

מדעי הסביבה ומחקר  
הארכאולוגיה וההיסטוריה  
של ארץ-ישראל:  
מטלורגיה וזיהום סביבתי

נעמה יהלום-מאק  
ויגאל אראל



# מדעי הסביבה ומחקר הארכאולוגיה וההיסטוריה של ארץ-ישראל: מטלורגיה וזיהום סביבתי

בשער המאמר:  
ראש אלה מעוטר  
בראשי יעלים  
שהתגלה במטמון  
בנחל משמר. משני  
הצדדים זרועות  
בצורת להבי סכין  
וגרזן  
(באדיבות רשות העתיקות)

למחקר הסביבתי פנים רבות. הוא מקיף נושאים כגון חקר שינויי אקלים והשפעתם על חברות אנושיות, זיהום סביבתי (קרקעות, מאגרי מים, אטמוספירה) עקב פעילות אנושית ושינויים במגוון המינים עקב פעילות האדם. בהכללה אפשר לחלק את תחומי המחקר הסביבתי לאלה העוסקים בהשפעת הסביבה על האדם ולאלה העוסקים בהשפעת האדם על סביבתו.

המחקר הסביבתי מסייע לפתרון סוגיות ארכאולוגיות בעשותו שימוש בשיטות מחקר מתקדמות מתחומי מדעי הטבע (כגון גאולוגיה, כימיה, ביולוגיה ופיזיקה). מהמחקר הסביבתי אפשר להסיק למשל באילו תנאי אקלים פעלו תרבויות שונות, ומה היו האילוצים הסביבתיים העיקריים שאִתם היה עליהן להתמודד (זמינות מי שתייה, פוריות קרקעות ועוד). שיטות מתחום הגאולוגיה עומדות בבסיסן של שיטות מחקר ארכאולוגיות ותיקות, כמו מחקר של כלי חרס באמצעות פֶטְרוֹגְרַפִּיה (בדיקת ההרכב המינרלוגי, הסלעי, של החרס במטרה לקבוע את מוצא הכלי), ומשתלבות היטב במגמה ההולכת ומתפתחת של המחקר המיקרו־ארכאולוגי, מחקר של שרידי פעילות אנושית שאינם נראים לעין אלא באמצעות מכשור אנליטי מתקדם, ובאופן כללי במחקר של חומרים מעשי ידי אדם.<sup>1</sup> תרומתה של הארכאולוגיה למדעי הסביבה אף היא ראויה לציון, ועיקרה תיארוך ישיר או משלים של תופעות כגון רעידות אדמה, שינויים בכיוון ובעוצמה המגנטית של כדור הארץ, שינויי אקלים ושינויי צומח.

השפעת הסביבה על האדם ניכרת בראש ובראשונה בתנאי האקלים (זמינות מי השתייה, תפוצת מינים, חקלאות ועוד), שהשפיעו באופן ישיר על בחירת אזורי ההתיישבות, ושהכתיבו את דגם הפיזור המרחבי של היישובים. ייתכן שאפשר לקשור לשינויים אקלימיים גם שינויים תרבותיים, כגון צמיחת ערים או קריסתן. מחקרים רבים באזורנו עסקו בקשר שבין תנאי האקלים לנדידת האדם הקדמון מאפריקה לאסיה דרך בקע ים המלח, קשר שבא לידי ביטוי לדוגמה בזמינות מי שתייה לאורך מסלול הנדידה.<sup>2</sup> חקר השפעת האדם על סביבתו עודו בשלבי הראשונים, אך כבר עכשיו הוא מעיד על זיהום סביבתי שהתעצם מאוד בתקופת הברזל כתוצאה מפעילות אנושית.

במאמר הנוכחי נתמקד בהתפתחות השימוש במתכות ובהשפעתו על הסביבה, ומתוך כך נדגים את המתודות המדעיות של המחקר הסביבתי-הארכאולוגי. נתמקד בשינויים שהתרחשו באזור הלוונט בפרק הזמן שמן התקופה הכלקוליתית המוקדמת עד סוף תקופת הברזל, כלומר בשנים 600-5600

1 S. Weiner, *Microarchaeology: Beyond the Visible Archaeological Record*, Cambridge 2010

2 A. Frumkin, O. Bar-Yosef & H.P. Schwarcz, 'Possible Paleohydrologic and Paleoclimatic Effects on Hominin Migration and Occupation of the Levantine Middle Paleolithic', *Journal of Human Evolution*, 60 (2011), pp. 437-451

לפסה"נ לערך (בתקופת ההולוקן התיכון והמאוחר). תקופות אלה התאפיינו באופן כללי בעלייה הדרגתית ברמת המורכבות החברתית, שהתבטאה במעבר מיישובים חקלאיים קטנים לכפרים ומאוחר יותר לערים, לממלכות ולאמפריות, שהשתרעו על פני אלפי קילומטרים רבועים. במקביל חלו בתקופה זו שינויים מרחיקי לכת בכלים שיצר האדם. האדם עבר בהדרגה משימוש בלעדי בכלי אבן, בתקופה הנאוליתית, לשימוש משולב בכלי אבן ומתכת, בתקופה הכלקוליתית ובתקופת הברונזה, ועד שימוש מזערי בכלי אבן ושימוש בעיקר בכלי מתכת, בתקופת הברזל. בהתאם לשינויים אלה גברה מצד אחד השפעת בני האדם על סביבתם עקב הפקת המתכות הדרושות לייצור כלים, עלייה בצפיפות היישובים ועליית רמת החיים, ומצד אחר גברה התלות של החברה האנושית בחסדי הטבע. במאמר נתאר את התפתחות השימוש במתכות בדרום הלוונט ובדרכים למדוד את השפעתו הסביבתית. כמו כן ניגע בקצרה בחלק מהשיטות המדעיות המשמשות בשירות הארכאולוגיה לצורך המחקר הסביבתי.

