האוניברסיטה העברית
הפקולטה למדעי הרוח
המכון לארכיאולוגיה

ISRAEL ANTIQUITIES AUTHORITY
רשות העתיקות

ארכיאולוגיה דיגיטלית

מחקרים חדשים וטכנולוגיות מתקדמות

עורכים: מיכל בירקנפלד ויוסף גרפינקל

אסופת מאמרים מתוך יום עיון משותף

ענף GIS מחקרי ברשות העתיקות
המכון לארכיאולוגיה של האוניברסיטה העברית

קובץ מאמרים זה עומד והודפס בעזרת קרן רות עמירן

עורכים: מיכל בירקפלד ויוסף גרפינקל

עיצוב גרפי ועימוד: גיל זהבי

הדפסה וכריכה: פרינטיב

© כל הזכויות שמורות למחברים,
לאוניברסיטה העברית ולרשות העתיקות

ירושלים, תשפ"א, 2020

תוכן עניינים

דברי פתיחה - יום העיון הראשון לארכיאולוגיה דיגיטלית..... 9
מיכל בירקנפלד ויוסף גרפינקל

ארכיאולוגיה ממוחשבת - סיכויים וסיכונים 11
עוזי סמילנסקי

התיעוד הפוטוגרמטרי בחפירות ההצלה ברשות העתיקות 15
אלכסנדר ויגמן

פוטוגרמטריה לתיעוד סביבה ונוף וכבסיס לניתוח מרחבי - נחל רודד 110 כמקרה מבחן 29
מיכל בירקנפלד ואמיל אלדג'ם

כחומר ביד היוצר - שיטות חישוביות במחקר טכנולוגיות קדומות 41
אורטל הרוש, טליה ישוב, לנה דובינסקי, פרנצ'סקו וולטה וליאור גרוסמן

מיפוי דיגיטלי וסקר זיהום קרקע באתר הפקת נחושת מראשית תקופת הברזל בבקעת תמנע... 59
אהרון גרינר, עמרי יגל וארז בן-יוסף

יישומי מערכות מידע גיאוגרפי וניתוחי פריסה מרחבית ככלי מחקר ארכיאולוגי
אפשרויות ומגבלות – מקרה המבחן של אתרי הרגמים בנגב המזרחי 77
רועי גלילי ואלי כהן ששון

על אונומסטיקון דיגיטלי ועל הזיקה בין חותמות לטביעות חותם עם שמות בתקופת הברזל II 97
מיתקה גולוב-רצהבי

צילום מולטיספקטרלי כאמצעי לזיהוי פיגמנטים בציור קיר מקרה מבחן פומפי 109
יותם אשר

ארכיאולוגיה דיגיטלית - הזדמנויות וסכנות 125
חי אשכנזי

Landscape Archaeology at Aneva Stream, Israel: Deconstructing a General Trend in Agricultural Intensification with GIS, Remote Sensing and Regression Analysis
N. Manspeizer, M. Haiman, O. Ackermann, A. Tendler, M. Birkenfeld, D. Levy and J. Marcus-Peretz.....5*

רשימת איורים

התיעוד הפוטוגרמטרי בחפירות ההצלה ברשות העתיקות 15

איור 1: תוכנית הפיילוט 2017: תיעוד מורכב בחפירת הרחוב המדורג בעיר דוד
(נ' זנטון, מ' חג'בי, ג' עוזיאל ואחרים. 17

איור 2: תוכנית הפיילוט 2017: תיעוד מלא של חפירה בפרויקט 'חלומות ארנונה' בירושלים
(י' ביליג וא' זילברבוד). 18

איור 3: דוגמה של העיגון הגיאוגרפי ובקרת הדיוק במודל מורכב. 20

איור 4: דו"ח נקודות העיגון ובקרת הדיוק מפרויקט ח' עין לוזה. 21

איור 5: ריכוז שכבות המידע בפרויקט ArcGIS Pro. 22

איור 6: תוכנית הפיילוט 2017: חפירת מורדות ארנונה
(נ' ספיר וכ' ארביב; תיעוד על ידי יעקב שמידוב). 23

פוטוגרמטריה לתיעוד סביבה ונוף וכבסיס לניתוח מרחבי -נחל רודד 110 כמקרה מבחן 29

איור 1: האתר הניאוליתי נחל רודד 110 31

איור 2: יצירת DEM טופוגרפי באמצעות קווי גובה. 32

איור 3: מסלול הטיסה של הרחפן. 33

טבלה 1: Pix4Dmapper Processing Options . . . . . 34.

איור 4: תוצרי התהליך הפוטוגרמטרי - האורתופוטו (משמאל) וה-DEM (מימין). 35

איור 5: קווי הגובה של מפ"י לעומת קווי הגובה שנוצרו מה-DEM. 36

איור 6: מפת תבליט (HILLSHADE) מקווי הגובה של מפ"י (מימין)
ומהמודל הפוטוגרמטרי (שמאל). 36

איור 7: ניתוחי הראות. השטח הנצפה מהאתר מסומן בצבע ירוק בהיר.
מימין - תוצאות המודל המסורתי, משמאל - תוצאות המודל הפוטוגרמטרי.. 37

איור 8: ניתוח דרכי מעבר בנוף. מימין - תוצאות המודל המסורתי,
משמאל - תוצאות המודל הפוטוגרמטרי.. 37

כחומר ביד היוצר - שיטות חישוביות במחקר טכנולוגיות קדומות 41

איור 1: המעבדה לארכיאולוגיה חישובית, המכון לארכיאולוגיה, האוניברסיטה העברית
בירושלים (צילום: טל רוגובסקי) 42

איור 2: חישוב זווית החורפה הממוצעת בתלת-ממד: (א) הגדרה ידנית של אזור האנליזה;
(ב) הפרדה אוטומטית של המשטחים היוצרים את הזווית;
(ג) חישוב הזווית בין המשטחים. 43

איור 3: דרום הלבנט. אתרי האפיפליאולית הכלולים במחקר. 44

איור 4: התפלגות תוצאות חישוב זווית החורפה הממוצעת (ציר ה-X) של המיקרוליתים
בכל אתר, כולל הממוצע וסטיית תקן.. 45

איור 5: השוואה בין שני פריטים מחוררים. עמודה ימנית – חלוק אבן גיר טבעי עם סימון בנקודה אדומה של מרכז הכובד (א); עם קידוח לא אחיד (ב); וציר קידוח בעל סטיית תקן גבוהה (ג). עמודה שמאלית – חלוק אבן גיר מעובד עם סימון של מרכז הכובד (א); עם קידוח סימטרי (ב); וציר קידוח בעל סטיית תקן נמוכה (ג). 47

איור 6: גרף מדידת החור המינימלי המראה את העקביות של פתח בקוטר 2–4 מ"מ באופן בלתי תלוי בגודל הפריט. 48

איור 7: הניסוי: (א) הכנת הטין לפני הייצור (משקל הטין לכל פריט כ-400 גרם); (ב) הסטודנטיות בבצלאל בעבודה; (ג) ייצור הפריטים לפי טכניקת 'גדילים על אובניים'; (ד) אבטיפוס הניסוי – החלק העליון של קנקן מתקופת הברזל. 49

איור 8: (א) מודל תלת-ממדי עם ציר סיבוב ועם פרופיל דו-ממדי (בלבן); (ב) תצוגה ויזואלית של כלל פריטים שקדרית אחת ייצרה. הפרופילים מאורגנים לפי סדר כרונולוגי בייצור (שימוש בתוכנת Rhino). 50

איור 9: תצוגה ויזואלית של פריטים שיצרה קדרית אחת, עם מבט על החלק הפנימי (למעלה) והחיצוני (למטה) של הפרופילים. 50

איור 10: עץ מיון אוטומטי ל-138 פריטים שיוצרו על ידי 5 קדריות מתלמדות. 51

איור 11: תצוגת תוכנת CUT3-D. מספור המקטעים מתייחס לשלושה חלקים נבחרים בניתוח הטכנולוגי של הדמות (HF21) 52

איור 12: תוכנת CUT3-D: תצוגה של רצף הרצועות התלת-ממדיות החותכות לרוחב את הקווים החרותים (במ"מ) 53

איור 13: חתכים בודדים מתוך הרצפים של שלושה מקטעים, המצביעים על הבדלים באופני הביצוע של הקווים השונים בדמות HF21. (1) נוצר באמצעות תנועה אחת; (2) נוצר באמצעות תנועה חוזרת; (3) נוצר באמצעות הקשה. 54

מיפוי דיגיטלי וסקר זיהום קרקע באתר הפקת נחושת מראשית תקופת הברזל בבקעת תמנע 59

איור 1: מיקומו של אתר 34 בבקעת תמנע. במפה המוקטנת: מיקומם של תמנע ופינאן, שני מרכזי ייצור הנחושת העיקריים בעת העתיקה בדרום הלבנט. 63

איור 2: מפה גיאולוגית של מרכז בקעת תמנע ואתר 34 (קטע מהמפה הגיאולוגית 1:50,000 של באר אורה; (Beyth et al. 1999). 64

איור 3: ערימות סיגים, אלמנטים אדריכליים (מתקנים שונים) ותפוצת שברי החרס האינדיקטיביים באתר 34 ('גבעת העבדים'). 65

איור 4: אתר 34 (מבט לדרום-מזרח). 65

איור 5: מפה של אתר 34 המראה את המיקום המדויק של דגימות הקרקע שנאספו במחקר הנוכחי. 66

איורים 6–7: איסוף של דגימות הקרקע באתר 34 תוך כדי תיעוד המיקום המדויק בו נלקחה כל דגימה בעזרת dGPS. 67

איורים 8–9: נתנאל דיטון מכין את דגימות הקרקע לקראת קריאתן במכשיר XRF במעבדה הארכיאומטלורגית באוניברסיטת תל אביב. 68

איור 10: התפלגות מרחבית של ריכוזי הנחושת והעופרת באתר 34. 70
איור 11: התפלגות מרחבית של ריכוזי הברזל והסידן באתר 34. 71
איור 12: התפלגות מרחבית של ריכוזי האשלגן והזרחן באתר 34.. 71

יישומי מערכות מידע גיאוגרפי וניתוחי פריסה מרחבית ככלי מחקר ארכיאולוגי
אפשרויות ומגבלות – מקרה המבחן של אתרי הרגמים בנגב המזרחי 79
איור 1: אתרי בקעת ימין 79
איור 2: ממוצע שכן קרוב – בין פיזור מקובץ לפיזור רנדומלי 81
איור 3: הביטוי הכרטוגרפי של מבחן צפיפויות הליבה 82
איור 4: תצוגה כרטוגרפית של שטחים נצפים. 83
איור 5: אתר תמר 1: תוכנית האתר 84
איור 6: אתר תמר 1 דגם הפריסה במבחן ממוצע שכן קרוב 85
איור 7: אתר תמר 1 מבחן צפיפות הליבה 86
איור 8: אתר תמר 1: שטחים נצפים (בוורוד) על גבי מפת גבהים (DEM file). 87
איור 9: אתר תמר 1: שטחים נצפים בקרבת האתר – אזור בקעת צבאים מצפון מערב ורכסים שעליהם אתרי רגמים מדרום מערב. 87
איור 10: אתר חצרה 1 תוכנית האתר 88
איור 11: אתר חצרה 1 דגם הפריסה במבחן ממוצע שכן קרוב 89
איור 12: אתר חצרה 1 מבחן צפיפות הליבה 90
איור 13: אתר חצרה 1: שטחים נצפים (בוורוד) על גבי מפת גבהים (DEM file). 91
איור 14: שטחים נצפים מחצרה 1 (בכחול) תמר 1 (בוורוד) ושטחים שנצפים משני האתרים (בשחור) . . 92
איור 15: חצרה 1 והמקדש בנחל סייף – קווי ראייה ופרופיל גבהים. 93

על אונומסטיקון דיגיטלי ועל הזיקה בין חותמות לטביעות חותם עם שמות בתקופת הברזל II . . . 97
איור 1: היחס בין קבוצות הממצאים השונות ובינן לבין כלל החותמות 106

צילום מולטיספקטרלי כאמצעי לזיהוי פיגמנטים בציור קיר - מקרה מבחן פומפי 109
איור 1: תיאור גרפי פשטני של שיטת צילום ציורי הקיר המערבי במצלמה המולטיספקטרלית. . . 114
איור 2: (A) ציור הקיר המערבי ב-frigidarium, עם מיקום נקודות של פיגמנטים אדומים (ספקטראות אדומים) וכחולים (ספקטראות כחולים) אשר נותחו בשיטות pXRF ו-FORS.
(B) ספקטראות FORS (אשר נותנת מידע מולקולרי-מבני) מראות שהנקודות האדומות מכילות את המינרל המטיט (תחמוצת ברזל) והנקודות הכחולות מכילות את המינרל קופרוריאויט (כחול מצרי), מינרל סיליקתי של נחושת.
(C) ספקטראות XRF (אשר נותנות מידע על ההרכב הכימי), מראות שהיסודות הכימיים של הצבעים האדומים עשירים בברזל, והספקטראות של הצבעים הכחולים עשירים בנחושת. 115

איור 3: ניתוח ספקטרלי של המינרל המטיט בציור הקיר המערבי ב-frigidarium. 116
איור 4: תוצאות מדידות דיפרקציה של קרני X על שברי קיר הצבועים באדום (F413)
וכחול (F404). 117
איור 5: ניתוח ספקטרלי של מינרלים המשויכים לבליה. 118

נספח 1 123
תמונות של שברי ציורי קיר שנמצאו מתחת לציור המערבי בחדר הקר ואשר נבדקו
במחקר זה באמצעות דיפרקציית קרני X. ראה תוצאות באיור 4 בטקסט, כאשר a היא
דוגמא 413, ו-b היא דוגמא 404. 123

נספח 2 123
שש תמונות באורכי גל שונים המרכיבים את קוביית המידע התלת ממדית. התמונות הן
מונוכרומטיות (סרגל צבעים אפור) והן ממוקמות בצירי XY שלהם זו על גבי זו במדויק
(לפי ממדי הציור) וציר Z שמהווה את התמונות הספקטרליות השונות. אפשר לראות
שינויים בתמונות הנובעת מחדירת האור לתוך החומר ותגובת החומר עם האור.. . . . 123

נספח 3 124
ספקטראות האור המוחזר של סטנדרטי USGS של המטיט (אדום) GDS27
וקופרוריאויט (כחול מצרי). 124

נספח 4 124
הקיר הצפוני ב-frigidarium של קומפלקס הבריכות. אפשר לראות את המצב המקורי
(שמאל, ציור משוחזר אחרי Niccolini, 1898), בשנת 1992 (ימין, אחרי Ioppolo) וכיום
(אמצעי). בתמונה הקטנה אפשר לראות את המלחים המתגבשים על ציורי הקיר.. . . . 124

רשימת טבלאות

על אונומסטיקון דיגיטלי ועל הזיקה בין חותמות לטביעות חותם עם שמות בתקופת הברזל II . . . 97
טבלה 1: נוכחות איקונוגרפיה בחותמות, טביעות חותם על קנקנים ובולות 101
טבלה 2: תפוצה גיאוגרפית של חותמות. 102
טבלה 3: התפלגות החותמות על פי שיוכם הטריטוריאלי. 103
טבלה 4: תפוצה גיאוגרפית של בולות. 103
טבלה 5: תפוצה גיאוגרפית של טביעות חותם על קנקנים 104
טבלה 6: התפלגות כרונולוגית של חותמות, טביעות חותם על קנקנים ובולות 105

דברי פתיחה - יום העיון הראשון לארכיאולוגיה דיגיטלית

מיכל בירקנפלד ויוסף גרפינקל

רשות העתיקות והמכון לארכיאולוגיה באוניברסיטה העברית

בקובץ זה מתפרסמים עשרה מאמרים שונים שהוצגו ביום העיון הראשון לארכיאולוגיה דיגיטלית. מצד אחד ממשיכים הארכיאולוגים לחפור באתרים בעבודת כפיים וממשיכים להשתמש בכלים שלא השתנו מזה מאה שנים ויותר, כגון מכוש, מעדר ודלי. מצד שני אין עוד תחום במדעי הרוח שאימץ מגוון כה רחב של שיטות מחקר חדשות במהלך השנים. אפשר לתאר את ההתפתחויות הללו כשתי מהפכות: מהפכת המחקר המשלב תחומים שונים (מחקר אינטרדיסציפלינרי) ומהפכת המחקר הדיגיטלי.

שילוב חוקרים מתחומי מחקר מגוונים להבנה טובה יותר של הממצא הארכיאולוגי החל כבר בחפירות המשלחת הראשונה ללכיש, כאשר כימאי בדק את הדיו שבה השתמשו לכתיבת מכתבי לכיש. אבל מאז שנות השמונים של המאה הקודמת מדובר במהפכה של ממש. אי אפשר לתאר מחקר ארכיאולוגי מודרני ללא ניתוח של עצמות בעלי חיים, צדפים, זרעים, פחם, פיטוליתים, מחקר מטלורגי של ממצא מתכת, מחקר גיאולוגי של כלי אבן וחרוזים, מחקר פטרוגרפי של כלי חרס, בדיקת משקעים בכלי חרס, שיטות תיארוך רדיומטריות, מחקרי DNA וכדומה.

באופן דומה אפשר לדבר על פריצת דרך חדשה בהיבט המהפכה הדיגיטלית המתרחשת ממש לנוכח עיננו. לתחום זה הוקדש יום העיון שהשתתפו בו קרוב למאה ארכיאולוגים מכל מוסדות המחקר בארץ. עשרת המאמרים המרוכזים בפרסום זה כוללים רק חלק ממגוון האפשרויות שהמהפכה הדיגיטלית מאפשרת. בימי עיון נוספים, שנשתדל לארגן מפעם לפעם, ודאי יבואו לידי ביטוי מגוון מחקרים נוספים.

בקובץ הנוכחי יש דגש גדול על אמצעי מיפוי חדשים. המודד הקלאסי, ההולך עם סרט מדידה ומצייר את הקירות והמתקנים המתגלים בחפירה, מפנה את מקומו למדידות בשיטות של פוטוגרמטריה. שיטות אלה הן מהירות, מדויקות ויוצרות דגם תלת-ממדי של אתר החפירה. השימוש בפוטוגרמטריה אף מאפשר לעלות מעבר לרמת שטח החפירה הבודד אל רמת האתר ומיקומו בנוף; מערכות מידע גיאוגרפי (GIS) תורמות להבנת תפרוסת ההתנהגות האנושית, כגון בחירת מיקום אתרים, ניתוח בניית טראסות ופעילות חקלאית סביב האתר, וסקר זיהומי נחושת להבנת פעילות כרייה בתמנע; מגוון היבטים אחרים כוללים ניתוח דיגיטלי ליצירת טיפולוגיה של כלי חרס, ניתוח שמות אנשים שהתגלו בכתובות עתיקות ואף ניתוח צבעים בציורי קיר.

כמו בכל תחום מחקרי, גם בעידן הדיגיטלי יש היבטים הדורשים זהירות, ביקורתיות ומודעות למגבלות התחום. כמה מאמרים בפרסום זו דנים גם בהיבטים אלה. כיום, יותר מתמיד, נראה שהעתיד צופן בחובו אפשרויות בלתי מוגבלות למחקר העבר.

ארכיאולוגיה ממוחשבת - סיכויים וסיכונים

עוזי סמילנסקי

מכון ויצמן למדע והמכון לארכיאולוגיה, האוניברסיטה העברית

"המחשב לעולם לא ימנע מלעשות דבר אחד – להציג תוצאה"

(ל. ס. בידנהרן (1968))

המִחשוב שפלש כמעט לכל תחומי החיים של הפרט והחברה לא פסח גם על העשייה והמחקר הארכיאולוגי. מבין מדעי הרוח, הייתה הארכיאולוגיה – האמונה על השימוש בשיטות הלקוחות ממדעי הטבע –אחד מענפי המחקר הראשונים שאימצו שיטות חישוביות, עוד לפני שפרצה מהפכת הבינה המלאכותית המתקדמת עם מערכי הנתונים הענקיים (Big Data) והראייה הממוחשבת. כיום משתמשת הארכיאולוגיה במחשוב בכל התחומים שבהם היא עוסקת:

א. תיעוד – תיעוד מפורט של מהלך החפירה בשטח, צילום (בשניים או שלושה ממדים) של ממצאים קטנים (מחרצני ענבים עד אכסון) וגדולים (פרטים ומבנים ארכיטקטוניים ואורבניים) ויצירת מערכי נתונים מתאימים. לשלושת ממדי המרחב אפשר גם להוסיף את ממד הזמן שמאפשר תיעוד של תהליכים של בלֶיה (כאשר הנזק מצטבר בזמן) או תהליכי ייצור (סיתות, קדרות, אריגה בעבודה אתנו-ארכיאולוגית).

ב. שימור והפצת ידע – מערכי הנתונים משמרים ממצאים שנהרסים בגלל מלחמות או אסונות טבע ואפשר לשחזרם מהתיעוד. הם משמשים כבסיס נוח להפצת הידע הארכיאולוגי לקהל המתעניין במוזיאונים המסורתיים, כמו גם במרשתת וכעזרי הוראה.

ג. שחזור ורפאות – שחזור מבנים באמצעות תוכנות ייעודיות מאפשר הכנסת אילוצי סטטיקה, יציבות וחוזק חומרים לתהליך השחזור; שיפור הנראות של כתבי יד, חריטות ועיטורי צבע; רפאות של כלי חרס או פסלים; וקריאה ופיענוח של טקסטים.

ד. מדידה – סיכום ותיעוד של מדידות במהלך החפירה; קבלת מידות המאפיינות כלים כמו אורך רוחב, שטח פנים או נפח; הצבה נכונה של שברי קרמיקה; אפיון תכונות של משטחים.

ה. מחקר – שיטות להשוואה ומיון של מכלולי פריטים, השוואות כתבי יד וסגנונות כתיבה או ניתוח סטטיסטי מפורט של אוספי נתונים מורכבים.

כל אלה ועוד תוארו והודגמו במהלך יום העיון.

כדאי גם לזכור כי רוב המכשור, הן היום-יומי (כגון מצלמת הטלפון) והן הייעודי (כגון הסורק התלת ממדי) הם מבוססי מִחשוב. נתון מאלף שידגים את חשיבות התוכנה הוא העלות של תוכנת המחשב השולטת בסורק תלת-ממד שמגיעה עד 30% מהעלות הכוללת של הסורק.

העתיד המִחשובי נראה מבטיח – המחשבים מתחזקים מידי שנה ושנה הן בנפח הזיכרון והן במהירות ותחכום החישובים, בעוד מחירי החומרה והתוכנה יורדים. אפליקציות מגוונות מוצעות והיקף הבעיות שהן פותרות מתרחב בתחכומו ובנוחיות השימוש ובנגישות. תהליכים אלו מדורבנים וממומנים על ידי דרישות השוק והמערכות הביטחוניות. בסופו של יום, הכל זמין ומצוי בהישג יד וכיס על מדפי החנויות.

וכשהעתיד נראה כל כך ורוד עולות השאלות:

- האם באמת יפנה הארכיאולוג המסורתי את מקומו לארכיאורובוט?
- מה הם הסדקים בתמונה זו?
- איך אפשר לנצל באופן המיטבי את היתרונות הגלומים במחשוב על כל צורותיו וגווניו לחיזוק והרחבת המחקר הארכיאולוגי?

הבסיס לבעייתיות של אימוץ המחשוב לצורך המחקר הארכיאולוגי הוא לדעתי העובדה שלשאלות הארכיאולוגיות המורכבות אין פתרונות "מן המוכן", כלומר פתרונות המצויים על המדפים, וכן שהאוכלוסייה הארכיאולוגית קטנה מידי מכדי לפתח תוכנות מיוחדות, ייעודיות לארכיאולוגיה, שיצדיקו כלכלית את ההשקעות. אמנם יש כמה אנשי מחשבים המפתחים תוכנה לארכיאולוגיה, אולם לעיתים קרובות הם לא מכירים מספיק את צורכי המחקר הארכיאולוגי. הם פותרים בעיות שנראות להם מעניינות, אך למעשה הן בעלות חשיבות ארכיאולוגית מעטה.

במצב כזה עומדות שתי אפשרויות בפני הארכיאולוג המעוניין להיפתח או להתעדכן בשיטות ממוחשבות: לרכוש מוצרים קיימים ולהתאים אותם לצרכיו או לשתף פעולה עם אנשי מקצוע כדי לפתח תוכנות ייעודיות.

רכישת תוכנה (או אימוץ פיתוחים שנעשו במעבדות אחרות) היא כמובן הקלה והנוחה יותר, כי היא לא דורשת הבנה של האלגוריתמים והלוגיקה שבבסיס התוכנה. עם זאת שכרה יוצא בהפסדה, כי למשתמש אין ידע או יכולת להכניס שנויים בתוכנה מעבר לרפרטואר שהעמיד המפתח לרשות המשתמש. כמו כן הרוכש מוותר במידה רבה על היכולת לבדוק אם התוכנה מבצעת את תפקידה בדיוק, ביציבות וביעילות הנדרשים. כאן המקום לצטט שוב את המוטו המופיע בכותרת המאמר: *"המחשב לעולם לא ימנע מלעשות דבר אחד – להציג תוצאה"*, כלומר חובת ההוכחה לאמינות היא על המשתמש.

פיתוח עצמי, לעומת זאת, דורש ידע והשקעת זמן. את הידע והמומחיות החישובית אפשר להשיג באמצעות שיתוף פעולה הדוק עם אנשי מחשבים, אבל לצורך זה יש להשקיע

זמן ביצירת דיאלוג פורה שיגשר על הפער שבין הדיסציפלינות: הארכיאולוגית-הומנית והמתמטית-חישובית. היתרון הגדול בגישה האחרונה הוא בכך שהגדרת המשימה נעשית לפי הצרכים והשיקולים הארכיאולוגיים, ועם סיום הפיתוח זוכה הארכיאולוג בראשוניות ובמעמד מוביל בתחומו.

בשני כיווני הפעולה, הארכיאולוג המשתמש חייב לרכוש ידע בסיסי במתמטיקה ובמחשוב. ידע זה יאפשר הידברות כמו גם הבנת המושגים הבסיסיים ואופני הניסוח והמחשבה המאפיינים את המדעים מדויקים. אומר זאת בבירור: אני מאמין שהמחקר הארכיאולוגי שייך לתחום מדעי הרוח ואיננו נזקק לשיטות מתמטיות כדי להשיג את מטרותיו. אולם אם הארכיאולוג מאמץ את המחשוב ככלי עזר, עליו להבין את העקרונות שבעזרתם יוכל להעריך את התועלת לצד הסכנות בשימוש בלתי מושכל בכלים אלו.

אסיים בדוגמה מהחיים: בשנים האחרונות פורחים שימושי המחשב במדעי הרוח תחת הכותרת Digital Humanities או בקיצור DH. בהרבה מכיווני מחקר אלה נעשה שימוש בתוכנות מוכנות של Big Data ולימוד עמוק (deep learning) לניתוח של טקסטים מילוליים, מוזיקליים או אינפורמציה ויזואלית. השימוש בתוכנות כאלה מוצדק, אם כמות הנתונים שמשמשת לאמן את התוכנה מספיק גדולה כדי לעמוד בדרישות הרזולוציה המוכתבת על ידי הצרכן. תנאים אלו מתמלאים בדרך כלל בניתוח ספרות או בזיהוי תמונות או מוזיקה. קשה להאמין שאפשר לעשות זאת לצורך ניתוח אוספים ארכיאולוגיים שמספר הפריטים בהם קטן, יחסית לדרישת הדיוק והרזולוציה הנחוצה. במקרים כאלה אפיון מראש של הפרמטרים הרלבנטיים לניתוח עשוי לאפשר שימוש בכלים אלו.

את הנקודה האחרונה ברצוני להדגיש: הידע וההבחנה של הארכיאולוג חייב להיות משולב במהלך הניתוח הממוחשב, כי בלעדיו אפשר בקלות להגיע למסקנות שהן נכונות מתמטית, אך לא רלבנטיות מהבחינה הארכיאולוגית.

ואסיים את דברי בנימה אופטימית – שיתוף פעולה פורה ומועיל בין תחומי מחקר וידע התקיים תמיד ומתקיים גם כעת. אני משוכנע שהוא ימשיך ויפרח לתועלת שני הצדדים – הארכיאולוגיה ומדעי המחשב.

התיעוד הפוטוגרמטרי בחפירות ההצלה ברשות העתיקות

אלכסנדר ויגמן

רשות העתיקות

תקציר

התיעוד הפוטוגרמטרי הוא כלי נגיש ועוצמתי לתיעוד תלת-ממדי פוטו-ריאליסטי של אתרי עתיקות. התוצרים של התיעוד יכולים לשמש ליצירת תוכניות וחתכים לפרסום, ולמחקר בתחומי הניתוח המרחבי, מורפולוגיה וארכיאולוגיה של הנוף. במאמר הזה נסכם את תהליך העבודה, ונציג את הכללים המנחים והתפיסה על השינויים במבנה הארגוני שנדרשים כדי להטמיע את התיעוד הפוטוגרמטרי ככלי התיעוד העיקרי בחפירות, במטרה ליישמו בכלל חפירות ההצלה של רשות העתיקות עד סוף שנת 2019.

מבוא

בתחילת העשור הפיתוח של שיטת Structure from Motion (SfM) הובילה למהפכה בתחום התיעוד הפוטוגרמטרי. שיטת SfM מאפשרת את החישוב האוטומטי של האוריינטציה והמיקום במרחב של סדרת צילומים חופפים, ללא צורך להגדיר מראש את המיקום המרחבי של הצילומים או את נקודות הקישור שביניהם (Fonstad et al. 2013; Howland, Kuester and Levy 2014; Kjellman 2012; Magnani and Douglass 2019; Remondino 2014; Westoby et al. 2012).

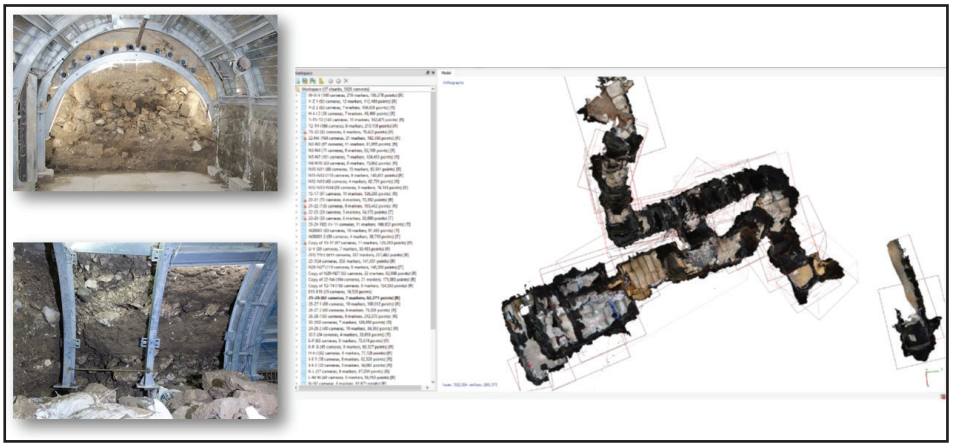
שיטת SfM הובילה לפיתוח של סדרת תוכנות פוטוגרמטריה מתחרות שמאפשרות לייצר דגמים תלת-ממדיים מדויקים של חפצים, מבנים ושטחים על סמך צילומים שצולמו במצלמות דיגיטליות רגילות שזמינות לציבור הרחב. הפיתוח המתמשך של התוכנות האלה מונע בראש ובראשונה על ידי היישום של פוטוגרמטריה ככלי מדידה בתחומי הביטחון, ההנדסה, האדריכלות והתכנון. תחום התיעוד הארכיאולוגי והשימורי יוצא נשכר, במיוחד בשנים האחרונות, מתוכנות שנעשות יותר קלות להבנה ולשימוש. זאת לצד התפתחויות מקבילות בתחום הצילום הדיגיטלי וכוח העיבוד של מחשבים שמאפשרות לייצר תיעוד תלת-ממדי באיכות גבוהה מאוד באופן יותר ויותר יעיל, תוך כדי שימוש בכלים פשוטים ונגישים. התפתחות טכנולוגית נוספת שתורמת באופן מהותי ליישום הפוטוגרמטריה לתיעוד ולמחקר הארכיאולוגי היא בתחום הרחפנים. הרחפנים מאפשרים לתעד שטחים שקשה או בלתי אפשרי לתעד מהקרקע ולבצע מיפוי אורתוגרפי וטופוגרפי על שטחים נרחבים, לצורך סקרים ומחקר הניתוח המרחבי (Muñoz-Nieto et al. 2014; O'Driscoll 2018).

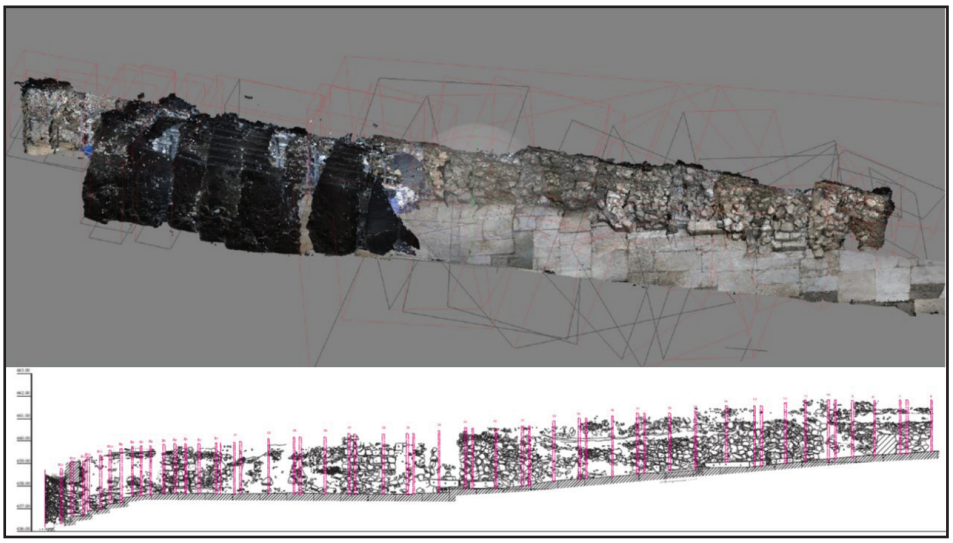
צעד חשוב בהכנסת התיעוד הפוטוגרמטרי למחקר הארכיאולוגי בארץ נערך על ידי משלחת תל עכו מטעם אוניברסיטת חיפה ואוניברסיטת המדינה של פנסילבניה בראשות א׳ קילברו ומ׳ ארצי. המשלחת הסתמכה על תיעוד פוטוגרמטרי כתיעוד העיקרי בחפירה, תוך כדי שימוש בתוכנת Agisoft Photoscan (Olson et al. 2013; Quartermaine, Olson and Killebrew 2014: 113-116). זהו הניסיון הראשון בארץ לשימוש בפוטוגרמטריה ככלי התיעוד העיקרי בחפירה ארכיאולוגית במקום שיטות התיעוד המסורתיים. במקביל החל שימוש נרחב בתיעוד הפוטוגרמטרי בפרויקט האזורי בעמק יזרעאל בראשות מ׳ אדמס מטעם מכון אלברייט (Prins 2016; Homsher et al. 2017).

הטמעת התיעוד הפוטוגרמטרי ברשות העתיקות

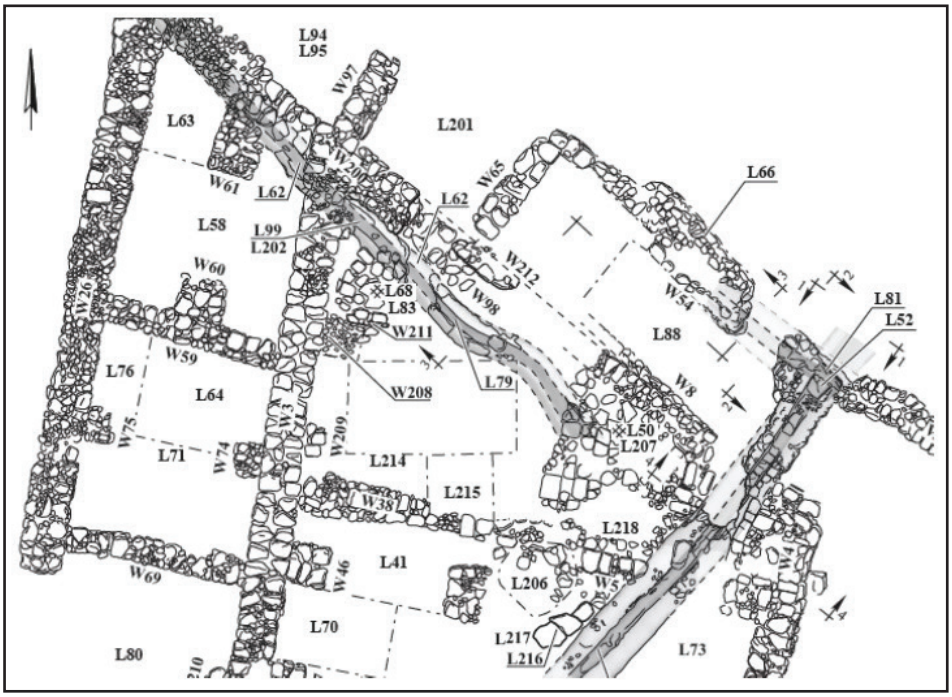
אחרי תקופת ניסוי במרחב ירושלים (Wiegmann 2016), נערך בשנת 2017 פיילוט ליישום התיעוד הפוטוגרמטרי על ידי א׳ ויגמן, א׳ רוז וי׳ שמידוב ב-20 חפירות הצלה, במטרה לבדוק את היעילות של התיעוד ולבנות תהליך עבודה וכללים לשינויים במבנה הארגוני שנדרשים כדי להטמיע את התיעוד הפוטוגרמטרי בכלל חפירות ההצלה, כמו כן בעבודות הפיקוח, השימור והסקרים של רשות העתיקות.[1] החל מתוכנית הפיילוט שנערך בשנת 2017 עד למחצית של שנת 2019, בוצע תיעוד פוטוגרמטרי בכ-350 פרויקטים במסגרת העבודה של רשות העתיקות בחפירות וסקרים, ובמשימות פיקוח ופרויקטים של מינהל השימור. כמחצית מפרויקטים אלה הן חפירות הצלה מגוונות מבחינת הגודל והמורכבות שלהן: מחפירות קטנות וחד-שכבתיות, דרך חפירות עם סטרטיגרפיה מורכבת ועד החפירות הגדולות ביותר שנערכו בתולדות רשות העתיקות שמתנהלות כעת במחלף מוצא ובעין איסוויר. במאמר הזה נסכם את תהליך העבודה שגובש לצורך התיעוד בחפירות ההצלה במהלך הפיילוט ובתקופת ההתנסות שבאה אחריו.

1 אני מודה מאוד לכול עמיתיי לעבודה שסייעו וליוו את תוכנית הפיילוט, ובמיוחד מ׳ בירקנפלד, י׳ ברוך וי׳ ציונית, ולמימון להטמעת התיעוד הפוטוגרמטרי ברשות העתיקות מפרויקט "ציוני דרך" בראשות ר׳ פינסקי מטעם משרד ירושלים ומורשת. ההצלחה של הטמעת התיעוד תלויה בעבודה המאומצת והיצירתית של כלל חברי צוותי הפוטוגרמטריה: א׳ אזולאי, א׳ אלג׳ם, א׳ בחרנו, ה׳ ביתן, י׳ דלרזון, ש׳ הלוי, ח׳ טחן-רוזן, י׳ מרמלשטיין, א׳ מרקו, ד׳ סלמאן, ש׳ עמנואלוב, מ׳ פלג, י׳ פלייטמן, ג׳ צברי, א׳ קליינר, א׳ רוז מ׳ שויסקיה, וי׳ שמידוב.





איור 1: תוכנית הפיילוט 2017: תיעוד מורכב בחפירת הרחוב המדורג בעיר דוד (נ' זנטון, מ' חג'בי, ג' עוזיאל ואחרים; תיעוד ע"י א' בחרנו ומנהלי השטחים וציור ובניית המודלים ע"י א' בחרנו וא' רוז באמצעות Agisoft Photoscan). החפירה מתקדמת אופקית בתוך מנהרות, והחתכים שבניצב ולאורך תוואי החפירה מתכסים כל 3–4 מ' בכיסוי מתכת מטעמי הבטיחות. לפני כל כיסוי מתבצע תיעוד פוטוגרמטרי מלא. מאות המודלים שנוצרים באופן הזה מעוגנים גיאוגרפית באופן עצמאי ומחוברים כדי לייצר חתכים ותוכנית רצופים.



איור 2: תוכנית הפיילוט 2017: תיעוד מלא של חפירה בפרויקט 'חלומות ארנונה' בירושלים (י' ביליג וא' זילברבוד).
למעלה: מבט על מודל הסופי בפורמט 3MX ב-ContextCapture Viewer.
תיעוד על ידי א' ויגמן באמצעות 1808 צילומי רחפן DJI Phantom 4 Advanced.
למטה: ציור ב-ArcGIS וגימור ב-Adobe Illustrator על ידי א' רוז, תוך כדי הפרדת שכבות ארכיאולוגיות.

