואפי־פלאגיים, מאובנות על ידי אפטיט. בדיקות מדוקדקות של פוספוריטים רבים בנגב גילו שגרגירי הפוספט נוצרו ממקורות שונים ומגוונים ושהופעתם הזוהה קשורה בתהליכים דיאגנטיים. דרך אחת ליצירת גרגירי הפוספט היא קדיחה של שברי עצמות (דגים וחולייתנים ימיים אחרים) על ידי מיקרואורגניזמים (פטריות) ומילוי תעלות הקדיחה על ידי אפטיט קריפטו־קריסטליני השוקע מתוך חלקי העצם המומס. קדיחה אינטנסיבית מוחקת את מבנה העצם וזה נהפך ל־peloid של פוספט. דרך נוספת ליצירת גרגירי הפוספט היא מילוי 'חדרים' של שלדי פורמיניפרים (לדוגמה, Buliminids) ועטיפתם על ידי מעטה של פוספט קריפטו־קריסטליני. גרגירי פוספט אחרים הם פרגמנטים ש'נקרעו' מ'פוספט ראשוני' (pristine phosphate), וייתכן גם הפרשות ימיות שהוצאו מתוך סדימנט הקרקע ועוגלו על ידי הובלתם על קרקעית הים. נוסף על כך, בדיקות במיקרוסקופ אלקטרוני סורק גילו שבמקרים רבים גרגירי הפוספט של הנגב הם שברים מעוגלים של מרבדים מיקרוביאליים (מאסף של מיקרו־אורגניזמים חד־תאיים, חוטיים וקוואידיים) עטופי אפטיט (איור 4) וכן מיקרו־אונקוליטים (גרגירים כדוריים בנויים ממעטפות מיקרוביאליות מאובנות על ידי אפטיט). הרכב המעטפות המיקרוביאליות (ג'ל עשיר בפוליסכרידים) מקנה להן עמידות בפני פירוק בקטריאלי ועושה אותן לתשתית נוחה להתגבשות האפטיט. סטרקטורת מיקרוביאליות אלה גם מרכיבות את הפרקציה המלכדת של הפוספוריט המועשר ביותר בזרחן (מעל ל־30% P_2O_5). לרוב, גידולי משנה של אפטיט קריפטו־קריסטליני סמיך מכסה את השרידים המיקרוביאליים ומוחק את נוכחותם בפוספוריט (איור 5). שברי עצמות והפרשות של יצורים ימיים אופייניים יותר לפוספוריטים הגיריים והצורניים, דלי־הזרחן, המצויים בחלקים נמוכים יותר של פרט הפוספט (איור 2).

שינויים אלה מתעצמים והולכים ככל שמתקרבים לשולי האנטיקלינות, עקב הטלטול הנמשך של סדימנט הפוספט, הנגרם בהשפעת הגלים וזרמי קרקע האפקטיביים יותר באזורים אלה. הטלטול הנמשך גרם לשהייה ארוכה יותר של הפאזה האפטיטית סמוך מאוד לקרקעית ולהשתנותה הכימית, לשטיפתו החוצה של המרכיב הקרבונטי הדק מהסדימנט הפוספטי ולאורור מוגבר של הפוספורים, שהביא לחמצון סולפידים וסילוק המתכות הכבדות מתוכו (Soudry et al., 2013).

תכונות סלע הפוספט והשימוש בו

סלעי הפוספט הם חומר הגלם הבסיסי לייצור חומצה זרחתית (H_3PO_4). חומצה זו נוצרת על ידי התקפת סלע הפוספט (לאחר השבחתו) על ידי חומצה גפריתית (H_2SO_4). כ-90% מתפוקת הפוספט בעולם מיועדת להפקת חומצה זרחתית. שימושים אחרים הם בעיקר לדטרגנטים, חומרי הדברה וחומרי נפץ. מהחומצה הזרחתית מייצרים דשנים, מוצר הכרחי בחקלאות מודרנית, וכן מגוון מוצרים תעשייתיים אחרים. הדשנים העיקריים הם סופר-פוספט, המיוצר על ידי התקפה כימית על סלע הפוספט על ידי חומצה זרחתית, אמוניום פוספט, שפרט לזרחן מכיל גם חנקן, וכן אשלגן זרחני ופוספט נטול פלואור (DFP), המשמשים לתוספי מזון. הצמח קולט את הזרחן המשתחרר מתוך הדשן הזרחני, והאדם מקבל את מנת הזרחן הדרושה לקיומו היישר דרכו או דרך בעל החיים הניזון ממנו. לאדם נדרשת כמות יומית ממוצעת של 3-1 גר' זרחן.