## כריית מתכות והפקתן בארץ-ישראל

שימוש במתכות החל באזורנו בפתאומיות בתקופה הכלקוליתית. רמת העיבוד הגבוהה של כלי המתכת, שבאה לידי ביטוי בחפצים המרהיבים ממטמון נחל משמר שבמדבר יהודה, הנמנים עם פריטי המתכת הקדומים ביותר שנוצרו באזורנו,<sup>3</sup> שוללת את ההנחה של התפתחות מקומית הדרגתית. הרכבם הכימי של חפצי היוקרה ושיטת הייצור שלהם, שכללה יציקה בשיטת השעווה האבודה,<sup>4</sup> מלמדים על מקור חיצוני של הטכנולוגיה ושל חלק מחומרי הגלם. שרידי ההפקה הקדומים ביותר מן התקופה הכלקוליתית נחשפו באתרי נחל באר-שבע.<sup>5</sup> הנחושת נכרתה בתקופה זו ככל הנראה משכבות אבן החול בפניאן שבעבר הירדן. עפרות הנחושת הושבחו על ידי שברורן לרסיסים וריכוזן של פיטות סלע ירקרקות, ומינרלי הנחושת הועברו לאתרי היישוב בנחל באר-שבע. שם הופקה נחושת מינירלים אלה, ככל הנראה יחד עם מינרלים של נחושת הכוללת ארסן, שמקורם אינו ידוע (co-smelting). יכולת ההפקה הייתה מוגבלת, ועל כן התקבלה הנחושת כטיפות בגושי סיגים, והטיפות חולצו בצורה מכנית, על ידי שבירת הסיגים וריסוקם. ככלל לא נמצאו תנורי הפקה מתקופה זו בסמוך לאתרי הכרייה.

3 ראו לדוגמה: M. Tadmor et al., 'The Nahal Mishmar Hoard from the Judean Desert: Technology, Composition, and Provenance', *Atiqot*, 27 (1995), pp. 95-148

4 בשיטה זו יוצרים את הדגם בשעווה, לאחר מכן מצפים את השעווה בחומר (חימר). בעת צריפת החומר, השעווה ניתכת וזורמת החוצה דרך פתחים שהושארו בחומר, ונוצרת תבנית שאפשר לצקת בה ברונזה. לאחר שהמתכת מתקררת שוברים את התבנית ומלטשים את המוצר הסופי.

5 A.N. Shugar, 'Archaeometallurgical Investigation of the Chalcolithic Site of Abu-Matar, Israel: A Re-assessment of Technology and Its Implications for the Ghassulian Culture', Ph.D. dissertation, University College, London, 2001; J. Golden, T.E. Levy & A. Hauptmann, 'Recent Discoveries Concerning Chalcolithic Metallurgy at Shiqmim, Israel', *JAS*, 28 (2001), pp. 951-963. יש עדויות שבמקביל הועברו עפרות נחושת מתמנע לאתרים בדרום ירדן. ראו לדוגמה: L. Khalil & J. Riederer, 'Examination of Copper Metallurgical Remains from a Chalcolithic Site at el-Magass, Jordan', *Damaszener Mitteilungen*, 10 (1998), pp. 1-9



**משמאל: כלי נחושת שהתגלו במטמון בנחל משמר**  
(באדיבות רשות העתיקות)

**למטה: גרזני נחושת שנמצאו בשכבת החורבן של מבנה מונומנטלי מתקופת הברונזה הקדומה בתל בית-שאן**  
(באדיבות משלחת החפירות, תל בית-שאן, האוניברסיטה העברית)

אתרי ההפקה הקדומים ביותר בפינאן, למשל אתר ואדי פידאן 4, מתוארכים לתקופת הברונזה הקדומה 1א (3600 לפסה"נ לערך)<sup>6</sup>, ומכאן ואילך לא הועברה עוד נחושת לאתרי יישוב בצורה גולמית.<sup>7</sup> במקביל להתפתחות העירונית בתקופת הברונזה הקדומה ב-ג (2950-2400 לפסה"נ לערך) הסתמן בפינאן שינוי מהותי באופי ובהיקף של ייצור הנחושת. לעומת ייצור הנחושת באתרי נחל באר-שבע, שהיה ברמה ביתית, החל כעת ייצור שאפשר להגדירו תעשייתי. עשרות אתרי הפקה הכוללים תנורים, שהופעלו באמצעות רוח, זוהו באזור פינאן. שרידים של יציקת מטילים וחפצים מוגמרים שנמצאו בח'רבת חמרת איפדאן וברקה אלחיטיה שבפינאן, מלמדים שכל שרשרת