אמצעי התיעוד

אחת המסקנות של תוכנית הפיילוט הייתה שצריך לעבור מתוכנת Agisoft Photoscan לתוכנת Bentley ContextCapture[2] כפלטפורמה העיקרית לבניית המודלים הפוטוגרמטרים ועריכתם. היתרונות העיקריים של ContextCapture הם האיכות הוויזואלית הגבוהה של הטקסטורה של המודלים; אי הגבלת גודל המודלים על פי כמות הזיכרון הזמין במחשב; ותוכנת צפיין חינמית המאפשרת לצפות ולבצע מדידות מרחק, שטח ונפח במודלים בכלל המחשבים של רשות העתיקות, דרך הרשת או באופן לא מקוון.

שיטת התיעוד מתבססת על תחנות עבודה שכל אחת כוללת ערכת כלים קבועה. המחשב שמשמש ליצירה ולעריכה של המודלים בעל המאפיינים הבאים: מעבד: Xeon W-2155 10 Core 3.30 GHz; זיכרון זמין: 128 Gb; כרטיס מסך: NVIDIA Quadro P4000; מערכת הפעלה Windows 10 64 bit. הצילומים נעשים באמצעות מצלמה מדגם Canon EOS 750D (חיישן APS-C CMOS 24.2 MP) עם עדשת קיט 18-55 מ"מ ורחפן מדגם Phantom 4 Advanced (חיישן 1" CMOS 20 MP). העיגון הגיאוגרפי מתבצע באמצעות מכשיר South Instruments Galaxy G1 RTK לדיוק של 3 ס"מ (אופקי ואנכי). בכל תחנת עבודה מיועדים כונן עבודה בנפח 2 TB וכונן אחסון בנפח 12 TB.

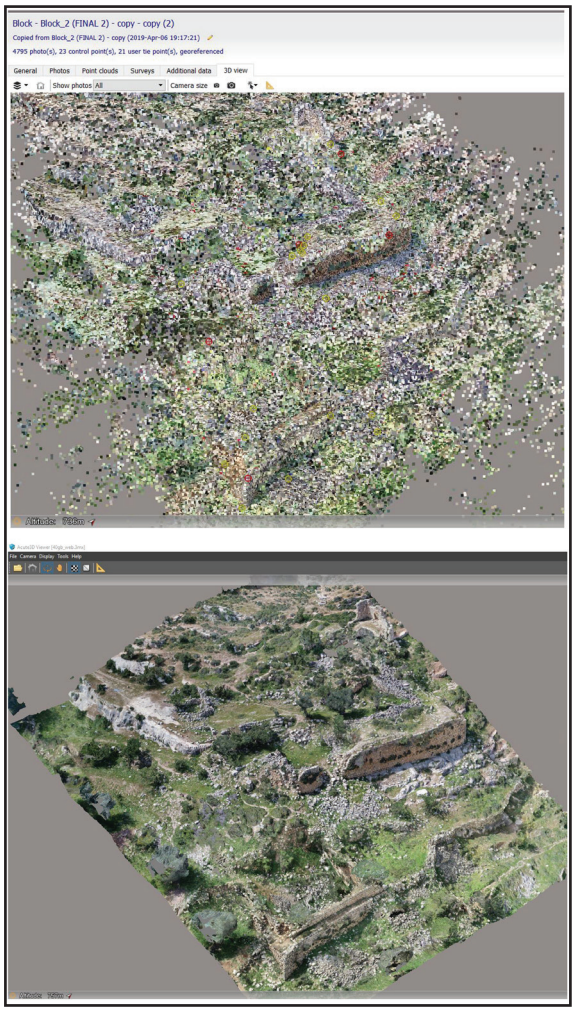
כללים מנחים לתיעוד

הכללים הבאים מנחים את שיטת התיעוד:

1. תיעוד הוליסטי: המודל התלת-ממדי צריך לכלול את כלל שטח החפירה, וכל שטחי החפירה שתועדו בנפרד צריכים להתחבר למודל אחד.
2. רזולוציה גבוהה: הרזולוציה של המודל צריכה להיות גבוהה מספיק כדי לאפשר לארכיאולוג להציג בתלת-ממד או במבטים אורתוגרפיים את כלל האלמנטים שנזכרים בדו"ח החפירה ורלוונטיים להבנת האתר. הרזולוציה חייבת להיות גבוהה או שווה ל-0.5 cm/px.
3. דיוק ועיגון גיאוגרפי: המודל חייב להיות מעוגן גיאוגרפית בטווח הדיוק של מכשיר המדידה. בשימוש השגרתי של מכשיר המדידה RTK בשטחים פתוחים, סטיית נקודות העיגון (Ground Control Points) היא פחות מ-3 ס"מ בסבירות של שתי סטיות תקן (95%). בשטחים שבהם יש בעיות קליטה, אפשר להוריד את הדיוק של המכשיר ל-10 ס"מ, אך לא מעבר לכך. בשטחים בנויים וחללים סגורים נקודות העיגון נמדדות באמצעות דיסטומט, על סמך נקודות העיגון שנמדדו באמצעות מכשיר ה-RTK מחוץ לשטח החפירה. לחלופין אפשר להסתמך על מדידות של מודדים חיצוניים. ככלל, נקודות העיגון פרוסות במרחקים של לא יותר מ-5 מ' זו מזו, בהיקף ובפנים שטח החפירה, ולכל 4 נקודות עיגון נמדדת נקודת בקרה (Check Point) אחת שמשמשת למדידת הסטייה בין מדידת ה-RTK והמבנה של

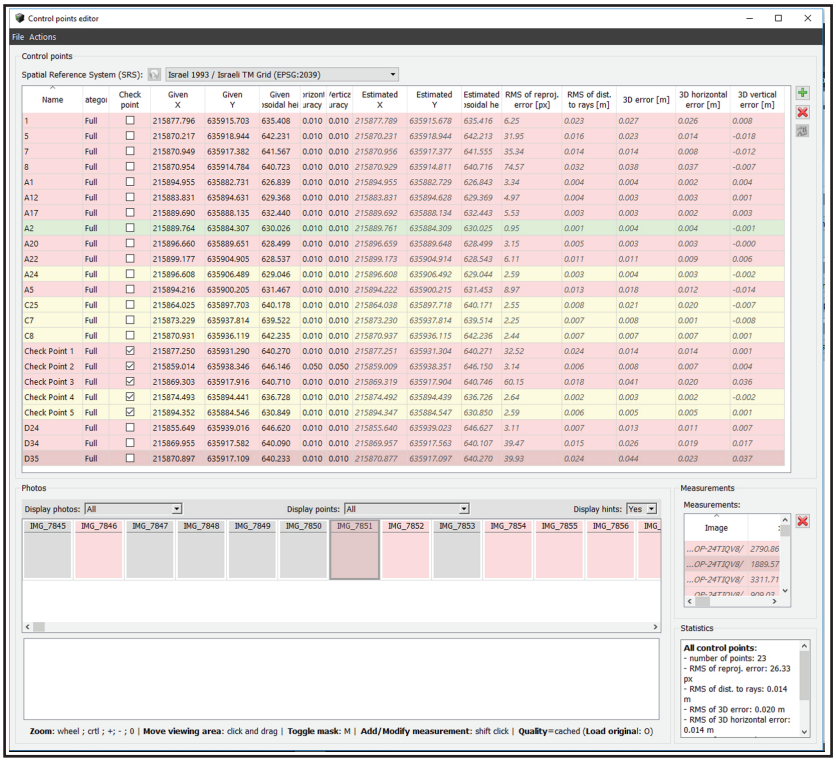
2 https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture

המודל. בשיטה הזאת קיימת בכל תיעוד בקרה לדיוק של המודל, ותוצאות הבקרה נשמרות בדו"ח כחלק מקובץ הפרויקט (קובץ CCM) (איורים 3–4).[3]



איור 3: דוגמה של העיגון הגיאוגרפי ובקרת הדיוק במודל מורכב. פרויקט תיעוד ח' עין לוזה (תיעוד על ידי א' ויגמן וי' שמידוב, באמצעות 4795 צילומי רחפן DJI Phantom 4 Advanced). גודל השטח שתועד: 4850 מ"ר.
למעלה: נקודות הקישור האוטומטיים עם נקודות העיגון (בצהוב) ונקודות הבקרה (באדום).
למטה: המודל הסופי (פורמט 3MX).

3 בשיטת צילום נכונה לתיעוד שטחי חפירה ארכיאולוגית טיפוסית (צילום קרקעי בטווח קצר), הסטיות הפרופורציונליות של המודלים שמיוצרים באמצעות ContextCapture קטנות יותר מהסטייה הצפוי במדידות מכשיר ה-RTK. במיפוי שטחים נרחבים באמצעות רחפנים, הסטיות גדולות יותר ויש למזער אותן לטווח הרצוי באמצעות פיזור נכון ואחיד של נקודות העיגון. לניתוח מידות הסטיות של הגרסה המעודכנת של ContextCapture והשוואה לתוכנות פוטוגרמטריה אחרות, ראה: Soares et al. 2018; Lewinska and Pargiela 2018; Marcis and Frastia 2018.



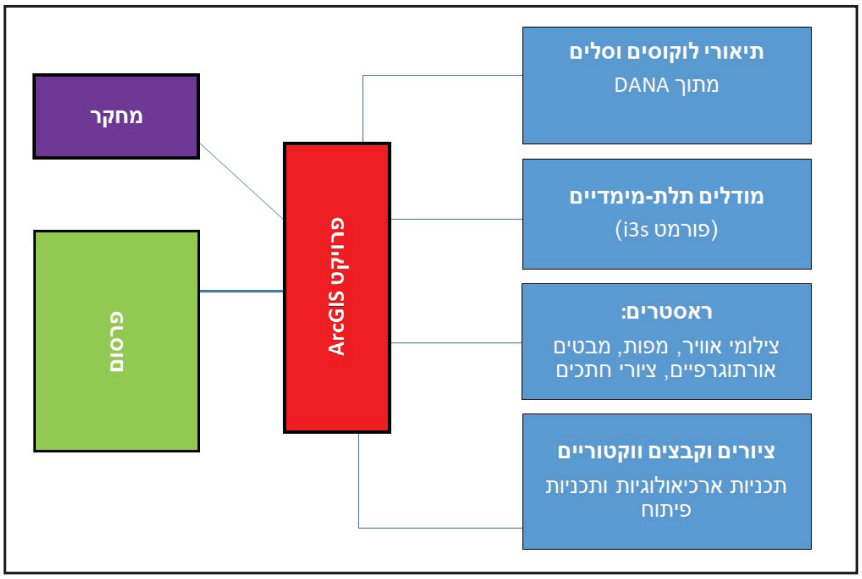
איור 4: דו"ח נקודות העיגון ובקרת הדיוק מפרויקט ח' עין לוזה. נמדדו סטיות עד 4.1 ס"מ (3D Error) בין נקודות הבקרה והמבנה של המודל. סטיית שורש ממוצע הריבועים (RMS 3D Error) מבין כלל נקודות העיגון בתוך המודל נמדדו כ-2.0 ס"מ.

שימור המידע: הטכנולוגיה בתחום הפוטוגרמטריה מתפתחת באופן מואץ ונכון להיום התוכנות המובילות מייצרות את המודלים באיכות הגבוהה ביותר רק בפורמט קנייני (פורמט 3MX ב-ContextCapture) ולא בפורמט אוניברסלי. לכן יש חשיבות גבוהה מאוד בשימור כלל הצילומים שמשמשים ליצירת המודלים, יחד עם המידע לעיגון הגיאוגרפי, כדי לייצר את המודלים בעתיד במידת הצורך בפלטפורמה הפוטוגרמטרית החדשה שתבוא. בגלל הכמות העצומה של צילומים שיש לשמר (קודם בזיכרון הפנימי של המצלמה, לאחר מכן בזיכרון של תחנת העבודה ובסוף בגיבוי הכללי), הצילומים מיוצרים ונשמרים בפורמט JPEG. בנוסף לצילומים וקבצי המדידת ונקודות העיגון, נשמר קובץ הפרויקט (CCM) וכל מודל או קובץ אורתוגרפי (GeoTIFF) שנוצר לטובת הפרויקט. נפח האחסון השנתי המשוער שנדרש לכל תחנה הוא 2Bt. כעת נבדקת האפשרות לבנות מערכת מרכזי לגיבוי של כלל התוצרים שיתבסס על הפלטפורמה CTERA Scality RING.[4]

4 https://www.scality.com/products/ring

ציור תוכניות על סמך התיעוד הפוטוגרמטרי[5]

אחרי יצירת המודל, מתבצע ציור וקטורי בתוכנת ArcGIS Pro.[6] הציור מתבצע על פי מבטים אורתוגרפיים מעוגנים גיאוגרפית (בפורמט GeoTIFF). העיקרון שמנחה את שיטת הציור הוא חלוקת הציור לשני מרכיבים: א) מידע גולמי: ציור קו של ישויות לצורך תיעוד צורתן במבט-על; ב) עיצוב גרפי: תוספות ציור לתיאור הישויות ותנאי השטח כדי להתאים את התוכנית לאמות המידה של במות הפרסום. במהלך הציור של המידע הגולמי, נוספות לישויות מספרי לוקוס כמאפיינים (attributes). הייחוס של מספרי הלוקוס לישותיות המצוירות מאפשר את סנכרון המידע שנרשם לגבי הלוקוסים בתוכנת רישום השדה (Münger and Weinblum 2015) המידע של הרישום מ-DANA, שכולל תיאור מילולי של הלוקוס, סוג הלוקוס, רשימת הסלים שמיוחסים לו, תאריכי הפתיחה והסגירה, שכבה, תקופה, גבהים ועוד, מיוצאת מתוכנת DANA כטבלת Microsoft Excel. הערכים של הטבלה מסתנכרנים כמאפיינים של הישות המצוירת ב-ArcGIS באמצעות הפונקציה 'Join Data' על סמך מספר הלוקוס שהוגדר במהלך הציור. סנכרון המידע מאפשר להציג ולהעלים ישויות על פי היחס שלהן לשכבות הארכיאולוגיות השונות ו/או כל מאפיין אחר, ובכך להציג בקלות בנפרד שכבות שונות שצוירו זו על גבי זו. התהליך מסתיים בהכנת התוכניות לפרסום הסופי, שנעשית ב-Adobe Illustrator.

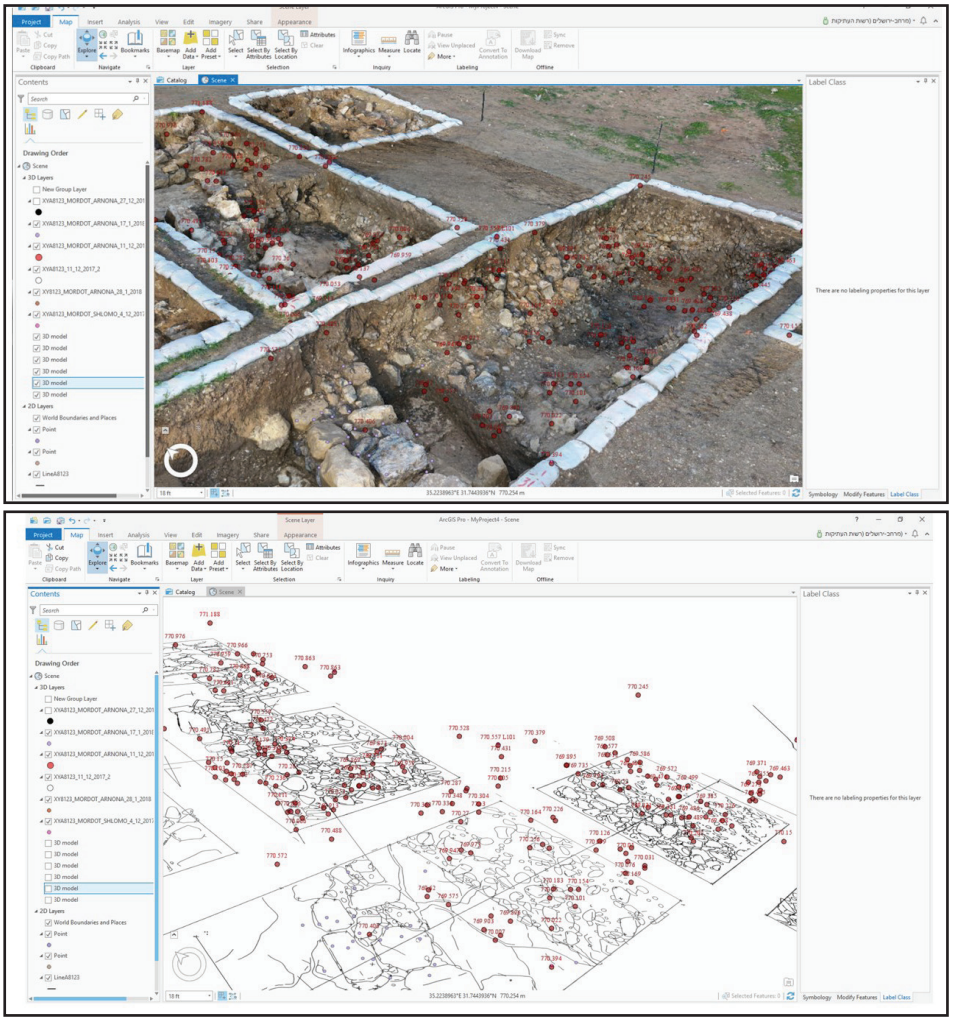


איור 5: ריכוז שכבות המידע בפרויקט ArcGIS Pro.

5 הפיתוח של שיטת הציור הוא פרי עבודתם של מ' בירקנפלד, א' הדר, ד' לוי, י' ציונית וא' רוז.

6 https://pro.arcgis.com

לפרויקט ArcGIS Pro אפשר לייבא כשכבות מידע גם את המודלים הפוטוגרמטרים המעוגנים גיאוגרפית באיכות גבוהה, בזכות האפשרות להכין מודלים בפורמט i3s (Indexed 3D Scene) ב-ContextCapture. בכך, בפרויקט ArcGIS אחד יהיה אפשר לבחון ביחד או לחוד את הציור הדו-ממדי של הלוקוסים, נתוני רישום השדה שקשורים לכל לוקוס שצויר, וההקשר התלת-ממדי של הלוקוסים. קובץ פרויקט מסוג זה ירכז בתוכו עושר מידע שישמש להצגה ולניתוח נתוני החפירה ולמחקר הניתוח המרחבי (איורים 5–6).



איור 6: תוכנית הפיילוט 2017: חפירת מורדות ארנונה (נ' ספיר וכ' ארביב; תיעוד על ידי יעקב שמידוב). ריכוז שכבות מידע דו-ממדיות ותלת-ממדיות בפרויקט ArcGIS Pro. מודל פוטוגרמטרי בפורמט i3s עם מדידות נקודתיות של לוקוסים באמצעות RTK (למעלה), והתוכנית הווקטורית המצוירת (למטה).

המבנה הארגוני

המבנה הארגוני שתומך בתיעוד הפוטוגרמטרי במרחבים מבוסס על צוות של שני עובדים: המתעד והגרפיקאי. באחריות המתעד לבצע את התיעוד בשטח, לעגן את התיעוד באמצעות מכשיר RTK ו/או דיסטומט, לייצר את המודל בתחנת העבודה ולהפיק ממנו מבטים וחתכים. הגרפיקאי נדרש לדעת לייצר מודלים ולהפיק מהם מבטים וחתכים, אך עיקר עבודתו היא הציור ב-ArcGIS וגימור הציור בעיצוב הגרפי ב-Adobe Illustrator. האחריות המִנהלית על הצוות היא של המרחב, בעוד שההנחיות המקצועיות, ההכשרה והביקורת על התוצרים באחריות ראש ענף טכנולוגיות השדה. עד כה הוקמו בסך הכול 9 תחנות עבודה: אחת לכל אחד מארבעת המרחבים של רשות העתיקות (צפון, מרכז, ירושלים, דרום), שתיים ל'מגה-פרויקטים' בחפירות במחלף מוצא ועין איסוויר (ראה לעיל), אחת לחפירות עיר דוד, אחת לקמ"ט ארכיאולוגיה ביהודה ושומרון ואחת לענף טכנולוגיות השדה במוזאון רוקפלר בירושלים. השאיפה היא שאחרי האיוש וההכשרה של הצוותים לכל התחנות האלה, תוכל רשות העתיקות לתעד בפוטוגרמטריה את כלל חפירות ההצלה (כ-300 חפירות מדי שנה) החל מסוף שנת 2019.

העיקרון שמנחה את המבנה הארגוני הזה הוא ביזור הסמכות והאחריות למרחבים, והקניית היכולת למרחבים לתעד חפירות ולהביא את התוצרים לפרסום באופן עצמאי, בלי להיות תלויים ביחידה מרכזית שמרוחקת גיאוגרפית ואינה נמצאת בקשרי עבודה יום-יומיים עם הארכיאולוגים של המרחב. נוסף על הצוותים במרחבים, הוקם צוות של ענף טכנולוגיות השדה שמגבה את המרחבים בתיעוד בפרויקטים שהמרחבים לא מצליחים לתעד או להביא לפרסום. כמו כן מטפל הצוות בפרויקטים מורכבים במיוחד, תיעוד לשימור וחפירות שאינן מתבצעות במסגרת העבודה של המרחבים (על ידי הארכיאולוגים מתחום המחקר וההתמחויות).

סיכום

נוסף לתיעוד בחפירות ההצלה הנדון כאן, מיועד התיעוד הפוטוגרמטרי להיות כלי מרכזי גם לתיעוד לצורך הפיקוח, עבודות השימור וסקרים.[7] היום התיעוד הפוטוגרמטרי הוא הכלי הנגיש והעוצמתי ביותר לתיעוד תלת-ממדי פוטו-ריאליסטי, והתוצרים של התיעוד יכולים לשמש לא רק לצורך המיידי של פרסום החפירות אלא גם למחקר העתידי בתחומי המחקר והניתוח המרחבי, מורפולוגיה והארכיאולוגיה של הנוף. ההנצחה של אתרי העתיקות במודלים פוטוגרמטרים והנגשתם ברשת יאפשרו לחוקרים לבחון באופן מקיף יותר את חפירות העבר

7 פרויקטים בתחומים האלה הם חלק גדול מנפח העבודה בתיעוד הפוטוגרמטרי ומשמשים לעבודה השוטפת של רשות העתיקות, אך לרוב אינם זוכים לפרסום. לתיעוד המקיף ביותר שנעשה במסגרת העבודה של רשות העתיקות לצורך סקר ומחקר ראה את התיעוד המרחבי במחקר של חורבת סעדון וסביבותיה, שכולל מיפוי אורתוגרפי של כ-12,000 דונם (דהרי ושיאון תשע"ח; שיאון, דהרי ורובין 2019).

ובמידת הצורך להפיק מבטים, חתכים ומדידות שלא נעשו על ידי החופרים בשטח. כמו כן, המודלים יכולים לשמש ככלי עוצמתי להצגת שרידים ארכיאולוגיים לקהל הרחב במדיה החברתית ובפרסומים לעיתונות. לצד היתרונות האלה, יש גם חסרונות למעבר לתיעוד הפוטוגרמטרי: זמן העיבוד הארוך שנדרש בדרך כלל ליצירת תוכניות וחתכים, רכישה ותחזוקה של אמצעי תיעוד חדשים וקשיים רבים שנובעים משינויים ארגוניים שנדרשים לצורך ההטמעה, לרבות ההסבה מקצועית של עובדים ותיקים.

אחד היתרונות המשמעותיים ביותר לתיעוד הפוטוגרמטרי לארגון כמו רשות העתיקות הוא 'דמוקרטיזציה' של התיעוד שהטכנולוגיה הזאת מאפשרת. ההשתלבות בתחום כמתעד דורשת רמת מיומנות מסוימת בצילום ועבודה במחשב, ולגרפיקאים נדרשת מיומנות בציור ובעיצוב הגרפי, אבל מעבר לכך לא נדרש ידע או השכלה מוקדמים בתחום המדידות. ההכשרה של חברי הצוות מתבצעת במשך כחודש, תוך כדי חפיפה עם מתעד או גרפיקאי מיומן וליווי בתיעוד של חפירות הצלה קטנות. ההשתלבות בתחום פתוחה לכלל הארכיאולוגים, הגרפיקאים והשרטטים שעובדים ברשות העתיקות, וגם מי שלא עובד כמתעד במשרה מלאה יכול ללמוד בזמן קצר את שיטת הצילום והעיגון הגיאוגרפי ולתרום למאמצי התיעוד.

כגוף האחראי על הפיקוח הסטטוטורי על אתרי העתיקות וכמבצע של הרוב המוחלט של חפירות ההצלה בארץ, על רשות העתיקות מוטלת האחריות לתעד באופן מקיף ואיכותי את השרידים הארכיאולוגיים, במיוחד כאשר השרידים האלה בסכנה או מיועדים לכיסוי או הריסה. הטמעת התיעוד הפוטוגרמטרי והרחבת מעגל המשתתפים בתוך הארגון במלאכת התיעוד יאפשרו לרשות העתיקות לקיים באופן טוב יותר את הייעוד החשוב הזה.

ביבליוגרפיה

דהרי, ע. ושיאון, ע. תשע"ח. רוחייבה-רחובות בנגב כמודל לעיר במדבר. **קדמוניות 154**: 66–77.

שיאון, ע., דהרי ע. ורובין, ר. 2019. חורבת סעדון ורחובות בנגב ממעוף הרחפן. **הקונגרס הארכיאולוגי הארבעים וחמישה בישראל: חוברת תקצירים**. חיפה. עמ' 19.

De Reu, J., De Smedt, P., Herremans, D., Van Meirvenne, M., Laloo, P. & De Clercq, W. (2014). On Introducing an Image-Based 3D Reconstruction Method in Archaeological Excavation Practice. *Journal of Archaeological Science* 41: 251–262.

Doneus, M., Verhoeven, G., Fera, M., Briese, C., Kucera, M. & Neubauer, W. (2011). "From Deposit to Point Cloud: A Study of Low-Cost Computer Vision Approaches for The Straightforward Documentation Of Archaeological Excavations", in: A. Cepek (ed.), *23rd International CIPA Symposium, Prague, 12-16 September 2011. Geoinformatics 6*, Prague., pp. 81-88.

At:https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/gi/article/view/gi.6.11/2474 (Accessed on 29/3/19)

Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. & Carbonneau, P. (2013). Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 421.

Homsher, R. S. J., Adams, M. J., Prins A. B., Gardner-Cook, R. & Tepper, Y. (2017). New Directions with Digital Archaeology and Spatial Analysis in the Jezreel Valley. *Journal of Landscape Ecology* 10, 3: 154–164.

Howland, M. D., Kuester, F. & Levy, T. E. (2014). Structure from Motion: Twenty-First Century Field Recording with 3D Technology. *Near Eastern Archaeology* 77, 3: 187–191.

Kjellman, E. (2012). *From 2D to 3D: A Photogrammetric Revolution In Archaeology?* Master's Thesis in Archaeology. University of Tromsø.

At: https://munin.uit.no/handle/10037/4306 (Accessed on 29/3/19)

Lewinska, P. & Pargiela, K. (2018). Comparative Analysis of Structure-from-Motion Softwares: An Example of Letychiv (Ukraine) Castle and Convent Buildings. *Journal of Applied Engineering* Sciences 8,2: 73–78.

Magnani, M. & Douglass, M. (2019). "Photogrammetry and Stereophotogrammetry", in: S. L. López Varela (ed.), *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, Malden.

At: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119188230.saseas0451 (Accessed on 4/4/19)

Marcis, M. & Frastia, M. (2018). Photogrammetric Measurement of a Wooden Truss. *Slovak Journal of Civil Engineering* 26,4: 1–10.

Münger, S. & Weinblum L. (2015). DANA (Digital Archaeology and National Archives) - A New Software Tool for Field Archaeologists. In: *CAA International (Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology) Conference 31/3/2015.* University of Siena, Complesso Universitario San Niccolò, Siena.

At:https://www.slideshare.net/evaminerva/e03-liat-weinblumstefanmungerdanasoftwarefiedlarchaeologists (Accessed on 28/3/2019)

Muñoz-Nieto, A., Rodríguez-Gonzálvez, P., González-Aguilera, D., Fernández-Hernández, J., Gómez-Lahoz, J., Picón-Cabrera, J., Herrero-Pascual, J. and Hernández-López, D. (2014). UAV Archaeological Reconstruction: The Case Study of Chamartin Hillfort (Avila, Spain). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-5: 259–265.

O'Driscoll, J. (2018). Landscape Applications of Photogrammetry using Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Archaeological Science*: *Reports* 22: 32–44.

Olson, B. R., Placchetti, R. A. Quartermaine & J. Killebrew, A. E. (2013). The Tel Akko Total Archaeology Project (Akko, Israel): Assessing the Suitability of Multi-Scale 3D Field Recording in Archaeology. *Journal of Field Archaeology* 38, 3: 244–262.

Prins, A. B. (2016). 3D Modeling for Archaeological Documentation: Using the JVRP Method to Record Archaeological Excavations with Millimeter-accuracy. *JVRP White Papers in Archaeological Technology.*

At: http://www.jezreelvalleyregionalproject.com/3d-modeling.html (Accessed on 18/12/16)

Quartermaine, J., Olson, B. R. & Killebrew, A. E. (2014). Image-Based Modeling Approaches to 2D and 3D Digital Drafting in Archaeology at Tel Akko and Qasrin Two Case Studies. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology & Heritage Studies* 2, 2: 110–127.

Remondino, F. (2014). "Photogrammetry: Theory", in: F. Remondino and S. Campana (eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practice*, BAR International Series 2598, Oxford., pp. 65–73.

Soares, G., Inocensio, L. C., Veronez, M. R., Da Silveira, L. G., Bordin, F. & Marson, F. (2018). Analysis of Positional and Geometric Accuracy of Objects in Survey with Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium at Valencia, Spain.*

At: https://ieeexplore.ieee.org/document/8517315 (Accessed on 28/3/2019)

Verhoeven, G. J., Taelman, D. & Vermeulen, F. (2012). Computer Vision-Based Orthophoto Mapping of Complex Archaeological Sites: The Ancient Quarry of Pitaranha (Portugal–Spain). *Archaeometry* 54, 6: 1114–1129.

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. and Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology* 179: 300–314.

Wiegmann, A. (2016). The Application of Photogrammetry in Archaeology in the Jerusalem District. *Art & Archaeology 2016: 2nd International Conference, December 11-14, 2016, Jerusalem, Israel.*

At: https://art2016.isas.co.il/wp-content/uploads/sites/10/2017/03/Session-VIII-Digital-Imaging-and-Sites-3-Wiegmann.pdf (Accessed on 29/3/19)

פוטוגרמטריה לתיעוד סביבה ונוף וכבסיס לניתוח מרחבי - נחל רודד 110 כמקרה מבחן

מיכל בירקנפלד[1,2] ואמיל אלדג'ם[1]

רשות העתיקות[1]; אוניברסיטת בן גוריון בנגב[2]

תקציר

פוטוגרמטריה היא שיטת מיפוי ומידול מבוססת צילום דיגיטלי המאפשרת לנו ליצור, בין השאר, מודל תלת-ממדי בקלות וביעילות. בשנים האחרונות הופכת מתודת הפוטוגרמטריה לכלי משמעותי בעולם הארכיאולוגי. שימושה הנפוץ ביותר הוא בתיעוד, מרמת הממצא הקטן ועד רמת האתר. יחד עם זאת, הפוטוגרמטריה טומנת בחובה בשורה משמעותית גם לעולם האנליזה המרחבית. השימוש בפוטוגרמטריה וצילומי אוויר ליצירת מודל טופוגרפי ברזולוציה גבוהה מאפשר ניתוח מדויק ומציאותי יותר של הסובב. בסביבת ה-GIS, ניתוחים הידרולוגים, ניתוחי ראות ונראות, ניתוחי תנועה בנוף וניתוחים אחרים המסתמכים על שכבות טופוגרפיות (Data Terrain Models) הופכים יעילים ומדויקים יותר. הזמינות ההולכת וגדלה של מתודת הפוטוגרמטריה, הן בשטח והן במעבדה, והאיכות הגבוהה של תוצריה, מסמנים שינוי משמעותי במתודת המחקר המרחבי.

הקדמה

הפוטוגרמטריה היא בבסיסה שיטת מדידה הנסמכת על אנליזה של צילומים חופפים. ראשיתה כבר במחצית המאה ה-19 בשיטת הצילום הסטריאוסקופית, ואת עיקר פיתוחה אנו חייבים לגופי מיפוי צבאיים ואזרחיים (לסיכום על שלביה הראשונים של הפוטוגרמטריה ראה Anderson 1984). הופעתה של הפוטוגרמטריה הדיגיטלית בשנות ה-90 של המאה הקודמת הפכו את תהליך האנליזה המורכב לאוטומטי ברובו ואת מתודת הפוטוגרמטריה לנגישה ויעילה מאין כמותה. מספר רב יחסית של תוכנות המאפשרות יצירת מודל פוטוגרמטרי תלת-ממדי קיים היום בשוק, וגם מצלמה ביתית פשוטה יכולה לספק את הצילומים הנדרשים (ראה דיון והפניות ויגמן, כאן).

הפוטוגרמטריה המודרנית משתמשת במערכות נתונים הכוללות מספר רב של צילומים דיגיטליים חופפים הנלקחים מזוויות שונות סביב האזור המתועד. בעזרת השילוב הנכון בין תוכנה וחומרה, אפשר ליצור מודל תלת-ממדי מדויק ומפורט של חפצים ומונומנטים, אך גם

של הנוף. הפוטוגרמטריה מאפשרת לנו ליצור מודל ברזולוציה גבוהה מאד של אזורים נרחבים, בקלות יחסית וביעילות רבה. למעשה, הפוטוגרמטריה מייצרת שני תוצרים עיקריים:

1. אורתופוטו – האורתופוטו ('מפת תצלום' בעברית) הוא למעשה תצלום אוויר (תצ"א) מיושר. מה הכוונה? תא"צות סובלים פעמים רבות מעיוותים שונים שמקורם בגובה הטיסה והמרחק מהקרקע, ומשינויים בתנועת המטוס ובמהירות הטיסה. האורתופוטו הוא צילום ש'נוקה' מאותם עיוותים ויושר, כך שקנה המידה בציר ה-X ובציר ה-Y שווים וכל נקודה בתצלום נמצאת ביחס מדויק למיקומה האמיתי.
2. DEM (Data Elevation Model) – ה-DEM הוא מפת ערכים שמתארת שונות מתמשכת במרחב. ב-DEM מסוג גריד ראסטרי (Raster grid), כמו אלה המיוצרים בתהליך הפוטוגרמטרי, המפה בנויה מרשת של תאים אחידים בגודלם. כל תא הוא בעל ערך מסוים שמייצג בדרך כלל גובה במטרים מעל פני הים. כלומר מדובר במפה שמתארת את הטופוגרפיה של האזור המצולם. באופן עקרוני יכול DEM לשמש גם לתיאור תופעות אחרות, כמו צפיפות. לכן נראה לעתים שימוש במונח Data Terrain Model (DTM) כשמדובר בטופוגרפיה.

האורתופוטו הוא כלי חשוב במחקר הארכיאולוגי, ומעבר למיפוי נעשה בו שימוש רב, למשל בסקרים (לדוגמה Hill 2019; Šedina et al. 2019). יחד עם זאת, במאמר הנוכחי נבקש להתמקד דווקא ב-DEM ובאפשרויות המחקר הטמונות בו. בסביבת ה-GIS, משמש DEM כבסיס לחלק גדול מהניתוחים המרחביים הנפוצים ביותר בארכיאולוגיה, כמו ניתוחי ראות ונראות (Visibility Analyses), ניתוחי תנועה בנוף (Time Cost and Path Cost Analyses) ועוד. משום כך איכותו של ה-DEM היא בעלת חשיבות מכרעת לאיכות הניתוחים שנערוך ותוצאותיהם.

הדרך ה'מסורתית' ליצירת DEM היא באמצעות אינטרפולציה של מידע וקטורי. אינטרפולציה היא שיטה של אנליזה מתמטית שמאפשרת לבנות מידע חדש, באמצעות הערכה מנקודות מידע קיימות. במקרה שלנו, הערכה של טווח הגבהים באזור נתון, בהסתמך על נקודות גובה או קווי גובה ידועים. שני משתנים עיקריים משפיעים על איכות האינטרפולציה ואיכות ה-DEM הנוצר ממנה: 1) קיימות שיטות שונות לחישוב אינטרפולציה המתבססות על אלגוריתמים מסוגים שונים. כל אלגוריתם מדגיש אספקטים אחרים של המידע (למשל בכמה נקודות ידועות עושים שימוש או באיזה מרחק הן נמצאות מהנקודות הלא ידועות), ולכן כל אלגוריתם יכול להוביל לתוצאה שונה. 2) מספר הנקודות הידועות המשמשות לחישוב האינטרפולטיבי. ככל שמספר הנקודות הידועות בתא שטח מסוים גדול יותר, כך תהיה ההערכה האינטרפולטיבית שלנו בנקודות הלא-ידועות מדויקת יותר. מקור מידע הגובה הנפוץ

ביותר בישראל הוא נקודות הגובה וקווי הגובה של המרכז למיפוי ישראל (מפ"י). רמת הדיוק המקסימלית הזמינה לרכישה היא קווי גובה ברווח אנכי של 5 מטרים.

במאמר זה נציג, באמצעות מקרה המבחן של נחל רודד 110, כיצד השימוש בפוטוגרמטריה להשגת DEM ברמת דיוק מקסימלית יכול לסייע בניתוח הארכיאולוגי בסביבת GIS ולשפר לאין שיעור את תוצאות הניתוחים המרחביים שאנו עורכים.

נחל רודד 110

איור 1: האתר הניאוליתי נחל רודד 110

האתר של נחל רודד 110 נמצא על הר רודד, כשישה ק"מ צפון-מערבית לאילת. האתר ממוקם במרומי ההר, סמוך לפסגה, בגובה של כ-420 מ' מעל פני הים, ומתוארך רדיומטרית (באמצעות פחמן 14 ו-OSL) לניאולית הקדם-קראמי ב' המאוחר. הגישה אל האתר קשה במיוחד ודורשת טיפוס ארוך ומאומץ במעלה ההר. חפירה שנערכה באתר בסוף שנת 2017 (Birkenfeld et al. 2019) חשפה קומפלקס מעניין המורכב ממבנה מרכזי ומאזורי פעילות (איור 1). המבנה מורכב משורת קירות מעוגלים, בנויים מאבני שדה, שהשתמרו לגובה של שניים או שלושה נדבכים. מצפון למבנה נחשף אזור גדול של מוקדים ואפר, תוצאה של פעילות פירוטכנולוגית חוזרת ונשנית. פעילות נוספת שזוהתה באתר היא סיתות של כלי צור. פעילות זו באה לידי ביטוי הן בהרכב מכלול כלי הצור העשיר בפסולות סיתות ותחזוקת גרעין, והן בזיהויו של בור פסולת

שנחפר אל תוך האפר והכיל כמות גדולה במיוחד של פסולות סיתות. מכלול הצור אופייני לתקופת הניאולית הקדם-קראמי ב׳ המאוחר, והוא מצביע על קשרים תרבותיים עם אתרי יישוב בני התקופה באזור בקעת עובדה (נחל עשרון, Goring-Morris & Gopher 1983).

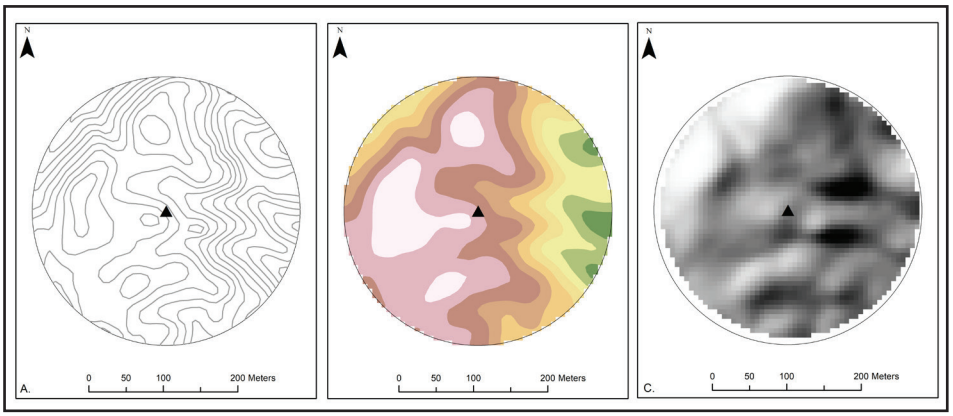
המאפיין הייחודי ביותר של האתר הוא מכלול בעלי החיים שנמצא בו: כ-700 עצמות בעלי חיים, רובן ככולן זוהו כעצמות של עופות דורסים. כל המינים המיוצגים הם מינים שעוברים מעל הרי אילת במהלך הנדידה העונתית בסתיו ובאביב. נראה שהאתר שימש כאתר צייד שהתמחה בציד של עופות דורסים באותן העונות.