להוציא מקרים בודדים, הפוספוריט הנחצב במכרה חייב לעבור תהליכי השבחה בטרם יתאים לייצור חומצה זרחתית. הסיבות לכך הן ריכוז זרחן נמוך מדי בסלע, נוכחות גבוהה של יסודות מזיקים או קושי בשחרור המרכיב הפוספטי. קיימות כמה שיטות השבחה שונות, בהתאם למבנה הפוספוריט הנחצב, הרכבו המינרלוגי וההתפלגות הגרנולומטרית של מקטע האפטיט בתוך הסלע. הנפוצות ביותר הן: C (א) השבחה מכנית, שבה נאסף מקטע גודל הגרגר העשיר ביותר בזרחן לאחר גריסת הפוספוריט וניפוי תוך כדי שטיפתו; (ב) קליית בזק של הפוספוריט בטמפרטורה של 500° לסילוק החומר האורגני; (ג) הצפה (flotation), שבה הקלציט מסולק מהפוספוריט על ידי הצפתו באמצעות מגיב כימי. גורמים רבים משפיעים על התאמתו של הפוספוריט לייצור חומצה זרחתית

ודשנים. החשוב ביניהם הוא כושר ההשבחה של הפוספוריט להעלאת ריכוז הזרחן בתוכו. כושר ההשבחה מושפע בעיקר מהרכבו הפטרוגרפי והמינרלוגי של הפוספוריט ומהמבנה הפנימי שלו. ייצור חומצה זרחתית דורש בדרך כלל ריכוז של לפחות 32% P_2O_5 בתוצר ההשבחה של הפוספוריט שבו משתמשים לייצור החומצה; אי לכך, כושר השבחה נמוך יפסול את הפוספוריט לשימוש תעשייתי או לחלופין יחייב עלויות ייצור גבוהות. תכונות אחרות העלולות להגביל את השימוש התעשייתי של הפוספוריט הן: (א) יחס CaO/P_2O_5 גבוה בפוספוריט – גורם לצריכה גבוהה של חומצה גפריתית ולייצור מוגבר של פוספוגבס – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (תוצר לוואי של ייצור החומצה הזרחתית, מזיק לסביבה); (ב) תכולה גבוהה של חומר אורגני (מעל 0.5%) – גורמת לקצף רב בעת ייצור החומצה הזרחתית ובכך להפסדי חומצה; חומר אורגני מפריע גם להתגבשות מתאימה של הפוספוגבס ובכך מפחית את קצב הסינון של החומצה הזרחתית ואת הניצולת שלה; (ג) פלואור – בריכוז גבוה, נפלט לסביבה וגורם לקורוזיה של מכונות הייצור; עם זאת נוכחות פלואור בתמיסת החומצה יוצרת קומפלקסים אלומיניום-פלואור, המשפרים את התגבשות הגבס וכך מעלים את קצב הסינון של החומצה; (ד) סיליקה (צור) – יוצר אחוז גבוה של בלתי מסיסים בחומצה וגורם לבעיות קורוזיה; (ה) מגנזיום – בריכוז גבוה מעלה את צמיגותו של תרחיף התמיסה ועל ידי כך פוגע בקצב הסינון של החומצה; (ו) תכולה מצומצמת של CO_3^{2-} בתוך שריג האפטיט (פחות מ-4% במשקל) מפחיתה את מסיסות האפטיט בתוך הקרקע ומקטינה את התאמת הפוספוריט ליישום ישיר (שימוש ישיר של הפוספוריט הגולמי כדשן – מתאים לקרקעות חומציות באזורים טרופיים); (ז) מתכות כבדות (קדמיום, ארסן, סלניום, כספית, עופרת, נחושת, ניקל, כרום ואנדיום) ורדיו-נוקליאידים (אורניום) רעילים לאדם ולבהמה, ומעל סף מסוים אסורים בדשנים.