A. Hauptmann, *The Archaeometallurgy of Copper: Evidence from Faynan, Jordan*, Berlin & Heidelberg 2007, pp. 136-140 6

T. Levy & S. Shalev, 'Prehistoric Metalworking in the Southern Levant: Archaeometallurgical and Social Perspectives', *World Archaeology*, 20 (1989), pp. 352-372 7



**ערמות סיגים באתר הכרייה של ח'רבת א־נחאס, פינאן**  
(באדיבות ארז ב־יוסף ותום לוי, משלחת החפירות של אוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו)

הייצור התנהלה באתר הכרייה, למן הכרייה וההפקה ועד המוצר המוגמר.<sup>8</sup> מלאכתם של חרשים באתרי היישוב הוגבלה מעתה ליציקה, תיקון ומחזור של חפצים. שקיעת הערים בסוף תקופת הברונזה הקדומה ג לא בהכרח הביאה לדלדול השימוש במתכת. אפשר ללמוד על כך מן העושר של חפצי מתכת שהתגלו בקברים מתקופת הברונזה הביניימית (1900–2400 לפסה"נ). יציקת המטילים ועיבוד המתכת בח'רבת חמרת איפדאן נמשכו במידה מסוימת בתקופת הברונזה הביניימית. המטילים נסחרו בעיקר עם אתרים בהר הנגב, כגון עין־זיק ובאר־רסיסים, ושם יוצרו מהם ככל הנראה חפצים.<sup>9</sup> בתקופה זו החל הבדיל להחליף את הארסן בסגסוגת הנחושת,<sup>10</sup> והשימוש בו עתיד היה להתגבר במהלך האלף השני לפסה"נ. מקור הבדיל אינו ידוע; ייתכן שהוא מאפגניסטן או ממקורות קטנים וקרובים יותר שנוצלו לחלוטין בימי קדם, כגון זה שזוהה באנטוליה.<sup>11</sup>

8 האופטמן (לעיל, הערה 6), עמ' 136–134, 'Early Bronze Age Metallurgy: A Newly Discovered Copper Manufactory in Southern Jordan', *Antiquity*, 76 (2002), pp. 425–427  
9 I. Segal, L. Halicz, & R. Cohen, 'A Study of Ingots and Metallurgical Remains from 'Ein Ziq and Be'er Resisim, Central Negev, Israel', S.M.M. Young et al. (eds.), *Metals in Antiquity*, Oxford 1999, pp. 179–186  
10 ראו לרוגמה: B. Kaufman, 'Copper Alloys from the 'Enot Shuni Cemetery and the Origins of Bronze Metallurgy in the EB IV – MB II Levant', *Archaeometry*, 55 (2009), pp. 663–690  
11 J.D. Muhly, 'Sources of Tin and the Beginnings of Bronze Metallurgy', *AJA*, 89 (1985), pp. 275–291; idem, 'Early Bronze Age Tin and the Taurus', *ibid.*, 97 (1993), pp. 239–253; idem et al., 'The Bronze Age Metallurgy



**מימין: סכין גילוח מטיפוס מצרי עשוי ברונזה מזמנה של השושלת המצרית התשע-עשרה (סוף המאה השלוש-עשרה לפסה"נ) מתל בית-שאן**

(באדיבות משלחת החפירות, תל בית-שאן, האוניברסיטה העברית)

**משמאל: שישה ראשי חץ מברונזה שנמצאו בשכבת חורבן מזמנה של השושלת המצרית העשירים (המחצית הראשונה של המאה השתיים-עשרה לפסה"נ) מתל בית-שאן**

(באדיבות משלחת החפירות, תל בית-שאן, האוניברסיטה העברית)



כמעט אין עדויות מתקופת הברונזה התיכונה (1550-1850 לפסה"נ) והמאוחרת א (1400-1550 לפסה"נ) לכרייה והפקה של מתכת במכרות הערבה, אולי בשל כוחה העולה של קפריסין ומרכזיותה בסחר הנחושת באגן הים התיכון. תעודות מארכיון מארי, מראשית האלף השני, מלמדות שאלשיה (המזוהה עם קפריסין או עם אזור בתוכה) ייצאה נחושת לערים במרחב הסורי בתקופת הברונזה התיכונה.<sup>12</sup> בכדיקות כימיות ואיזוטופיות<sup>13</sup> של מטילי נחושת מחצור המתוארכים לתקופת הברונזה המאוחרת א התברר שמקורם בקפריסין, והם כעת העדות החומרית היחידה לייצוא נחושת משם בתקופה זו.<sup>14</sup>

העדויות לפעילותם של חרשים באתרי היישוב מתקופת הברונזה התיכונה אינן מרובות, ומקורן לעתים קרובות באתרי פולחן. במקדש פתוח בנהרייה מתקופה זו נחשפו שרידים של יציקת ברונזה וכסף.<sup>15</sup> שרידים ליציקת ברונזה מתקופה זו נמצאו גם במתחם מצבות פולחני באקרופוליס של חצור.<sup>16</sup> בצפון הארץ, בתל דן ובחצור, נמצאו עדויות לחרשות ברונזה מתקופת הברונזה המאוחרת א.