אחת השאלות המעניינות בנוגע לנחל רודד 110 הוא מיקומו יוצא הדופן. כבר בתחילת הפרויקט היה ברור שניתוח הסובב של האתר יהיה חלק בלתי נפרד מניתוח תוצאות החפירה. לשם כך הוחלט לתעד את סביבת האתר במהלך החפירה באמצעים שונים, ביניהם פוטוגרמטריה. לצורך מאמר זה נציג ונשווה שתי מתודות ליצירת מודל טופוגרפי (DEM): המודל ראשון הוא מודל ׳מסורתי׳ שעושה שימוש בנתוני הגובה הווקטורים של מפ״י, ואילו המודל השני הוא מודל פוטוגרמטרי. בשלב השני נבחן את המודלים תוך כדי שימוש במספר ניתוחים מרחביים מבוססי GIS.

מתודולוגיה

כדי שנוכל לערוך השוואה, ניצור שני מודלים טופוגרפיים שווים בשטחם ובמיקומם הגיאוגרפי. לשם כך נבחר השטח שנמצא ברדיוס של 200 מטרים מנחל רודד 110. כל ההליכים המפורטים מטה בוצעו בתוכנת *ArcGIS 10.5*.

המודל המסורתי

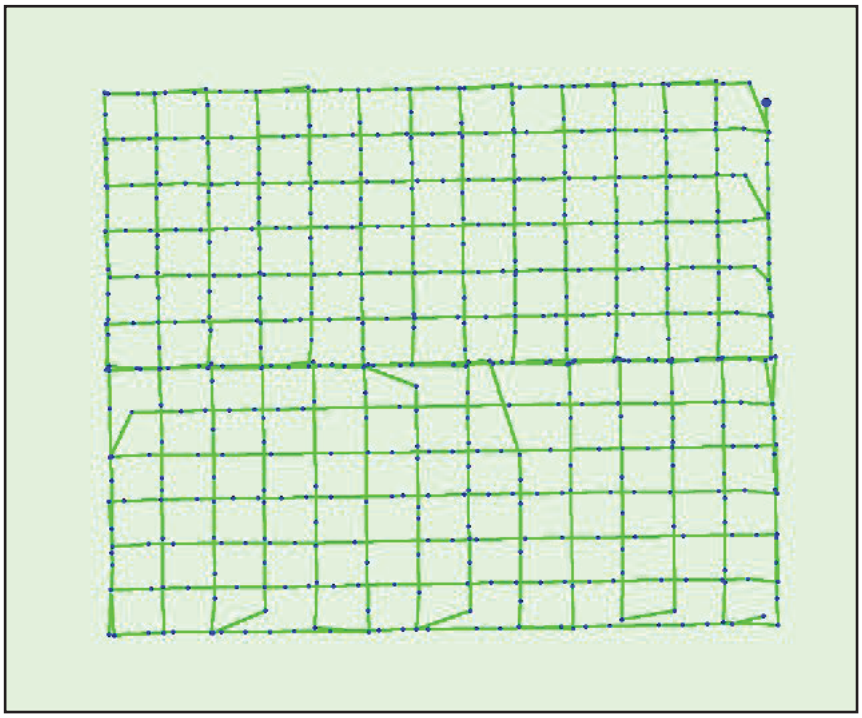


איור 2: יצירת DEM טופוגרפי באמצעות קווי גובה.
משמאל לימין: קווי הגובה, ה-DEM וה-HILLSHADE שנוצרו.

במודל המסורתי (איור 2) יצרנו DEM בהתבסס על נתוני הגובה של מפ"י – מפה דיגיטלית של קווי גובה במרווח אנכי של חמישה מטרים. את האינטרפולציה ביצענו באמצעות הכלי Topo to Raster. זהו כלי ייעודי לבניית DEM טופוגרפי שמתמחה באינטרפולציה מקווי גובה, תוך כדי שמירה על ייצוג נכון של רכסים וואדיות. הרזולוציה הגבוהה ביותר האפשרית לגודל השטח הנבחן, בהינתן המידע הווקטורי הקיים ומורכבות פני השטח, היא גודל תא של 6.32 מ"ר (לצורת החישוב ודיון בנושא ראו Hengl 2006).

המודל הפוטוגרמטרי

הצילום נעשה באמצעות רחפן מסוג Phantom 4 של חברת DJI, בעל מצלמה דיגיטלית מדגם FC330_3.6_4000x3000 (RGB), בעלת רזולוציה של 12MegaPixel. הרחפן טס בגובה 50 מטרים מעל פני הקרקע בצורת שתי וערב (איור 3), כאשר המצלמה מוטית בזווית של 45 מעלות ביחס לפני הקרקע. כל צילום מכסה תא שטח של 50X50 מטר, בחפיפה של 70%. מסלול הרחפן נשלט באמצעות תוכנה מסוג *Pix4Dcapture*. משך הטיסה והצילום ארך כ-40 דקות. צולמו 587 תמונות (JPG) ובכולן נעשה שימוש לחישוב המודל הפוטוגרמטרי. העיגון הגיאוגרפי נעשה על פי ה-GPS המובנה ברחפן המאפשר סטייה מקסימלית של עד 3 מטר.



איור 3: מסלול הטיסה של הרחפן.

עיבוד הנתונים נעשה באמצעות תוכנת *Pix4Dmapper Pro 4.1.15*. המודל עשה שימוש ב-587 תצלומי אוויר שכיסו שטח של 0.25 קמ"ר. שיטת האינטרפולציה שנבחרה היא Inverse Distance Weighted (IDW). הפרמטרים השונים מתוארים בטבלה 1.

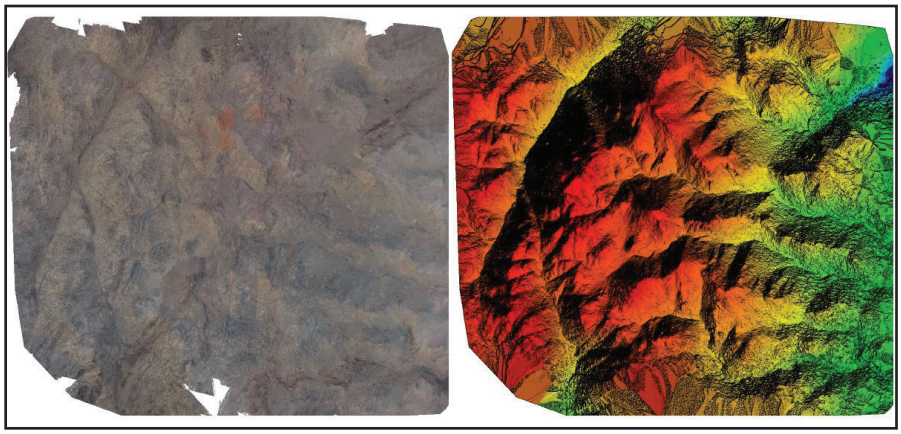
טבלה 1: Pix4Dmapper Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (2.64 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	39m:18s

בשלב השני של המחקר השתמשנו בשני המודלים הטופוגרפיים (המודל המסורתי והמודל הפוטוגרמטרי) כבסיס לביצוע ניתוחים מרחביים בסביבת GIS. שלושה ניתוחים נבחרו: הראשון, עיבוד פשוט יחסית של נתונים מרחביים – בניית מפת תבליט. מפת תבליט היא ייצוג דמוי תלת-ממד של הטופוגרפיה העושה שימוש בהצללה להדגשת האלמנטים הטופוגרפיים. ב-*ArcGIS* מיוצרת מפת תבליט על ידי הכלי Hillshade. השני, ניתוח ראות (Visibility analysis). ניתוח ראות משתמש במודל הטופוגרפי כדי לחשב את האזורים שאפשר לראות מנקודה מסוימת בנוף, בהתחשב בנתונים מסוימים (גובה העין, גובה האלמנט הנצפה ועוד). ב-*ArcGIS* חישובי הנראות מבוצעים על ידי הכלי Viewshed. ניתוח שלישי שנבחר הוא ניתוח דרכי מעבר בנוף. ניתוח זה משתמש במודל הטופוגרפי כבסיס לניתוח תנועה בנוף כתוצר של עלות (Cost). חישוב העלות יכול להתבסס על גורמים שונים ומגוונים, אך לצורך תרגיל זה נבחר מודל פשוט יחסית המתייחס למרחק משוקלל ואשר לוקח בחשבון, מלבד המרחק, גם את שיפוע ההליכה וכיוונה. ניתוח זה מורכב למדי ומבוצע ב-*ArcGIS* באמצעות כמה כלים מתוך מערכת הכלים Distance, ביניהם Cost distance ו-Cost path (להסבר מפורט על הכלים ואופן פעולתם ראה Birkenfeld 2018). לטובת החישוב נבחר אתר סמוך, נחל רודד 108, כנקודת היעד.

תוצאות

המודלים הטופוגרפיים

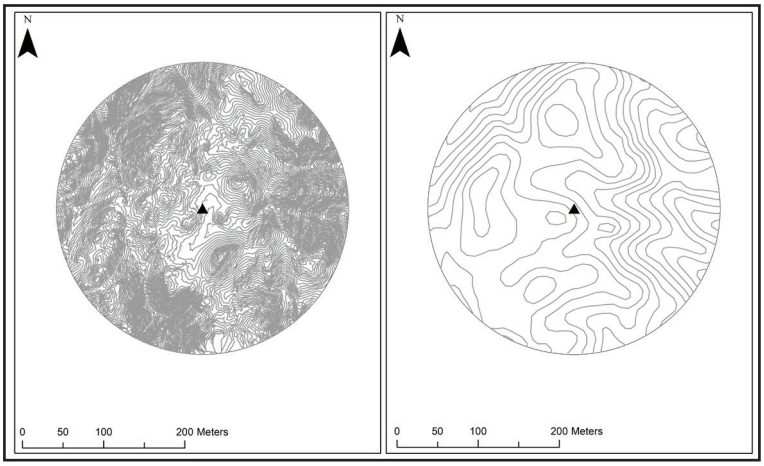


איור 4: תוצרי התהליך הפוטוגרמטרי - האורתופוטו (משמאל) וה-DEM (מימין).

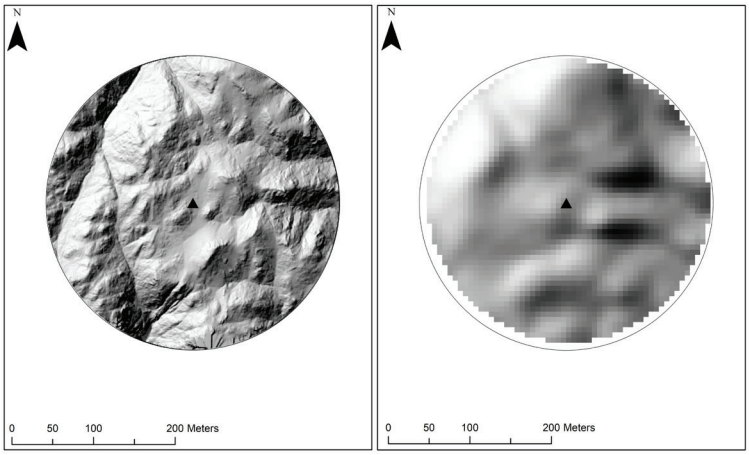
איור 2ב' מציג את המודל הטופוגרפי המסורתי: מודל בשטח של כ-0.12 קמ"ר, ברזולוציה של 6.32 מ"ר. איור 4 מציג את שני התוצרים של התהליך הפוטוגרמטרי: האורתופוטו וה-DEM. המודל הטופוגרפי שנוצר מכסה שטח של כ-0.25 קמ"ר, ברזולוציה של 2.64 סמ"ר. כדי שההשוואה בין שני המודלים תהיה מיטבית, נדגם מהמודל הפוטוגרמטרי שטח זהה לשטחו של המודל המסורתי (כ-0.12 קמ"ר) ברזולוציית גודל תא של 0.8 מ"ר (כדי לייצג את מורכבות פני השטח, בהתאם למודל המסורתי, ראה Hengl 2006).

הניתוחים המרחביים

כבר ממבט ראשון באיור 5 אפשר לראות את משמעות ההבדלים ברמת הרזולוציה של שני המודלים הטופוגרפיים מבחינת טיב תיאור פני השטח. אין ספק שמפת קווי הגובה של מפ"י (קווי גובה ברווח אנכי של חמישה מטרים) גורמת למיצוע משמעותי של פני השטח האמיתיים וממסכת במידה רבה את השונות הטופוגרפית הרבה של השטח. אפשר לראות את השפעת הירידה ברמת הרזולוציה גם במפת התבליט (איור 6), אך האם הירידה ברזולוציה היא בעלת השפעה משמעותית גם בניתוחים המורכבים?

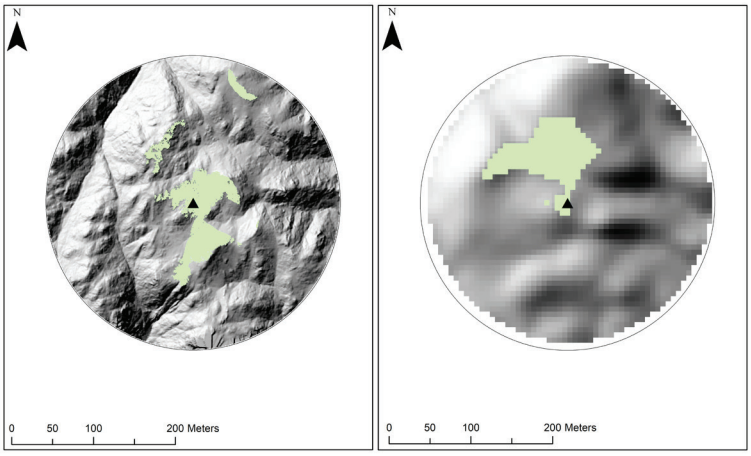


איור 5: קווי הגובה של מפ"י לעומת קווי הגובה שנוצרו מה-DEM.



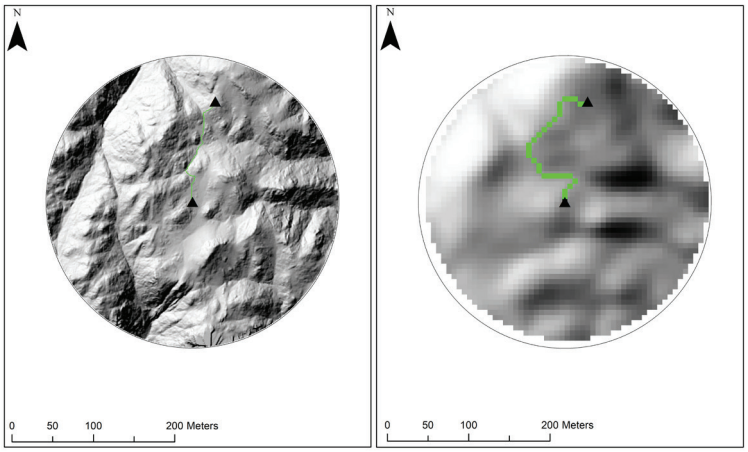
איור 6: מפת תבליט (HILLSHADE) מקווי הגובה של מפ"י (מימין) ומהמודל הפוטוגרמטרי (שמאל).

איור 7 מציג את תוצאות ניתוח הראות. השטח המסומן בירוק מייצג את האזורים שאפשר לראות מהאתר, כלומר אזורים בעלי קשר עין ישיר. לפי המודל המסורתי אפשר לראות מהאתר שטח של כ-734 מ"ר, ואילו לפי המודל הפוטוגרמטרי השטח הנצפה מהאתר קטן יותר וכולל כ-630 מ"ר. אפשר לראות כי מעבר להבדלים *בגודל* השטח הנצפה, קיימים הבדלים ברורים גם *במיקום* האזורים הנצפים. למשל, לפי המודל המסורתי אין כמעט כלל שטחים נצפים מהאתר לכיוון דרום, בעוד שלפי המודל הפוטוגרמטרי יש תצפית דרומית נרחבת. רמת הפירוט של האזורים הנצפים אף היא גבוהה הרבה יותר במודל הפוטוגרמטרי.



איור 7: ניתוחי הראות. השטח הנצפה מהאתר מסומן בצבע ירוק בהיר.
מימין - תוצאות המודל המסורתי, משמאל - תוצאות המודל הפוטוגרמטרי.

כאשר אנו פונים לניתוח דרכי המעבר בנוף (איור 8), משמעות הדיוק הטופוגרפי בולטת עוד יותר. בחישוב על פי המודל המסורתי נקבע מסלול בין נחל רודד 110 לאתר 108 שיוצא צפונה, ואז מערבה כדי לעקוף את האזור המשופע שבין האתרים. אורך המסלול המוצע הוא 212 מטרים. בחישוב על פי המודל הפוטוגרמטרי זיהתה התוכנה מסלול קצר משמעותית, שנע צפונה בקו כמעט ישר מאתר 110 לאתר 108. אורך המסלול המוצע הוא 150 מטרים, מסלול קצר בכ-30% מהמסלול הקודם.



איור 8: ניתוח דרכי מעבר בנוף. מימין - תוצאות המודל המסורתי, משמאל - תוצאות המודל הפוטוגרמטרי.

דיון ומסקנות

המחקר המרחבי היה מאז ומתמיד חלק בלתי נפרד מהמחקר הארכיאולוגי. הדבר נובע בראש ובראשונה מכך שכמעט כל המידע שאנו אוספים ברקורד הארכיאולוגי הוא בעל מאפיינים מרחביים ברורים – כל אלמנט שאנו מתעדים הוא בעל מיקום משלו במרחב, ונוסף על כך, כל אלמנט הוא בעל רשת רחבה של קשרים מרחביים עם אלמנטים אחרים, עם הסובב הארכיאולוגי ועם הסובב הטבעי. עם הזמן משתנה המתודולוגיה שבה אנו עושים שימוש כדי לאסוף את המידע המרחבי, לנתח אותו ולהציג אותו. אחד השינויים המשמעותיים ביותר בעשורים האחרונים הוא כניסתם של המחשבים לעולם המחקר והאפשרויות הרבות שהטכנולוגיה הממוחשבת פותחת בפנינו כחוקרים. כניסתן של מערכות המידע הגיאוגרפיות (GIS) היא בעלת השפעה מכרעת על המחקר המרחבי הארכיאולוגי.

בעשור האחרון צובר השימוש ב-GIS תאוצה משמעותית גם במחקר הישראלי. אחד הגורמים לכך הוא שתוכנות GIS הופכות ליותר נגישות, הן מבחינת עלותן והן מבחינת התפעול שלהן. ממשקי GIS הופכים לידידותיים למשתמש והדבר מקל על כל שלבי העבודה, משלב הכנסת המידע, דרך הניתוח המרחבי עצמו ועד ההצגה הוויזואלית של תוצאות המחקר. יודגש כי איכות התוצרים תלויה באופן ישיר באיכות המידע שאנחנו אוספים ובאיכות המודלים שבהם אנו עושים שימוש.

במאמר זה ביקשנו להראות ששאלת איכות המודל, במקרה זה המודל הטופוגרפי, היא שאלה רבת משמעות ובעלת השפעה מכריעה על הניתוח המרחבי ועל תוצאותיו. על פניו רזולוציית המודל הטופוגרפי המסורתי שבו עשינו שימוש (גודל תא של 6.32 מטר) היא רזולוציה טובה למדי, ובוודאי גבוהה בהרבה מהרזולוציה שבה עושים לעתים שימוש במחקרים ארכיאולוגיים (למשל, Byrd et al. 2016). יחד עם זאת אין ספק שבתא שטח דוגמת הרי אילת, המתאפיין בשונות טופוגרפית גבוהה מאד, היא אינה מספקת.

כל הניתוחים המרחביים שנבחנו הראו הבדלים משמעותיים בתוצאותיהם, הבדלים שמקורם אך ורק ברזולוציית המודל הטופוגרפי בבסיס החישובים.

טכנולוגיית הפוטוגרמטריה נכנסת אל עולם התיעוד הארכיאולוגי בצעדי ענק, הן ברמת תיעוד הממצא הבודד והן ברמת תיעוד האתר הארכיאולוגי (ראו לדוגמה ויגמן, כאן). זו טכנולוגיה שמספקת תוצר מדויק מאד, אך בניגוד למתודות אחרות המחייבות מכשור מורכב ותהליכים ארוכים היא טכנולוגיה נגישה וזולה יחסית. ההפקה של המודל מהירה מאד, הן מבחינת זמן העבודה בשטח והן מבחינת זמן הפקת המודל במעבדה, והיא מספקת תוצר בעל איכות גבוהה במיוחד.

אין ספק שגם לעבודה עם המודל המסורתי, העושה שימוש במידע טופוגרפי קיים (למשל, מידע הגובה של מפ"י) יש יתרונות משלה. בייחוד בולטת העובדה כי המודל המסורתי לא דורש יציאה אל השטח עצמו, ואפשר ליישמו בכל אזור נתון על פני כדור הארץ שקיים עליו מידע טופוגרפי וקטורי. עם זאת אין ספק שהשימוש בפוטוגרמטריה מאפשר לנו מודל מדויק יותר שמשקף בצורה נאמנה הרבה יותר את הסובב ומאפשר לנו לבצע ניתוחים מרחביים ברמה יותר גבוהה ומדויקת. הכניסה של הפוטוגרמטריה אל עולם התיעוד הארכיאולוגי מסמנת בהחלט את תחילתו של שינוי משמעותי באופן העבודה שלנו כחוקרים, בשטח ובמעבדה.

תודות

החפירה בנחל רודד 110 נוהלה על ידי מיכל בירקנפלד (רישיון מס' A-8164/2017) כחלק מפרויקט משותף עם ד"ר ליאורה ק. הורביץ וד"ר עוזי אבנר, במימון קרן CARE וקרן המחקר של ה-National Geographic. ברצוננו להודות למתנדבים ולסטודנטים שהשתתפו בחפירה.

ביבליוגרפיה

ויגמן, א. בדפוס. התיעוד הפוטוגרמטרי בחפירות ההצלה ברשות העתיקות. בתוך: מ.בירקנפלד וי. גרפינקל (עורכים). *ארכיאולוגיה דיגיטלית: מחקרים חדשים וטכנולוגיות מתקדמות*. האוניברסיטה העברית: ירושלים.

Anderson, R.C. (1982). Photogrammetry: The pros and cons for archaeology, *World Archaeology*, 14:2, 200-205, DOI: 10.1080/00438243.1982.9979860

Birkenfeld, M. (2018). *Changing Systems: Pre-Pottery Neolithic B Settlement Patterns in the Lower Galilee, Israel.* Studies in Early Near Eastern Production, Subsistence, and Environment (SENEPSE) 21, Berlin: ex-oriente.

Birkenfeld, M., Horwitz, L., Bar-Yosef Mayer, D., Bond, J., Guttmann-Bond, E., Cummings, L., Goldgeier, H., Krakovsky, M., Natalio, F., Nebenhous, K., Neumann, F.H., Porat, N., Scott, L., Simmons, T., Yashuv, T. & U. (2019). "Investigations at Naḥal Roded 110: A Late Neolithic ritual site in the southern Negev". *Antiquity*, 93(367), E4. doi:10.15184/aqy.2019.6

Byrd, B.F., Garrard, A.N. & P. Brandy (2016). Modeling foraging ranges and spatial organization of Late Pleistocene hunter–gatherers in the southern Levant – A least-cost GIS approach, *Quaternary International* 396: 62-78. ISSN 1040-6182, https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.048.

Goring-Morris, A.N. & Gopher, A. (1983). Nahal Issaron: A Neolithic Settlement in the Southern Negev: Preliminary Report of the Excavations in 1980. *Israel Exploration Journal* 33: 149-162.

Hengl, T. (2016). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32: 1283-1298.

Hill, A.C. (2019). Economical drone mapping for archaeology: Comparisons of efficiency and accuracy, *Journal of Archaeological Science: Reports* 24: 80-91.

Šedina, J., Housarová, E. & P. Raeva (2019). Using RPAS for the detection of archaeological objects using multispectral and thermal imaging, *European Journal of Remote Sensing* 52:sup1, 182-191, DOI: 10.1080/22797254.2018.1562848

כחומר ביד היוצר - שיטות חישוביות במחקר טכנולוגיות קדומות

אורטל הרוש, טליה ישוב, לנה דובינסקי, פרנצ'סקו וולטה וליאור גרוסמן

המעבדה לארכיאולוגיה חישובית, המכון לארכיאולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

תקציר

המעבדה לארכאולוגיה חישובית באוניברסיטה העברית בירושלים מפתחת שיטות חישוביות מתקדמות ליישום במחקרים ארכאולוגיים. שילובן של שיטות מחקר מסורתיות עם הכלים הטכנולוגיים של המעבדה פותח צוהר לכיווני מחקר חדשניים, ומעניק ערך מוסף משמעותי לעבודתם של חוקרים בארץ ובעולם. המאמר שלפנינו מאגד ארבעה מחקרים של חברי המעבדה, העוסקים בהיבטים טכנולוגיים של ממצאים ארכאולוגים שונים – צור, קרמיקה, אבנים מחוררות וחרותת סלע – מתקופות שונות, החל באפיפליאולית ועד ימינו. דרכם, אנחנו מבקשים להציג כיצד מיושמות השיטות החישוביות במטרה לענות על מגוון רחב של שאלות.

הקדמה

התרבות החומרית משקפת תהליכים בחברה שממנה היא צומחת, ולעיתים היא אף מניעה תהליכים חברתיים בעצמה. כמו כן, לצד יחסי הגומלין בין התרבות החומרית והחברה, התרבות היא גם תוצר של הפרט, יחידים המעורבים בהפיכת החומר לכלי. אחד הנדבכים המגשרים בין המישור הפרטי לבין החברתי היא הטכנולוגיה, שיש לה תפקיד חשוב בהבנת הקשר בין החומר, הפרט והחברה. בשנים האחרונות, מתמקדת המעבדה לארכאולוגיה חישובית בשאלות טכנולוגיות במגוון תחומים, באמצעות כלים ויזואליים וחישוביים לעיבוד מודלים תלת ממדיים (איור 1). המודל התלת ממדי הנו ייצוג גאומטרי של פריטים ארכאולוגיים אשר נסרקים באמצעות טכנולוגיית אור מובנה. פעולת הסריקה מעבירה למעשה את הטיפול בפריט מהעולם המוחשי אל הדיגיטלי. המודל הדיגיטלי מורכב מנקודות במרחב (x, y, z) וממשטחים המחברים ביניהם. מידע זה משמש לתיעוד מתקדם של פריטים ארכאולוגים, וכן, גם לניתוח מכלולים על מנת לענות על שאלות מחקריות. אנליזות אלו משמשות את המעבדה לצורך תיעוד מתקדם של פריטים ארכאולוגים, וכן, גם למענה על שאלות מחקריות. בכך, מקדמת המעבדה לארכיאולוגיה חישובית התמודדות עם שאלות מחקריות שלפני כן נותרו ללא מענה, וחשיפה לשאלות וכיווני מחקר חדשים (Grosman et al. 2014; Grosman 2016). הניתוח החישובי מאפשר לבחון את החומר ברמת הפרט, האתר והתרבות, וכן לערוך השוואות כרונולוגיות ובין-תרבותיות.

איור 1: המעבדה לארכיאולוגיה חישובית, המכון לארכיאולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים (צילום: טל רוגובסקי)

מתוך כלל המחקרים המתנהלים בימים אלה במעבדה, מציג מאמר זה ארבעה. כולם מבוססים על תוכנות שפותחו על ידי חברי המעבדה, במטרה לנתח חומרים וטכנולוגיות מכל התקופות. המחקר הראשון בוחן את שאלת המסורות הטכנולוגיות השונות בקרב התרבויות האפיפליאוליתיות באמצעות שיטה אובייקטיבית ומדויקת למדידת זווית החורפה (cutting edge) של כלי צור; המחקר השני, שגם הוא עוסק באפיפליאולית, מתמקד בתופעת ייצור אבנים מחוררות באתר הנטופי המאוחר נחל עין גב II. במחקר הזה מאפשרת האנליזה הרב-ממדית לחלץ מתוך החור הריק, כביכול, מידע על ראשית טכנולוגיית הקידוח והמלאכות השונות אשר התפתחו באמצעותה; המחקר השלישי בוחן תהליכי ייצור של קרמיקה, תוך כדי ניתוח השונות וזיהוי סגנון אישי בקרב קדריות מתלמדות. השיטות החישוביות והוויזואליות מאפשרות לא רק לכמת את ההבדלים בין הקדריות, אלא גם לאפיין את מהות ההבדלים ביניהן; לבסוף, נציג מחקר רביעי הבוחן את חרותת 'המרכבות' מהאתר בתמנע מנקודת מבט טכנולוגית. שיטת הניתוח החישובית מאפשרת לעקוב אחר הטופוגרפיה התלת-ממדית של החרותה ולאפיין את הטכניקות שבהן נוצרה. ארבעת מקרי הבוחן יוצגו כאן לפי רמת הניתוח הנבחנת בהן החל בהשוואת מכלולים וכלה בניתוח הקו הבודד שחרת האמן.

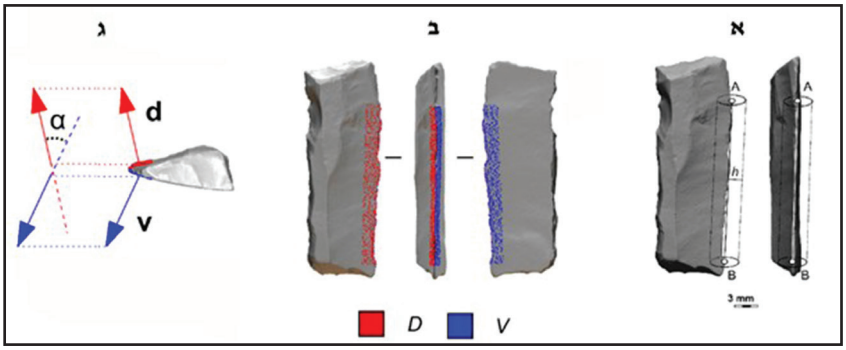
המחקרים

זווית החורפה ומסורות טכנולוגיות באפיפליאולית

ככל מיומנות טכנולוגית, ייצור כלי צור מושפע מהשיוך התרבותי והחברתי של בעלי המלאכה, דהיינו, הסתתים. סביבת הלמידה של הסתתים מטמיעה בהם הרגלים מוטוריים נרכשים שבאים לידי ביטוי בכל שלב ושלב של רצף הסיתות (Sackett 1982; Hiscock 2014). בידוד וזיהוי

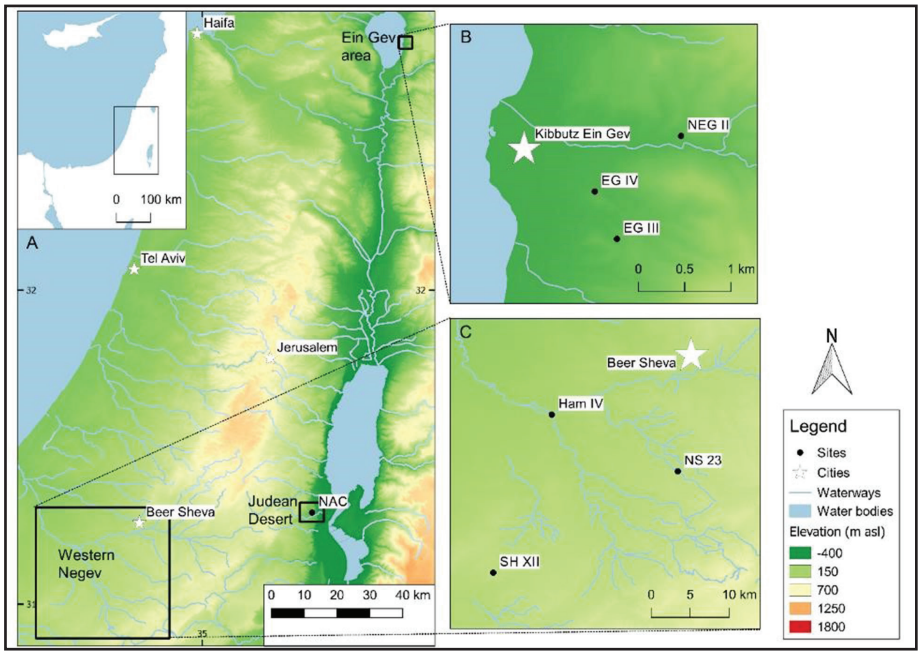
הסמנים הטכנולוגיים הללו בתוצר הסופי יכול לשמש לאפיון מסורות טכנולוגיות וקשרים בין קבוצות (Gandon et al. 2013). אחד הסמנים הקבועים הללו, שאפשר לזהות גם לאחר שברור הכלי, הוא זווית החורפה אשר נקבעת עוד בשלב הסרת הנתזים מהגרעין (Hiscock 1982). במילים אחרות, ההרגלים המוטוריים של הסתתים משפיעים באופן בלתי מכוון על זווית החורפה של כלי הצור, וזו יכולה ללמד על המסורות הטכנולוגיות שבהן התחנכו הסתתים. אחת השאלות המהותיות בתקופת האפיפליאולית (11,500 – 20,000 שנים לפני זמננו) קשורה למידת הקשר וההמשכיות בין המסורות הטכנולוגיות השונות במרחב הגיאוגרפי לאורך ציר הזמן. לכן מדידה מדויקת של זווית החורפה הממוצעת לפריט יכולה להיות נתון מבוסס להשוואה בין מכלולים אפיפליאוליתיים, ובכך לתרום תובנות חשובות על תנועת האוכלוסיות והקשר ביניהן.

מדידת זווית החורפה של כלי צור משמשת לשלל מטרות מחקריות. בדרך כלל מתבצעת המדידה באחת מהשיטות הידניות השונות שפותחו למטרה זו (Dibble & Bernard 1980). עם זאת, שיטות אלה מועדות לחוסר עקביות, לסטיית תקן גבוהה ולשונות סובייקטיביות, בפרט כשמדובר בפריטים קטנים כמו מיקרוליתים (Morales et al. 2013; Zaidner & Grosman 2015; Viallet 2019). כדי לספק מענה לפער במדידות מסוג זה, פותחה במעבדה לארכיאולוגיה חישובית שיטה חדשנית, מדויקת ואובייקטיבית למדידת זווית החורפה של פריטי צור (Valletta et al. 2020) כלי חישובי זה משולב בתוכנת *Artifact3-D* שפותחה במעבדה, המיועדת לתיעוד וניתוח של פריטים ארכיאולוגיים (Grosman et al. 2014). בתחילת המדידה, מתבקש המשתמש לבחור את אזור האנליזה באופן ידני על גבי החורפה (A, B, h, באיור 2:א). בשלב הבא, האזור הנבחר מוקף אוטומטית בצילינדר המכיל את כל הנקודות והפוליגונים שבגבולותיו, ואלו מופרדים לשני משטחים (D ו-V באיור 2:ב). זווית החורפה (α) מחושבת כזווית הממוצעת בין יחידות המשטחים (d ו-v, איור 2:ג). לבסוף, כדי להימנע מהפרעות כתוצאה מפני שטח לא אחידים, מתבצעת בחירה אוטומטית בתחום היציב ביותר למדידת הזווית מתוך האזור שנבחר. (Valletta et al. 2020)



איור 2: חישוב זווית החורפה הממוצעת בתלת-ממד: (א) הגדרה ידנית של אזור האנליזה; (ב) הפרדה אוטומטית של המשטחים היוצרים את הזווית; (ג) חישוב הזווית בין המשטחים.

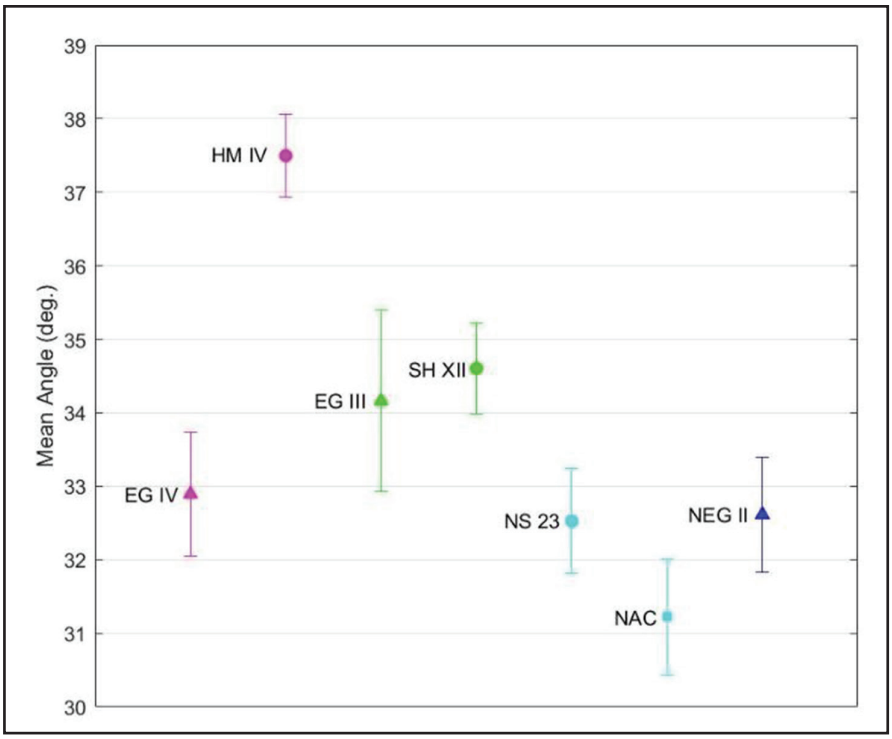
המתודולוגיה שפותחה במעבדה נבדקה באמצעות מקרה בוחן להשוואת מכלולים מיקרוליתים מתרבויות האפיפליאולית בדרום הלבנט (איור 3). הפריטים מהאתרים שנבחנו (171 סה"כ) סווגו לפי תקופה ומרחב גיאוגרפי. מבחינת ציר הזמן – האפיפליאולית הקדום מיוצג על ידי שני אתרים מהתרבות הניצנית, עין גב IV והמפגש IV; האפיפליאולית התיכון מיוצג על ידי שני אתרים מהתרבות הכבארית הגיאומטרית, עין גב III ושונרא XII; והאפיפליאולית המאוחר מיוצג על ידי שני אתרים מהתרבות הרמונית הסופית, נחל סכר 23 ומערת עזגד, ואתר נחל עין גב II מהתרבות הנטופית המאוחרת (Bar-Yosef 1970; Goring-Morris 1987; Grosman et al. 2016). מבחינה גיאוגרפית משתייכים שבעת האתרים לשלושה אזורים גיאוגרפיים שונים – תא שטח מצומצם באזור החוף המזרחי של אגם הכנרת (עין גב III, עין גב IV ונחל עין גב II); הנגב המערבי (המפגש IV, שונרא XII ונחל סכר 23); ומדבר יהודה (מערת נחל עזגד).



איור 3: דרום הלבנט. אתרי האפיפליאולית הכלולים במחקר.

לפי כלל הנתונים שנמדדו במחקר, טווח זווית החורפה מוגבל ל-30° עד 38°. אף כי מדובר בטווח קטן למדי, קיימת התפלגות ברורה בין זוויות המיקרוליתים מהאתרים השונים (איור 4). לאור התפלגות זו, יתכן שאפשר לזהות דפוסים המשקפים מגמות כרונולוגיות וגיאוגרפיות בקרב המסורות הטכנולוגיות של האפיפליאולית.

בין שני המכלולים מהתרבות הניצנית, עין גב IV והמפגש IV, נמצאה שונות גבוהה עם זוויות ממוצעות של 33° ו-37.5° בהתאמה. ההסבר לכך יכול להיות נעוץ במסורות טכנולוגיות שנבדלות זו מזו מבחינה גיאוגרפית. לעומת זאת, באתרים השייכים לתרבות הכבארית הגיאומטרית, עין גב III ושונרא XII, נמצאה זווית חורפה ממוצעת דומה של 34°–35°, למרות ההבדל במיקומם הגיאוגרפי. תמונה דומה עולה גם ממכלולי התרבות הרמונית הסופית, נחל סכר 23 ומערת נחל עזגד, המציגים זווית ממוצעת קרובה של 31°–32.5°. אם כן, בשני המקרים האחרונים אפשר להציע את קיומם של קשרים הדוקים בין מסורות טכנולוגיות על פני טווח גיאוגרפי גדול.



איור 4: התפלגות תוצאות חישוב זווית החורפה הממוצעת (ציר ה-X) של המיקרוליתים בכל אתר, כולל הממוצע וסטיית תקן. הצבעים השונים מתייחסים לתרבויות אפיפליאוליתיות, והצורות השונות לשיוכם הגיאוגרפי (ורוד – תרבות ניצנית; ירוק – כאברית גיאומטרית; תכלת – רמונית סופית; כחול – נטופית מאוחרת. משולש – אזור עין-גב; עיגול – הנגב המערבי; ריבוע – מדבר יהודה).