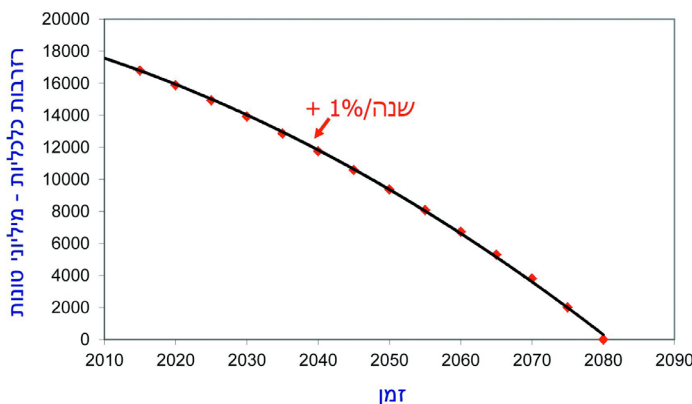
מלאי סלעי הפוספט בארץ ובעולם וצפי לעתיד

כמות הפוספט המופקת היום בישראל היא כשבעה עד שמונה מיליון טון לשנה חומר כרוי, שמהם מייצרים כשלושה וחצי עד ארבעה מיליון טון של פוספט מועשר (תוצר השבחה). חלקה של ישראל בתפוקה העולמית הוא כשני אחוזים. כ-70% מהתפוקה העולמית מרוכזים בשלוש מדינות בלבד: סין, ארצות הברית ומרוקו (כולל סהרה

המערבית), ושמונה מדינות (כולל ישראל) מפיקות קרוב כ-90% מהתפוקה העולמית. מאז תחילת שנות השמונים ירד חלקה של ארצות הברית בהתמדה (מ-35% ל-15%), בעוד חלקה של סין עלה באותה תקופה מ-5% ל-37%, זאת עקב צריכה מוגברת של דשנים כתוצאה של הצמיחה הכלכלית המהירה שלה. חלקה של מרוקו נותר יציב לאורך תקופה זו – 15%–20%. מרוקו היא גם היצואנית הראשית של פוספט מועשר בעולם, והיא שולטת במידה רבה בסחר העולמי של מוצר זה. אשר לייצור הדשנים, מרביתו (כשני שלישים) נצרך באסיה (בעיקר בסין ובהודו). אפריקה, לעומת זאת, המפיקה יותר מרבע מכמות הפוספט בעולם, צורכת רק 3% מכלל ייצור הדשנים. כמויות סלע הפוספט בישראל נאמדו בכ-1.5–2.0 מיליארד טון, אך רק חלק קטן מכמות זו ניתן כיום לניצול. כ-75% מכלל כמויות הפוספט הידועות בישראל מצויות בתוך שמורות טבע, שטחי אש ובקרבת יישובים (ערד), ולכן אינן נמנות עם המלאי. מתוך החלק הנותר, רק כמות כל כ-150 מיליון טון נחשבת היום, בעיני החברה הכורה סלעי פוספט בנגב (חברת רותם-אמפרט), לכלכלית, והנה עיקר הרזרבות באתרי הכרייה (אורון, בקעת צין ומישור רותם). בקצב הכרייה כיום, העומד על שבעה עד שמונה מיליון טון סלע פוספט לשנה, עתודות אלה יספיקו לכ-20 שנה בלבד. אם יתירו הרשויות בסופו של דבר גם את ניצולו של שדה בריר (חלקו הדרום-מזרחי של שדה הפוספט בבקעת ערד, המכיל כ-70 מיליון טון של פוספוריט), ואם תימצא שיטת עיבוד כלכלית לכמויות הרבות של פוספט ביטומיני (כ-60 מיליון טון) המצויות בשטחי הכרייה של מישור רותם ובקעת צין ואינן מנוצלות כיום, אזי יתאפשרו כ-20 שנות ניצול נוספות.

אשר למלאי סלעי הפוספט בעולם, קשה לאמוד את העתודות הקיימות. הסיבה לכך היא מחסור בנתונים עדכניים מצד המדינות המפיקות ופירוט מועט בדבר טיב העתודות. קיימים פערים גדולים בין האומדנים השונים המתפרסמים מעת לעת. ההערכה המקובלת ביותר היום היא שקיימות בעולם עתודות איכותיות בכמות של כ- 20×10^9 – 18 טון. מלאי זה מרוכז במספר קטן ביותר של מדינות; רובו (יותר מ-70%) מצוי במרוקו (כולל סהרה המערבית), והשאר בסין (כ-15%), ארצות הברית (4%) ובעוד מספר קטן של מדינות (אחוזים בודדים וחלקי אחוזים בכל אחת). חלקה של ישראל בעתודות העולמיות נמוך מאחוז אחד. בתפוקה שנתית נוכחית של כ-180 מיליון טון פוספט מועשר (תוצר ההשבחה), ובקצב גידול שנתי (מינימלי) של 1%, העתודות האיכותיות בעולם עשויות להספיק לכ-70 שנה בלבד (איור 9). מודלים אחרים, שהתבססו על קצב צריכת הדשנים, הניבו מסקנות דומות. יש לציין, עם זאת,