of Anatolia and the Question of Local Tin Sources', *Archaeometry*, 90 (1991), pp. 209-220; K.A. Yener & P.B. Vandiver, 'Tin Processing at Göltepe, an Early Bronze Age Site in Anatolia', *AJA*, 97 (1993), pp. 207-237; idem,

'Reply to J.D. Muhly...'; *ibid.*, pp. 255-264

A.B. Knapp (ed.), *Near Eastern and Aegean Texts from the Third to the First Millennium BC*, Altamont, NY 1996, pp. 1-13

13 איזוטופ של יסוד כימי הוא אטום בעל אותו מספר אטומי אך בעל מסה שונה, כלומר מספר הניטרונים שונה מהרגיל. בכדיקה איזוטופית בודקים בדרך כלל את היחס בין איזוטופים שונים של אותו יסוד. נמצא לדוגמה כי היחס בין איזוטופים של עופרת, המצויה בכמות קטנה בתוך הנחושת, נשמר קבוע בתהליך ההפקה, ועל כן באמצעות השוואה של היחס האיזוטופי של העופרת בחפץ מתכת ליחס האיזוטופי של עופרת במרבץ נחושת, אפשר לקבוע אם החפץ נעשה מנחושת של אותו המרבץ. לשיטה זו יש כמוכח מגבלות, אך היא יעילה מאוד במקרים מסוימים.

N. Yahalom-Mack et al., 'Copper Ingots from the Bronze and Iron Ages in Israel', *JAS* (forthcoming) 14

15 N. Yahalom-Mack & S. Zuckerman, 'Metalworking at Nahariya: Production and Utilization', S. Zuckerman (ed.), *The Middle Bronze Age Cult Place at Nahariya: Towards an Archaeology of Canaanite Cult and Ritual* (forthcoming)

16 N. Yahalom-Mack et al., 'Metalworking at Hazor: A Long-Term Perspective', *OJA* (in press)



מטען של מטילי ככר  
 מנחשת שנחשפו  
 בחפירות תת־ימיות  
 בחוף הכרמל, ליד  
 נווה־ים. בדיקות  
 כימיות ואיזוטופיות  
 הראו שמקור  
 הנחשת בפינאן  
 (באדיבות אהוד גלילי,  
 רשות העתיקות)

העדות בתעודות ממארי על משלוח ברזל לחצור, והמטילים מחצור שנזכרו לעיל, העשויים נחושת שחורה, שיש בה זיהומים של ברזל ועל כן יש לזקקה, מלמדים כי חרשי חצור עסקו גם בזיקוק ובסגסוג של נחושת ולא רק מחצור מתכת.

באתרים אחדים נותרו עדויות לפעילותם של חרשי ברונזה בתקופת הברונזה המאוחרת ב (1200-1400 לפסה"נ לערך). ראוי לציין את השימוש בתעלת התכה (melting canal) בתקופה זו בתל רחוב שבעמק בית־שאן, שלה מקבילות מדויקות בקנטיר (פי־רעמסס) שבדלתא במצרים. מתקנים שכוללים תעלות נמצאו גם בתל מור שליד אשדוד, סמוך למבנה מונומנטלי ששויך למנהל המצרי במקום. סידורם הסימטרי של המתקנים ומיקומם לצד מבנה שלטוני יכולים להעיד על ייצור ברונזה בהיקף גדול.<sup>17</sup> מספר מטענים של מטילי נחושת, ברזל ועופרת התגלו בחפירות תת־ימיות לאורך חוף הכרמל, ותוארכו ברובם לתקופת הברונזה המאוחרת.<sup>18</sup> ניתוח כימי ואיזוטופי של שברי מטילי נחושת מטיפוס עור־פר מתוך אחד המטענים מלמד כי מקור הנחושת בקפריסין.<sup>19</sup>

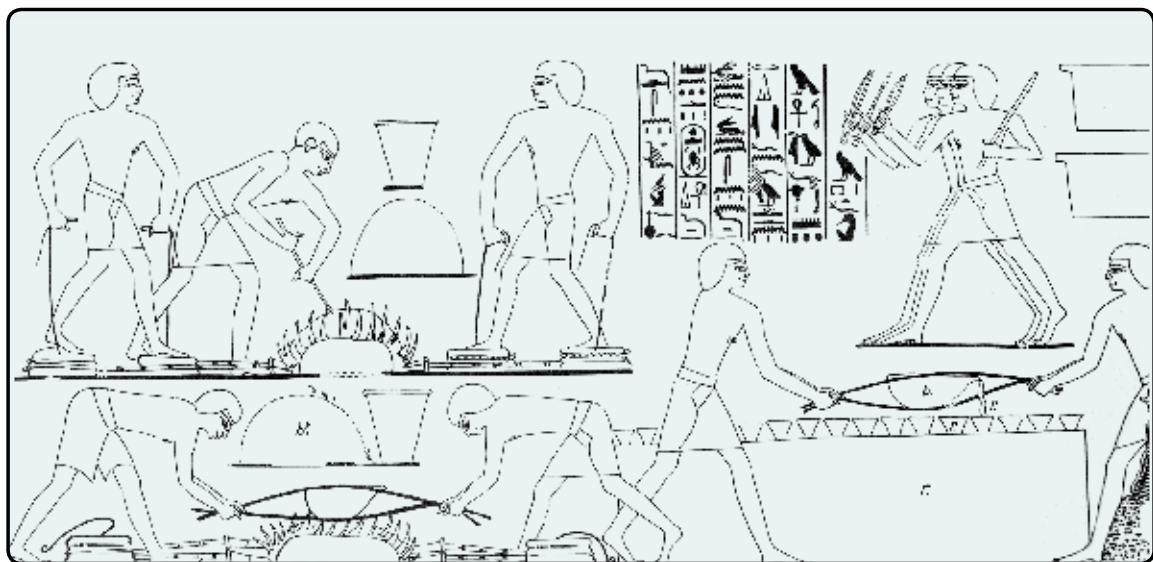
17 נ' יהלום־מאק, 'ברונזה בראשית תקופת הברזל בארץ־ישראל: ייצור ושימוש על רקע מערך אתני־פוליטי מגוון', עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית בירושלים, 2009, עמ' 47-49.