תוצאות המחקר הן עדות חדשה למורכבות הטכנולוגית באפיפליאולית, והן מספקות תובנות שמצטרפות למחקרים קודמים בתחום. באשר לשוני הזווית בתרבות הניצנית, הוצע בעבר כי המכלולים הניצניים מהנגב מתאפיינים בפריטים מעט ארוכים ורחבים יותר מאלו שהתגלו

בצפון (Goring-Morris 1987). כמו כן באשר לדמיון הזווית בין אתרי הרמונית הסופית ואתר נחל עין-גב II הנטופי, אפשר לראות במחקר הנוכחי תמיכה בפרשנויות קיימות על השורשים של התרבות הנטופית בנגב (Goring-Morris & Belfer-Cohen 2013). עם זאת הדמיון המקומי שבין אתרי אזור עין גב, המתקבצים בטווח זווית ממוצעת של 33°–34°, יכול לסתור את הטענה על חוסר הקשר הטכנולוגי של הנטופית עם תרבויות הצפון שקדמו לה. מכל מקום ניתוח זווית החורפה של המיקרוליתים באפיפליאולית מוסיף נקודת מבט ייחודית, המעמיקה את הדיון המחקרי על תנועתם של אנשים ורעיונות בתוך חברות וביניהן.

פריטים מחוררים וטכנולוגיות קידוח בתרבות הנטופית המאוחרת

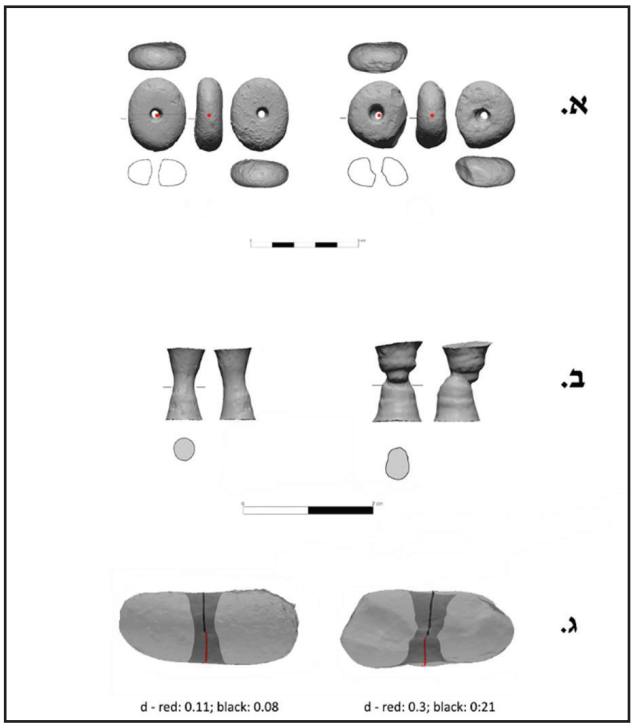
הופעה של כלים חדשים בתרבות החומרית יכולה להעיד על התפתחויות טכנולוגיות ומזמינה התייחסות מעמיקה (Schiffer & Skibo 1987). בתרבות הנטופית יכולים שינויים כאלה לשפוך אור על התהליכים החשובים המיוחסים לתקופה זו: המעבר להתיישבות קבע ותחילת האימוץ של אורח חיים חקלאי (Grosman & Munro 2017).

האתר נחל עין-גב II מתוארך לתרבות הנטופית המאוחרת (12,000–12,500 שנים לפני זמננו), והתגלו בו עדויות להתיישבות אינטנסיבית במבנים גדולים וכן מתחם קבורה. ייחודו של האתר הוא בהופעתם של סממני המשכיות תרבותית מהאפיפליאולית, לצד מאפיינים המזוהים עם תרבויות ראשית הניאולית (Bar-Yosef & Belfer-Cohen 2000; Grosman et al. 2016). אחד הנתונים המשקפים זאת הוא הנוכחות הגבוהה של מקדחי צור, המגיעים לשיעור של כ-31% מהכלים במכלול ומבטאים ככל הנראה חידוש טכנולוגי לתקופתם (Yashuv & Grosman In press). לצידם נתגלו באתר טיפוסים של פריטים בעלי חור. קבוצה אחת, המשתייכת למסורת הקישוטים הנטופית, היא חרוזי דיסק עשויים צדף שעוצבו באמצעות חירור מלאכותי (Bar-Yosef Mayer 2005). קבוצה אחרת חדשה, המיוצרת באתר, היא אבני גיר מחוררות. לקבוצה זו אין מקבילה בסדר גודל דומה מהאפיפליאולית, בעוד שבניאולית היא נפוצה למדי (Wright 1992). המחקר הנוכחי מתמקד בתופעת האבנים המחוררות ושואף לבחון את החדשנות שבאה לידי ביטוי מבחינה מורפולוגית, טכנולוגית ופונקציונלית. בהיבט רחב יותר, נשאלת השאלה כיצד מכלול כלי האבן המחוררים תורם להבנת ההתפתחות של מלאכות והתמחויות בצומת שבין האפיפליאולית והניאולית (Yashuv & Grosman, In prep).

שיטת המחקר מבוססת על ניתוח באמצעות מספר תוכנות. בשלב הראשון של העיבוד, מאופיינת הצורה השלמה באמצעות תוכנת *Artifact3-D*. לאחר העמדה אוטומטית עקבית של הפריטים, מתקבלים נתונים מטריים מדויקים עבור כל פריט במכלול (Grosman et al. 2014). נוסף לאלו מחושב מיקומו של מרכז הכובד ביחס למדידות המעטפת של הפריט. בשלב השני, מתבצע אפיון החורים באמצעות פונקציה חישובית המייצרת מודל תלת-ממדי (איור 5א), שהוא

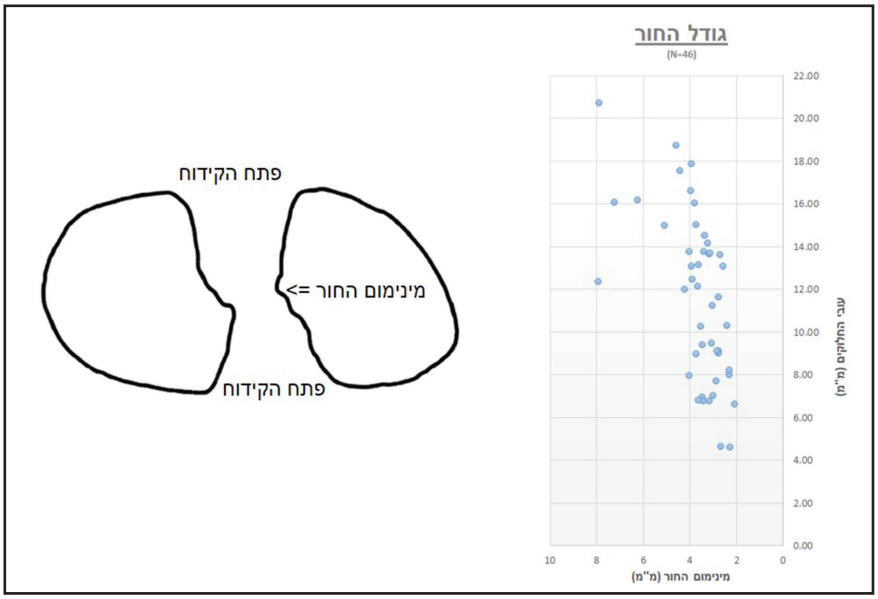
למעשה תשליל של חלל החור הסרוק (איור 5ב). באמצעות פונקציה זו אפשר לבחון את פנים החור המלא. מבחינה איכותנית, מאפשר התשליל לשחזר את תהליך הייצור, להעריך את איכות הקידוח ולזהות אזורי שחיקה; מבחינה כמותנית, אפשר לערוך מדידות מדויקות של התשליל עצמו באמצעות תוכנת *Artifact3-D*.

הקידוחים השונים עוברים ניתוח חישובי נוסף, באמצעות פונקציה שפותחה עבור חפצים שנוצרו בטכנולוגיה סיבובית, כדוגמת קרמיקה. מעצם אופייה של טכנולוגית ייצור זו, לכל חפץ שנוצר באמצעותה קיים ציר סיבוב גיאומטרי. על בסיס חיתוכים אופקיים של הפריט, מיקום נקודות מרכז החתכים וחיבור הנקודות הללו לכדי ציר אנכי, מוגדר ציר הסיבוב הממוצע של הקידוח (איור 5ג). אם היו מספר שלבים של תנועות סיבוביות שונות בתהליך הייצור, אפשר יהיה לזהות בפריט מספר צירי סיבוב שונים. החלוקה לצירים השונים מתבצעת באמצעות זיהוי נקודת התפנית, שמפרידה באופן אופטימלי את החור לשני צירי קידוח בעלי סטיית תקן קטנה יותר מזו של החור כולו (d באיור 5ג). הליך זה מאפשר להעריך באופן כמותני את הסימטריה של כל קידוח ואת מידת השונות הטכנולוגית בין פריטים במכלול.



איור 5: השוואה בין שני פריטים מחוררים. עמודה ימנית – חלוק אבן גיר טבעי עם סימון בנקודה אדומה של מרכז הכובד (א); עם קידוח לא אחיד (ב); וציר קידוח בעל סטיית תקן גבוהה (ג). עמודה שמאלית – חלוק אבן גיר מעובד עם סימון של מרכז הכובד (א); עם קידוח סימטרי (ב); וציר קידוח בעל סטיית תקן נמוכה (ג).

תוצאות המחקר עד כה נחלקות לשני תחומים: הניתוח הצורני של הפריט השלם וניתוח המודלים של הקידוחים. מבחינת הניתוח הצורני של הפריט השלם עולה, כי האבנים הן בעלות פרופורציות סימטריות ומרכז הכובד שלהן יחד עם החור הקדוח נמצאים במרכז הפריט. כמו כן התוצאות מראות כי מגוון הצורות של האבנים איננו אחיד, והוא משקף את השימוש בחלוקי גיר לא מעובדים במשקל נמוך של 20 גרם ומטה. מבחינת ניתוח המודלים של הקידוחים, רוב החורים של כלי האבן לא הורחבו ולכן נשמרה בהם הטביעה הטכנולוגית של הקידוח המקורי. בניתוח האיכותני ניכרת חוסר סטנדרטיזציה בטכניקת החירור הדו-כיוונית: לצד חורים סימטריים שאולי נעשו בשיטת קידוח מהירה, רבים מהחורים שאינם עגולים כנראה נעשו בחירור ידני (Werner & Miller 2018) מעניין להוסיף כי קוטר החור המינימלי של כל הפריטים השלמים אחיד: בין 2–4 מ"מ, ללא תלות בגודל הפריטים או בשיטות הקידוח (איור 6). תוצאה זו יכולה להעיד על הפונקציה של הפריטים המחוררים.



איור 6: גרף מדידת החור המינימלי המראה את העקביות של פתח בקוטר 2–4 מ"מ באופן בלתי תלוי בגודל הפריט.

על סמך המחקר עד כה, אפשר לזהות לא רק את אופן ייצור הפריטים, אלא גם לבחון השערות לגבי תפקידם מבחינה פונקציונלית. הבחירה המכוונת של חלוקים קלים וסימטריים, לצד פיזור מסה שווה וקידוח החור במרכז הפריט, תואמים לאלו של משקולות פלך לטוויית חוטים (Barber 1991). ייתכן כי מדובר בהופעה ראשונית של שימוש במשקולות אבן לטווייה ואריגה, מלאכה מתפתחת שהולכת ומשתרשת במהלך הניאולית והכלקולית (Levy & Gilead 2012).

זיהוי סגנון אישי של קדרים

שברי חרס הם הממצא השכיח ביותר בחפירות ארכיאולוגיות. ככאלה הם אוצרים מידע חשוב על ההקשר הכרונולוגי, המרחבי והתרבותי של אתרים. הקרמיקה לרוב מקוטלגת על פי טיפוסים לפי סוג, צורה וגודל, ולבסוף שיוכם לתרבות חומרית מסוימת. עם זאת אפיון השונות במכלול הקרמי והבנת משמעותה מקבלים תשומת לב מועטה. בתוך כך חסרה גם הבנה בנוגע לאופן שבו סגנון, אישי וקבוצתי, מעצב את השונות שאנחנו עדים לה ברקורד הארכיאולוגי. ההגדרה הכללית של סגנון היא הדרך לעשות דבר כלשהו מכלל האפשרויות המוצעות לנו (Sackett 1977). אחד מההוגים הבולטים בתולדות הדיון על סגנון הוא פרנץ בועז, שטען כי הסגנון כרוך בהופעה של צורות קבועות וביציבות הופעתן. לדבריו, ללא עקביות – אין סגנון (Boas 1955). לפי תובנה זאת אם נמצא את המאפיין העקבי במכלול קרמי, נוכל לזהות סגנון של קבוצה ואולי אף של קדר.

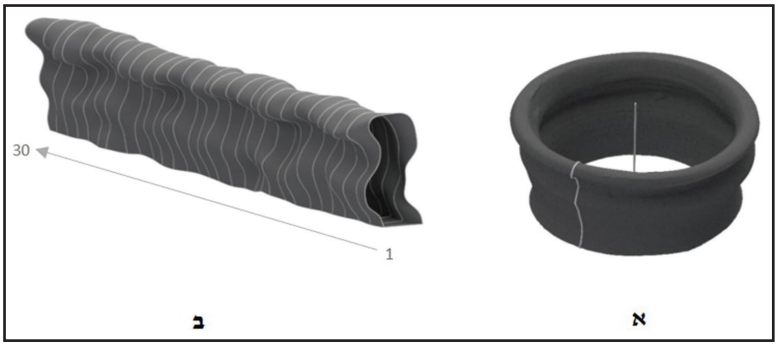
החיפוש אחר סגנון ברקורד הארכיאולוגי הוא מורכב, בעיקר כי ממצאים ארכיאולוגיים אינם מייצגים 'רגע' ספציפי בזמן. יתרה מזו, חסר לנו מידע על בעלי המלאכה שייצרו את הממצאים. כדי ליצור בסיס מתודולוגי חדשני העוסק בסוגיה זו, פנה המחקר הנוכחי לגישה ניסויית. גישה זו מאפשרת מציאת משתנים חדשים לבחינה של קרמיקה, ובפרט בחינה בזמן אמת של הבדלים צורניים וטכנולוגיים בין קדרים (Harush et al. 2019; 2020).

לצורך המחקר, התבקשו סטודנטיות מהמחלקה לעיצוב קרמי וזכוכית בבצלאל לייצר את החלק העליון של קנקן, מידי יום, במשך שבוע ימים לפי פרוטוקול ניסויי קפדני (איור 7). הנחת היסוד בבחירת מושא הניסוי היא שהחלק העליון של הכלי (השפה והצוואר) מייצג באופן ברור שינויים מורפולוגיים הקשורים להרגלים המוטוריים של הקדר (Sillar 1997; Gosselain 1998; 2000; Roux 1989).

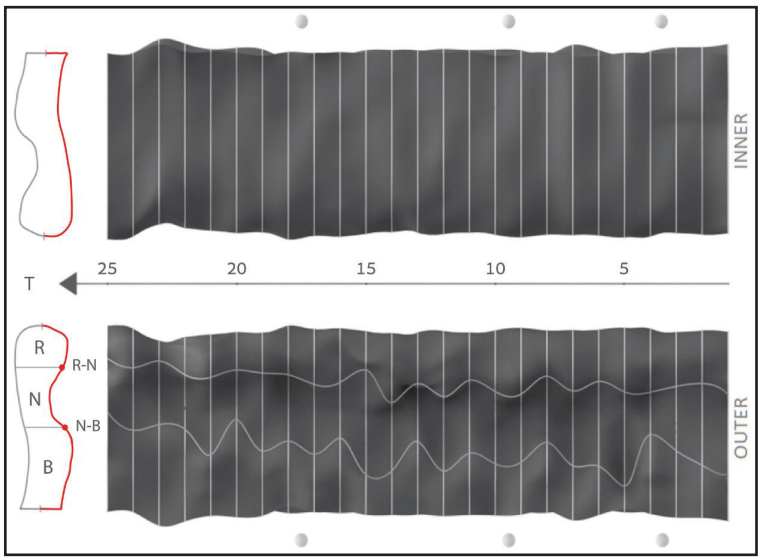
איור 7: הניסוי: (א) הכנת הטין לפני הייצור (משקל הטין לכל פריט כ-400 גרם); (ב) הסטודנטיות בבצלאל בעבודה; (ג) ייצור הפריטים לפי טכניקת 'גדילים על אובניים'; (ד) אבטיפוס הניסוי – החלק העליון של קנקן מתקופת הברזל.

כל הפריטים שיוצרו בידי הקדריות המתלמדות נסרקו בתלת-ממד. המודלים התלת-ממדיים שימשו להפקת משתנים גיאומטריים מדויקים של הפרופילים, המאפשרים מיון אוטומטי של

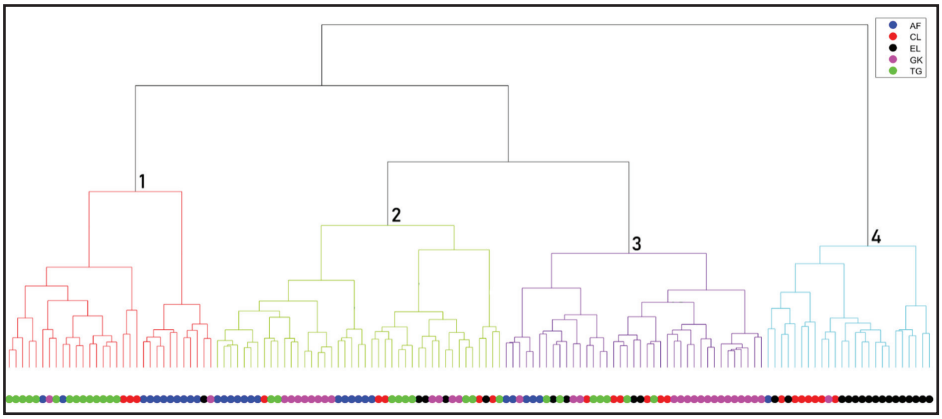
כלל הפריטים (איור 8). לצד המיון הכמותני שניתח את המידע הדיגיטלי בתוכנת *Pottery3-D* (Karasik & Smilansky 2011), פותחה במחקר זה גם גישה ויזואלית איכותנית לזיהוי החלק בעל השונות הנמוכה ביותר לאורך הפרופיל הקרמי. שיטה זו מחלקת את הפריטים שהקדריות ייצרו לשלושה מקטעים: שפה (R), צוואר (N) ותחתית (B), ולאחר מכן מחשבת את השונות בכל אזור (איור 9). שילוב שתי הגישות, הכמותית והוויזואלית, מאפשר להבחין בין קדרים על פי סגנונם האישי (Harush et al. 2019).



איור 8: (א) מודל תלת-ממדי עם ציר סיבוב ועם פרופיל דו-ממדי (בלבן); (ב) תצוגה ויזואלית של כלל פריטים שקדרית אחת ייצרה. הפרופילים מאורגנים לפי סדר כרונולוגי בייצור (שימוש בתוכנת Rhino).



איור 9: תצוגה ויזואלית של פריטים שיצרה קדרית אחת, עם מבט על החלק הפנימי (למעלה) והחיצוני (למטה) של הפרופילים. הקווים האנכיים מתארים כל פריט שהקדרית ייצרה לאורך זמן הניסוי. הנקודות האפורות מתייחסות לחלוקה על פי ימים. הפרופיל מחולק לשלושה חלקים: השפה (R), הצוואר (N) ותחתית הצוואר (B); והקווים המפרידים בין החלקים (מסומנים בנקודות אדומות) R-N ו-N-B.



איור 10: עץ מיון אוטומטי ל-138 פריטים שיוצרו על ידי 5 קדריות מתלמדות. הקווים בחלק התחתון של העץ מתייחסים לכלל הפריטים במכלול. כל ענף מציין קבוצה טיפולוגית במכלול (הענפים מסומנים בצבעים שונים לשם הנוחות). הנקודות הצבעוניות למטה מתייחסות לכל קדרית, בהתאם למקרא מימין. אפשר לראות כי הקדריות מופרדות היטב במיון האוטומטי.

תוצאות המחקר החישובי מראות כי אפשר לזהות סגנון אישי בשלבים ראשוניים של למידה. הפריטים שהקדריות ייצרו מופרדים באופן יחסית מובהק במיון האוטומטי, וזאת אף כי הקדריות עצמן לא יכלו לזהות את הפריטים שלהן מתוך המכלול (איור 10). לצד זאת, הגישה הוויזואלית מסייעת בהגדרה מחדש של משתנים החיוניים להבנת המשמעות של השונות בפריט. פרמטרים אלה מאפשרים לאתר את מיקומה של טביעת האצבע של כל קדרית (הסגנון האישי שלה) בתהליך הייצור. מהניסוי עולה כי החלק העקבי ביותר לאורך הפרופיל עבור כלל הקדריות הוא החלק שבין השפה (R) לצוואר (N). על כן מדובר באזור בעל השונות הנמוכה ביותר בתהליך הייצור, המשקף את חתימתו המוטורית של הקדר (איור 9).

יישום המתודה הכמותית יחד עם הוויזואלית, כפי שהוצגה במחקר זה, תשולב בקרוב במקרה בוחן ארכיאולוגי באפיון וניתוח השונות במכלולים קרמיים. למשל מעקב אחר דפוסי הפרופיל במכלול קרמי יכול לקדם הערכה של מספר הקדרים או של בתי היוצר שהשתתפו ביצירת המכלול הקרמי הנחקר. מתוך כך אפשר יהיה אף לקבוע את רמת ארגון הייצור הקרמי, הקשורה קשר הדוק לרמת הארגון החברתי.

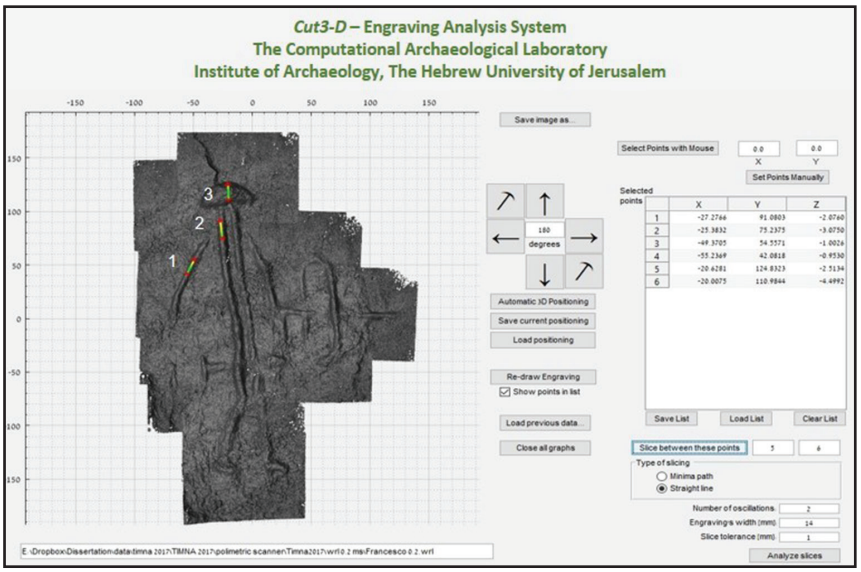
אפיון טכנולוגי של חרותת 'המרכבות' בתמנע

לאורך ההיסטוריה הותירו תרבויות אנושיות שונות אחריהן מגוון רחב של חרותות סלע. מרבית המחקרים התמקדו בהיבטים האיקונוגרפיים, האיקונולוגיים והסגנוניים של חרותות אלו (Taçon & Chippindale 1998; Eisenberg-Degen 2012). הכלים ששימשו את החוקרים כדי לקבוע את שיוכם הכרונולוגי והתרבותי הם ניתוח מבנה הסצנה, הדימויים והמאפיינים הסגנוניים. מודלים מחקריים אלו נשענו על דרכי התיעוד שהיו זמינות, כגון העתקה ידנית או

צילום. אלו מציגים את הדימויים בצורה דו-ממדית ומתעלמים מן המאפיינים התלת-ממדיים של החרותות. הטכנולוגיות הזמינות כיום באמצעות סריקה תלת-ממדית, מאפשרות ניתוח של האיכויות המיקרו-טופולוגיות עד לרמת המאפיינים הצורניים של כל קו חרות.

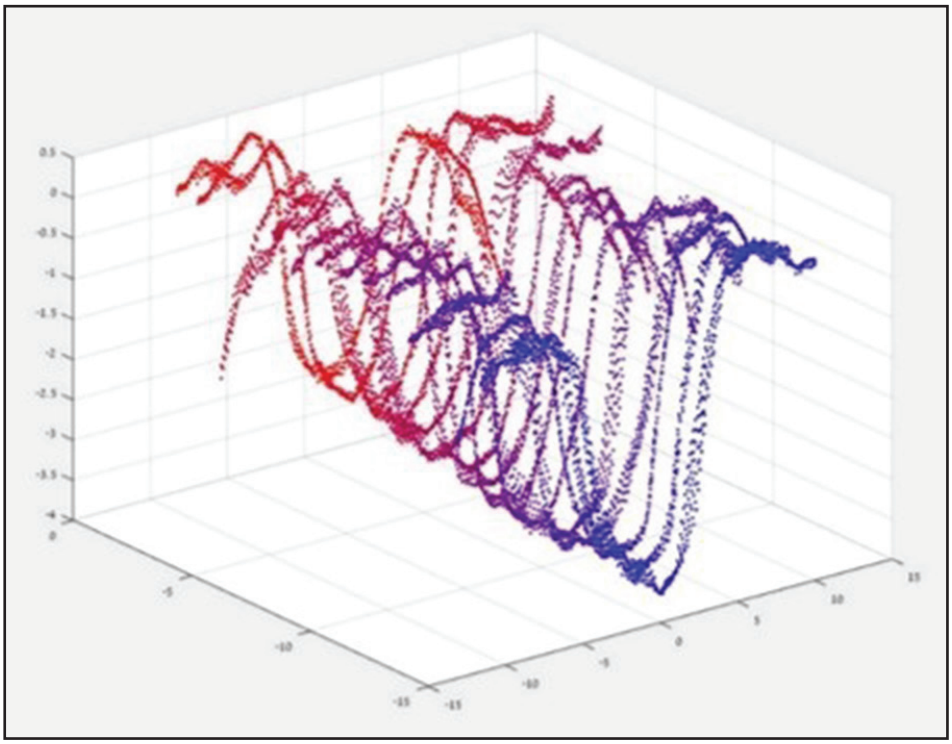
המחקר הנוכחי מתמקד בהיבטים הטכנולוגיים של החרותות, באמצעות אפיון הטכניקות, כלי העבודה והמיומנויות שביצירתן. המחקר משלב בין ניתוח חישובי של חרותות הסלע, ובין גישה ניסויית שמטרתה להתחקות אחר אופן הייצור של החרותות. הנחת היסוד היא כי המיזוג בין מחקר חזותי מסורתי לבין מחקר טכנולוגי-מוטורי יכולים ללמד על אודות יוצרי ה'גרפיטי' הקדומים, ולסייע בפענוח ההקשר התרבותי של החרותה (Dubinsky et al. Under review). המחקר הנוכחי מתמקד בהיבטים הטכנולוגיים של החרותות, באמצעות אפיון הטכניקות, כלי העבודה והמיומנויות שביצירתן (Dubinsky and Grosman In press).

מקרה הבוחן הוא 'קיר המרכבות', חרותת סלע המצויה בפארק תמנע ובה ייצוג של פעילות אנושית, כלי מרכבות וחיות. מאמצי המחקר הקודמים נשענו על האיקונוגרפיה והאיקונולוגיה של החרותה, והסכימו כי היא נושאת השראה מצרית ומתארת את החיל המצרי בסצנת ציד (Rothenberg 1972; 1998; 2003; Anati 1979; 1999; Yekutieli 2016). אולם ברקורד הארכיאולוגי חסר מידע על זהותם של יוצרי החרותה ומועד יצירתה. המודלים התלת ממדיים מאפשרים בחינה מרבית של הקו החרות – רציפותו, עומקו, וצורתו – ובכך משלימים את החסר במחקר של הממצאים החרותים.



איור 11: תצוגת תוכנת CUT3-D. מספור המקטעים מתייחס לשלושה חלקים נבחרים בניתוח הטכנולוגי של הדמות (HF21)

לשם כך פותחה תוכנה ייעודית המכונה *CUT3-D* (איור 11). התוכנה עוקבת אחר הטופוגרפיה לאורך מקטע נבחר, ומפיקה רצף של חתכים תלת-ממדיים המשקפים אותו בכל מ"מ (איור 12). רצף זה מאפשר לבחון את מאפייני הקו בחתך נתון (איור 13) וגם את השתנות הקו לכל אורכו. כך הניתוח המורפולוגי של כל קו והיחסים בין הקווים מאפשר אפיון של רצף הפעולות בתהליך ייצור החרותה.

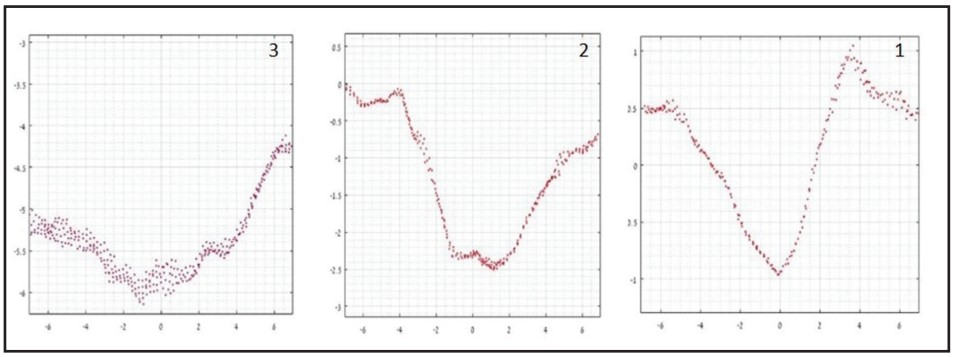


איור 12: תוכנת CUT3-D: תצוגה של רצף הרצועות התלת-ממדיות החותכות לרוחב את הקווים החרותים (במ"מ)

לשם הדגמה נבחנה דמות אחת מתוך חרותת המרכבות, דמות אדם האוחז בקשת. בחינת רצף החתכים של יד הדמות הראתה כי היא נעשתה בפעולת חריתה בודדת, המתבטאת בנקודת מינימום יחידה בחתך החריתה (איור 13.1). לעומתה בחינת רצף החתכים של גוף הדמות הראתה כי היא נעשתה באמצעות פעולת חריתה חוזרת, המתבטאת בשתי נקודות מינימום בחתך (איור 13.2). לבסוף בחינת אלמנט ראש הדמות הראתה כי הוא נעשה באמצעות פעולת הקשה ולא חריתה (איור 13.3).

התוצאות הראשוניות מראות כי הרצועות המופקות בתוכנה מצליחות לשקף את הטכניקות השונות שבהן נוצרו החרותות. אפיון הקווים וטכניקות שם את הדגש על בחירותיו של החורת

בתהליך הייצור, והשוואתם מאפשרת סיווג דפוסים ואיתור סגנונות. אופק מחקרי זה משמעותי לא רק להבנת מקרה הבוחן שלפנינו, אלא גם בהיותו תצוגת תכלית למתודולוגיה היכולה לספק מענה לשלל שאלות מעולם התרבות החזותית.



איור 13: חתכים בודדים מתוך הרצפים של שלושה מקטעים, המצביעים על הבדלים באופני הביצוע של הקווים השונים בדמות HF21.
(1) נוצר באמצעות תנועה אחת; (2) נוצר באמצעות תנועה חוזרת; (3) נוצר באמצעות הקשה.

סיכום

המשותף לכל מקרי הבוחן שנידונו הוא ההתמקדות בהיבט הטכנולוגי של ממצאים ארכיאולוגיים. לצד אפיון תהליך הייצור של פריטים ארכיאולוגיים, הגישה הטכנולוגית פותחת פתח לדיון בשלל תחומים שבעבר היו נחלת המחקר המסורתי בלבד. כך למשל אפשר להשתמש בתובנות טכנולוגיות כדי לשפוך אור על דפוסי התיישבות, תהליכי למידה והעברת ידע, אפיון סגנוני, מבנה חברתי וכן הלאה. נקודת השקה נוספת בין המחקרים שתוארו בסקירה זו היא ההעמקה בחומר הנחקר, עד כדי נגיעה של ממש ביד האמן הקדום. בדרך זו המחקרים מצביעים על זיהוי בחירותיו המודעות של היוצר, לצד אלו הנטבעות בתהליך הייצור באופן נסתר. נתונים מסוג זה יכולים לשמש מחקרים ברמות שונות של קנה מידה: החל בהשוואת מכלולים בין אתרים וכלה במחקר הממוקד ביותר לניתוח ממצא יחיד. בכל המחקרים הללו, הגישה החישובית מאפשרת לבחון באופן כמותי ומעמיק את הממצאים ולהפיק מהם תובנות חדשות על אודות תרבויות העבר והאמנים הקדומים עצמם. לצד מקרי הבוחן הפרטניים שנידונו כאן, הניתוח התלת-ממדי והגישה החישובית יכולים לסייע במענה על מגוון שאלות מחקר ארכיאולוגיות, ואף לעורר שאלות שטרם נחקרו. לפיכך נראה שגישה זו תמשיך להתפתח כחלק בלתי נפרד מהמחקר הארכיאולוגי המסורתי, ולקדמו למחוזות חדשים.

דברי תודה והוקרה

המעבדה לארכיאולוגיה חישובית לא הייתה משגשגת אלמלא תמיכתם של מוסדות, מענקים ואנשים. בראשם האוניברסיטה העברית בירושלים והמכון לארכיאולוגיה; רשות העתיקות; קרן יד הנדיב; קרן ווילסון; קרן רות עמירן למחקר ארכיאולוגי בארץ-ישראל; בצלאל – אקדמיה לאמנות ועיצוב; פרופ' עוזי סמילנסקי, ד"ר אבשלום קרסיק; המתכנתים ממדעי המחשב המשולבים בעבודות פיתוח התוכנות – מרסלו דוד, נעמה גלובר, ניר דיק; תודה מיוחדת לקרן נבנהויז עבור עריכת המאמר; ואחרונים חביבים, לסטודנטים והשותפים לפעילות המעבדה מידי יום, ובמיוחד להדס גולדגייר, אנטואן מולר ואירנה לשצ'יבר.

ביבליוגרפיה

Anati, E. (1979). *L'arte Rupestre del Negev e del Sinai*. Milan.

Anati, E. (1999). The rock art of the Negev desert. *Near Eastern Archaeology* 62: 22–34.

Bar-Yosef Mayer, D. E. (2005). The exploitation of shell as beads in the Palaeolithic and Neolithic of the Levant. *Paléorient* 31: 176–185.

Bar-Yosef, O. & Belfer-Cohen, A. (2000). Nahal Ein Gev II - A late Epi-Paleolithic site in the Jordan Valley. *Mitekufat Haeven: Journal of the Israel Prehistoric Society* 30: 49–71.

Bar-Yosef, O. 1970. "The Epi-Paleolithic cultures of Palestine", Ph.D. Dissertation submitted at The Hebrew University, Jerusalem

Barber, E.J.W. (1991). *Prehistoric Textiles*. Princeton.

Boas, F. (1955). *Primitive art.* New York.

Dibble, H.L. & Bernard, M.C. (1980). A comparative study of basic edge angle measurement techniques. *American Antiquity* 45: 857–865.

Dubinsky, L., David M. & Grosman L. Submitted. Looking into the third dimension: Studying ancient engravings with a technological perspective.

Dubinsky L. & Grosman L. In press. Into the Lines: 3-D Analysis of Rock Engravings from Site 25, Timna Park. In E. Ben-Yosef (ed.), Timna Valley Revisited: The Tel Aviv Excavations (2013-2018) and Other Studies in the Ancient Copper Mining District of the Southern Aravah. Tel Aviv.

Eisenberg-Degen, D. (2012). "Rock art of the Central Negev: Documentation, stylistic analysis, chronological aspects, the relation between rock art and the natural surroundings, and reflections on the mark 46". Ph.D. Dissertation submitted at Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva.

Gandon, E., Bootsma, R.J, Endler, J.A. & Grosman, L. (2013). How can ten fingers shape a pot? Evidence for equivalent function in culturally distinct motor skills. *PLoS One* 8: 1–9.

Goring-Morris, A.N. (1987). At the Edge. Terminal Pleistocene Hunter-Gatherers in the Negev and Sinai. Oxford.

Goring-Morris, A.N. & Belfer-Cohen, A. (2013). "Ruminations on the role of periphery and centre in the Natufian", in: O. Bar-Yosef & F.R. Valla (eds.), *Natufian Foragers in the Levant. Terminal Pleistocene Social Changes in Western Asia*, Michigan, pp. 562–583.

Gosselain, O. (1998). "Social and technical identity in a clay crystal ball", in: M. Stark (ed.), *The Archaeology of Social Boundaries,* Washington, pp. 78–106.

Gosselain, O. (2000). Materializing identities: An African perspective. *Journal of Archaeological Method and Theory* 7(3): 187–217.

Grosman, L., Karasik, A., Harush, O. & Smilansky, U. (2014). Archaeology in three dimensions: Computer-based methods in archaeological research. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies* 2 (1): 48–64.

Grosman, L. (2016). Reaching the point of no return: The computational revolution in archaeology. *Annual Review of Anthropology* 45: 129-143.

Grosman, L., Munro, N.D., Abadi, I., Boaretto, E., Shaham,. D., Belfer-Cohen, A. & Bar-Yosef, O. (2016). Nahal Ein Gev II, a Late Natufian community at the Sea of Galilee. *PLoS One 11*: 1–32.

Grosman, L. & Munro, N.D. (2017). "The Natufian culture and the threshold for early farming", in: Y. Enzel and O. Bar-Yosef (eds.), *Quaternary Environments, Climate Change and Humans in the Levant*, Cambridge, pp. 699–708.

Harush, O., Glauber, N., Zoran, A. & Grosman, L. (2019). On quantifying and visualizing the potter's personal style. *Journal of Archaeological Science 108.*

Harush, O., Roux, V., Karasik, A. & Grosman, L. (2020). Social signatures in standardized ceramic production–A 3-D approach to ethnographic data. Journal of Anthropological Archaeology, 60.

Hiscock, P. (1982). The real meaning of edge angles. *Australian Archaeology* 14: 79–85.

Hiscock, P. (1982). More about edge angles. *Australian Archaeology 15*: 116–120.

Hiscock, P. (2014). Learning in lithic landscapes: A reconsideration of the hominid 'toolmaking' niche. *Biological Theory* 9: 27–41.

Karasik, A. & Smilansky, U. (2011). Computerized morphological classification of ceramics. *Journal of Archaeological Science 38*: 2644–2657.

Levy, J. & Gilead, I. (2012). Spinning in the 5th millennium in the Southern Levant: Aspects of the textile economy. *Paléorient* 38: 127–139.

Morales, J.I., Lorenzo, C. & Vergès, J.M. (2013). Measuring retouch intensity in lithic tools: A new proposal using 3D scan data. *Journal of Archaeological Method and Theory* 22: 1–16.

Rothenberg, B. (1972). Timna: Valley of the Biblical Copper Mines. London.

Rothenberg, B. (1998). "Who were the 'Midianite' copper miners of the Arabah?", in: T. Rehren, A. Hauptmann, & J. D. Muhly (eds.), *Metallurgica Antiqua. In Honour of Hans-Gert Bachmann and Robert Maddin*, Bochum, pp. 197–212.

Rothenberg, B. (2003). Egyptian chariots, Midianites from Hijaz/Midian (Northwest Arabia) and Amalekites from the Negev in the Timna Mines. *Institute for Archaeo-Metallurgical Studies Newsletter* 23: 9–14.

Roux, V. (1989). Le Tour du Potier. Spécialization Artisanale et Compétences Techniques. Paris.

Sackett, J.R. (1977). The Meaning of style in archaeology: A general model. *American Antiquity* 42: 369–380.

Sackett, J.R. (1982). Approaches to style in lithic archaeology. *Journal of Anthropological Archaeology* 1: 59–112.

Schiffer, M.B. & Skibo, J.M. (1987). Theory and experiment in the study of technological change. *Current Anthropology* 28: 595–622.

Sillar, B. (1997). "Reputable pots and disreputable potters: Individual and community choice in present-day pottery production and exchange in the Andes", in: C.G. Cumberpatch & P.W. Blinkhorn, (eds.), *Not So Much a Pot, More a Way of Life*, Oxford, pp. 1–20.

Taçon, P.S.C. & Chippendale, C. (1998). "An archaeology of rock-art through informed methods and formal methods", in C. Chippindale & P.S.C. Taçon (eds.), *The Archaeology of Rock-art*, Cambridge, pp. 1–10.