שגם בתום ניצול הפוספט האיכותי כולו ייוותרו בעולם כמויות גדולות של סלע פוספט, אך רובן בטיב נמוך ובתנאי ניצול מסובכים שיחייבו בהכרח עליות ייצור גבוהות. מה צפוי אפוא בעתיד? ההערכות היום הן שהעולם ייקלע למחסור בפוספט בעוד עשורים אחדים. יתרה מכך, הריכוז העצום של העתודות בארצות ספורות יחריף עוד יותר את המצב. נקודת השבירה תגיע כנראה כשארצות הברית, המפיקה היום 15% מהכמות השנתית של פוספט בעולם, תנצל עד תום את הרזרבות האיכותיות שלה.



איור 9: גרף המראה מתי עלול להיגמר מלאי הפוספוריט האיכותי בעולם. גרף זה מבוסס על תפוקה שנתית (בהווה) של כ-180 מיליון טון תוצרת פוספט בעולם, ועל קצב גידול שנתי (מינימלי) של 1% בתפוקה. בפועל צפוי קצב גידול שנתי של 2%-3% כך שזמן מיצוי הרזרבות האיכותיות יקוצר בהתאם. מוערך שעדיין ייוותרו כמויות גדולות של סלעי פוספט בעולם שיספיקו לעשרות שנים נוספות, אך רובן באיכות נמוכה יותר ובתנאי ניצול בעייתיים.

על פי הנתונים של המכון הגאולוגי האמריקני (USGS) הדבר יתרחש בעוד כ-25 שנה בלבד. לאחר מכן תצטרך ארצות הברית להישען על יבוא מסיבי של סלע פוספט (בעיקר ממרוקו) כדי לספק את צרכיה העצומים בדשנים. אשר לאירופה, אין לה כלל סלעי פוספט משלה והיא נשענת אך ורק על יבוא (מצפון אפריקה והמזרח התיכון). לכך יש להוסיף את הודו (חמישית מאוכלוסיית העולם), הצורכת לבדה כמעט 40% מכלל צריכת הדשנים בתבל, ושגם לה אין סלעי פוספט והיא תלויה אך ורק ביבוא. לסין אמנם יש עתודות, אך היא דואגת לשמור אותן לעצמה. לאחרונה היא אף הטילה מסי יצוא על סלע פוספט, זאת כדי לצמצם ככל האפשר יצוא מתחומה. עם מיצוי הפוספט האיכותי בארצות הברית ובמזרח התיכון, תוך עשורים בודדים, תיווצר

תלות גוברת והולכת של הצרכנים הגדולים (ארצות הברית, אירופה ואסיה) במספר ספקים קטן ביותר. עם הזמן, מרוקו, שבתחומה מצויים כאמור יותר מ־70% ממלאי הפוספט בתבל, תהפוך לספק יחיד כמעט של פוספט בעולם. התפתחות זו מדאיגה ומסוכנת ביותר. מרוקו שוכנת באזור רגיש מבחינה גאופוליטית, ולכך עלולות להיות השפעות חמורות על זמינותו בעתיד של סלע פוספט בעולם (תפוקת הפוספט של תוניסיה הצטמצמה ביותר מ־50% הפוספט בעקבות ה'אביב הערבי'). דרך אפשרית להקל את המחסור בפוספט הצפוי בעולם בטווח הבינוני־רחוק הוא מחזור מואץ של הזרחן (משפכים ביתיים ותעשייתיים ומפסולות אורגניות) וצמצום בזבזים במסלולי ההפקה, הדישון וצריכת המזון (רק כחמישית מהזרחן המופק במכרה מגיע לבסוף, כמזון, לצלחת האדם...).