18 U. Galili, N. Gale & B. Rosen, 'Bronze Age Metal Cargoes off the Israeli Coast', *Skyllis: Zeitschrift für Unterwasser Archäologie*, 11 (2011), pp. 64-73

19 יהלום־מאק ואחרים (לעיל, הערה 14).



למעלה: מקדש הכורים בתמנע, כפי ששוחזר בשנת 1985 (באדיבות עוזי אבנר)  
למטה: חרשים מצרים בעבודתם, ציור קיר מתוך קברו של רחמירע, תבי, 1450 לפסה"נ לערך





בתמנע יש עדויות לנוכחות של מצרים מן השושלות התשע־עשרה-העשרים (1130/40-1290 לפסה"נ),<sup>20</sup> אך תאריכי פחמן 14 וניתוח סטרטיגרפי מחודש של מקדש הכורים מלמדים שהייתה במקום פעילות של כרייה והפקה עוד קודם לבואם.<sup>21</sup> לאחר נסיגת המצרים במהלך המאה השתים־עשרה לפסה"נ התגברה פעילותם של החרשים באתרי היישוב בארץ-ישראל, ויש עדויות לפעילותם בכל רחבי הארץ באתרים רבים מתקופת הברזל א (1130-980 לפסה"נ לערך). עם האתרים הללו אפשר למנות את תל משוש, בית-שמש, יקנעם, מגידו ותל דן. בתל דן נמצא ריכוז של סדנאות ברונזה לא רחוק מאזור השער אך גם בינות לבתים באזורים שונים ברחבי התל, דבר שמלמד על מרכזיותה של תעשיית הברונזה לכלכלת היישוב.<sup>22</sup> באזורי הכרייה וההפקה בתמנע ובפינאן הייתה פעילות מוגברת בתקופה זו, ובמהלך תקופת הברזל ב (830-980 לפסה"נ לערך) התפתח בהם ייצור נחושת תעשייתי בקנה מידה גדול; באזור ח'רבת א-נחאס, אחד מאתרי התכת הנחושת של פינאן, לכדו נותרו בשטח קרוב ל-60,000 טונות סיגים.<sup>23</sup> בדיקות כימיות ואיזוטופיות של מטילים מתקופת הברזל ב 2 שנמשו מקרקעית הים ליד חוף הכרמל, סמוך לנווה-ים, הראו כי מקור הנחושת בפינאן; ממצא זה מלמד שהנחושת שהופקה בפינאן נוצקה בכיכרות שמשקלן עד 4 ק"ג, ונסחרה דרך הים, קרוב לוודאי שבאמצעות הפניקים, יורדי הים של התקופה.<sup>24</sup>

חפצי הברזל הראשונים שנוצרו למטרות שימושיות הם מתקופת הברזל א (החל מסוף המאה השתים־עשרה לפסה"נ).<sup>25</sup> להב המגל וחדר המחרשה מתקופה זו יוצרו לראשונה מברזל, ואין עדויות מתקופות קודמות לייצור חפצים דומים מנחושת או מברונזה. יש לציין שהעדויות הראשונות לייצור ברזל נחשפו באתרי היישוב של מגידו, חצור, בית-שמש ותל צפית (המזוהה עם גת־פלשתים), ותוארכו באמצעות פחמן 14 לחלק האחרון של המאה העשירית לפסה"נ לכל המוקדם, כלומר לתקופת הברזל ב1. על כן הן מאוחרות בכ-100 שנה או יותר מפריטי הברזל הראשונים שהגיעו לידינו, כלומר בתקופה זו יוצרו חפצים אלה מחוץ לאתרי היישוב, אולי בסמוך לאזורי הכרייה. אתר הפקת הברזל היחיד נחשף בתל אלחמה שבעבר הירדן, בסמוך למרבץ עפרות הברזל במוררת אלנרדה, תוארך באמצעות פחמן 14 ל±930 לפסה"נ.<sup>26</sup> ייצור הברזל באתרי היישוב מקביל לעלייה בכמות חפצי

B. Rothenberg, *The Egyptian Mining Temple at Timna*, London 1988; idem, *The Ancient Metallurgy of Copper*, London 1990

U. Avner, 'Egyptian Timna- Reconsidered', J. Tebes (ed.), *Unearthing the Wilderness: Studies on the History and Archaeology of the Negev and Edom in the Iron Age* (in press)

22 ר' בן-רב, 'סדנאות חרשים בתל דן, ארץ-ישראל, 30 (תשע"ב), עמ' 77-95.