Valletta F., Smilansky U., Goring-Morris A. N. & Grosman L. (2020). On measuring the mean edge angle of lithic tools based on 3-D models – A case study from the Southern Levantine Epipalaeolithic. *Archaeological and Anthropological Sciences* 12 *(49)*.

Viallet, C. (2019). A new method of three-dimensional morphometry for analyzing the functional potentialities of bifaces. Contribution to the study of artefacts from AU P3 from the 'Caune de l'Arago' (France). *Comptes Rendus - Palevol* 18: 236–250.

Werner, J.J. & Miller, J.M. (2018). Distinguishing stone age drilling techniques on ostrich eggshell beads: An experimental approach. *Journal of Archaeological Science Reports* 22: 108–114.

Wright, K.I. (1992). "Ground stone assemblage variations and subsistence strategies in the Levant, 22,000 to 5,500 B.P. ", Ph.D. Dissertation submitted at Yale University, New Haven.

Yashuv, T. & Grosman, L. In preparation. Drilling tools and perforated items during the crossroad between the Epipaleolithic and the Neolithic.

Yashuv, T & Grosman L. In press. Drilling tools at the end of the Natufian – Suggesting a technological innovation. In Y. Nishiaki, M. Arimura & O. Maeda (eds.), Proceedings of the 9th International Conference on PPN Chipped and Ground Stone Industries of the Near East, Tokyo.

Yekutieli, Y. (2016). The chariots engraving of Timnaʿ (Israel) revisited. *American Schools of Oriental Research* 375: 171–84.

Zaidner, Y. & Grosman, L. (2015). Middle Paleolithic sidescrapers were resharped or recycled? A view from Nesher Ramla, Israel. *Quaternary International* 361: 178–187.

מיפוי דיגיטלי וסקר זיהום קרקע באתר הפקת נחושת מראשית תקופת הברזל בבקעת תמנע

אהרון גרינר[1], עמרי יגל[2] וארז בן-יוסף[2]

[1] מכון אולברייט למחקר ארכיאולוגי

[2] החוג לארכיאולוגיה ותרבויות המזרח הקדום ע"ש יעקב מ. אלקוב, אוניברסיטת תל אביב

תקציר

אחת השאלות השנויות במחלוקת בנוגע למטלורגיה קדומה קשורה להיקף וחומרת הזיהום שנבע מהפקת מתכות, כמו גם למידת הנזק הבריאותי שנגרם לאוכלוסייה שעסקה באופן ישיר ועקיף בתעשייה זו. במסגרת החפירות המחודשות בבקעת תמנע, שבה שוכן אחד ממרבצי הנחושת הגדולים בדרום הלבנט, ביצענו מחקר ראשוני של זיהום הקרקע באחד מאתרי ההתכה המרכזיים (אתר 34, הידוע גם בכינויו 'גבעת העבדים'). האתר ממוקם על גבעה מבודדת והפעילות המטלורגית התקיימה בה אך ורק בראשית תקופת הברזל (סוף המאה ה-11 והמאה ה-10 לפנה"ס). לפיכך מקורות הזיהום הפוטנציאליים מתוארכים היטב ואינם מופרעים – מצב אידיאלי לחקירת ההשפעה הסביבתית של התעשייה. אספנו 348 דגימות קרקע מהאתר וניתחנו את הרכבן הכימי באמצעות אנליזת XRF (X-ray fluorescence), כבסיס למיפוי הריכוזים של היסודות השונים בקרקע ברזולוציה גבוהה. המיפוי חשף את הפיזור המרחבי של המזהמים התעשייתיים (בעיקר נחושת ועופרת). כמו כן המידע הכימי אִפשר לנו לזהות שרידים של פעילויות אנושיות נוספות באתר, וסיפק אבחנות על ארגון הייצור ועל היבטים נוספים של התעשייה בת 3000 השנה שאי אפשר היה להבחין בהם בעין בלתי מזויינת.

המפות מבוססות ספקטרומטריה שהפקנו מראות בבירור שהפעילות האנושית התמקדה בחלקה המרכזי והצפוני של הגבעה, וכי הזיהום ממוקד ואינו סוטה מאזורי הפעילות הפירו-טכנית עצמם. תוצאותינו שוללות טענות קודמות על כך שאתרי מטלורגיה הקדומים למהפכה התעשייתית גרמו לזיהום נרחב שהשפיע דרמטית על בריאותם של אנשים שעבדו באתרים וגרו בסמיכות אליהם, ואף על זו של האוכלוסייה שהתגוררה במקומות מרוחקים יותר ולא עסקה ישירות במטלורגיה. התוצאות מחזקות תצפיות מהמחקרים החדשים ביותר בתחום המגיעים מאזור פינאן שבירדן.

מבוא

האופי והיקף הזיהום שנגרם כתוצאה מפעילות מטלורגית בעת העתיקה אינם נהירים כלל ועודם שנויים במחלוקת במחקר. כדי להעריך את ההשפעה הסביבתית הכוללת של תעשיות הכרייה והתכת הנחושת בעת העתיקה, פנו מספר קבוצות מחקר לחקור את אזור ואדי פינאן שבירדן, שבו התקיימה תעשיית הפקת נחושת אינטנסיבית לאורך תקופות רבות. מחקרים שונים לאורך השנים ניתחו מגוון חומרים, כגון סדימנטים גיאולוגיים, שרידי צמחים ובעלי-חיים, עצמות אדם, ועוד (לדוגמה, Pyatt et al. 2002, 2005; Pyatt & Grattan 2001; Hunt & El-Rishi 2010; Grattan et al. 2007, 2013). מחקרים אלו הציעו באופן גורף שתעשיית המתכת הקדומה בפינאן גרמה לזיהום נרחב של הסביבה המקומית וכי זיהום זה חלחל בסופו של דבר לתוך מערכת המזון. כתוצאה מחשיפה ועיכול של המזון המזוהם, הריכוזים של עופרת ונחושת עלו בגופם של אנשי האוכלוסייה המקומית. יתר על כן, תעשיית הנחושת בפינאן נקשרה לעדויות לעלייה בזיהום גלובלי בהיקף נרחב בתקופת הברזל (Grattan et al. 2007). הנחת היסוד של החוקרים הייתה שתוצרי הלוואי של תעשיית הנחושת, הכוללים סיגים וסדימנטים עשירים במתכות, חלחלו באיטיות לתוך הסביבה הקרובה באמצעות מגוון של תהליכי בליה. לטענתם, הזיהום החמור נמצא עדיין בקרקע וממשיך להשפיע על הסביבה המדברית בדרום ירדן ועל בריאותם של הבדואים המקומיים אלפי שנים לאחר שנוצר.

לעומת זאת, מחקרים חדשים יותר מפינאן הכירו בכך שיש מזהמים סביבתיים בקרקע, אולם טענו שאלו מרוכזים בכמה אזורים ממוקדים ומבודדים (Beherec et al. 2016; Knabb et al. 2016; Knabb 2019). מחקרים עדכניים אלו הסתמכו על שתי מערכות של נתונים. הראשונה מבוססת על ניתוח גיאוכימי של אדמות חקלאיות (בייחוד באזורי טראסות חקלאיות קדומות) שהראה כי אין קורלציה בין הפיזור של עופרת וקרבה למרכזי ייצור הנחושת (מלבד כמה אזורים מבודדים שזוהמו כתוצאה משיטפונות שהגיעו ישירות מאזורי כרייה במעלה הוואדי). השנייה מבוססת על ניתוח של אמייל משיניים שנמצאו בבית הקברות של תקופת הברזל שבאתר ואדי פידאן 40. בבדיקות אלו נתגלה שרעלני הסביבה נמצאים במספר פרטים מצומצם, כנראה רק אלו אשר עסקו באופן ישיר בהתכת הנחושת.

לפי המחקרים החדשים, למזהמים המתכתיים לא היו השפעות רחבות היקף כפי שסברו בעבר, לא על הסביבה ולא על החברות העתיקות או המודרניות. החוקרים ביקרו את המחקרים הקודמים על כך שמרבית העדויות הקודמות הגיעו ישירות מערימות הסיגים או מאזורים שבהם הייתה פסולת התכה. יתר על כן, נטען גם שהמידע הקודם שהופק משלדים אינו מהימן, משום שלא נלקחו בחשבון השינויים הכימיים שקרו לאחר הקבורה.

במחקרנו הנוכחי בחרנו במחנה התכה גדול בבקעת תמנע, כדי שישמש כמקרה מבחן להערכת היקף הזיהום המטלורגי שעיבוד הבצר וסדנאות ההתכה הותירו בקרקע. האתר היה פעיל במשך תקופה קצרה, מסוף המאה ה-11 ועד המאה ה-10 לפנה"ס, ואז ננטש (Ben-Yosef 2016). משמעות הדבר היא שזיהום הקרקע באתר מייצג תקופת פעילות קצרה שמאפייניה ברורים. יתרה מכך, האתר ממוקם על גבעה נישאה ומבודדת שאינה חשופה לשיטפונות עונתיים העשויים להשפיע על הרכב הקרקע כתוצאה מסחיפה של מזהמים. תוצאות סקר הקרקע, שכלל את תיעוד פיזור הריכוזים של יסודות כימיים רבים, סייעו לנו גם לזהות אזורי פעילות אנושית שלא קשורים ישירות לפעילות מטלורגית, ובכך להבין טוב יותר את הארגון המרחבי של התעשייה והפעילות הנלווית לה באתר.

השימוש ב-XRF לזיהוי שרידים של פעילות אנושית קדומה

אף שמדובר ביישום יחסית חדש, השימוש בבדיקות XRF (נייד או נייח) גובר והולך עבור תיעוד כימי רחב היקף של אתרים ארכיאולוגיים. השיטה הפשוטה והיעילה יחסית יכולה לסייע בזיהוי היקף הזיהום באתרים תעשייתיים, ולספק מידע בסיסי על אופי הפעילות האנושית הקדומה ביחידות הנוף הנבדקות (לדוגמה, Smejda et al. 2017, 2018; Oonk et al. 2009, וראו מקורות נוספים שם).

כפי שנכתב לעיל, ריכוזים גבוהים בקרקעות של מתכות כגון נחושת (Cu) ועופרת (Pb), יכולים להעיד על פעילות מטלורגית שקשורה להפקת נחושת (Ash el al. 2014; Horák & Hejcman 2016; Knabb et al. 2016). שרידים של פעילות אנושית, כגון פסולת אורגנית, עצמות, אפר אורגני, גללים וצואה, קשורים להצטברות של יסודות אחרים, כגון זרחן (P) ואשלגן (K) (Smejda et al. 2017).

אתר 34 בבקעת תמנע

בבקעת תמנע שבדרום הערבה, בצד המערבי של הבקע הסורי-אפריקאי, שוכנים מרבצי הנחושת השניים בגודלם בדרום הלבנט (איור 1). חקירת האזור באופן ארכיאולוגי שיטתי, שהחלה לפני יותר מחמישים שנה על ידי בנו רותנברג ו"משלחת הערבה", הביאה לזיהויים של אלפי פירי כרייה ומספר רב של אתרי התכה שהקדומים בהם מתוארכים לתקופה הכלקוליתית (האלף החמישי לפנה"ס). מאז בצר הנחושת בבקעה נוצל בין השאר על ידי המצרים, האדומים, הנבטים, הרומאים, החליפות האומיית ומדינת ישראל. מחקרים רבים הבליטו את מקומה של תמנע כאזור מפתח להבנת טכנולוגיות הפקת נחושת קדומות במזרח הקדום ואף מעבר לכך (Pigott 1996; Craddock 1995; Rothenberg 1990; Ben-Yosef 2018; Ben-Yosef & Shalev 2018). משלחת חדשה, בראשותו של אחד הכותבים (ארז בן-יוסף מאוניברסיטת תל אביב),

חוקרת את בקעת תמנע מאז שנת 2012. המשלחת מיישמת שיטות מחקר מתקדמות ותיעוד דיגיטלי, במטרה לשפר את ההבנה של תהליך הפקת הנחושת ולענות על שאלות כרונולוגיות, חברתיות ותרבויות שנותרו עד כה ללא מענה מספק.

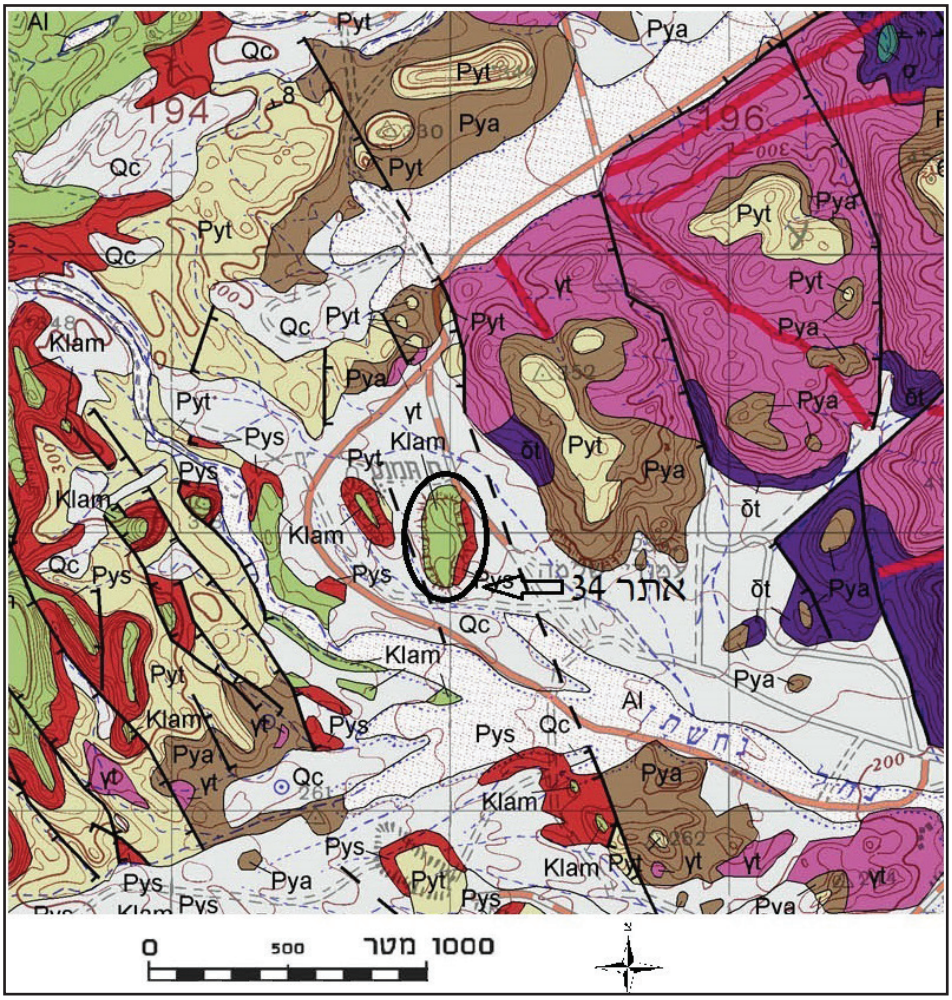
תוצאות של בדיקות מגוונות שנערכו בשנים האחרונות, הכוללות תיארוך בפחמן 14 ברזולוציה גבוהה ותיארוך ארכיאומגנטי של הסיגים, הביאו לשינוי המסגרת הכרונולוגית המקובלת שהוצעה בעבר על ידי רותנברג. מסגרת זו גרסה שפעילות ההתכה הנרחבת ביותר בבקעה התרחשה בסוף תקופת הברונזה המאוחרת תחת שליטת המצרים. כעת אנו יודעים ששיא הפעילות בתמנע התרחש בתחילת תקופת הברזל, במהלך המאות ה-11-9 לפנה"ס (לדוגמה, Ben-Yosef 2016; Ben-Yosef et al. 2012). שיא הפעילות המטלורגית בוואדי פינאן, הנמצא כ-100 ק"מ מצפון לתמנע, תוארך לאותה התקופה (לדוגמה, Levy et al. 2014), תצפית המרמזת על קשר תעשייתי ותרבותי בין שני אזורי הפקת הנחושת בקצוות הערבה.

עבור המחקר הנוכחי ריכזנו את עבודתנו באתר 34, אחד מאתרי ההפקה הגדולים ביותר בתמנע (Ben-Yosef 2016). אתר 34 ממוקם על גבעה מבודדת הגבוהה ביותר מעשרה מטרים מסביבתה. הגבעה בנויה מאבן חול בלויה של תצורת אמיר מתקופת הקרטיקון התחתון (איור 2); זו אבן חול קאולינית פרירה בעלת גרגירי קוורץ קטנים עד בינוניים לבנים (Beyth et al. 2013). הקרקעות הטבעיות בפסגת הגבעה מורכבות מאבן החול הבלויה ובעיקר מאדמת לס מדברית הנישאת ברוח. בנוסף ראוי לציין שכמעט אין צמחייה או חומרים אורגניים טבעיים בפסגת הגבעה.

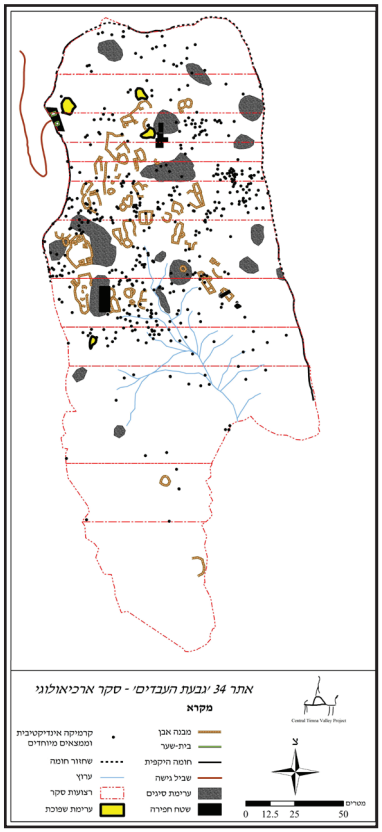
אתר 34, שלא נחפר כלל על ידי רותנברג, נקרא 'גבעת העבדים' בעקבות תיאורו של נלסון גליק (1935), ששחזר את האתר בתור "בית כלא של עבודת כפייה". אכן נדמה היה שיש בגבעה את כל הסממנים של מחנה עבדים מתקופת הברזל – כבשנים רותחים, תנאי מדבר קיצוניים ומחסום כביר שמונע בריחה. לאחר מיפוי קפדני של השרידים הארכיאולוגים בגבעה, החלו החפירות בשנת 2013 והתרכזו בשתיים מערימות הסיגים (13 ו-19) ובאזור השער (איור 3) (על האחרון ראו Ben-Yosef et al. 2017). תוצאות החפירה הפכו לחלוטין את הפרשנות של גליק: האנשים שעבדו על הגבעה השתייכו לאליטה, כפי שעולה בבירור מניתוח המזון שלהם, בגדיהם וחפצים אישיים אחרים. הדבר אינו מפתיע כיוון שבניגוד למכרות, חרשי הנחושת של 'גבעת העבדים' היו אחראים לאחת הטכנולוגיות המתקדמות של התקופה, "ההיי-טק של תקופת התנ"ך", והחזיקו בידע מתוחכם איך להפוך אבן למתכת (לדוגמה, Sapir-Hen and Ben-Yosef 2014) (ראו תצלום של אתר 34 באיור 4).

איור 1: מיקומו של אתר 34 בבקעת תמנע.

במפה המוקטנת: מיקומם של תמנע ופינאן, שני מרכזי ייצור הנחושת העיקריים בעת העתיקה בדרום הלבנט.

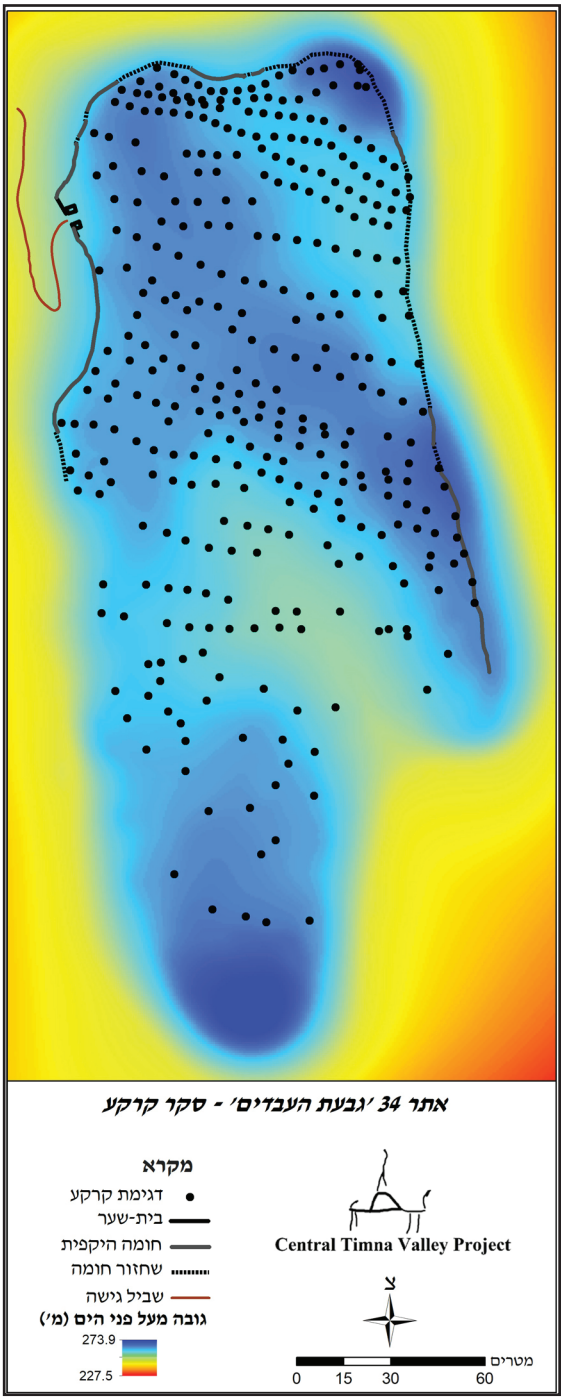


איור 2: מפה גיאולוגית של מרכז בקעת תמנע ואתר 34 (קטע מהמפה הגיאולוגית 1:50,000 של באר אורה; Beyth et al. 1999). **מפתח:** Klam (light green) = Amir Formation sandstones; Pys (red) = Shehoret Formation sandstones; Pya (brown) = Amudei Shlomo Formation; Pyt (yellow) = Timna Formation (dolomite); ϒt (light purple) = Alkali Granite; δt (dark purple) = Monzodiorite; QC = Stream terraces



איור 3: ערימות סיגים, אלמנטים אדריכליים (מתקנים שונים) ותפוצת שברי החרס האינדיקטיביים באתר 34 ('גבעת העבדים'). אורך הגבעה מצפון לדרום הוא כ-300 מטרים.

איור 4: אתר 34 (מבט לדרום-מזרח). שימו לב לכתמי הסיגים השחורים במרכזה וצפונה של הגבעה.

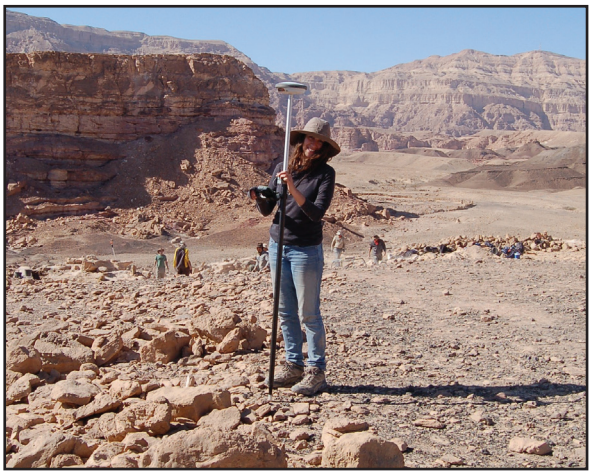


איור 5: מפה של אתר 34 המראה את המיקום המדויק של דגימות הקרקע שנאספו במחקר הנוכחי.

שיטות עבודה

איסוף הדגימות

דגימות הקרקע נאספו ממרבית השטח בפסגת גבעה 34 (29 דונם). נקודות הדיגום נקבעו על פי רשת שהוגדרה מראש ובהתאמה למגבלות תוואי הקרקע (איור 5). בכל דיגום נאספו כ-10–20 גרם של קרקע מעומק של כ-5 סנטימטרים, ולאחר מכן נשמרו הדגימות בשקיות פלסטיק אטומות. המיקום המדויק שממנו נלקחה כל דגימה תועד בעזרת מערכת מיקום גלובלית דיפרנציאלית מסוג Leica Zeno GG 03, עם אנטנה חכמה מסוג Zeno 5 GNSS שחוברה לרשת הקינמטיקה בזמן אמת של Etkes SpiderNET (עם שלוש תחנות ברדיוס של 30 קילומטרים). למערכת יכולת זיהוי מרחבי ברמת דיוק של סנטימטר אחד במישור ה-x/y (איורים 6–7). לא נדגמו מחשופי סלע עם פחות מחמישה סנטימטרים של כיסוי קרקע (topsoil) (אלו נפוצים במיוחד באזור הדרומי של הגבעה), כמו גם אזורי החפירה וערימות השפכים שלהם.



איורים 6–7: איסוף של דגימות הקרקע באתר 34
תוך כדי תיעוד המיקום המדויק בו נלקחה כל דגימה בעזרת dGPS.

ניתוח כימי

הכנת הדגימות והניתוח הכימי בוצעו במעבדה הארכיאומטלורגית באוניברסיטת תל אביב. לפני שביצענו את בדיקות ה-XRF, הוצאו כל החלקיקים בגודל חצץ (<2 מילימטר) מדגימות הקרקע, והדגימות עברו הומוגניזציה באמצעות כתישה בעזרת מכתש ועלי עשויים מברקת (אגט). גרמים בודדים נלקחו מכל שקית ונדחסו לתוך כוסית דגימה סטנדרטית מפלסטיק (בקוטר 32 מילימטר) שנאטמה על ידי שקף פוליפרופילן (איורים 8–9).

איורים 8–9: נתנאל דיטון מכין את דגימות הקרקע לקראת קריאתן במכשיר XRF במעבדה הארכיאומטלורגית באוניברסיטת תל אביב.

ניתוח כימי כמותי נעשה בעזרת מכשיר pXRF מסוג Thermo Scientific Niton XLt-900 XRF Analyzer, שצויד בשפופרת רנטגן מסוג GOLDD, ועיבוד אותות דיגיטליים בזמן אמת במהירות של 80 MHz. מדידות XRF נלקחו בעזרת Thermo Scientific SmartStand ולא על ידי החזקה ידנית. כיוון ש-Niton pXRF מתוכנת להשתמש בכמה מטריצות שהוגדרו מראש על ידי החברה, נבחרה מטריצת general mining, שכוללת את היסודות הכימיים הרלוונטיים ומתייחסת למטריקס הרלוונטי (=לא מתכתי), לשמש במחקר הנוכחי. כיול נערך באמצעות מערכת כיול פנימית שהחברה הגדירה. זמן הבדיקות נקבע ל-150 שניות, והשתמשנו בארבעה פילטרים המסוגלים לזהות את היסודות הכבדים מנתרן (Na).

רמת הדיוק (accuracy) של מכשירי XRF ניידים שנויה במחלוקת (לדוגמה, Hunt & Speakman 2015), כשהטענה המרכזית שללא כיול ספציפי לחומר הנמדד לא ניתן להגיע לנתונים כמותיים מהיימנים, בעיקר ליסודות קלים בריכוז נמוך. להסתייגות הזו אין השלכה על תוצאות המחקר הנוכחי, כיוון שהוא מבוסס על בדיקת שינויים יחסיים בריכוזי היסודות; מיפוי פיזור הריכוזים בקרקע נעשתה על דוגמאות עם אותו המטריקס (קרקע) שנמדדו באותו המכשיר ובאותן הגדרות הכיול. יחד עם זאת, השלמת המחקר עם בדיקות כימיות מדויקות יותר (למשל בדיקות ICP) תאפשר גם להעריך את גודל השגיאה בתוצאות הקיימות וגם לוודא אם קיימים זיהומים ברמות נמוכות מאוד שלא זוהו על ידי ה-XRF בכיול הנוכחי שלו.

ניתוח הנתונים

התוצאות האנליטיות תועדו בטבלאות אקסל יחד עם המידע המרחבי. ניתוח מרחבי ומיפוי בוצעו באמצעות ESRI ArcMap 10.4.1, תוך כדי שימוש באינטרפולציה של המרחק ההופכי המשוקלל (IDW). הסמלים נקבעו לערכי מתיחה של מינימום-מקסימום לאורך סגנון צבעים.

תוצאות

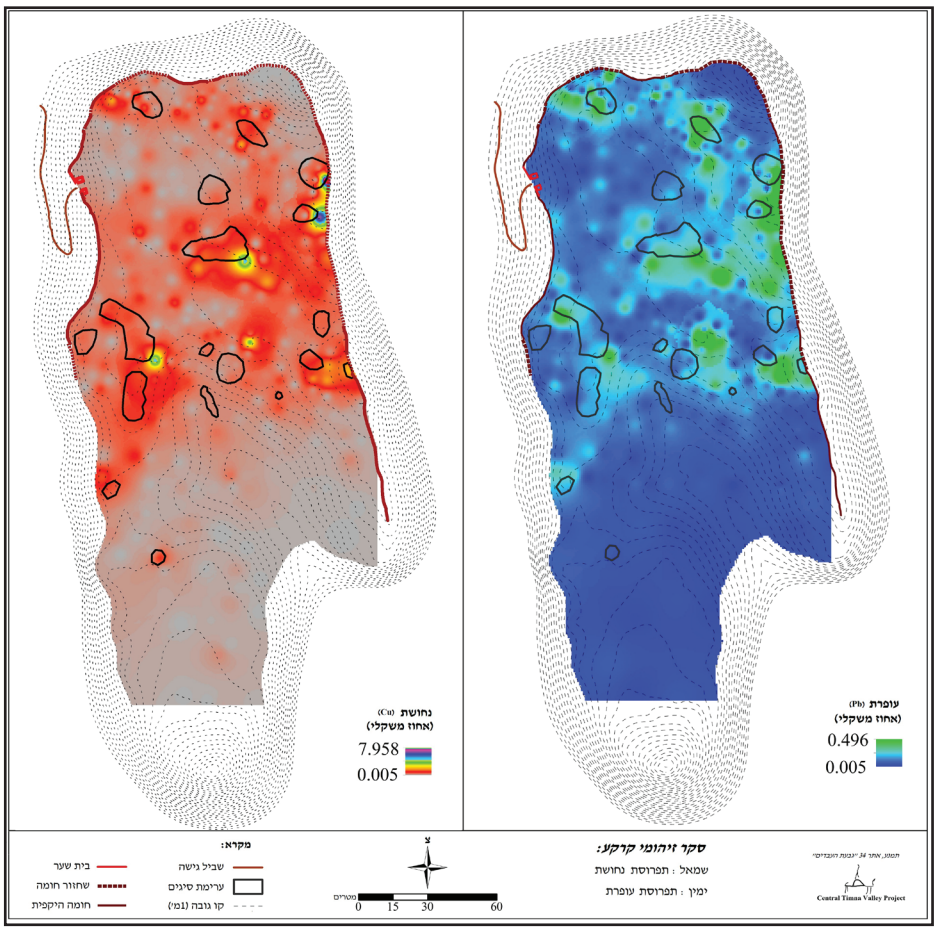
כלל התוצאות האנליטיות מובאות באחוז משקלי (Wt%.) ומופיעות בטבלה א׳ שבנספח. שנים עשר יסודות זוהו באופן עקבי במרבית הדגימות. מבין אלה התמקדנו בנחושת (Cu), עופרת (Pb) וברזל (Fe) כסממנים של תעשיית מתכת, ובאשלגן (K), זרחן (P) וסידן (Ca) כסממנים של פעילויות אנושיות אחרות. כדי ליצור תיאור ויזואלי של זיהומי הקרקע, מוצגים ריכוזי היסודות הנ״ל בצורה מרחבית ביחס לטופוגרפיה של הגבעה, ערמות הסיגים והחומה ההיקפית (איורים 10, 11 ו-12).

ניכר כי ערכי הנחושת (ממוצע {מ׳}=0.38, חציון {ח׳}=0.201, סטיית תקן {ס״ת}=0.69) והעופרת (מ׳=0.026, ח׳=0.015, ס״ת=0.044) פוחתים באופן משמעותי בחלקה הדרומי של הגבעה (איור 10). פיחות זה תואם את הפיזור הגיאוגרפי של הממצא הקרמי, ערימות הסיגים ומבני האבן המרוכזים ברובם בשני השלישים הצפוניים של הגבעה (ראו למשל Ben-Yosef 2016). משום כך הקשר בין התעשייה המטלורגית לבין ריכוזים גבוהים של נחושת ועופרת בקרקע הוא מובהק. נוסף על כך, מקדם המתאם הגבוה שנמדד בין שני היסודות (r=0.88) מצביע על מקור משותף (בהתאמה להבנת אופי הבצר ממחקרים גיאולוגים ואחרים).

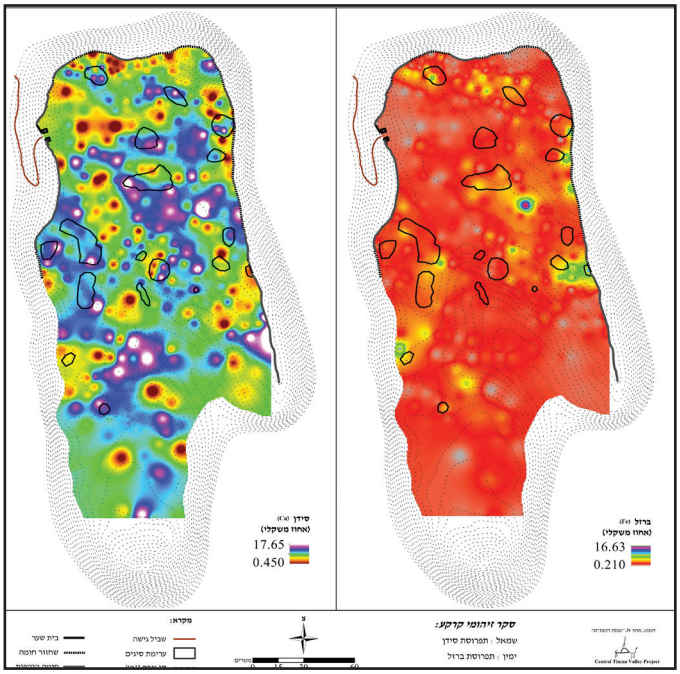
מרבית ריכוזי הברזל (מ׳=2.33, ח׳=1.88, ס״ת=1.89) והסידן (מ׳=6.65, ח׳=6.38, ס״ת=2.7) שנמדדו תואמים את השכיחות הממוצעת בקרקעות לס מדבריות (רביקוביץ 1981). אף על פי כן, אפשר לזהות דפוס מסוים בתפרוסת המרחבית של ריכוזי היסודות הללו. נראה כי ריכוזי הברזל מעט גבוהים יותר בחלקה הצפוני של הגבעה (איור 11), אך דפוס זה אינו מובהק בהשוואה לדפוסים של הנחושת והעופרת. יתר על כן, מקדם המתאם בין ברזל ונחושת (r=0.66) נמוך מזה שנמדד בין נחושת לעופרת. בתוצאות אנליטיות שנמדדו בסיגים מאתר 34, היחס בין ממוצע ריכוזי הנחושת לממוצע ריכוזי הברזל הוא 1:0.049 (Ben-Yosef et al. 2019). לעומת זאת היחס בין ממוצע הנחושת לממוצע הברזל בתוצאות המחקר הנוכחי הוא 1:0.13. תוצאות אלה מצביעות על האפשרות ששברי סיגים מיקרוסקופיים אינם הגורם העיקרי לתפרוסת ריכוזי הנחושת בקרקע, שכן היחסים בין היסודות שונים מאוד בסיגים מבקרקעות. בדומה לברזל גם סידן מופיע בכמות גדולה יחסית בקרקעות לס מדבריות, אולם כמויות הסידן הגבוהות שנמדדו בחלקים שונים בגבעה מצביעות על העשרה ממקורות שאינם טבעיים. ניכר כי הסידן,

לעומת הברזל, מושפע בעיקר מערימות הסיגים, אך לא מהן בלבד (איור 12). מקדם ההתאמה של סידן ביחס לאשלגן (r=0.45) גבוה בהרבה מסידן ביחס לנחושת (r=0.02), ברזל (r=0.216) וזרחן (r=0.074).

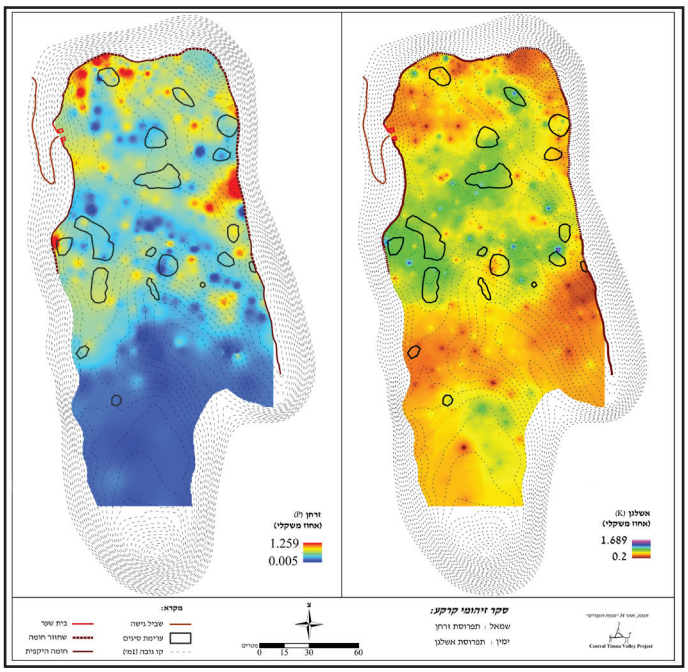
אפשר לראות כי גם ריכוזי הזרחן (מ'=0.304, ח'=0.292, ס"ת=0.164) נמוכים בצורה משמעותית בחלקה הדרומי של הגבעה ביחס לחלקה הצפוני (איור 12), מקדמי ההתאמה בין זרחן לנחושת (r=0.13) ובין זרחן לעופרת (r=0.17) נמוכים, ומצביעים על מקורות שונים; כלומר נראה כי הזרחן מצביע על אזור פעילות אנושית שאינה מטלורגית. ריכוזי האשלגן (מ'=0.596, ח'=0.588, ס"ת=0.286) מצביעים על מגמה מעט שונה ממגמת ריכוזי הזרחן. ריכוזי אשלגן גבוהים נמדדו בעיקר במרכז הגבעה, בהתאמה לריכוזי מבני האבן. לריכוזי האשלגן מקדמי התאמה נמוכים ביחס לריכוזי הנחושת (r=0.19) ולריכוזי הזרחן r=0.13)).



איור 10: התפלגות מרחבית של ריכוזי הנחושת והעופרת באתר 34.



איור 11: התפלגות מרחבית של ריכוזי הברזל והסידן באתר 34.



איור 12: התפלגות מרחבית של ריכוזי האשלגן והזרחן באתר 34.

דיון ומסקנות

במהלך ראשית תקופת הברזל, גדלו ההיקף והעוצמה של ייצור הנחושת בבקעת תמנע באופן דרמטי ביחס לתקופות קודמות. אולם אפילו כאשר בוחנים את אתר ההפקה התעשייתי הגדול ביותר מהתקופה, אתר 34, אנו מבחינים בעדות מועטה ביותר לזיהום מתכתי מעבר לערימות השפכים והסיגים עצמן. הפיחות המשמעותי בזיהומי קרקע המקושרים לתהליך הפקת הנחושת בחלקה הדרומי של הגבעה, היכן שגם אין עדויות ארכיאולוגיות לאותה פעילות, מצביע על רדיוס השפעה נמוך שכנראה לא עלה על כמה עשרות מטרים מהכבשנים וערימות הסיגים עצמן.

הפיחות המשמעותי ברמת זיהום הנחושת והעופרת רומז על כך שהייתה לו השפעה מועטה על האוכלוסייה שעבדה והתגוררה באזור, בתקופה שבה האתר היה פעיל בראשית תקופת הברזל ובוודאי בתקופות מאוחרות יותר. להבדיל מתמנע, לחופרים בפינאן הייתה הזדמנות לבחון שרידי עצמות ושיניים של האוכלוסייה שהפיקה את הנחושת. בדיקות אלו הובילו אותם למסקנה שרק אלו שעסקו ישירות בהפקת הנחושת (ואולי גם בכרייה) היו בסיכון מוגבר להרעלת עופרת הקשורה לחשיפה לאבק רעיל, אדים וגזים. החוקרים שיערו שמרבית האוכלוסייה עסקה בעבודות שתמכו בתעשיית הנחושת, ובהתאם גם נחשפו הרבה פחות לפסולת הרעילה. תוצאות בדיקות הקרקע שביצענו בתמנע מחזקות את התמונה הזו, ומראות שהזיהום ממוקד ומוגבל בהיקפו לאזורים שבהם עסקו באופן ישיר בהפקת מתכת.