ישראל: סיכום לעתיד

ישראל התברכה בכמויות גדולות יחסית של סלעי פוספט. רובן אינן ניתנות היום לניצול עקב ייעודים קודמים ושימושים אחרים של השטחים המכילים סלעי פוספט. את המיעוט הנותר חייבים לנצל באופן חסכוני ומחושב, תוך מבט לעתיד. בין היתר, חובה לשמר באתרי הכרייה שכבות פוספט שאינן נחשבות כלכליות היום (פוספט עשיר בחומר אורגני ושכבות ביניים דלות זרחן), כדי שניתן יהיה לנצלן בעתיד, כאשר ייווצר מחסור בעולם ותנאי השוק ישתפרו. בעבר הלכו לטמיון באתרי הכרייה של הנגב כמויות גדולות מאוד של סלעי פוספט בגלל היעדר פיקוח נאות מצד רשויות המדינה. לאור מיעוט הרזרבות הניתנות לניצול הנותרות במדינה, והמחסור הצפוי בעולם בעתיד, אסור שמצב זה יחזור על עצמו. הניסיון מראה שסלעי פוספט שניצולם נחשב בעבר לא־כדאי הפכו לכלכליים עם עליית מחירי הפוספט והדשנים בעולם והשתכללות תהליכי ההשבחה והעיבוד התעשייתיים. להבטחת ניצול מושכל של עתודות הפוספט של המדינה נדרשים פיקוח סדיר והדוק יותר של מנהל אוצרות הטבע על מהלך הכרייה בשדות הפוספט של הנגב ומעורבות פעילה שלו ועין בוחנת בתכניות הכרייה באתרים השונים. יש לזכור, בהקשר זה, שהאינטרס של החברה הכורה (דאגה לרווח מרבי) אינו בהכרח זהה לאינטרס של המדינה (ניצול מרבי של נכסי הטבע). רק כך יובטחו מיצויו של חתך הפוספט באתרי הכרייה, שימור עתודות אסטרטגיות לעתיד ומניעת פגעי נוף נוספים בשטחים אחרים של הנגב.

רשימת מקורות וקריאה נוספת

- זהר, א' ושילוני, י'. 1987. מרבץ הפוספטים בבקעת ערד, דו"ח GSI/19/97, המכון הגאולוגי ירושלים.
- סודרי, ד'. 2007. 'סלעי הפוספט: עבר גאולוגי, הווה כלכלי, ועתיד לא ברור', גלילאו 103: 36–47.
- Bentor, Y.K. 1953. 'Relations entre la Tectonique et les Dépôts des Phosphates dans le Néguev Israëlien', *19th Intern. Geol. Congr. Algeria 1952, Proc. Sec. 11*: 93–101.
- Nathan, Y. & Shiloni, Y. 1989. 'The Phosphate Fields of the Negev (southern Israel)', Notholt, A.J.G., Sheldon, R.P. & Davidson, D.F., Eds., *Phosphate Deposits of the World, Vol. 2, Phosphate Rock Resources*. Cambridge: Cambridge University Press: 352–356.
- Kolodny, Y. 1981. 'Phosphorites', (C.E. Emiliani, C.E., Ed.. *The Sea Vol. 7*. New York: John Wiley and Sons: 981–1023.
- Kolodny, Y. & Garrison, R.E. 1994. 'Sedimentation and Diagenesis in Paleo-Upwelling Zones of Epeiric Sea and Basinal Settings: A Comparison of the Cretaceous Mishash Formation of Israel and the Miocene Monterey Formation of Israel and the Miocene Monterey Formation of California', *Siliceous, Phosphatic and Glauconitic Sediments of the Tertiary and the Mesozoic, 29th Intern. Geol. Congr. Proc.* 133–158.
- Reiss, Z. 1962. 'Stratigraphy of Phosphate Deposits in Israel', *Bull. Geol. Surv. Isr.* 34: 1–23.
- Soudry, D., Glenn, C.R., Nathan, Y., Segal, I. & Vonderhaar, D. 2006. 'Evolution of Tethyan Phosphogenesis along the Northern Edges of the Arabian-African Shield during the Cretaceous-Eocene as Deduced from Temporal Variations of Ca and Nd Isotopes and Rates of P Accumulation', *Earth Sci. Rev.* 78: 27–57.
- Soudry, D., Nathan, Y. & Ehrlich, S. 2013. 'Geochemical Diagenetic Trends during Phosphorite Formation – Economic Implications: The Case of the Negev Campanian Phosphorites, Southern Israel. *Sedimentology* 60: 800–819.