23 T.E. Levy et al., 'High-Precision Radiocarbon Dating and Historical Biblical Archaeology in Southern Jordan', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (2008), pp. 16460-16465; E. Ben-Yosef et al., 'The Beginning of Iron Age Copper Production in the Southern Levant: New Evidence from Khirbat al-Jariya, Faynan, Jordan', *Antiquity*, 84 (2010), pp. 724-746; E. Ben-Yosef et al., 'A New Chronological Framework for Iron Age Copper Production at Timna (Israel)', *BASOR*, 367 (2012), pp. 31-71

24 יהלום-מאק ואחרים (לעיל, הערה 14).

25 Y. Gottlieb, 'The Advent of the Age of Iron in the Land of Israel: A Review and Reassessment', *Tel-Aviv*, 37 (2010), pp. 89-110

26 H.A. Veldhuijzen & Th. Rehren, 'Slags and the City: Early Iron Production at Tell Hammeh, Jordan, and Tel Beth-Shemesh, Israel', S. La Niece, D. Hook & P. Craddock (eds.), *Metals and Mines: Studies in*



**למעלה: פגיון ברזל המתוארך לתקופת הברזל א מתל מגידו. הפגיון נחשף בתוך מטמון שהתגלה בעונת החפירות בשנת 2012**

(באדיבות משלחת החפירות במגידו, אוניברסיטת תל-אביב)

**משמאל: בצעים מתוך מטמון כסף שנמצא בתל בית-שאן, המאה השתיים-עשרה לפסה"נ**

(באדיבות משלחת החפירות, תל בית-שאן, אוניברסיטה העברית)

הברזל בתקופת הברזל ב1; חלקם בממצא הארכאולוגי מן התקופה גדול לראשונה מחלקם של חפצי הברונזה. מכאן ואילך הפכה הנחושת משנית לברזל, ויש עדויות מתקופת הברזל ב לעיבוד ברונזה בסדנאות הברזל.<sup>27</sup> הפעילות באזורי כריית הנחושת והפקתה בערבה הגיעה לקצה בסוף תקופת הברזל ב1.<sup>28</sup>

Archaeometallurgy, London 2007, pp. 189–201.; A. Eliyahu-Behar et al., 'Iron and Bronze Production in Iron Age IIA Philistia: New Evidence from Tell es-Safi/Gath, Israel', *JAS*, 39 (2012), pp. 255–267

27 יהלום-מאק ואחרים (לעיל, הערה 17); וראו גם: אליהו-בהר ואחרים (שם).

28 לוי ואחרים (לעיל, הערה 23).



**תצלום אוויר של החפירות באתר ח'רבת א־נחאס, פינאן, ערמות הסיגים בשחור** (באדיבות תום לוי, המעבדה לחקר הארכאולוגיה של הלוונט, אוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו)

בסוף האלף השני ובאלף הראשון לפסה"נ גבר השימוש בכסף. באתרי יישוב בכל רחבי הארץ נמצאו קרוב לשלושים מטמונים שהכילו בצעי כסף (חתיכות כסף קטנות שנחתכו ממטיל כסף) ושברי תכשיטים מכסף. הכסף נצרך בכד ושימש ככל הנראה אמצעי תשלום בשלב שקדם לשימוש במטבעות.<sup>29</sup> שימוש נרחב בעופרת – תוצר לוואי של הפקת כסף – אופייני בעיקר לתקופה הרומית.<sup>30</sup>

## השפעת השימוש במתכות על הסביבה: ממצאים ושיטות מחקר

הפעילות הענפה של הפקת מתכות, עיבודן ושימוש בהן השאירה את חותמה על הסביבה. העדות הבולטת ביותר נמצאת באתרי ההפקה והעיבוד של המתכות, ששם השאירו חרשי המתכת הקדמונים ערמות של סיגי מתכות וקרקעות מזוהמות. בהפקת המתכות באזורי המכרות ובעיבודן נפלטו לאוויר חלקיקים קטנים, עשירים במתכות, ונישאו עם הרוח למרחק אלפי קילומטרים. בדגימות של קרח מגרינלנד ושל משקעים מאגמים ברחבי אירופה נמצאו עדויות לזיהום במתכות, כגון עופרת ונחושת, בקנה מידה עולמי שיצרה הפקת המתכות במזרח התיכון ובמקומות אחרים בעולם.<sup>31</sup> בסדרת מחקרים

C.M. Thompson, 'Sealed Silver in Iron Age Cisjordan and the "Invention" of Coinage', *OJA*, 22, 1 (2003), pp. 67–107

B. Rosen & E. Galili, 'Lead Use on Roman Ships and its Environmental Effects', *International Journal of Nautical Archaeology*, 36, 2 (2007), pp. 300–307

M. Murozumi, T.J. Chow & C. Patterson, 'Chemical Concentrations of Pollutant Lead Aerosols, Terrestrial Dusts and Sea Salts in Greenland and Antarctic Snow Strata', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33 (1969), pp. 1247–1294; S. Hong et al., 'A Reconstruction of Changes in Copper Production and Copper Emissions to the Atmosphere during the Past 7000 Years', *Science of the Total Environment*, 188 (1996), pp. 183–193