תוצאות בדיקות דגימות הקרקע עולות בקנה אחד עם אלו של נב ואחרים (Knabb et al. 2016: 99), שהטילו ספק בהשקפה הטוענת שתעשיות מטלורגיות קדומות בהכרח מפירות את ההרמוניה והאיזון הטבעי בסביבתם. בהסתמך על המידע העדכני מפינאן ומתמנע, אנו טוענים שגם הניצול האינטנסיבי ביותר של מקורות הנחושת באזורים אלו בעת העתיקה, שמתבטא בשיא ההפקה בראשית תקופת הברזל, גרם לנזק סביבתי מינימלי שאינו בר השוואה לחברות מתועשות בעולם המודרני. האחרונות היו ככל הנראה השראה לפרשנויות דרמטיות יותר של העדות הארכיאולוגית.

התוצאות מראות שהמקור העיקרי של זיהום הקרקע קשור לשחרור חלקיקים קטנים של נחושת ועופרת בתהליך ההפקה, בזמן שהאתר היה פעיל. נראה שכתישת הבצר – ככל הנראה עד כדי אבקה (Greener and Ben-Yosef 2016) והפעלת הכבשנים הן עיקר הפעילויות המזהמות. אחרי היווצרותם, סיגי נחושת לא תרמו לזיהום, ונראה שאין "תהליך מתמשך של שחרור מזהמים לקרקע" מהסיגים או מפסולות אחרות (שברי הכבשנים למשל).

יסודות נוספים הקשורים לפעילויות אנתרופוגניות לא-מטלורגיות נמצאו בריכוזים גבוהים בצורה ניכרת גם כן במרכז ובצפון הגבעה. אנו בחרנו להציג את תוצאות התפוצה של

היסודות זרחן (P), אשלגן (K), וסידן (Ca) הקשורים לפעילויות אנושיות, כגון הצטברות של אפר ביולוגי, שפכים אורגניים ועצמות. אלה יכולים להיחשב כפעילויות אנושיות יומיומיות. עצים וגללים של חיות משק היו חומרי בעירה שכיחים בתקופות הברונזה והברזל באזורנו (Gur-Arieh et al. 2014; Ebeling and Rogel 2015), וההצטברות של אפר ביולוגי כתוצאה של עיבוד מזון, חימום ופעילויות ביתיות ותעשייתיות נוספות תועדו באתרים קדומים רבים אחרים בדרום הלבנט.

שרידי הזרחן באתר 34 נראים קשורים בין השאר בתפרוסת מכלאות לחמורים וצאן, כפי שהתגלו משני צידי בית השער (Ben-Yosef et al. 2017), היכן שהתגלתה בחפירה שכבת גללים. ריכוז גבוה נראה בבירור באזור הסמוך לחפירות, ובאקסטרפולציה אפשר לשער שריכוזים גבוהים אחרים מציינים מקומות נוספים שבהם הוחזקו חמורים וחיות משק נוספות. הריכוזים הגבוהים ביותר נמצאו בסמוך לחומה בשלושה מקומות שונים, הנרחב מביניהם בפינה הצפון מערבית של האתר לא רחוק מבית השער. החמורים שימשו לאספקת חומרי הגלם, מזון ומים לראש הגבעה ולנשיאת התוצר (מטילי הנחושת) מהגבעה לשווקים. אחזקתם בסמוך לחומה ולא בלב הפעילות המטלורגית הגיונית, ונראה שכתמי הזרחן בלב הגבעה קשורים בפסולות אורגניות שונות, ולא בהכרח במכלאות. אשלגן בריכוז גבוה נמצא בכתמים מוגדרים וקטנים יחסית בחלק הצפוני של הגבעה, ובשלב זה אופי הפעילות אותה הם מייצגים אינו לגמרי ברור (ההתאמה לפיזור הזרחן חלקית בלבד).

סידן קשור גם הוא לפעילות אנושית באתרים ארכיאולוגיים (Oonk et al. 2009). הסידן יכול היה להגיע משיירי מזון, כמו גם ממיקרו-שבבים מאבנים קרבונטיות שהובאו לאתר. אולם אופי הפיזור שלו באתר מצביע על כך שהוא מייצג אפר שמקורו ככל הנראה בכבשנים המטלורגיים, במיוחד באזורים בהם ישנה התאמה בינו ובין פיזור האשלגן (וראו דיון בנושא לגבי מקור הסידן בסיגים ב-Ben-Yosef & Yagel 2019).

מחקרים על מכרות ומרכזי התכה מודרניים הראו קשר חזק וברור בין הקרבה למקור הזיהום ובין ריכוזים של עופרת בקרקעות וביבולים (לדוגמה, Pruvot et al. 2006; Qu et al. 2012). במחקר שנערך בסביבתם של מכרות שנעזבו לא מכבר בלימני, קפריסין, נמצאו ריכוזים גבוהים של זיהום, ואף הומלץ לאסור על כל פעילות חקלאית באזור (Anastasis et al. 2017). מחקרים אלו הסיקו ששפכים וערימות סיגים מודרניים צריכים להיות מוגדרים כאיומים סביבתיים חמורים, כיוון שכמויות לא מבוטלות של מתכות כבדות יכולות להתפזר בסביבתם על ידי אבק ובליית קרקע. זיהומים אלו משפיעים על מקורות המים, הקרקעות והמערכות האקולוגיות. אלו מהווים סיכונים חמורים לבריאות בני האדם.

אף שמחקרים על זיהום תעשייתי בן זמננו יכולים לעיתים לסייע לנו לפרש את הממצא הארכיאולוגי, אנו חייבים להדגיש שעל אף אופייה המרשים אי אפשר להשוות את תעשיית הנחושת הקדומה בערבה לתעשיות מודרניות (ראו גם אצל Knabb 2019). בתעשיות מודרניות רמת ניצול המשאבים והפגיעה בסביבה היא בדרך כלל משמעותית ביותר, הטכנולוגיות מזהמות הרבה יותר (במקומות רבים המיצוי נעשה בשיטות הידראוליות, הכוללות מים וחומצות), ובהתאם ההשפעה על האוכלוסייה המתגוררת בקרבת מקום הרסנית לאין ערוך יותר. מחקרים עתידיים יוכלו לשפר את הבנתנו לגבי אופי ההשפעה של המטלורגיה הקדומה על הסביבה והאדם, ואף לבחון את השינויים בין התקופות השונות וההבדלים בין סוגי תעשיות (אתרי כרייה, אתרי הפקה ראשוניים, סדנאות מטלורגיות בתוך יישובים, סוג המתכת). כפי שהראנו, הכלי הדיגיטלי המרכזי שהוצג פה – מיפוי ריכוזים של יסודות כימיים באמצעות סקר קרקע ברזולוציה גבוהה (dGPS) ואינטרפולציות ליצירת קונטורים ב-GIS – הוא אמצעי יעיל לניתוח הפיזור המרחבי של הזיהום באתר הנחקר; ייצור מפות כאלו לאתרים נוספים (מסוגים שונים ומתקופות שונות) יאפשר לזהות דפוסים ומגמות בצורה יעילה.

תודות

המחקר הנוכחי נתמך על ידי הקרן הלאומית למדע, מענק מס׳ 1880/17#, ופרס כדר למצוינות מחקרית (2018), שניהם לא.ב.-י. הכותבים מבקשים להודות לנתנאל דיטון על העזרה בהרצת הבדיקות ולצוות משלחת חפירות תמנע על התמיכה בשלבים השונים של עבודת השטח והמעבדה.

ביבליוגרפיה

רביקוביץ, ש. תשמ"א. 1981. *"קרקעות ישראל. התהוותן, טבען ותכונותיהן"*. הוצאת הקיבוץ המאוחד, תל-אביב.

Ash, C., Botůvka, L., Tejnecký, V., Nikodem, A., Šebek, O. & Drábek, O. (2014). Potentially toxic element distribution in soils from the Ag-smelting slag of Kutná Hora (Czech Republic): descriptive and prediction analyses. *Journal of Geochemical Exploration* 144: 328–336.

Anastasis, C., Theologides, C.P., Costa, C., Kalavrouziotis, I.K. & Varnavas, S.P. (2017). Assessment of toxic heavy metals concentrations in soils and wild and cultivated plant species in Limni abandoned copper mining site, Cyprus. *Journal of Geochemical Exploration* 178: 16-22.

Beherec, M.A., Levy, T.E., Tirosh, O., Najjar, M., Knabb, K.A. & Erel, Y. (2016). Iron Age nomads and their relation to copper smelting in Faynan (Jordan): trace metal and Pb and Sr isotopic measurements from the Wadi Fidan 40 cemetery. *Journal of Archaeological Science* 65: 70-83.

Ben-Yosef, E., Shaar, R., Tauxe, L. & Ron, H. (2012). A new chronological framework for Iron Age copper production at Timna (Israel). *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* 367: 31-71.

Ben-Yosef, E., Langgut, D. & Sapir-Hen, L. (2017). Beyond smelting: new insights on Iron Age (10th c. BCE) metalworkers community from excavations at a gatehouse and associated livestock pens in Timna, Israel. *Journal of Archaeological Science: Reports* 11: 411-426.

Ben-Yosef, E. & Shalev, S. (2018). "Social archaeology in the Levant through the lens of archaeometallurgy", in: A. Yassur-Landau, E. Cline & Y.M. Rowan (eds.), T*he Social Archaeology of the Levant: From Prehistory to the Present*, Cambridge, pp. 536-550.

Ben-Yosef, E., Liss, B., Yagel, O. A., Tirosh, O., Najjar, M. & Levy, T. E. (2019). Ancient technology and punctuated change: detecting the emergence of the Edomite Kingdom in the southern Levant. *PloS one* 14(9): e0221967.

Ben-Yosef, E. (2016). Back to Solomon's era: results of the first excavations at 'Slaves' Hill' (Site 34, Timna, Israel). *Bulletin of the Schools of Oriental Research* 376: 169-198.

Ben-Yosef, E. (2018). "The Central Timna Valley Project: research design and preliminary results", in: E. Ben-Yosef (ed.), *Mining for Ancient Copper: Essays in Memory of Professor Beno Rothenberg,* Tel Aviv, pp. 28-63.

Beyth, M., Segev, A. & Bartov, Y. (1999). *Be'er Ora geological map (Israel Geological Survey)*, Jerusalem.

Beyth, M., Segev, A. & Ginat, H. (2013). Stratigraphy and Structure of the Timna Valley and Adjacent Ancient Mining Areas (Geological Survey of Israel), Jerusalem.

Craddock, P.T. (1995). *Early Metal Mining and Production,* Washington D.C.: Smithsonian University Press.

Ebeling, J. & Rogel, M. (2015). The tabun and its misidentification in the archaeological record. *Levant* 47: 328–349.

Erel, Y., Dayan, U., Rabi, R., Rudich, Y. & Stein, M. (2006). Trans-boundary transport of pollutants by atmospheric mineral dust. *Environmental Science & Technology* 40(9): 2996-3005.

Glueck, N. (1935). *Explorations in Eastern Palestine, II*. Annual of the American Schools of Oriental Research, Vol. 15). Pp. 1-288.

Grattan, J., Gilbertson, D. & Hunt, C. (2007.) 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. *Journal of Archaeological Science* 34(1): 83-110.

Grattan, J.P., Gilbertson, D.D. & Kent, M. (2013). Sedimentary metal-pollution signatures adjacent to the ancient centre of copper metallurgy at Khirbet Faynan in the desert of southern Jordan. *Journal of Archaeological Science* 40: 3834-3853.

Greener, A. & Ben-Yosef, E. (2016). The ground stone assemblage of a metal workers community: An unexplored dimension of Iron Age copper production at Timna. *Journal of Lithic Studies* 3(3): 191-220.

Gur-Arieh, S., Shahack-Gross, R., Maeir, A.M., Lehmann, G., Hitchcock, L.A. & Boaretto, E. (2014). The taphonomy and preservation of wood and dung ashes found in archaeological cooking installations: case studies from Iron Age Israel. *Journal of Archaeological Science* 46: 50–67.

Horák, J. & Hejcman, M. (2016). 800 years of mining and smelting in Kutná Hora region (Czech Republic) – spatial and multivariate meta-analysis of contamination studies. *Journal of Soils and Sediments* 16(5): 1584-1598.

Hunt, C. & El-Rishi, H. (2010). "Human paleoecology in the ancient metal-smelting and farming complex in the Wadi Faynan, SW Jordan, at the desert margin in the Middle East", in: I.P. Martini & W. Chesworth (eds.), *Landscapes and Societies,* New York, pp. 121-134.

Hunt, A.M.W. & Speakman, R.J. (2015). Portable XRF analysis of archaeological sediments and ceramics. *Journal of Archaeological Science* 53: 626-638.

Levy, T.E., Najjar, M. & Ben-Yosef, E. (2014). New Insights into the Iron Age Archaeology of Edom, Southern Jordan: Surveys, Excavations, and Research from the University of California, San Diego

- Department of Antiquities of Jordan, Edom Lowlands Regional Archaeology Program (ELRAP) (Vols. I-II), Los Angeles: Cotsen Institute of Archaeology.

Knabb, K.A., Erel, Y., Tirosh, O., Rittenour, T., Laparidou, S., Najjar, M. & Levy, T.E. (2016). Environmental impacts of ancient copper mining and metallurgy: multi-proxy investigation of human-landscape dynamics in the Faynan Valley, southern Jordan. *Journal of Archaeological Science* 74: 85-101.

Knabb, K.A. (2019). Human and environmental impacts of ancient copper metallurgy: a case study from southern Jordan. *Current Anthropology* 60(6): 840-848.

Oonk, S., Slomp, C.P. & Huisman, D.J. (2009). Geochemistry as an aid in archaeological prospection and site interpretation: current issues and research directions. *Archaeological Prospection* 16(1): 35-51.

Pigott, V. (1996). "Near Eastern archaeometallurgy: modern research and future directions", in: Cooper, J.S. & G.M. Schwartz (eds.), *The Study of the Ancient Near East in the 21st Century*, Winona Lake, Indiana, pp. 139-176.

Pruvot, C., Douay, F., Herve, F. & Waterlot, C. (2006). Heavy metals in soil, crops and grass as a source of human exposure in the former mining areas. *Journal of Soils and Sediments* 6(4): 215-220.

Pyatt, F.B. & Grattan, J.P. (2001). Some consequences of ancient mining activities on the health of ancient and modern human populations. *Journal of Public Health* 23(3): 235-236.

Pyatt, F.B., Amos, D., Grattan, J.P., Pyatt, A.J. & Terrell-Nield, C.E. (2002). Invertebrates of ancient heavy metal spoil and smelting tip sites in Southern Jordan: their distribution and use as bioindicators of metalliferous pollution derived from ancient sources. *Journal of Arid Environments* 52(1): 53-62.

Pyatt, F., Pyatt, A., Walker, C., Sheen, T. & Grattan, J. (2005). The heavy metal content of skeletons from an ancient metalliferous polluted area in southern Jordan with particular reference to bioaccumulation and human health. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60(3): 295-300.

Rothenberg, B. (1990). *The Ancient Metallurgy of Copper: Archaeology, Experiment, Theory.* Researches in the Arabah 1959-1984 (Vol. 2), London: London Institute for Archaeo-Metallurgical Studies.

Rothenberg, B. (1999). Archaeo-metallurgical researches in the southern Arabah 1959-1990. Part 2: Egyptian New Kingdom (Ramesside) to early Islam. *Palestine Exploration Quarterly* 131: 149-175.

Sapir-Hen, L. & Ben-Yosef, E. (2014). The socioeconomic status of Iron Age metal workers: animal economy in the "Slaves' Hill", Timna, Israel. *Antiquity* 88: 775-790.

Smejda, L., Hejcman, M., Horák, J. & Shai, I. (2017). Ancient settlement activities as important sources of nutrients (P, K, S, Zn and Cu) in eastern Mediterranean ecosystems – the case of Biblical Tel Burna, Israel. *Catena* 156: 62-73.

Smejda, L., Hejcman, M., Horák, J. & Shai, I. (2018). Multi-element mapping of anthropogenically modified soils and sediments at the Bronze to Iron Ages site of Tel Burna in the southern Levant. *Quaternary International* 483: 111-123.

Taylor, S.R. & McLennan, S.M. (1995). The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* 33(2): 241-265.

Qu, C.S., Ma, Z.W., Yang J., Liu, Y., Bi, J. & Huang, L. (2012). Human exposure pathways of heavy metals in a lead-zinc mining area, Jiangsu Province, China. *PLoS One* 7(11): e46793.

יישומי מערכות מידע גיאוגרפי וניתוחי פריסה מרחבית ככלי מחקר ארכיאולוגי
אפשרויות ומגבלות – מקרה המבחן של אתרי הרגמים בנגב המזרחי

רועי גלילי ואלי כהן ששון

אוניברסיטת בן גוריון

תקציר

בסקרים שנערכו במהלך השנים 2013–2017 בבקעת ימין שבנגב המזרחי נמצא ריכוז יוצא דופן של מאות רגמים במרחב גיאוגרפי מצומצם יחסית. בדומה לאתרי רגמים רבים במדבריות דרום הלבנט, הוקמו האתרים במקבצים, על רכסים ונקודות גובה טופוגרפיות בולטות, ששיוו להם מראה דרמטי ונראו למרחוק. מניתוח דגמי הפריסה המרחבית של האתרים ומרכיבים טיפולוגיים שנמצאו בהם, באמצעות יישומים מבוססי מערכות מידע גיאוגרפיות (ממ"ג/GIS), אופיינו חמישה טיפוסי אתרים והוצע שהפריסה המרחבית שלהם שיקפה רבגוניות תרבותית וחלוקה טריטוריאלית מורכבת (גלילי 2019). בעבודה זו ביקשנו לבחון באופן השוואתי היבטים סטטיסטיים ומרחביים של שני טיפוסי אתרים, לעמוד על נקודות הדמיון והשוני ביניהם ולנסות ולאפיין את פרופיל הפריסה המרחבית שלהם. מבחינה מתודולוגית התבססה ההשוואה על יישום כלי ממ"ג זהים על שני האתרים וניתוח משתנים אקולוגיים, נופיים ותרבותיים שהשפיעו על מקימי האתרים ועל הדרך שבה התעצבו. אופיים החידתי של אתרי הרגמים הדגיש את מגבלותיהם של ניתוחי ממ"ג ורגישותם ככלי מחקר להיעדר שכבות מידע חשובות, כמו אופי הפולחן, פליאו אקלים ותיארוך. לאור זאת רק חלק מן התוצאות התגלו כמובהקות וניתנות להבנה. להערכתנו לשימוש ביישומי ממ"ג יש פוטנציאל מחקרי מבטיח, אך הוא מחייב שילוב יעיל בין טכנולוגיות ממ"ג ושיטות מחקר קלאסיות דוגמת חפירה וסקר, וכן הבנה ברורה של יתרונות ומגבלות המתודולוגיה.

אתרי רגמים במדבריות דרום הלבנט: תופעה ארכיאולוגית ותופעה נופית

אלפי רגמים מטיפוסים שונים פרושים במדבריות דרום הלבנט בהיקף גיאוגרפי גדול ובתאי שטח שונים ומגוונים. חלק נכבד מן הרגמים נבנו במקבצים מספריים שזכו לכינוי 'אתרי רגמים' או 'שדות רגמים' (היימן תשנ"ח). בחלק ניכר מן המחקרים שעסקו בתופעת אתרי הרגמים דווח על מיעוט ממצאים ובפרט ממצאים מתארכים באתרי הרגמים (Cohen and Dever 1979 Dever 1980; Haiman 1992; כהן 1999: 213, 191). בעבר הוצע שמרבית אתרי הרגמים

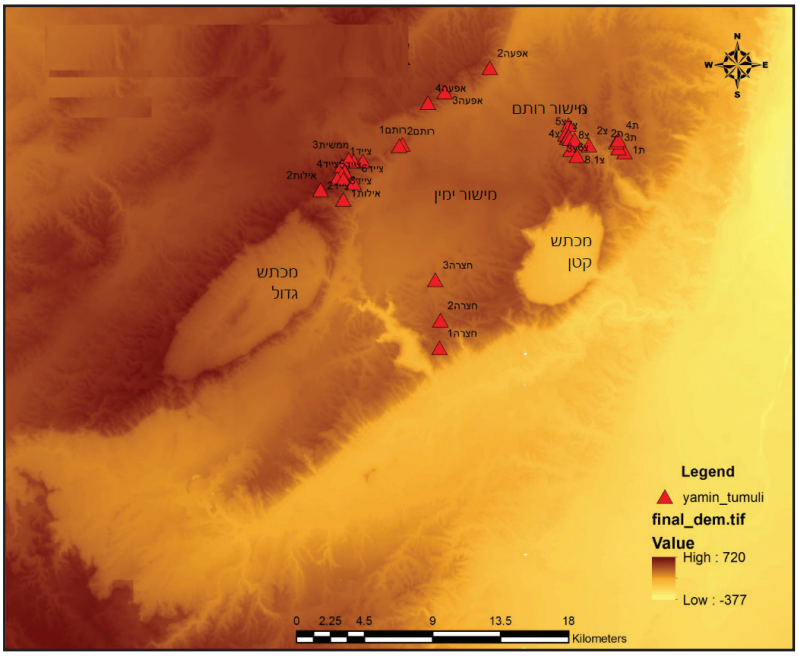
הוקמו בתקופת הברונזה הביניימית (IB – כוכבי תשכ"ז: Glueck 1955, 1957; Haiman 1992; כהן 1999: 213, 256-253). נראה שחלק מן התיארוכים האלו לא התבססו על ממצא מתארך מן האתרים, אלא על הקשרים פרשניים וקרבה גיאוגרפית לאתרי יישוב בני התקופה. אולם ממחקרי השנים האחרונות נראה שאתרי רגמים הוקמו במהלכן של תקופות זמן ארוכות החל מסוף תקופת הניאולית (Abu Azizeh et al 2014; Porat et al 2006; Avner et al 1997) ועד תקופת הברונזה המאוחרת (כהן ששון 2017: 159–161). קיימות גם עדויות ברורות לשימוש משני לקבורה באתרי רגמים בתקופות מאוחרות (Rosen et al 2007; Haiman 1992).

מרבית המחקרים שעסקו בתופעת אתרי הרגמים תיארו טיפולוגיה שהתבססה על השוני במבנה הרגמים (Haiman 1992; כהן 1999: 213; Beit-Arieh 2003: 274). אנו סברנו שהגישה הזו בעייתית, מפני שהיא איננה עולה בקנה אחד עם הממצאים בשטח ועם רגמים מטיפוסים שונים שנמצאו בקרבת מקום זה לזה, בפרט לנוכח תהליכי הבליה האינטנסיביים שאינם מאפשרים לעיתים להבחין בצורת המבנה. על כן הצענו טיפולוגיה שמתבססת על המקדשים הפתוחים ומרכיבים פולחניים נוספים שנמצאו בקרבת אתרי הרגמים (גלילי 2019). מבחינה נופית מוקמו ונבנו מרבית אתרי הרגמים בנגב בנקודות בולטות: פסגות, רכסים ושיאי גובה והיבטים שונים שקשורים לפריסה המרחבית שלהם, תפוצתם, והיחס ביניהם לבין אתרי המגורים שסביבם נידונו בעבר (eg: Haiman 1992; Rosen et al 2007; Abu Azizeh et al 2014). להערכתנו משקפת הבולטות הנופית של אתרי הרגמים במרחבים גיאוגרפיים נרחבים כל כך היבטים רבי חשיבות בקודים התרבותיים של חברות מדבריות, והיא טרם נבחנה כראוי כנושא אוטונומי. בארכיאולוגיה נופית, בפרט בזרם הפנומנולוגי, מיוחסת חשיבות רבה לאופן שבו משפיעה סביבת הקיום על התפתחותן של חברות אנושיות ולאופן שבו מתפתחת תפיסת עולמן (Tilley 2004). המסגרת התיאורטית הזו מספקת להערכתנו כלי מחקר יעילים לבחינת תופעת אתרי הרגמים, בפרט לחשיבות הרבה שמשתקפת בבחירת מיקומם של אתרי הרגמים. דוגמאות מובהקות לתשומת הלב הרבה שניתנה לנושא הזה ניכרות בתאי שטח שונים ומגוונים במדבריות דרום הלבנט: היכרותם העמוקה של מקימי אתרי הרגמים בבקעת תמנע עם הטופוגרפיה והגיאולוגיה של האזור משתקפת בהקמת רגמים בקווי המגע המדויקים שבין תצורות סלע שונות (כהן ששון 2017: 157). באזור Jabal Kabd/Al-Thulaythuwat שבדרום ירדן נבחנה תופעת מקבצי הרגמים, והוצע שהיא קשורה לחייהם של הנפטר וקבוצת הקרובים לו ובעיקר לטריטוריה ולדפוסי הנדידה במרחב שנצפה מהרגם שבו נקבר (Abu Azizeh; et al 2014). באזור בקעת ימין נבחנה פריסתם המרחבית של אתרי רגמים, והוצע שהיא משקפת שונות אזורית ותרבותית ותפיסות מורכבות של חלוקה טריטוריאלית של משאבי קיום (גלילי 2019).

שימוש בכלי מחקר מתחום הממ"ג מתאים להערכתנו לבחינה של תופעת אתרי הרגמים, מפני שהתופעה היא מרחבית במהותה ונופית במאפייניה. כלי הממ"ג מאפשרים לבחון, לנתח ולהצליב בכלים סטטיסטיים כמות גדולה של משתנים ראסטריים ווקטוריים.

אזור המחקר: מאפיינים

רכס חצרה הוא המזרחי ברכסי הקימוט של הר הנגב הצפוני. מבנה הקמר א-סימטרי, מדרונו הצפון-מערבי מתון ואילו הדרום-מזרחי תלול, מתנשא מעל בקעת צין ומשמש לה כגבול טבעי. בצפון-מערב משתפל הרכס אל מישור ימין ומישור רותם. הרכסים שתוחמים את המישורים החוליים הללו בנויים מסלעי גיר מתצורות אבנון תמר וצפית מתקופת הקנומן. סביבת האזור מדברית עד ספר מדברית (ממוצע גשמים של כ-100-50 מילימטרים לשנה) וענייה במקורות מים קבועים (נחליאלי 2008: 8-2). ראשי הרכסים עשירים באתרי רגמים ומעל 1000 רגמים נסקרו בהם, 634 מהם ב 34 אתרים והיתר בודדים (איור 1, גלילי 2019). באזור המחקר הוגדרו חמישה טיפוסי אתרים על בסיס טיפולוגית המרכיבים הארכיטקטוניים ומתקנים שונים שנתגלו בהם. הוצע שפריסת אתרי הרגמים משקפת זיקה טריטוריאלית לבקעות החוליות שבין הרכסים, אזור שהיה אטרקטיבי מאוד כאדמות מרעה לקבוצות שקיימו באזור הזה אורח חיים של נוודות פסטורלית (שם).



איור 1: אתרי בקעת ימין

הנחות עבודה ומתודולוגיה

תופעת אתרי הרגמים מאפיינת את אזור המחקר, אולם הגדרת מספר רגמים מסוים 'כאתר' היא שרירותית. ממצא מאפיין וברור שנתגלה במהלך עבודת הסקר אִפשר הגדרה ברורה של האתרים. במרבית האתרים שנסקרו באזור המחקר (28 מתוך 34) נמצאו בין הרגמים או בסמוך מאוד אליהם מתקנים מן הסוג המכונה בספרות המחקר 'מקדשים פתוחים', Open air Sanctuaries / Open air Shrine, והוצע ששימשו להתוועדויות ולצרכים פולחניים (eg: Avner 2002: 102-101; Rosen 2017: 144-148). ארבעה טיפוסי מקדשים נתגלו באזור המחקר, והגדרת האתרים נעשתה על בסיס הזיקה בין הרגמים למקדשים ומרכיבים ארכיטקטוניים נוספים שנמצאו בקרבתם: מצבות, קווים ומעגלי אבן. שישה אתרים שבהם לא נמצאו מקדשים נסקרו בחלקו הצפוני של אזור המחקר (הר אפעה) ובהם נמצאו קוים ומעגלי אבן, מרכיבים ייחודיים שאפיינו אותם. טיפוסי האתרים השונים נתגלו במקבצים ובקרבת מקום זה לזה (גלילי 2019).

למרות ריבוי אתרי הרגמים והדמיון העקרוני ביניהם בתא השטח המצומצם הזה (כ-180 קמ"ר), שיקף השוני שתואר לעיל מאפיינים תרבותיים שונים, תרבות חומרית שונה וייתכן שגם את נוכחותן של קבוצות אוכלוסייה שונות. מאחר שתופעת אתרי הרגמים היא תופעה נופית, ביקשנו לבחון האם לטיפוסי אתרים שונים יש גם פרופילים אופייניים של פריסה מרחבית. את בחינת הפרמטרים השונים של הפריסה המרחבית ביצענו בפרספקטיבה ארכיאולוגית ומרחבית, מתוך כוונה לאפיין את התפיסה הנופית שעמדה בבסיס בחירת מיקומיהם של הרגמים והמקדשים. הבחינה נעשתה בעזרת כלי מחקר בתוכנת הממ"ג ARC MAPS 10.6. לצורך הבדיקה נבחנו שני אתרי רגמים מטיפוסים שונים ובהם מספר דומה של רגמים (25 ו-26 בהתאמה, איורים 6 ו-11)

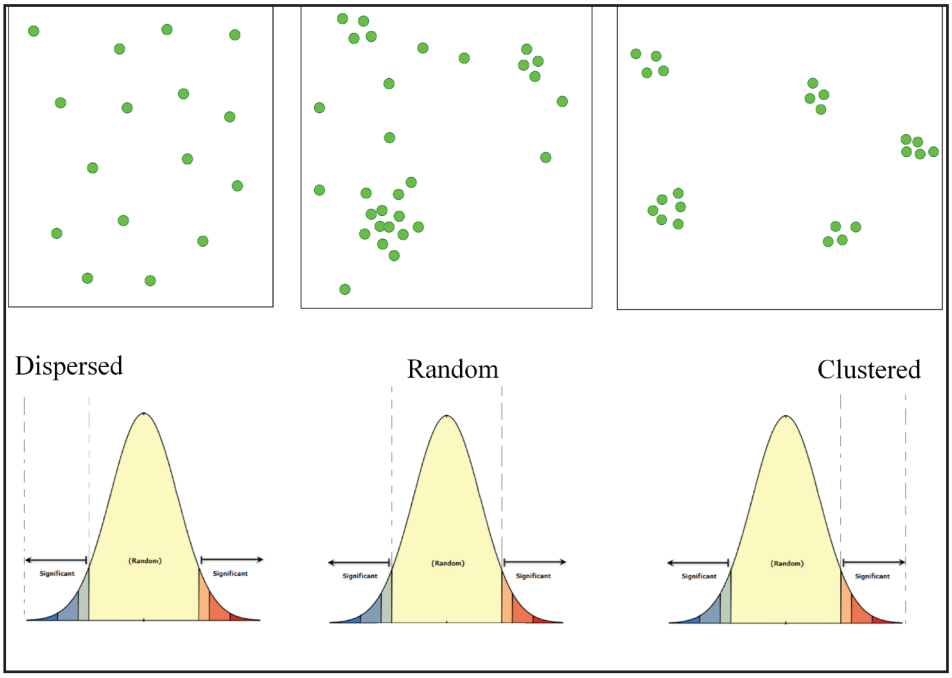
האתרים: תמר 1 מטיפוס אתרי מקדשי הקו – במרכז האתר נמצא מקדש קו יחיד, סוללת אבן נמוכה במידות 9*1 מ' ובגובה 0.80 מ'.

חצרה 1 מטיפוס אתר מקדשי המלבן – בחלקיו הצפוניים של האתר נמצאו שלושה מקדשים מלבניים – חצרות נמוכות מאבנים בנות נדבך יחיד במידות 4*9 6*10 5*8.

כלי המחקר

ANN) Average Nearest Neighbor) 'ממוצע שכן קרוב': בוחן את המרחק בין כל נקודה במרחב לנקודה הקרובה אליה, ומשווה את התוצאה למרחק הצפוי בפיזור רנדומלי של הנקודות במרחב נתון. לפיכך ינוע גרף התפלגות המרחקים בין הנקודות בין פיזור במרחב מצידו האחד לבין פיזור מקובץ (תלוי במשתנים שונים, כגון משתנים סביבתיים, אנושיים או אחרים) מצידו האחר (איור 2). באלגוריתם נעשה שימוש במחקרים ארכיאולוגיים לבחינת השפעת הנתונים

הסביבתיים על פיזור ודגמי פריסה של משתנים שונים, וצוין שיש לו חשיבות מיוחדת בכך שהוא בוחן השפעות שונות ואבחנות מרחביות באופן סטטיסטי (eg: Pinder et al 1979; Bevan and Conolly 2006).

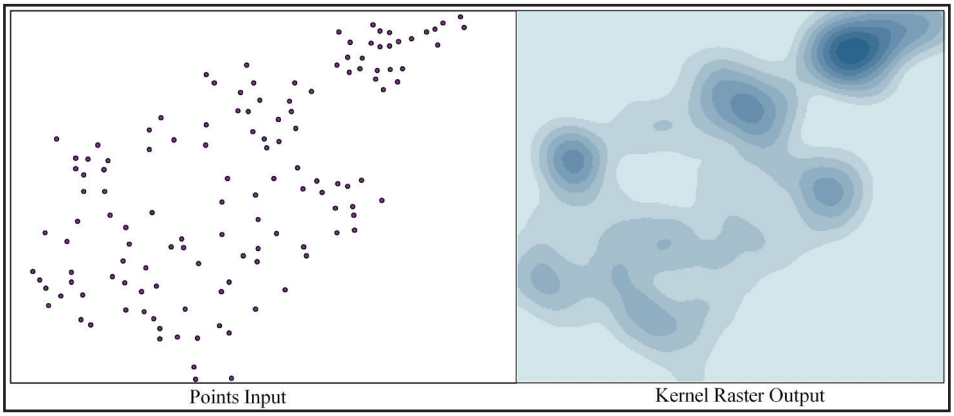


איור 2: ממוצע שכן קרוב – בין פיזור מקובץ לפיזור רנדומלי

גולדסטיין מציינת את הבעייתיות המובנית במבחן הזה בשל הרגישות שלו לגודל המדגם שממנו נגזר קבוע הממוצע הרנדומלי (Goldstein 1981: 58). בעבודה זו הנחנו שמדגם של מעל 20 רגמים הוא מדגם גדול דיו, ועל כן תחמנו והגדרנו את שטח האתר על בסיס מאפיינים טופוגרפיים בולטים (האתרים שוכנים על שלוחות או כיפות בולטות המובחנות מסביבתם) את השטח המתקבל מדדנו והזנו לבסיס הנתונים לביצוע מבחן שכן קרוב.

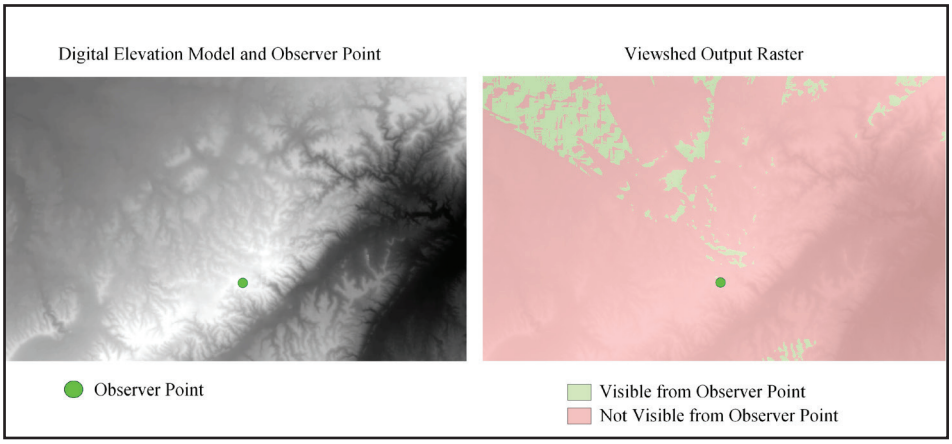
(http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/average-nearest-neighbor.htm)

Kernel Density (Spatial Analyst) מבחן לצפיפות הליבה: כלי החישוב הזה בוחן באופן סטטיסטי את הסתברות הצפיפות של משתנה אקראי. לכל משתנה בשטח נתון ניתן רדיוס קבוע. מספר המשתנים הנוספים שמתקיימים סביבו מחושב על פי רדיוס החיפוש שנקבע. הביטוי הקרטוגרפי של החישובים הסטטיסטיים נותן תמונה ויזואלית של האזורים שבהם מתקבצים מירב המשתנים (איור 3). מבחינת מתודולוגיית הניתוח, חשובות התוצאות בעיקר בנוגע לאופי המתאם בין התוצאות לבין הטופוגרפיה של האתר. הכלי המחקרי הזה מוכר היטב בארכיאולוגיה ונעשה בו שימוש לבחינת תופעות של מרכז, ופריפריה, התקבצות (clustering) ופיזור (Eg: Baxter et al 1997).



איור 3: הביטוי הכרטוגרפי של מבחן צפיפויות הליבה

שטחים נצפים (viewshed): כלי המחקר הזה בוחן את הנראות של נקודות בנוף – השטח שאליו הן צופות ובהתאמה השטח שממנו הן נראות. התוצאה הכרטוגרפית של כלי החישוב הזה מתארת תמונה דו-גונית של פני השטח, ונראים בה האזורים הנצפים מנקודה מסוימת ואזורים שאינם נצפים ממנה (איור 4). במחקרים ארכיאולוגיים הוצע בעבר ששימוש בנראות נופית נעשה כדי ליצור מציאות של שליטה על דרכים או אתרים (Avner et al 1997 Yekutieli 2006) בהתייחסות ישירה לקבורה הוצע שנראות נופית שימשה משאב שמשקף כבוד ויוקרה לנקברים, שקבורה משקפת מציאות של ריבוד חברתי (Al Shorman 2010) וכן שבחירה באתרי קבורה במיקומים בולטים נעשתה במטרה לבסס תביעות בעלות טריטוריאליות (Winter-Livneh et al 2012).

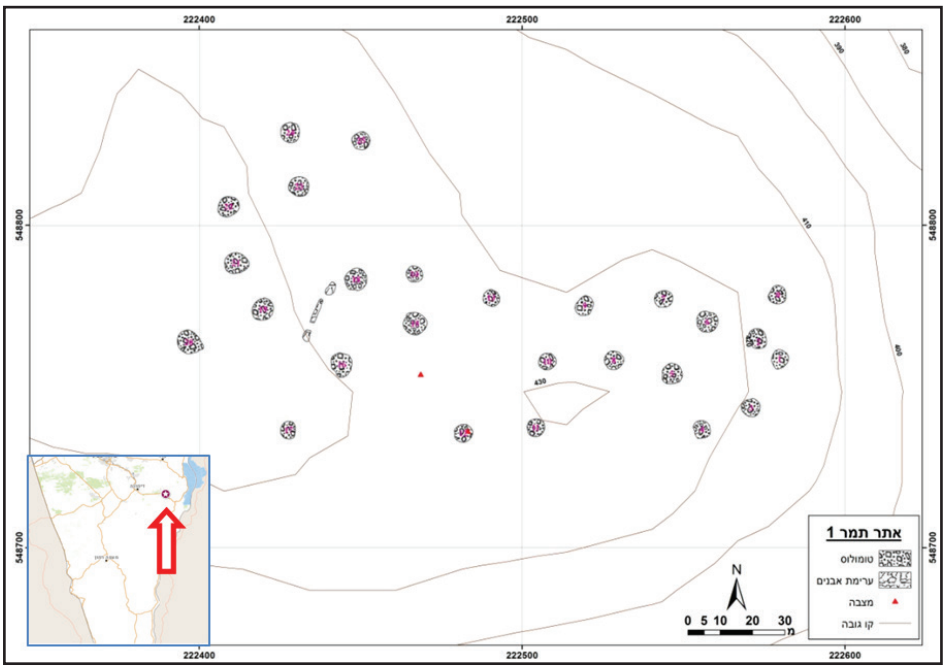


איור 4: תצוגה כרטוגרפית של שטחים נצפים

מקרה מבחן 1: אתר תמר 1

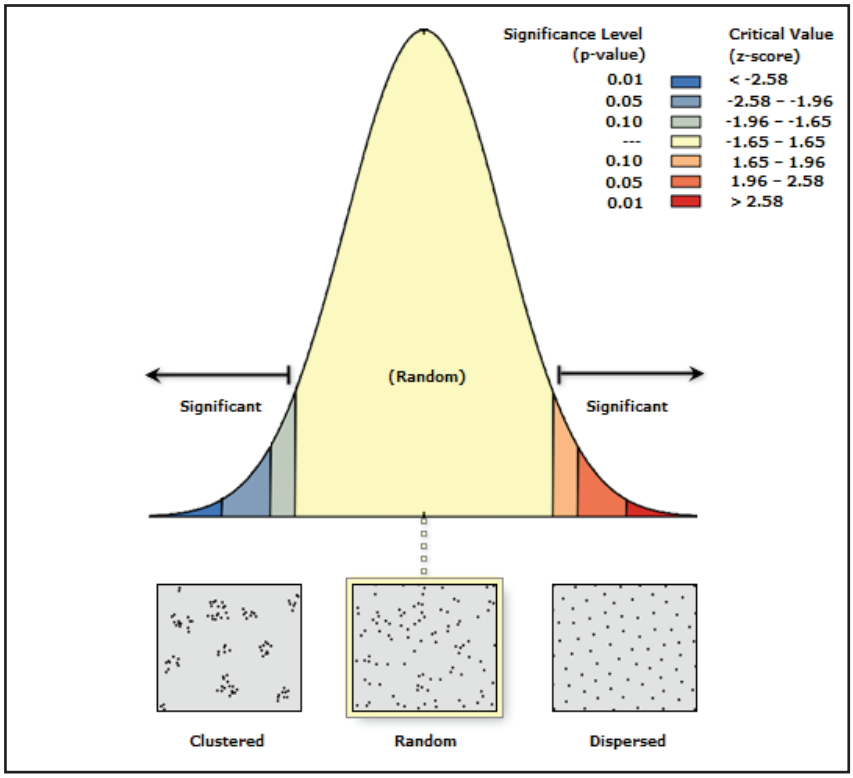
אתר הרגמים תמר 1 (איור 6) ממוקם על שלוחה של סלע משקע גירני מתצורת תמר (מגיל קנומן – חבורת יהודה) בגובה 445 מטרים מעל פני הים, מנגד לאפיקו הרחב של נחל פרס עליון (′בקעת צבאים′), חלק מקומפלקס הרגמים של בקעת ימין. האתר נסקר בשנת 2016 במהלך סקר אתרי הרגמים של בקעת ימין. במרכז האתר קו אבנים מאורך מטיפוס מקדש הקו שציר האורך שלו פונה לאזימוט 18^0 בדומה לרוב מקדשי הקו באזור המחקר (גלילי 2019), והוא מונה 26 רגמים מטיפוס ′גל′ (Haiman 1992). סביבת האזור מדברית-ספר מדברית ומקורות המים הקבועים הקרובים ביותר לאתר נמצאים במרחק של כ-7 ק"מ במורד נחל צפית. באתר נחל צפית שנמצא כ-3 ק"מ מהאתר נחפר אתר בסיס שתוארך לסוף האלף ה-5 לפסה"נ (Knabb et al 2018) אתר מגורים גדול שתוארך לתקופת הניאולית הקדם קרמי ב′ נחפר בנחל אפעה (Borrell et al 2016) כ-7 ק"מ מן האתר. אתרים נוספים מתקופות פרוטוהיסטוריות – ברונזה קדומה וברונזה ביניימית – נחפרו ונסקרו בבאר רטב, הר דימון והר צייד (כהן 1999: 105-91) במרחק 10 ק"מ ומעלה מן האתר. 6 מן הרגמים באתר נשדדו בחיתוך קיר הרגם מהצד עד מרכז הרגם ועד סלע האם. באתר זוהו בבירור רק 2 מצבות ששולבו ברגמים ומתקנים נוספים שנראו כחצרות בחלקם המזרחי של המבנים. מבחינה טיפולוגית מאפיינים המרכיבים הארכיטקטוניים באתר את מרבית אתרי האזור: כל הרגמים באתר הם מטיפוס ′גל′, בדומה ל-60% מן הרגמים באזור המחקר. היחס בין מספר הרגמים למקדש (26:1) דומה לממוצע באתרי האזור (ממוצע של מקדש ל-31.5 רגמים). מקדש הקו מופיע בכ-67% מאתרי הרגמים באזור, ומבחינת מאפייניו הוא דומה מאוד למקדשים אחרים בסביבתו: סוללת אבן בת שלושה נדבכים שגובהה כ-80 ס"מ

וציר האורך שלה פונה לכיוון צפון-צפון מזרח, ו'חצר' מסוקלת מאבנים שפונה לכיוון מזרח-דרום מזרח בחזיתה.



איור 5: אתר תמר 1: תוכנית האתר

Average Nearest Neighbor (ANN): השטח שבין הרגמים נסכם כשהרגמים הקיצוניים מסמנים את גבולותיו, ונמצא ששטחו הכולל 24089.6 מטרים. דגם הפיזור היה רנדומלי במובהק ונמצא במרכז הגרף שבין פריסה פזורה לפריסה מקובצת (איור 7).

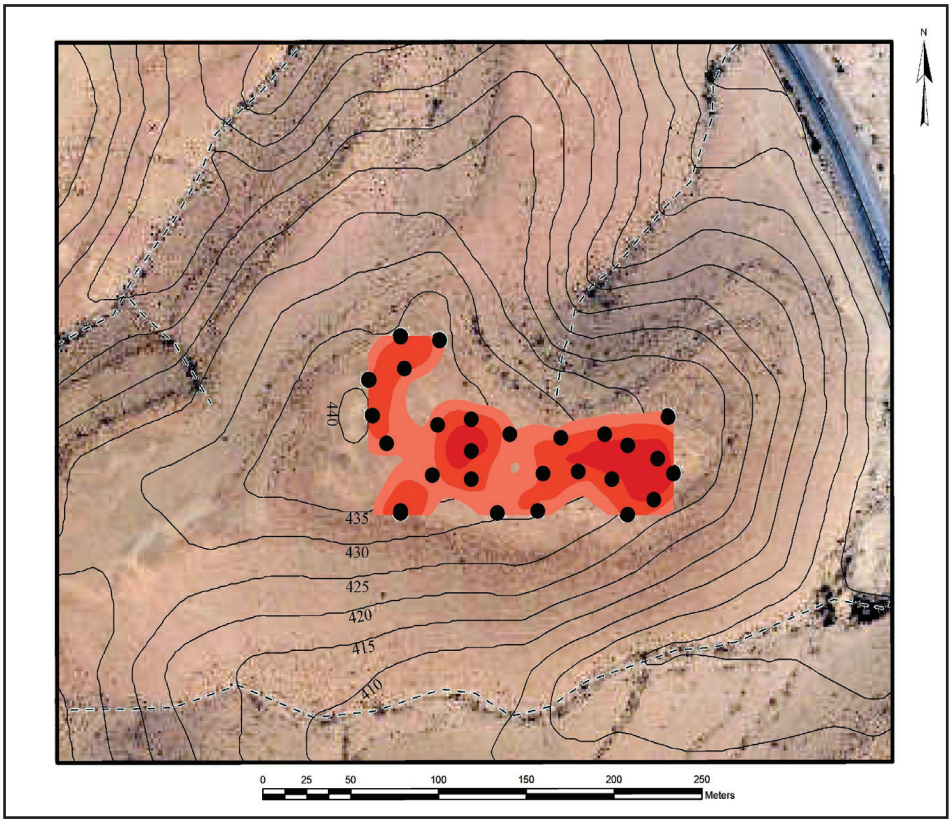


איור 6: אתר תמר 1 דגם הפריסה במבחן ממוצע שכן קרוב

להערכתנו משקפת התוצאה את חשיבותו של המשתנה הטופוגרפי בבחירת מיקום הרגמים בתחומי האתר. הפיזור אקראי לאורך צורתו העקלתונית של קו הרכס ורוב הרגמים מפוזרים על שיאי הגובה במרכז השלוחה. במחקרים שנערכו על אתרי קבורה הוצע שדגמי פיזור מקובץ משקפים שונות והיררכיה חברתית, וייתכן שהיעדרה המוחלט של תופעה כזו בתמר 1 משקפת שוויון והיעדר היררכיה מעמדית (לכל הפחות בנוגע למסורות הקבורה).

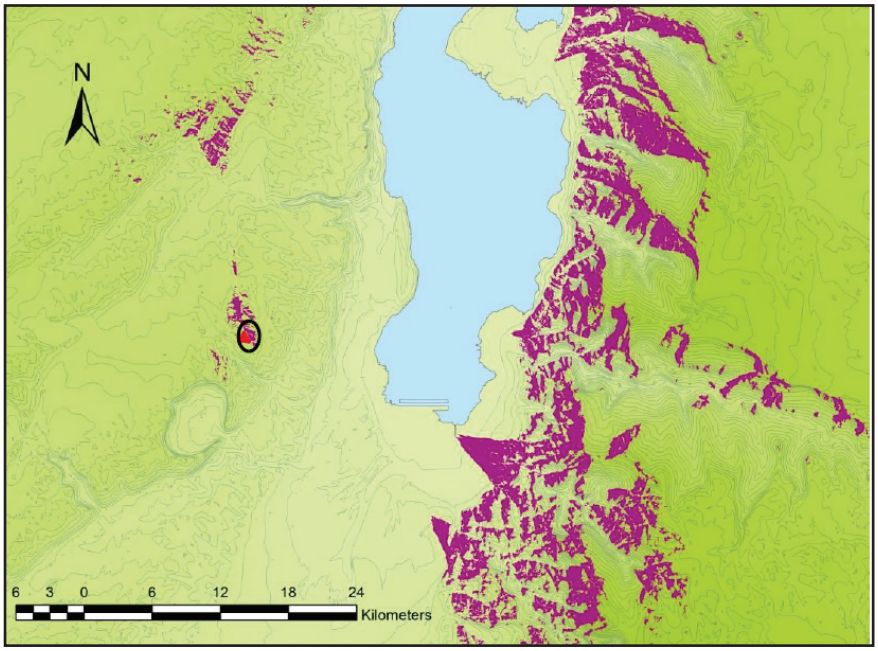
Kernel Density (Spatial Analyst) מבחן לצפיפות הליבה: תוצאת מבחן צפיפות הליבה שנעשה על אתר תמר 1 מתארת באופן ויזואלי את ריכוז הרגמים על ארבע נקודות על מרכז השלוחה, לאורך שיאי הגובה של הרכס (איור 7). יש להתייחס בזהירות לנתון הזה שתקפותו הסטטיסטית נמוכה יחסית, מאחר שדגם הפיזור הוא כאמור רנדומלי במובהק. להערכתנו יש לבחון את מסגרת הנתונים ואת התמונה שהיא מייצרת, בעיקר בהתייחס לטופוגרפיה של האתר. מהבחינה הזו נראה שריכוזי הרגמים לאורך השלוחה מייצרים דגם פריסה של שדרה (Polyline) רחבה ומקוטעת של רגמים, שנמתחת בין כיפה וכיפה סמויה שנמתחת ממנה על צידה הצפוני של השלוחה. נראה שדגם הפריסה הזה משקף את החשיבות שיוחסה לתצפית אל ערוצו של

נחל פרס עליון (בקעת צבאים) שנשקף משיאי הגובה של השלוחה. על הכיפה העליונה מוקם גם מקדש הקו ששימש ככל הנראה אתר התכנסות וממנו נשקפים הרגמים והאזור בריטואלים שנערכו באתר.

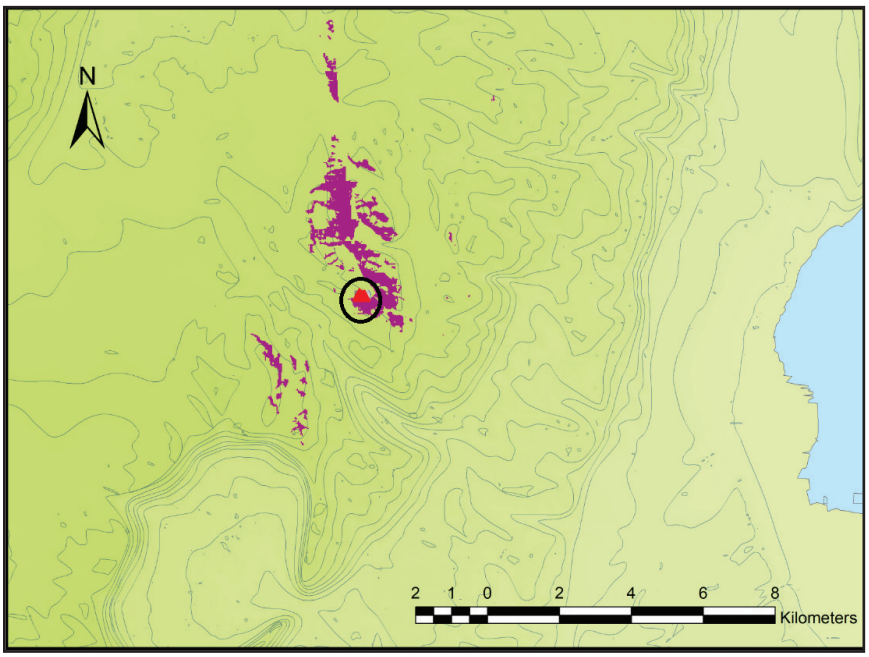


איור 7: אתר תמר 1 מבחן צפיפות הליבה

שטחים נצפים (viewshed): רכסי הרים גבוהים ורחוקים בהרי אדום נצפים מהאתר, אך אלו שטחים שנצפים מאזורים נרחבים מאוד בסביבת האתר. האתר עצמו איננו בולט מספיק כדי שאפשר יהיה לזהות אותו מהם, ועל כן אפשר להניח שלא אליהם כוונה החזות הוויזואלית של האתר. השטח הקרוב שנצפה מסביבת האתר הוא אזור בקעת צבאים, שטח קטן יחסית, מוגדר ומתוחם (איורים 8,9).



איור 8: אתר תמר 1: שטחים נצפים (בוורוד) על גבי מפת גבהים (DEM file). האתר מודגש בעיגול

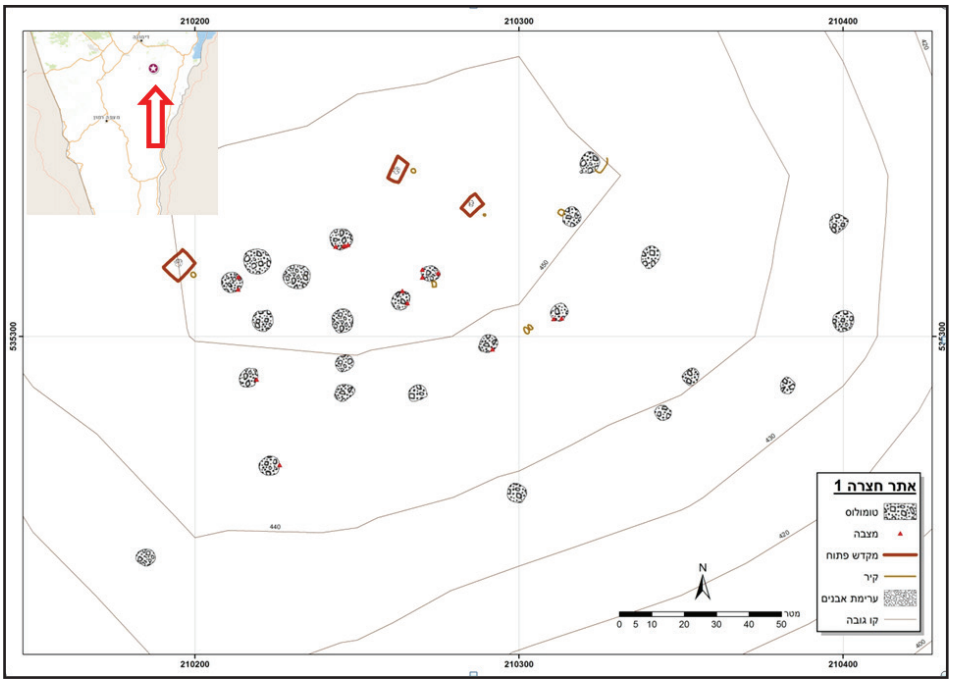


איור 9: אתר תמר 1: שטחים נצפים בקרבת האתר – אזור בקעת צבאים מצפון מערב ורכסים שעליהם אתרי רגמים מדרום מערב. האתר מודגש בעיגול.

מסביבת האתר נצפים רגמים באתר תמר 2 הסמוך, ורגמים בודדים מקבוצת אתרי צפית שנמצאים ממערב. אתרי יישוב מוכרים לא נצפים מן האתר.

מקרה מבחן 2: אתר חצרה 1

אתר חצרה 1 ממוקם על חלקו המערבי של רכס חצרה, על כיפת אבן גיר מתצורת תמר (מגיל קנומן) בגובה של 455 מעל פני הים, ומונה 25 רגמים (איור 10). האתר נסקר בשנת 2016 במהלך סקר אתרי הרגמים של בקעת ימין (גלילי 2019). בחלקו העליון של האתר פזורים מצפון וצפון-מערב לרגמים שלושה מקדשים פתוחים 'מלבניים' (Type 2 - Avner 2002: 100). במקדשים וברחבה שנמצאת ממזרח להם נמצאו מעגלי אבן בני נדבך יחיד בקוטר של 50–70 ס"מ. הרגמים שבאתר סווגו על סמך הטיפולוגיה של היימן (Haiman 1992) לשני טיפוסים: ה'בנוי' (3 רגמים) ורגם 'גל' (22 רגמים). בשמונה מן הרגמים שולבו מצבות במבנה הרגם (סך הכול 16 מצבות) ובשלושה מן הרגמים נבנו בחזיתם מתקני אבן נמוכים, 'חצרות' (גלילי 2019).

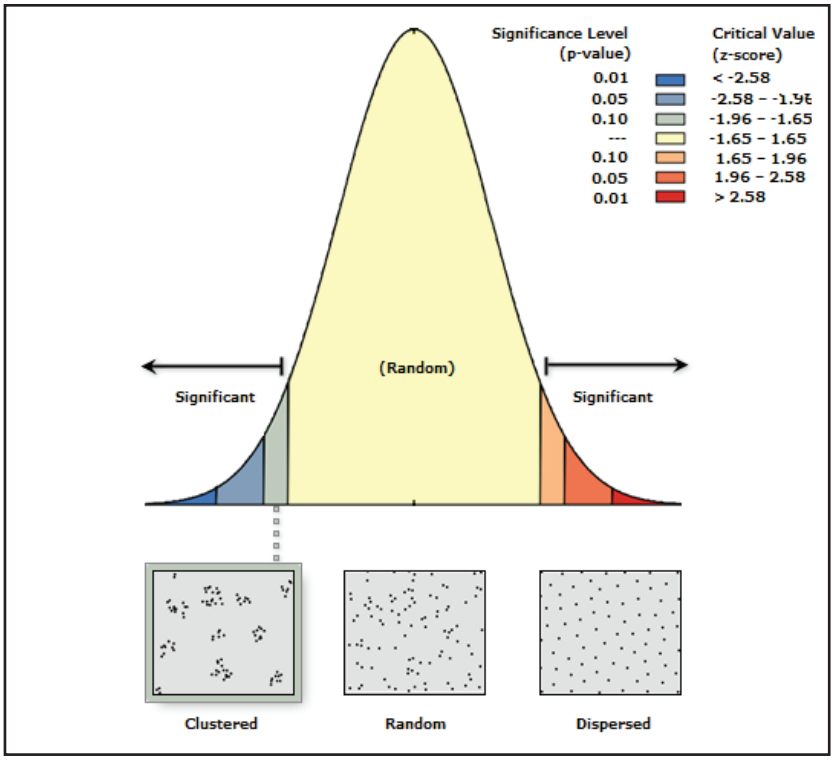


איור 10: אתר חצרה 1 תוכנית האתר

מספר מאפיינים מייחדים את אתר חצרה 1 משאר אתרי הרגמים שבקרבתו:

- מבחינה גיאוגרפית האתר הוא הדרומי באתרי בקעת ימין ונמצא מדרום לשיא קו הגובה של רכס חצרה.
- האתר נמצא בתחום השטחים הנצפים משאר אתרי הרגמים בבקעת ימין והוא מרוחק מריכוזי רגמים סמוכים, כ 2.5 קילומטרים מאתר הרגמים הקרוב אליו (חצרה 2).
- מבחינה טיפולוגית משתייך האתר לטיפוס אתרי 'מקדש המלבן', שהוא הנדיר באתרי בקעת ימין (גלילי 2019). האתר מתאפיין בריבוי מרכיבים ארכיטקטוניים: 3 מקדשים פתוחים (מקדש ל-7.66 רגמים לעומת ממוצע של מקדש ל-31.5 רגמים באתרי בקעת ימין); 16 מצבות שולבו במבנה הרגמים (מצבה ל-0.64 רגם לעומת מצבה ל-0.29 רגמים באתרי בקעת ימין); 10 מתוך המצבות (62%) נבנו בחלקו הדרומי של הרגם, וגם הנתון הזה שונה מהותית מרוב המצבות בבקעת ימין ש- 74% מהן נבנו ממזרח לרגמים (גלילי 2019).

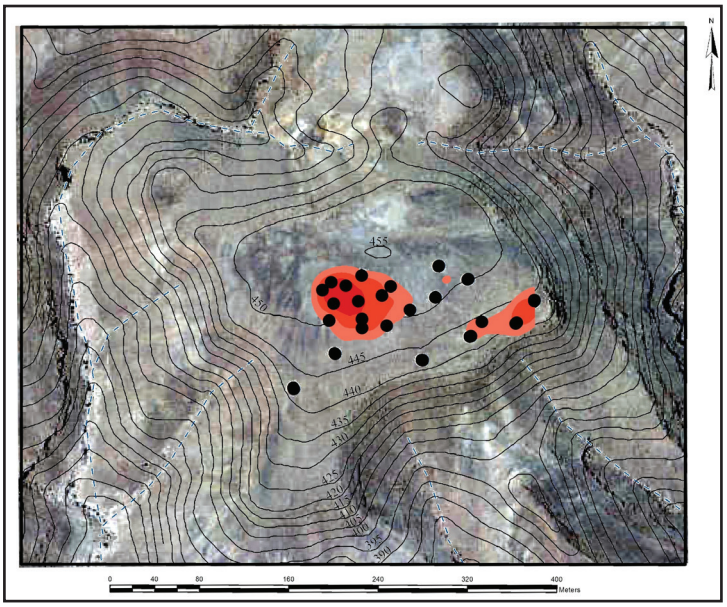
Average Nearest Neighbor (ANN): השטח שבין הרגמים נסכם ונמצא ששטחו הכולל הוא 43,892.8 מטרים, וכי דגם הפיזור מקובץ אם כי ברמת מובהקות נמוכה (0.10 איור 11).



איור 11: אתר חצרה 1 דגם הפריסה במבחן ממוצע שכן קרוב

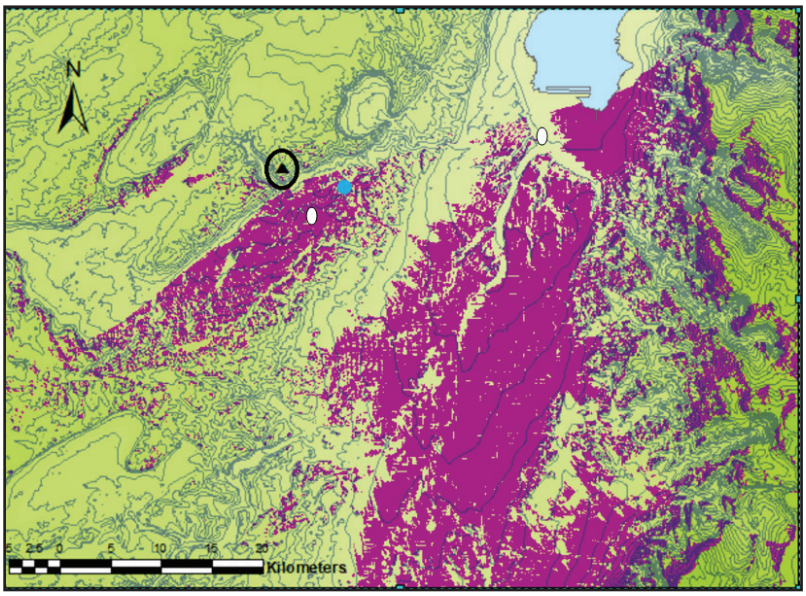
ההיגיון שעומד מאחורי דגם הפיזור הזה איננו ברור: הערכים אינם מובהקים, האתר פרוס על גבי שלוחה רחבה מאוד בעלת מאפייני קרקע דומים (שיפוע קבוע פחות או יותר), והאזורים שנצפים מכל הרגמים דומים מאוד. עם זאת דגם הפיזור שונה מהותית מזה של אתר תמר. הסבר אפשרי לתופעה הוא שבאתר נסקרו שלושה מקדשים (איור 10), ואולי מרכזו השתנה במהלך התקופה שבה התקיימה בו פעילות והאזור הצפון-מערבי הצפוף של האתר הוא האזור שבו נעשה שימוש במהלך התקופה הארוכה ביותר. יצוין כי המקדש המערבי שסביבו מקבץ הרגמים העיקרי הוא גם זה שנמצא במצב השימור הטוב ביותר.

Kernel Density (Spatial Analyst) מבחן לצפיפות הליבה: תוצאת מבחן צפיפות הליבה שנעשה על אתר חצרה 1 מתארת באופן ויזואלי שני ריכוזי רגמים שהוקמו על השלוחה שפונה דרומה (איור 12). אמנם המבחנים הסטטיסטיים לא הצביעו כאמור על דגם פיזור מובהק, אך נראה שהאזור הצפוף באתר, וככל הנראה גם מרכזו, הוא האזור הצפון מערבי שמשתרע סמוך למקדש המערבי. מבחינה מרחבית האזור הזה סמוך למדרגה נמוכה של סלע טבעי שמסתירה לבאים מצפון את נופו המרשים של אגן נחל ציין. אולי הקרבה למקום שבו נחשף המבקר באתר אל הנוף יצרה תפאורה טבעית לריטואלים פולחניים עם ההגעה לאתר, והיא הסיבה שבגינה הפך האזור למרכזו. הסבר נוסף לתופעת ההתקבצות עשוי להיות גודלו של האתר (43,800 מטרים לעומת תמר 1 שמתפרס על פני 24,089 מטרים). תופעה של אתרי רגמים גדולים שמתאפיינים בפיזור במספר מקבצים מועט מוכרת מן המחקר (Abu Azizeh et al 2014).



איור 12: אתר חצרה 1 מבחן צפיפות הליבה

שטחים נצפים (viewshed): שטח נרחב מאוד שנמצא מדרום וממזרח לאתר נצפה מסביבתו ורובו פרוס לרגלי האתר, ללא מחסומים טופוגרפיים. התצפית הדרמטית לכיוון דרום מאפשרת להבחין באלמנטים נופיים בולטים על הרי אדום, אך מהאתר לא נצפים אתרי רגמים או אתרי יישוב מוכרים (איור 13). ראוי לציין שבמרחק כ-5.5 ק"מ מהאתר נצפה היטב אתר פולחן, ובו מקדש מטיפוס המלבן – דומה למקדשי חצרה 1 (את האתר זיהתה והביאה לידיעתנו טלי גיני ואנו מודים לה על המידע). בסמוך למקדש שוכנים גם שני מעיינות השכבה הגדולים, עין ציין ועין עקרבים.



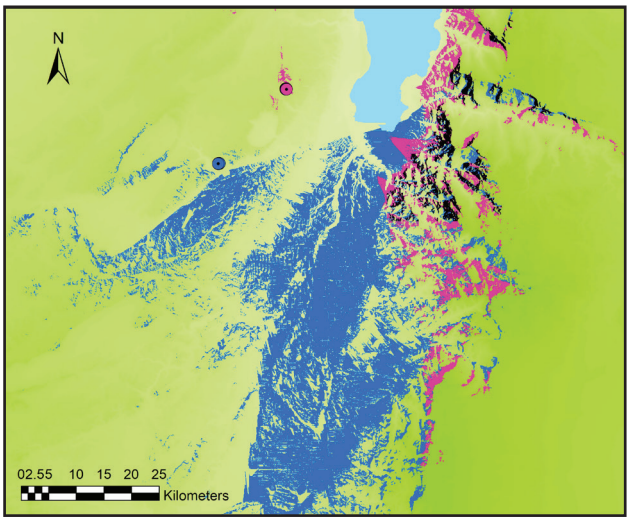
איור 13: אתר חצרה 1: שטחים נצפים (בוורוד) על גבי מפת גבהים (DEM file). האתר מודגש בעיגול, מקדשים פתוחים בנחל סיף ומִצד מזל מסומנים בלבן, מעיינות עין ציין ועין עקרבים בעיגול תכול.

דיון

ההבדלים בדגמי הפריסה הפנימיים של הרגמים בשני האתרים אינם מובהקים. נראה שפיזור הרגמים בשני האתרים רנדומלי או קרוב לרנדומלי. המתאם בין פיזור הרגמים בשני האתרים לבין הטופוגרפיה משקף שונות נמוכה. קשה להסביר בוודאות מה עומד מאחורי העובדות הללו, אך אולי הן מצביעות על היעדרה של היררכיה חברתית בכל הנוגע למסורות הקבורה בשני האתרים. ההבדלים הקיימים בפיזור הפנימי של הרגמים (אף כי אינם מובהקים) וההבדלים המובהקים בגודלם ומאפייניהם של השטחים הנצפים משני האתרים, ברורים דיים כדי להניח שהשיקולים המרחביים שעמדו לנגד עיניהם של מי שהקימו את אתר חצרה 1 מעל ערוצו הרחב של נחל ציין שונים מאלו של מקימי אתר תמר 1.

בראייה אזורית והשוואתית נראה שאתר תמר 1 הוא מקרה מאפיין של אתרי בקעת ימין, בפרט האתרים שנמצאים בחלקה הצפוני של הבקעה ואשר מתאפיינים בדומיננטיות של מקדשי קו (גלילי 2019). היחס בין מספר הרגמים והמקדשים באתר דומה לממוצע האזורי וכך גם דגם הפריסה המרחבי של האתרים האלו מעל לבקעות ומישורי החול של מזרח הנגב. בעבר הוצע שתפוצת אתרי הרגמים משקפת קשר לאתרי יישוב שאתרי הרגמים היו בתי הקברות האזוריים שלהם (כוכבי תשכ"ז; כהן 1999: 281-280). אנו סבורים שהטענה הזו איננה עולה בקנה אחד עם הממצאים באזור המחקר ומיעוט אתרי המגורים. להערכתנו משרטטת פריסת אתרי הרגמים בעיקר סימון חזקה טריטוריאליות באזורים מוגדרים ומתוחמים, והיא משקפת תנועה של קבוצות רועים נוודים ושהייה זמנית באזורי המרעה הפוריים במישור ימין, מישור רותם ובקעת צבאים.

לתפיסתנו מחזקות תוצאות הניתוחים שנערכו את ההנחה הזו, שכן דגם הפריסה של הרגמים בתחומי אתר תמר 1 הושפע בעיקר ממשתנים מרחביים הקשורים לסביבת האתר – המבנה הטופוגרפי של השלוחה, התצפית לכיוון בקעת צבאים ומקדש הקו שנמצא בליבת האתר וממוקם בנקודה הבולטת ביותר. האזור שנצפה מהאתר מתוחם ומצומצם באופן יחסי לשטח שנצפה מחצרה 1 (בפרט בניכוי נופם של הרי אדום הרחוקים – איור 14), ונראה שהעובדה הזו משקפת מציאות של חלוקת שטח מורכבת באזור בקעת ימין. דגם הפריסה המרחבי של הרגמים באתר, כפי שהשתקף בכלי המחקר, נראה כפרופיל מאפיין של טיפוס האתרים הזה. את המתאם בין דפוסי פריסה מרחביים כאלו לאתרי מקדשי הקו במרחב הבקעה יש לבחון בעתיד על אתרי רגמים נוספים מאותם טיפוסים וגם מטיפוסים שונים.



איור 14: שטחים נצפים מחצרה 1 (בכחול) תמר 1 (בוורוד) ושטחים שנצפים משני האתרים (בשחור)

חצרה 1 שונה מהותית משאר אתרי בקעת ימין, והשוני הטיפולוגי שמשתקף מן הממצאים עולה בקנה אחד עם חלק מן ניתוחים המרחביים. 'סט' של ממצאים חומריים מהסוג שמאפיין את האתר (ריבוי מצבות מלבניות, מעגלי אבן ונטייה כיוונית של מרבית המרכיבים הארכיטקטוניים דרומה) איננו מופיע באתרים נוספים במרחב הקרוב, אך מופיע באזורים שונים בנגב ובסיני. אבנר מתאר 51 מקדשים מטיפוס דומה (Avner (2002:100, 5:158 Type 2 עם סט דומה של ממצאים, אולם בשונה מממצאי חצרה 1 אף אחד מהמקדשים לא נמצא בסמיכות מקום לרגמים, וכולם נמצאו מדרום לרכס חצרה (שם). מידע אישי ידוע לנו על שני מקדשים נוספים מן הטיפוס הזה בסביבת האתר (במצד מזל סמוך לצומת הערבה ובנחל סיף מצפון לערוץ נחל ציין, נ.צ מרכזי 534283/212391). טיבו של הקשר בין האתרים האלו לאתר חצרה 1 איננו ברור, אך לנוכח הדמיון נראה שמדובר בווריאציה מסוימת על תרבות חומרית ומסורות פולחניות דרומיות. בעבר הצענו שאתרי רגמים מסמנים ומתחמים טריטוריות של שטחי מרעה שבהם לא מתקיימת נוכחות אנושית קבועה (גלילי 2019). האפשרות הזו נראית פחות הגיונית במקרה של חצרה 1 משתי סיבות: האטרקטיביות של אגן נחל ציין (תא השטח הנצפה מהאתר) כסביבת מחייה פחותה בהרבה מזו של בקעת ימין החולית והפורייה, ואילו השטח שאליו צופה האתר גדול מאוד ולא 'מתוחם'.

ניתוחי הממ"ג (מבחן צפיפויות הליבה וממוצע שכן קרוב) לרגמים מתארים דגם פיזור מרחבי מקובץ (clusterd) באופן לא מובהק. ההסברים שהצענו לתופעה הזו אינם מרחביים דווקא אלא קשורים לאופי הפעילות שהתקיימה באתר ואולי גם למאפיינים טופוגרפיים מקומיים (שדורשים בסיסי מידע מאוד מפורטים, כמו שכבות גובה ברזולוציה של כ-0.5 מטרים). השטח הנצפה מהאתר (viewshed) רחב מאוד ולא מתוחם, מדרום הערבה ועד הרי אדום ומואב. לכך יש להוסיף את הדמיון לאתרי רגמים ופולחן מהמרחב הדרומי, בפרט המקדש הפתוח בנחל סיף שנראה היטב מן האתר (איור 15).

איור 15: חצרה 1 והמקדש בנחל סייף – קווי ראייה ופרופיל גבהים.

קשה לקבוע מדוע מוקם אתר חצרה 1 מעל אגן הניקוז של נחל ציין, ומה היה כוח המשיכה של האזור הזה עבור מקימיו. אולי הפרעות מודרניות, כמו תקופות יובש וכרייה אינטנסיבית בחמישים השנים האחרונות, שינו ומחקו חלק ממאפייניו, ואולי הייתה זו השליטה על מעיינות

עין צין ועין עקרבים. אנו נוטים להניח שמאפייניו הפולחניים של האתר, שצופה אל מרחבי הערבה התיכונה והרי אדום, הדמיון לאתרים דרומיים וקרבתו למעלה עקרבים – אחד מנתיבי התנועה הטבעיים משולי הארץ הנושבת אל המדבר– משקף את הקשר של קבוצת האוכלוסייה שהקימה אותו לאזורים האלו. מעניין שתופעת הפולחן לאל הדרומי ולמרחב המדברי נזכרת במקרא, ונזכיר רק מובאה בודדת שמתייחסת לפולחן מרחבי הדרום ולפולחן שהופנה להר מקודש: "יְהוָה מִסִּינַי בָּא וְזָרַח מִשֵּׂעִיר לָמוֹ--הוֹפִיעַ מֵהַר פָּארָן" (דברים לג' ב').

סיכום

על אף שוני ברור בין שני האתרים, נראה שבולטותם הנופית והמתאם הברור עם המבנה הטופוגרפי שנבחר בקפידה (כך שנוף כמעט זהה נשקף מן הרגמים השונים בכל אתר) תומכים בהנחה שפריסת אתרי הרגמים קשורה באופן ברור לטריטוריה. ניתוח אופיו המדויק של הקשר מחייב היכרות עם הקשרים מרחביים נופיים ואקולוגיים רחבים, כדי לפענח את כוח המשיכה של המרחבים הנצפים מהאתרים עבור מקימיהם בתקופות הקמתם.

אל שורמן (Al Shorman 2010) הציע שנראות נופית שימשה משאב שמשקף כבוד ויוקרה לנקברים ומשקפת מציאות של ריבוד חברתי, אך באתרי הרגמים שנסקרו בעבודה זו נמצאה מגמה הפוכה. בראייה השוואתית אפשר להציע שהיעדר שוני במיקום הרגמים ביחס לנוף ופיזור רנדומלי (ברמות מובהקות שונות) של הרגמים ברחבי האתר, משקפים חברה שוויונית חסרת היררכיה. גם את ההשערה הזו יש לבחון בהקשר ארכיאולוגי כולל, בפרט לנוכח ממצאי חפירות.

תופעת אתרי הרגמים היא דוגמה מיוחדת ליתרונות השימוש בניתוחי ממ"ג: חלק גדול מכלי הממ"ג פותחו כדי להעריך תופעות נופיות ומרחביות בדומה לתופעת אתרי הרגמים. האפשרות להעלות שכבות מידע רבות על בסיס הנתונים ולשלבן זו בזו מאפשרת לבחון הקשרים שונים של התופעה. יכולות העיבוד הגרפי ועיבוד הנתונים של כלי הממ"ג מאפשרות לעבד כמות גדולה של נתונים, ולבחון תובנות אינטואיטיביות בכלי מחקר סטטיסטיים. מאפיינים של פריסה מרחבית באתרי רגמים שונים משקפים להערכתנו שוני מהותי באופן שבו התייחסו מקימיהם לנוף שסביבם.

יחד עם זאת שימוש בכלי ממ"ג לניתוח תופעה אניגמטית כמו תופעת אתרי הרגמים צופן בחובו כמה בעיות מובנות: טעות בפרשנות של תופעות ארכיאולוגיות עלולה ליצור טעות נגררת בהבנה של מהותן – פונקציונלית, פולחנית, חברתית וכיו"ב; כמו כן רמת הניתוח הגבוהה של כלי המחקר וההסתכלות הסטטיסטית על פרטי המידע הופכת אותם לרגישים להיעדרן של שכבות מידע קריטיות, כמו שכבות גבהים ברזולוציה מתאימה או תיארוך; נוסף על כך יכולותיהם של כלי הממ"ג לצרף שכבות מידע ולייצר ניתוחים שמתבססים על צירופי מידע

שונים נותנות בידי החוקר כלי שמאפשר לבצע מניפולציות רבות, ועל כן 'לייצר' ולבסס מבלי משים, טיעונים מעגליים.

שימוש בכלי מחקר מתחום הממ"ג על אתר בודד או מספר קטן של רגמים הוא מורכב, דווקא בשל העובדה שתופעת אתרי הרגמים היא תופעה מרחבית בהיקפים גיאוגרפיים רחבים כל כך. לפיכך אם מפעילים מניפולציה חישובית או כלי מחקר מתחום הממ"ג על אתר בודד, חשוב להכיר היטב את המאפיינים הספציפיים שלו ולהעלות את רזולוציית הדיוק של בסיסי הנתונים.

בהתייחס למעלותיהם ומגבלותיהם של כלי הממ"ג, אנו סבורים שהאפשרות 'לייצר' פרופיל של מאפיינים מרחביים לטיפוסי שונים של אתרים הוא כיוון עם פוטנציאל מחקרי מבטיח.

תודות

אנו מבקשים להודות לפרופסור סטיב רוזן על הערות ותובנות חשובות שתרם לנו.

ביבליוגרפיה

גלילי, ר. 2019. "ארכיאולוגיה נופית ומחקרי פריסה מרחבית כמפתח לתופעת היעדר הקבורה ולשאלת תפקודם של אתרי רגמים". בתוך: ורגה, ד. עבאדי-רייס, י. להמן, ג. ויינשטוב, ד. (עורכים) קבורה ופולחן בשפלה ובנגב לאורך התקופות. קובץ מאמרים. רשות העתיקות ואוניברסיטת בן גוריון בנגב.

כהן, ר. תשנ"ח. "אתרי תקופת הברונזה התיכונה א' בהר הנגב". בתוך: שמואל אחיטוב (עורך) *מחקרים בארכיאולוגיה של נודים בנגב ובסיני*. רשות העתיקות ואוניברסיטת בן גוריון בנגב. 141-133.

כהן, ר. 1999. "ההתיישבות הקדומה בהר הנגב חלק א'". רשות העתיקות, ירושלים. IAA reports 6.