תועדו היבטים שונים של זיהום קרקעות, בעלי חיים ובני אדם באזור המכרות של פינאן.<sup>32</sup> ג'ון גרטן (Grattan) ובריאן פייט (Pyatt) טענו שזיהום הסביבה של פינאן במתכות משפיע גם על הברווים החיים שם כיום. במחקרים רבים העוסקים בתיעוד של תכולת מתכות ואיזוטופים בשלדים של בני אדם קדמונים התברר שהאמייל של השיניים הוא החומר האמין ביותר לבדיקת זיהום במתכות.<sup>33</sup> זאת מאחר שהדנטין שבשן והעצמות משחלפים (מחליפים) מתכות עם תמיסת הקרקע בזמן הקבורה בקצב מהיר יותר מן האמייל, ועקב כך נמחק חלק מן המידע המקורי שהיה אצור בהם ואפילו המידע כולו. בעבודה הנעשית במעבדתנו נמדדו ריכוזי המתכות באמייל של שיניים מכעשרה אתרים בארץ-ישראל החל בתקופה הנטופית (11,500-15,000 שנים בקירוב לפני זמננו) ועד תקופת הברזל א (980-1130 לפסה"נ לערך). הריכוזים שמדדנו מעידים שזיהום משמעותי של מתכות בגוף האדם החל רק בתחילת תקופת הברזל, כ-3,000 שנה לאחר תחילת השימוש במתכות באזורנו. לאורך התקופה הכלקוליתית ותקופת הברונזה היו ריכוזי המתכות בשיניים בתחום הריכוזים שמדדנו באנשים מהתקופה הנאוליתית. שינוי זה ברמת הזיהום בשיני אדם לפני כ-3,000 שנה התבטא בשינוי בריכוזי עופרת ובהרכב האיזוטופי שלה במשקעי ביצות באירופה.<sup>34</sup> במעבר מתקופת הברונזה לתקופת הברזל השתנה גם דפוס עיבוד המתכות באזורנו. הפעילות במכרות הערכה התחדשה והתרחבה כאמור לייצור בקנה מידה שלא היה כמותו במזרח התיכון. במקביל נוצרו לראשונה כלים שימושיים מברזל. משהוטמעה הטכנולוגיה של ייצור הברזל, לפני כ-3,000 שנים, הפך הברזל למתכת השכיחה והנגישה ביותר הן לשליטי האזור, שייצרו נשק בכמויות גדולות, והן לאדם הפשוט, שיצר ממנה את כלי עבודתו.

יש שתי שיטות עיקריות למדידת ריכוזי מתכות בשיניים, בעצמות ובמשקעים. האחת היא מדידות ריכוזים בחומר המוצק, כלומר בדוגמת השן, העצם או המשקע עצמה. מדידות אלה מבוצעות בעיקר באמצעות מכשיר ED-XRF (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence). קביעת הרכב הדוגמה מבוססת על פליטת קרני X באורך גל האופייני לכל יסוד כימי בעקבות הקרנת הדוגמה בקרני X. זו אחת משיטות המדידה המהירות ביותר לגילוי הרכב כימי של חומרים רבים, ויתרונה הנוסף, שהבדיקה נעשית ללא פגיעה בדוגמה, ושהיא דורשת הכנה מועטה של הדוגמה (טחינה או הכנת שקף חלק). השיטה מתאימה לכל היסודות הכימיים שבין נתון לאורניום. מנגד, רגישות הבדיקה לחלק ניכר מהיסודות הכימיים אינה גבוהה (מספר חלקים למיליון במקרה הטוב), וההדירות של הבדיקה, כלומר האפשרות לחזור עליה, אינה טובה יחסית לשיטות מדידה אחרות. יש מכשירי XRF ניידים הנמצאים במעבדה, ויש גם מכשירי XRF ניידים שאפשר לקחת לאתר הארכאולוגי. ניתוח

J.P. Grattan et al., 'The Local and Global Dimensions of Metalliferous Pollution Derived from a Reconstruction of an Eight Thousand Year Record of Copper Smelting and Mining at a Desert-Mountain Frontier in Southern Jordan', *JAS*, 34, 1 (2007), pp. 83-110

J.E. Ericson, H. Shirahata & C.C. Patterson, 'Skeletal Concentrations of Lead in Ancient Peruvians', *New England Journal of Medicine*, 300 (1979), pp. 946-951

W. Shotyk et al., 'History of Atmospheric Lead Deposition since 12,370 14C yr BP from a Peat Bog, Jura Mountains, Switzerland', *Science*, 281 (1998), pp. 1635-1640

משקעים באמצעות XRF הראה לדוגמה שבסדנאות לייצור ברזל בתל צפית ובתל מגידו היו ריכוזי נחושת גבוהים יחסית למשקעים מן הסביבה.<sup>35</sup> בשיטה האחרת למדידת מתכות ממיסים את הדוגמה על ידי מספר חומצות מרוכזות במשולב (כגון חומצה חנקתית, חומצה פלואורית ועוד), ולאחר מכן מודדים במכשירי ICP (Inductive Coupled Plasma) למיניהם (אופטי ICP-OES, Optical Emission Spectroscopy) או מס ספקטרומטרי (ICP-MS, Mass Spectrometry). החיסרון העיקרי של השיטה נעוץ בצורך להמיס את הדוגמה בצורה מבוקרת, תהליך היכול לגזול זמן רב. היתרון הוא שלחלק ממכשירי ה-ICP יש רגישות גבוהה ביותר (מספר חלקים לטריליון), המדידה הדירה ביותר ומדויקת. לאחר מדידת ריכוזי המתכות השונות מגיע שלב עיבוד הנתונים, הכולל הקבצה של המתכות על פי המתאם ביניהן או על פי תכונותיהן הכימיות (או שילוב של השניים). לעתים קרובות עדיף להשתמש ביחסים בין יסודות, כגון Ba/Ca לעומת Sr/Ca או Pb/Ca.

נוסף על מדידות של ריכוזי מתכות, מקובל להשתמש ביחסים האיזוטופיים של מתכות (בעיקר עופרת וסטרונציום, אולם לאחרונה גם ברזל, נחושת ואבץ) על מנת לאתר את מקור המתכת. יחסי איזוטופים של עופרת משמשים החל משנות השמונים של המאה העשרים לקביעת מקורות הנחושת בתקופות שונות. השיטה מבוססת על מדידת יחסי איזוטופים בעופרת שנמצאת בדרך כלל בכמויות קטנות במרבצי הנחושת, בהנחה (שנבדקה) שיחסים אלו אינם משתנים בתהליכי הפקה והתכה, ועל כן הם יכולים להיחשב טביעת אצבע של העפרה המקורית. בישראל החלו להשתמש בשיטה באמצע שנות התשעים. במחקרים הראשונים שנעשו בשיטה זו, במכון הגאולוגי, הראתה אירנה סגל בין השאר שהנחושת שיצקו ממנה מטילים בעלי חתך משולש, שנמצאו לעשרות באתרי תקופת הברונזה הביניימית בהר הנגב, מקורה ככל הנראה במכרות פינאן שבעבר הירדן.<sup>36</sup> אנחנו משתמשים ביחסים האיזוטופיים של עופרת הנמצאת בשיניים של אנשים שנקברו באזור פינאן על מנת להבדיל בין עופרת שנקלטה בגופם בחייהם עקב העבודה במכרות לבין עופרת שנוספה לשיניים מן הקרקע לאחר הקבורה. בדומה לכך חוקרים אחרים משתמשים ביחסים איזוטופיים של סטרונציום בשיניים על מנת ללמוד על האזור שבו חיו האנשים, כאשר בקירוב ראשון אפשר להבחין בין אנשים שחיו באזורים של סלעי גרניט לעומת אנשים שחיו באזורי מסלע פחמתיים (קרבונטיים) ולעומת אנשים שחיו באזורי מסלע בזלת.<sup>37</sup>

לאחרונה נעשה שימוש בשרידים ארכאולוגיים כגון סיגי הפקת נחושת וקרמיקה על מנת לקבוע את עצמת השדה המגנטי של כדור הארץ בתקופות השונות.<sup>38</sup> זו דוגמה לחשיבות של ממצאים ארכאולוגיים מתוארכים היטב לשחזור תנאי סביבה בתקופות קדומות. מידע זה יכול בתורו לשמש לתיארוך ממצאים ארכאולוגיים שאי אפשר לתאריך ישירות. דוגמה נוספת היא שימוש בכלים מאתרים

35 אליהו-בהר ואחרים (לעיל, הערה 26).

36 סגל ואחרים (לעיל, הערה 9).

R.A. Bentley, 'Strontium Isotopes from the Earth to the Archaeological Skeleton: A Review', *Journal of Archaeological Method and Theory*, 13 (2006), pp. 135-187

38 E. Ben-Yosef et al., 'Geomagnetic Intensity Spike Recorded in High Resolution Slag Deposit in Southern Jordan', *Earth and Planetary Science Letters*, 287 (2009), pp. 529-539

פרהיסטוריים להבנת תהליכים גאוכימיים השולטים בהיווצרות ובהצטברות של ציפוי מדברי (desert varnish). הדבר חשוב בעיקר להבנת ניידות כימית של מנגן בסביבות צחיחות ולקביעת התנאים הסביבתיים-האקלימיים שיש בהם העדפה לתנועת מנגן כזאת.<sup>39</sup>

נושאים אלה ורבים כיוצא בהם עומדים כיום בלב מחקרים שהם פרי שיתוף פעולה בין חוקרים מתחומי מדעי הרוח בכלל והארכאולוגיה בפרט לבין חוקרים מתחומים שונים של מדעי הטבע. ההבנה שבמחקרים מסוג זה טמונה תועלת רבה למחקר בשני התחומים מחלחלת לקהילה מדעית ומניעה יזמות משותפות, ותוצאותיהן כבר נראות לעין.

39 Y. Goldsmith, Y. Enzel & M. Stein, 'Systematic Mn Fluctuations in Laminated Rock Varnish Developed on Coeval Early Holocene Flint Artifacts along a Climatic Transect, Negev Desert, Israel,' *Quaternary Research*, 8 (2012), pp. 474-485