כוכבי, מ. תשכ"ז. "הגל ההתיישבותי של תקופת הברונזה [הכנענית] התיכונה א' בנגב". חיבור לשם קבלת תואר דוקטור בפילוסופיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

כהן ששון, א. 2017. "מבט מחודש על מפעל הכרייה המצרי בבקעת תמנע: היבטים חברתיים של מערכת הפקת הנחושת בתקופת הממלכה החדשה" חיבור לשם קבלת תואר דוקטור בפילוסופיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

נחליאלי, א. 2008. "תהליכי סחיפה והשקעה בשולי מישור ימין" חיבור לשם קבלת תואר שני המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי אוניברסיטת בן גוריון.

Abu-Azizeh, W., Tarawneh, M., Abudanah, F., Twaissi and, S., & Al-Salameen, A. (2014). "Variability within consistency: cairns and funerary practices of the Late Neolithic/Early Chalcolithic in the Al-Thulaythuwat area, southern Jordan." *Levant*, 46(2): 161-185.

Al-Shorman, A. (2010). "Testing the Function of Early Bronze Age I Dolmens: A GIS Investigation." *Near Eastern Archaeology*, *73*(1): 46-49.

Avner, U. (2002). "Studies in the Material and Spiritual Culture of the Negev and Sinai Populations, During the 6th-3rd Millennia BC." Doctoral dissertation. Hebrew University, Jerusalem.

Avner, U. Baruch, U. Eshed, V, Hermon, S. Horwitz, L. K, Kaminsk, i A, Marder, O. Segal, I. Werker, E. (1997). "Late Neolithic-Early Chalcolithic Burial Site in Eilat By the Red Sea." Unpublished.

Baxter, M. J., Beardah, C. C., & Wright, R. V. (1997)." Some archaeological applications of kernel density estimates." *Journal of Archaeological Science*, *24*(4): 347-354.

Beit-Arieh, I. (2003). *Archaeology of Sinai: the Ophir Expedition*. Tel Aviv University Yass Publications in Archaeology 21, Tel Aviv.

Bevan, A., & Conolly, J. (2006). "Multiscalar approaches to settlement pattern analysis." In *Confronting scale in archaeology*. Springer, Boston, MA. : 217-234

Borrell F, Boaretto E, Caracuta,V Cohen-S E, Lavi R, Lupu R, Teira, L and Vardi J. (2015). "Nahal Efe A Middle Pre-Pottery Neolithic B Site in the North-eastern Negev" Preliminary Results of the 2015 Pilot Season *Neo – Lithics* 2/15: 29-33

Cohen, R. and Dever, W.G., (1979). "Preliminary Report of the Second Season of the" Central Negev Highlands Project." *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 236: 41-60.

Dever, W.G., (1980). "New vistas on the EB IV (" MB I") Horizon in Syria-Palestine." *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*. 237: 35-64.

Glueck, N. (1955). "a Further Explorations in the Negev." *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* 137: 10-22.

Glueck, N. (1957). "The Fofth Season of Exploration in the Negeb." *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* 145: 11-25.

Goldstein, L. (1981). "One-dimensional archaeology and multi-dimensional people: spatial organization and mortuary analysis." *The archaeology of death*, *5349*.

Haiman, M. (1992). "Cairn burials and cairn fields in the Negev." *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*. 287: 25-45.

Knabb, K., Rosen, S. A., Hermon, S., Vardi, J., Horwitz, L. K., & Goren, Y. (2018). "A Middle Timnian Nomadic Encampment on the Faynan-Beersheba Road: Excavations and Survey at Nahal Tsafit (Late 5th/Early 4th Millennia BCE)." *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, *380*(1): 27-60.

Pinder, D., Shimada, I., & Gregory, D. (1979). "The nearest-neighbor statistic: archaeological application and new developments." *American Antiquity*, *44*(3), 430-445.

Porat, N., Rosen, S.A., Boaretto, E. and Avni, Y., (2006). "Dating the Ramat Saharonim Late Neolithic desert cult site." *Journal of Archaeological Science*,*33*(10):1341-1355

Rosen, S.A. (2017). Revolutions in the Desert: The Rise of Mobile Pastoral Society in the Negev and the Arid Zones of the Southern Levant. New York.

Rosen, S. A., Avni, Y., Bocquentin, F., & Porat, N. (2007). "Investigations at Ramat Saharonim: a desert Neolithic sacred precinct in the Central Negev." *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, *346*(1): 1-27.

Tilley C. (2004). "Round barrows and dykes as landscape metaphors." *Cambridge Archaeological Journal* 14(2): 185-203

Winter-L. R. Svoray, T. and Gilead, I. (2012). "Secondary burial cemeteries, visibility and land tenure: A view from the southern Levant Chalcolithic period." *Journal of Anthropological Archaeology* 31.4: 423-438.

Yekutieli Y. (2006). "Is somebody watching you? Ancient surveillance systems in the southern Judean Desert." *Journal of Mediterranean Archaeology* 19: 65–89.

Van Leusen, M., (2002). Pattern to process: methodological investigations into the formation and interpretation of spatial patterns in archaeological landscapes. Rijksuniversiteit Groningen.

INTERNET

http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox

http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst

https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst

על אונומסטיקון דיגיטלי ועל הזיקה בין חותמות לטביעות חותם עם שמות בתקופת הברזל II

מיתקה גולוב-רצהבי

המכון לארכיאולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

תקציר

במאמר זה אציג אונומסטיקון דיגיטלי של שמות פרטים שנאספו מממצאים אפיגרפיים מחפירות בארץ ישראל ועבר הירדן המזרחי בתקופת הברזל II. האונומסטיקון הועלה לאתר באינטרנט — *onomasticon.net*[1] — ופתוח לשימושם של חוקרים מן התחום האפיגרפי, הארכיאולוגי, האונומסטי, המקראי והלשוני ולשימושו של הקהל הרחב. האונומסטיקון כולל מעל 900 שמות המופיעים בממצאים שנתגלו בכ-80 אתרים. לכל שם באונומסטיקון מספר קטגוריות המתארות אותו: שם, מספר הממצא, סוג הממצא (כגון אוסטרקון, חותם, בולה, טביעת חותם על קנקן, כתובת); שיוך טריטוריאלי (כגון ישראל, יהודה, פלשת, אדום); שם חוזר (אם שם של אדם מסוים חוזר בכמה ממצאים); מרכיב תאופורי תחילי או סופי (אם קיים); וביבליוגרפיה (קורפוס או פרסום אחרון). האונומסטיקון מאפשר חיפושים מורכבים בשמות, לדוגמה חיפוש צירוף אותיות מסוים בכלל השמות או בקבוצת שמות מוגדרת (כגון טביעות חותם מיהודה) או מציאת התפוצה הגיאוגרפית של מרכיב תאופורי מסוים בשמות. נוסף על כך, אביא במאמר מחקר המדגים את השימוש באונומסטיקון למחקר הארכיאולוגי. המחקר בודק את הזיקה בין חותמות עם שמות לבין טביעות חותם עם שמות על קנקנים ובולות בתקופת הברזל II, והאם מדובר בשני צדדים של תופעה אחת או בשתי תופעות נפרדות.

הקדמה

במסגרת המחקרים שערכתי על השמות מישראל, יהודה ושכנותיהן בתקופת הברזל II, בניתי מאגר נתונים של השמות ומאפייניהם, כגון המרכיב התאופורי בשם ונתונים על הממצא שבו הוא מופיע. מאגר הנתונים אִפשר לי לבדוק בקלות יחסית השערות מחקר על שמות. כמו כן, תוך כדי חיפושים ובדיקות במאגר הנתונים, התגלו דפוסים ותופעות בשמות ובממצאים שמהם הגיעו השמות. לאחרונה הועלה מאגר השמות לאתר באינטרנט בכתובת *onomasticon.net*

1 האתר *onomasticon.net* פותח ומתוחזק על ידי The Research Software Company – חברה המספקת משאבי פיתוח תוכנה עבור חוקרים באקדמיה. תודות מיוחדות למנהל הכללי איתי זנדבנק.

והוא פתוח לשימושם של חוקרים והקהל הרחב. לפני שאתאר את האתר ואפשרויות החיפוש והמחקר הגלומות בו, אקדים כמה מילות הסבר לשמות מתקופה זו.

קטגוריות בשמות פרטיים שמיים-מערביים

המחקר האונומסטי מדגיש את האספקט התאופורי בשמות אלו ומחלק אותם בהתאם לשלוש קטגוריות: הקטגוריה הראשונה היא שמות תאופוריים. שמות אלו הם בדרך כלל משפט פועלי או שמני המורכב מנושא ונשוא. הנושא הוא שם אל, כגון בעל, יהו/יה/יו (יהוה), כמש, קוס, או כינוי אל, כגון אדֹן, מלך, אב, אח, חם. הנשוא בשמות שהם משפט פעלי, כגון אלשמע ונתניהו, הוא פועל. הנשוא בשמות שהם משפט שמני, כגון אלאר ונריהו, הוא שם עצם כללי המביע אחת מתכונות האל; הקטגוריה השנייה היא שמות תאופוריים מקוצרים (היפוקוריסטיים) שבהם המרכיב התאופורי נשמט, כגון נתן (קיצור מנתניהו או מאלנתן); הקטגוריה השלישית היא שמות חסרי תוכן דתי, כגון שמות מעולם החי (פרעש, צבי), שמות מעולם הצומח (בצל, צמח) ושמות שהם כינויים (גבח, יתֹם) (אחיטוב תשע"ב: 438–439; פורטן תשמ"ב: 39–43).

האונומסטיקון

השמות באונומסטיקון נאספו מממצאים אפיגרפיים שהתגלו בחפירות ארכיאולוגיות בארץ ישראל ובעבר הירדן המזרחי בתקופת הברזל II, מהמאה העשירית/התשיעית עד לחורבן בית ראשון ב-586 לפסה"נ.[2] שמות מממצאים שהגיעו משוק העתיקות לא נכללו, כי קשה לקבוע את הקשרם הגיאוגרפי והכרונולוגי והאותנטיות שלהם אינה ודאית. השמות נאספו מהקורפוסים הבאים:

1) *Echoes from the Past* (Aḥituv 2008) והמהדורה בעברית הכתב והמכתב: אסופת כתובות עבריות מארץ-ישראל וממלכות עבר הירדן מימי בית ראשון (אחיטוב תשע"ב).
2) *Corpus of West Semitic Stamp Seals* (Avigad and Sass 1997).
3) *Handbuch der Althebräischen Epigraphik, vol. I: Text und Kommentar* (Renz 1995).
4) *Handbuch der Althebräischen Epigraphik, vol. II/2: Siegel, Gewichte und weitere Dokumente* der Althebräischen Epigraphik (Renz and Röllig 2003).
5) *Texts from the Biblical Period of the Monarchy with Concordance* (Dobbs-Allsopp et al. 2005).
6) *Ancient Hebrew Inscriptions: Corpus and Concordance* (Davies 2004).

2 כל התאריכים במחקר הם לפני הספירה.

נוסף על כך, נבדקו דו"חות חפירה, ספרים העוסקים באפיגרפיה של תקופת הברזל וכתבי עת החל משנת 2000 ועד סוף 2016, כדי לכלול שמות מממצאים שהתגלו לאחר פרסום הקורפוסים שלעיל.

האונומסטיקון כולל שמות פרטיים ולא שמות המייצגים משפחה (ובכללם שמות אזורים הזהים לשמות משפחה).[3] האונומסטיקון אינו כולל שמות חלקיים, היינו, שמות שחסרות בהן שתי אותיות או יותר, כי פענוח השם המלא במקרים רבים שנוי במחלוקת. כדי לשמור על אחידות באיסוף השמות, לא נכנסו שמות חלקיים שפענוחם מוסכם וברור.[4] גם בשמות שכל אותיותיהם מופיעות יכולה להתעורר מחלוקת לגבי פענוח השם. במקרים אלו העדפתי את הפענוח המובא בקורפוסים של Avigad and Sass, אחיטוב ו-Renz על פני זה המובא בפרסומים האחרים. אם בשני קורפוסים מופיעים פענוחים שונים לאותו השם, בחרתי בפענוח בקורפוס שהתפרסם מאוחר יותר. אם בפרסום מובאים שני פיענוחים לשם מסוים, נבחר הפיענוח הראשון.[5]

אדם ששמו מופיע באתר מסוים מספר פעמים, אם באותו ממצא ואם בממצאים שונים מאותו אתר, מופיע רק פעם אחת באונומסטיקון. אם שמו של האדם חוזר ביותר מאתר אחד, שמו יופיע באונומסטיקון כמספר האתרים שבהם הוא נמצא. מופע השם החוזר במספר אתרים חשוב לקביעת התפוצה הגיאוגרפית של שמות. יחד עם זאת, בניתוחים סטטיסטיים של השמות שלא מתייחסים לתפוצה הגיאוגרפית, יש להיזהר ולכלול שם שחוזר בכמה אתרים פעם אחת בלבד, כי הרי מדובר באותו אדם.

האונומסטיקון מכיל מעל 900 שמות השייכים לכ-800 אנשים שונים הנזכרים בממצאים שנתגלו בכ-80 אתרים. חשוב לציין שאוסף שמות זה מייצג את השכבות החברתיות הגבוהות בארץ ישראל יותר מהנמוכות, כי השמות מופיעים בממצאים אפיגרפיים הקשורים לידע קרוא וכתוב שבתחילתו הצטמצם לאליטות. כמו כן שמות שהופיעו באוסטרקונים, בחותמות ובבולות קשורים בדרך כלל לפקידות מנהלית ולאנשי שררה הבאים מקרב האליטות. יחד עם זאת, שמות על חותמות העשויים מאבן גיר ולא מאבנים יקרות או יקרות למחצה או שמות על אוסטרקונים מסוף המאה ה-8 ואילך בזמן שבו האוריינות מתפשטת,[6] שייכים כנראה לשכבות חברתיות נמוכות יותר.

3 בחרסי שומרון מופיעים שמות המייצגים משפחה, כגון שמידע, אבעזר, חֵלֶק ועוד (אחיטוב תשע"ב: 268, 274, 289). דוגמה נוספת היא גְדֹר המופיעה בחרותות על ידיות קנקנים מגבעון (שם: 212).

4 לדוגמה השם כמשית המופיע במצבת מישע בדיבון שבו חסרות שתי האותיות הסופיות: היו"ד והת"ו (אחיטוב תשע"ב: 380–381) או השם אחזיהו בכתובת מתל דן החסר את שלוש אותיותיו הראשונות: אל"ף, חי"ת וזי"ן (שם: 431).

5 כגון החותם לאחאב "בעדאל" או "ב[ן] עדאל" (Avigad and Sass 1997: 68, #52) לאונומסטיקון נכנס השם בעדאל המופיע כפענוח הראשון ולא עדאל.

6 בנושא ידע קרוא וכתוב בתקופת הברזל II ראו Hess 2009: 1–9.

קטגוריות באונומסטיקון

הנתונים באונומסטיקון מאורגנים בטבלה. כל שורה בטבלה מתייחסת לשם המופיע בממצא מסוים. העמודות הבאות מייצגות את הקטגוריות המתארות את השם:

שם;	
מספר הממצא	– מספר בן ארבע ספרות המזהה את הממצא;
סוג הממצא	– אוסטרקון, בולה, חותם, טביעת חותם על קנקן, כתובת, פפירוס או קנקן חרות;
מקום הממצא	– האתר שבו או בסמיכות אליו התגלה הממצא;
שיוך טריטוריאלי	– שיוך האתר ליחידה טריטוריאלית בתקופה שאליה מתארכים את הממצא, כגון אדום, יהודה, ישראל, עמון, פיניקיה. אם יש מחלוקת לגבי השיוך הטריטוריאלי של האתר, בחרתי בשיוך הטריטוריאלי שקבעו החופרים באתר;
שם חוזר	– סימן (′✓′) המציין שם חוזר, היינו, שם של אדם מסוים שמופיע ביותר מאתר אחד. כל השמות החוזרים, להוציא אחד, הם שמות מטביעות חותם על קנקנים;
מרכיב תאופורי תחילי/סופי	– שם אל או כינוי לאל (ראו לעיל). כאשר שם מכיל שני מרכיבים תאופוריים, כמו השם ′אליהו′ המורכב מ′יהו′ (שם האל) ו′אל′ (כינוי), מוגדר שם האל (′יהו′) כמרכיב התאופורי;
ביבליוגרפיה	– הפניה לפרסום. שתי הפניות מופיעות כאשר הנתונים על השם נאספו משני מקורות.

יתרונות האונומסטיקון הדיגיטלי

לאונומסטיקון הדיגיטלי באתר יתרונות רבים על פני אונומסטיקון המודפס בספר: הנתונים מעודכנים לעיתים קרובות; שמות חדשים מתווספים לאונומסטיקון עם גילויים של ממצאים אפיגרפיים; שמות הקיימים באונומסטיקון מתעדכנים לאור בחינתם מחדש של הממצאים באמצעות טכנולוגיות חדשות, כגון עיבוד רב ספקטרלי (Faigenbaum-Golovin et al. 2015); אפשר להוסיף קטגוריות חדשות, כגון תיארוך ואיקונוגרפיה, כדי לחקור היבטים נוספים של השמות; האונומסטיקון מאפשר חיפושים מורכבים בנושאים אונומסטיים וארכיאולוגיים על פי הקטגוריות השונות שלו. דוגמה לחיפוש מעין זה היא מציאת כל השמות הכוללים מרכיב של אלוהות שאינה יהוה בממצאים מאתרים יהודאיים; תוצאות החיפוש הן מיידיות ואפשר לשמור אותן בקובץ PDF; ולבסוף, האונומסטיקון, כמו כל אתר באינטרנט, זמין בכל מקום.

המחקר הבא מדגים את השימוש באונומסטיקון למחקר הארכיאולוגי.

בדיקת הזיקה בין חותמות לטביעות חותם עם שמות בארץ ישראל ועבר הירדן המזרחי בתקופת הברזל II[7]

שמות רבים בתקופת הברזל II מופיעים בחותמות או בטביעות חותם על קנקנים ובולות.[8] מאחר שטביעות חותם נעשו באמצעות חותמות, אפשר היה לצפות ששתי קבוצות אלו יהיו בעלות מאפיינים דומים. עם זאת, מניתוחים כמותיים של חותמות וטביעות חותם הכלולים באונומסטיקון הדיגיטלי[9] עולה כי מאפייני שתי הקבוצות שונים.

איקונוגרפיה בחותמות וטביעות חותם

טבלה 1 מציגה את אחוז החותמות, טביעות החותם על קנקנים ובולות עם איקונוגרפיה מול אלו בלא איקונוגרפיה או עם קווי הפרדה מעוטרים[10] (בסוגריים מופיע מספר החותמות / טביעות החותם). מהטבלה עולה כי בעוד שאיקונוגרפיה מופיעה על כמחצית החותמות (53%), היא מוגבלת רק לכמה טביעות חותם על קנקנים ובולות (2% ו-9% בהתאמה).[11] בעקבות הבדל זה בדקתי מאפיינים אחרים באותן קבוצות של חותמות וטביעות החותם, כגון התפלגות כרונולוגית ותפוצה גיאוגרפית.

טבלה 1: נוכחות איקונוגרפיה בחותמות, טביעות חותם על קנקנים ובולות

	עם איקונוגרפיה	בלא איקונוגרפיה או עם קווי הפרדה מעוטרים	סך הכול
חותמות	53% (35)	47% (31)	100% (66)
טביעות חותם על קנקנים	2% (1)	98% (43)	100% (44)
בולות	9% (7)	91% (69)	100% (76)

7 מחקר זה הוא הרחבה של דיון קצר ומשני שהופיע במאמר שבדק את הקשר בין המרכיבים התאופוריים בשם לנוכחות איקונוגרפיה בחותמות (Golub 2018: 161–162). בדיקת הזיקה בין חותמות לטביעות חותם בלא שמות היא נושא למחקר נפרד, מאחר שהקריטריונים לבדיקה זו שונים מאלו של חותמות וטביעות חותם עם שמות; בדיקת הזיקה ע"פ הקריטריון של נוכחות/היעדרות איקונוגרפיה אינה מתאימה לחותמות וטביעות החותם בלא שמות כי כולם איקונוגרפיים.

8 בולות הן פיסות טין שהוטבעו בחותם ומטרתן הייתה לחתום מסמכים או חבילות.

9 האונומסטיקון כולל חותמות וטביעות החותם שנמצאו בחפירות, מופיע עליהם לפחות שם אחד שלם או כמעט שלם ופורסמו עד סוף 2016 (ראו לעיל).

10 קווי הפרדה בין המדורים בחותם/בטביעת חותם יכולים להיות קווים פשוטים או קווים מעוטרים בצמח (ניצן לוטוס, ענף סכמטי) או דפוס גיאומטרי (נקודות, זיגזגים, משולשים) (Sass 1993: 204).

11 אחוזים אלו שונים במעט מאלו המופיעים במחקר על הקשר בין המרכיבים התאופוריים בשם בעל החותם לבין נוכחות איקונוגרפיה, כי המחקר היה מוגבל לחותמות וטביעות חותם שבהם שם בעל החותם שלם או כמעט שלם. לעומת זאת במחקר הנוכחי נכללו חותמות וטביעות חותם שבהם מופיע לפחות שם אחד שלם או כמעט שלם (שם בעל החותם או שם אביו). היינו, נכללו גם חותמות וטביעות חותם שבהם שם בעל החותם הוא חלקי.

תפוצה גיאוגרפית ושיוך טריטוריאלי של חותמות וטביעות חותם

טבלה 2, טבלה 4 וטבלה 5 מתארות את התפוצה הגיאוגרפית בכל אחת מן הקבוצות: חותמות, בולות וטביעות חותם על קנקנים. טבלה 3 מתארת את התפלגות החותמות על פי שיוכם הטריטוריאלי. מהטבלאות עולה שתפוצתן הגיאוגרפית של הקבוצות שונה. החותמות מגיעים מ-27 אתרים הפזורים בצורה אחידה יחסית ברחבי ארץ ישראל ועבר הירדן המזרחי, מדן ועכו בצפון עד עין חצבה ותל אל-חליפה בדרום. גם השיוך ליחידה טריטוריאלית הוא מגוון יחסית: 57% חותמות הם מיהודה (38 מתוך 66), 20% מעמון (13), 11% מישראל (7) ו-12% מארבע טריטוריות שונות (טבלה 3). רק 30% מן החותמות (20 מתוך 66) מקורם בירושלים. לעומת זאת, 95% מהבולות (72 מתוך 76) נמצאו באתרים ביהודה ו-90% מהן (69 מתוך 76) מרוכזות בשני אתרים בלבד: ירושלים (56) ולכיש (13). רק ארבע בולות (5%) נמצאו באתרים מחוץ ליהודה: בצירה (1), דותן (1), עכו (1) ותל ג'לול (1). בבדיקת התפוצה הגיאוגרפית של טביעות החותם על קנקנים כללתי גם את טביעות החותם החוזרות של אותו אדם שהופיעו במספר אתרים. בדומה לבולות, 95% מטביעות החותם על קנקנים מרוכזים ביהודה (89 מתוך 94) ו-61% (57 מתוך 94) מרוכזים בארבעה אתרים: לכיש (21), רמת רחל (13) ירושלים (12) ובית שמש (11). רק חמש טביעות חותם על קנקנים (5%) נמצאו באתרים מחוץ ליהודה: בית צידה (1), דותן (1), דן (2), ותל אל-חליפה (1).

טבלה 2: תפוצה גיאוגרפית של חותמות

	אתר	מספר החותמות
1	עכו	1
2	ערד	3
3	ערוער	1
4	בית שמש	3
5	דן	1
6	עין חצבה	1
7	עין גדי	2
8	גבעון	1
9	חברון	1
10	ירושלים	20
11	לכיש	4
12	מגידו	4
13	קריית יערים	1
14	רבת עמון	5
15	רמת רחל	1
16	רבדים	1

	אתר	מספר החותמות
17	שכם	1
18	תל מלחתה	1
19	תל רחוב	1
20	תל דיר-עלא	1
21	תל אל-עומיירי	5
22	תל אל-פארעה (דרום)	1
23	תל אל-חליפה	1
24	תל א-נצבה	1
25	תל ג'לול	2
26	תל ג'מה	1
27	תל מזר	1
	סך הכול	**66**

טבלה 3: התפלגות החותמות על פי שיוכם הטריטוריאלי

שיוך טריטוריאלי	מספר החותמות
אדום	3
יהודה	38
ישראל	7
מואב	1
עמון	13
פיניקיה	1
פלשת	3
סך הכול	**66**

טבלה 4: תפוצה גיאוגרפית של בולות

	אתר	מספר הבולות
1	עכו	1
2	בית צור	1
3	בצירה	1
4	דותן	1
5	ירושלים	56
6	לכיש	13
7	תל עיטון	1
8	תל חסי	1
9	תל ג'לול	1
	סך הכול	**76**

טבלה 5: תפוצה גיאוגרפית של טביעות חותם על קנקנים

	אתר	מספר טביעות החותם על קנקנים
1	עזקה	2
2	בית צידה	1
3	בית שמש	11
4	דן	2
5	דותן	1
6	גזר	1
7	גבעון	6
8	חורבת שובב	1
9	ירושלים	12
10	קיילה	1
11	חורבת רבוד	1
12	לכיש	21
13	נחל ערוגות עין גדי	1
14	רמת רחל	13
15	שוכה	2
16	תקוע	1
17	תל ערני	1
18	תל בטש	1
19	תל בורנה	1
20	תל צפית	2
21	תל בית מרסים	1
22	תל אל-חליפה	1
23	תל א-נצבה	2
24	תל גודד	8
	סך הכול	**94**[12]

התפלגות כרונולוגית של חותמות וטביעות חותם

טבלה 6 מתארת את השוני בהתפלגות הכרונולוגית במאות של שלושת הקבוצות, בדומה לשוני שנמצא בתפוצה הגיאוגרפית. החותמות מפוזרים לאורך תקופת הברזל II ושכיחותם עולה עם התפשטות האוריינות: 2 במאה ה-9, 20 במאה ה-8 ו-35 במאה ה-7 ותחילת ה-6. לעומת זאת טביעות חותם ובולות מוגבלות לתקופת זמן מסוימת: 98% מטביעות החותם על

12 בדיקת התפוצה הגיאוגרפית של טביעות החותם על קנקנים כוללת גם את טביעות החותם החוזרות, ולכן יש 94 טביעות על קנקנים ולא 44. היינו, 94 הטביעות הן של 44 אנשים שונים.

קנקנים (41 מתוך 42 טביעות שתיארוכם ידוע) הם מן המאה ה-8. באופן דומה 93% מהבולות (65 מתוך 70 בולות שתיארוכן ידוע) הם מן המאה ה-7 ותחילת המאה ה-6.

טבלה 6: התפלגות כרונולוגית של חותמות, טביעות חותם על קנקנים ובולות

	מאה 9	מאה 8	מאה 7 ותחילת 6	מאה לא ידועה	סך הכול
חותמות	2	20	35	9	100% (66)
טביעות חותם על קנקנים		41	1	2	100% (44)
בולות	1	4	65	6	100% (76)

דיון ומסקנות

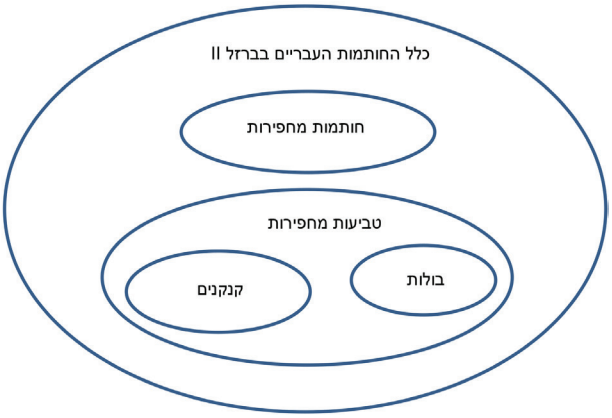
על אף הציפייה להתאמה בין מאפייני חותמות למאפייני טביעות חותם עם שמות, נמצאו הבדלים בנוכחות איקונוגרפיה, בתפוצה גיאוגרפית ובהתפלגות כרונולוגית. מעט בולות ורק טביעת חותם אחת על קנקן הן איקונוגרפיות, ואילו כמחצית מהחותמות הם איקונוגרפיים. טביעות החותם, במיוחד אלו על בולות, מוגבלות ברובן למספר אתרים יהודאיים, בהשוואה לחותמות שנמצאו באתרים רבים ברחבי ארץ ישראל ועבר הירדן המזרחי וביחידות טריטוריאליות שונות. כמו כן החותמות מופיעים לאורך תקופת הברזל II, ואילו מרבית טביעות החותם מוגבלות לתקופה מסוימת: טביעות חותם על קנקנים מופיעים בסוף המאה ה-8 ובולות מופיעות במאה ה-7 ותחילת המאה ה-6. אפשר להסביר את ההבדלים בין הקבוצות באופיין השונה: לטביעות החותם קשר הדוק לפעילות המנהלית ביהודה. הקנקנים המוטבעים, להוציא אחד, היו חלק מההכנות שנעשו ביהודה בסוף המאה ה-8 לקראת מסע סנחריב (Lipschits, Sergi and Koch 2010: 27). הם הוחתמו כנראה על ידי אנשי מנהל המופקדים על ייצור קנקנים אלה (Millard 2012: 190). ריכוז הבולות בשתי הערים הגדולות ביהודה, ירושלים ולכיש, גם הוא מעיד שהן היו חלק מארגון מנהלי.[13] בגלל ממדיהן הזעירים של הבולות ונטייתן להתפורר בקלות, קל לגלות אותן כאשר הן מרוכזות במספר רב במקום אחד, כגון ארכיון, במיוחד אם המקום נשרף. השריפה הופכת את הבולות מטין לחרס ומונעת את התפוררותן (Golub 2016: 375). קשר זה של טביעות חותם על קנקנים ובולות לפעילות מנהלית יכול להסביר את מיעוט האיקונוגרפיה בהם בהשוואה לחותמות, שכן אנשי מנהל וסופרים שעסקו בהחתמת הבולות או היו אחראים על ייצור הקנקנים ידעו קרוא וכתוב ולא נזקקו לאיקונוגרפיה לצד השמות.[14]

13 יתרה מזאת, בניתוח פטרוגרפי של 51 בולות שהתגלו בירושלים בעיר דוד (47 מתוכן עם כיתוב) מתברר שהבולות כנראה גם יוצרו בירושלים (Goren, Gurwin and Arie 2014: 143, 147).

14 על הקשר בין היעלמות האיקונוגרפיה ואוריינות ראו Uehlinger 1993: 282–284.

החותמות, על פיזורם הגיאוגרפי והכרונולוגי, הם מדגם מייצג אמין יותר של כל החותמות בישראל, יהודה ושכנותיה בתקופת הברזל II, בהשוואה לטביעות חותם. חותמות מאתרים רבים ולאורך כל התקופה מפחיתים את הסיכון של הטיה באוסף הפרטים המייצגים את האוכלוסייה הכללית. הטיה זו עלולה להביא למסקנות שגויות לגבי האוכלוסייה כולה. דוגמה להטיה באוסף הפרטים היא טביעות החותם שנמצאו בחפירות והמייצגים ברובם הגדול חותמות ששימשו לפעילות מנהלית ביהודה. אי אפשר להסיק מהם על כל החותמות שטבעו בהם בתקופת הברזל II. לכן במחקרים העוסקים בחותמות עם שמות מתקופה זו יש להפריד בין הקבוצות ולא להתייחס אליהן כמקשה אחת. קבוצות אלו הן נפרדות לא רק בגלל השוני במאפייניהן, אלא גם מהסיבה הפשוטה שעד היום לא מצאנו פריט השייך ליותר מקבוצה אחת. לא נמצא חותם שטבוע על אחד מהקנקנים או מהבולות שנמצאו, וגם לא נמצאו אף קנקן או בולה שהוחתמו באחד מהחותמות שנמצאו.

לסיכום מדובר בשלוש קבוצות שונות ונפרדות, קבוצת החותמות וקבוצת טביעות החותם, כשזו האחרונה נחלקת לשתי קבוצות משנה: קנקנים מוטבעים ובולות (איור 1). כל קבוצה היא אוסף פריטים שונה המתייחס לאותה תופעה, חותמות, אם כחותמות ממש ואם כטביעות חותם המשקפות חותמות. יחד עם זאת שתי הקבוצות של טביעות חותם מייצגות קבוצה קטנה של חותמות מנהליים ביהודה בשתי תקופות שונות: סוף המאה ה-8 (טביעות על קנקנים) והמאה ה-7 עד לסוף ברזל II (בולות). לעומת זאת קבוצת החותמות שנמצאו בחפירות היא מדגם מייצג מתאים יותר לכלל החותמות. שאלת השימוש שנעשה בחותמות אלו היא נושא למחקר נפרד. חותמות שימשו לא רק במערכות מנהליות מקומיות או אזוריות, אלא היו גם בשימוש פרטי לחתימת מסמכים וחבילות, כחפץ המזהה את נושאו ומעיד על מעמדו ואף כקמע.[15]



איור 1: היחס בין קבוצות הממצאים השונות ובינן לבין כלל החותמות

15 על השימושים השונים שנעשו בחותמות בתקופות ובאזורים שונים ראו et al. Ameri 2018: 1–10.

סיכום

במאמר זה הצגתי את האונומסטיקון הדיגיטלי, אוסף מקיף של שמות פרטיים מממצאים אפיגרפיים שהתגלו בחפירות ארכיאולוגיות בארץ ישראל ובעבר הירדן המזרחי בתקופת הברזל II. נוסף על כך תיארתי מחקר שבדק את הזיקה בין חותמות עם שמות לטביעות חותם עם שמות, והדגים כיצד אפשר להשתמש בניתוחים כמותיים של נתונים מהאונומסטיקון כדי להגיע למסקנות משמעותיות.

בהזדמנות זאת, אני מזמינה חוקרים לשתף פעולה בהרחבת *onomasticon.net* כדי שיכלול שמות מתקופות מוקדמות ומאוחרות יותר, מתעודות בכתב היתדות ומממצאים אפיגרפיים משוק העתיקות.

ביבליוגרפיה

אחיטוב, ש. תשע"ב. "הכתב והמכתב: אסופת כתובות מארץ-ישראל וממלכות עבר הירדן מימי בית-ראשון". מהדורה שנייה מורחבת ומתוקנת. מוסד ביאליק, ירושלים.

פורטן, ב. "שם, שמות עצם פרטיים בישראל, [ב] מתן שמות בישראל". אנציקלופדיה מקראית, כרך ח. מוסד ביאליק, ירושלים. עמ' 33–51.

Aḥituv, S. (2008). *Echoes from the Past: Hebrew and Cognate Inscriptions from the Biblical Period*, Jerusalem.

Ameri, M., Costello, S. K., Jamison, G. & Scott, S. J. (eds.) (2018). *Seals and Sealing in the Ancient World: Case Studies from the Near East, Egypt, the Aegean, and South Asia*, Cambridge, New York, NY.

Avigad, N. & Sass, B. (1997). *Corpus of West Semitic Stamp Seals*, Jerusalem.

Davies, G. I. (2004). *Ancient Hebrew Inscriptions: Corpus and Concordance* (2 vols), Cambridge 1991–2004.

Dobbs-Allsopp, F. W., Roberts, J. J. M., Seow, C. L. & Whitaker, R. E. (2005). *Hebrew Inscriptions: Texts from the Biblical Period of the Monarchy with Concordance,* New Haven.

Faigenbaum-Golovin, S., Rollston, C.A., Piasetzky, E. , Sober, B. & Finkelstein, I. (2015). The Ophel (Jerusalem) Ostracon in Light of New Multispectral Images. *Semitica* 57: 113–137.

Golub, M. R. (2016). "Revisiting Vaughn and Dobler's Provenance Study of Hebrew Seals and Seal Impressions", in: S. Ganor, I. Kreimerman, K. Streit & M. Mumcuoglu (eds.), *From Sha'ar Hagolan to Shaaraim: Essays in Honor of Prof. Yosef Garfinkel*, Jerusalem, pp. 371–382.

Golub, M. R. (2018). Aniconism and Personal Names on Iron Age II Inscribed Stamp Seals from the Land of Israel and Transjordan. *Tel Aviv* 45/2: 157–169.

Goren, Y., Gurwin, S. & Arie, E. (2014). "Messages impressed in clay: Scientific study of Iron Age Judahite bullae from Jerusalem", in: M. Martinón-Torres (ed.), *Craft and Science: International Perspectives on Archaeological Ceramic*s, Doha, Qatar, pp. 143–149.

Hess, R.S. (2009). Questions of Reading and Writing in Ancient Israel. *Bulletin for Biblical Ressearch* 19.1: 1–9.

Lipschits, O., Sergi, O. & Koch, I. (2010). The Date of the lmlk and 'Private' Stamp Impressions: A Fresh Look. *Tel Aviv* 37: 3–32.

Millard, A. (2012). "Hebrew Seals, Stamps and Statistics: How Can Fakes Be Found?" in: M. Lubetski and E. Lubetski (eds.), *New Inscriptions and Seals Relating to the Biblical World* (Archaeology and Biblical Studies 19), Atlanta, pp. 183–191.

Renz, J. (1995). *Handbuch der Althebräischen Epigraphik*, vol. I, Darmstadt.

Renz, J. & Röllig, W. (2003). *Handbuch der Althebräischen Epigraphik*, vol. II/2, Darmstadt.

Sass, B. (1993). "The Pre-Exilic Hebrew Seals: Iconism vs. Aniconism", in: B. Sass and C. Uehlinger (eds.), *Studies in the Iconography of Northwest Semitic Inscribed Seals*, (Orbis biblicus et orientalis 125), Fribourg, Switzerland, pp. 194–256.

Uehlinger, C. (1993). "Northwest Semitic Inscribed Seals, Iconography and Syro-Palestinian Religions of Iron Age II: Some Afterthoughts and Conclusions", in: B. Sass, and C. Uehlinger (eds.), *Studies in the Iconography of Northwest Semitic Inscribed Seals*, (Orbis biblicus et orientalis 125), Fribourg, Switzerland, pp. 257–288.

צילום מולטיספקטרלי כאמצעי לזיהוי פיגמנטים בציור קיר
מקרה מבחן פומפי

יותם אשר

רשות העתיקות

תקציר

צילום מולטיספקטרלי הוא שיטת דְּמוּת במחקרי ציורי קיר של מורשת תרבות. שיטה זו מאפשרת תיעוד באורכי הגל אולטרה סגול, האור הנראה ואינפרה אדום בקנה מידה גדול, למטרות שימור ומחקר באתר הארכיאולוגי. השימוש באורכי גל שונים מאפשר ניתוח של נוכחות פיגמנטים ושכבות שלא נראות לעין עקב תכונות האור, ומידע זה עוזר להערכת מצב השימור ואסטרטגית השחזור של ציורי קיר באתרם. באתר מורשת התרבות העולמית פומפי, דיגום הוא כמעט בלתי אפשרי בציורי הקיר מהתרבות הרומאית לפני כ-2000 שנה, אף כי ציורי הקיר עוברים בלאי עקב תיירות מוגברת, זיהום אוויר והתגבשות מלחים. שיטות אפיון חומרים, לא הרסניות ולא פולשניות, ממשיכות להתפתח כדי להעשיר את סל הכלים של המשמרים והארכיאולוגים, במטרה לשפר את תהליך קביעת אסטרטגית השימור של ציורי הקיר והעמקת הבנת השימוש בפיגמנטים בעת העתיקה. בעבודה זו צילום מולטיספקטרלי שימש לזיהוי חצי-כמותי של פיגמנטים בציורי קיר בפומפי ומיפוי תוצרי בליה, על בסיס עוצמת האור המוחזר ממינרלים שונים. הקיר המערבי בחדר הקר (frigidarium) בקומפלקס המרחצאות Sarno בפומפי, צולם באמצעות מצלמה דיגיטלית מותאמת לשטח עם מסננים חיצוניים באורכי גל באור הנראה, אינפרה אדום ואולטרה סגול. התמונות עובדו ונערמו זו על גבי זו ליצירת מידע מולטיספקטרלי שהוצלב עם מידע כימי מספקטרומטר קרני X נייד (pXRF), וספקטרופוטומטר אור נראה (FORS) שמספק מידע מולקולרי-מבני על הפיגמנטים. התוצאות מראות שבבית המרחץ השתמשו במינרלים המטיט, גואטיט וקופרוריאויט (כחול מצרי), שיש להם החזרי אור ספציפיים. כמו כן, זוהו אלמנטים אִיקוֹנוֹגְרָפִים הכוללים חיות בנהר, ננסים וגרדיאנטים של שימוש בצבע כחול להעמקת ההבדלים בין השמים לנהר. גישה לא הרסנית ולא פולשנית זו לאפיון פיגמנטים בציור הקיר היא שיטה לתיעוד מתקדם בשטח החפירה, עם יכולות לזיהוי החומרים הארכיאולוגים ותוצרי בליה למטרות שימור ציורי קיר באתרם.

הקדמה

המסחור הרחב של המצלמות הדיגיטליות בשנת 1990 הביא לפיתוח הטכנולוגי בתחום התיעוד במחקרי מורשת התרבות. בשלושת העשורים האחרונים, הפכו מצלמות דיגיטליות זמינות לציבור והפופולריות שלהן גדלה באופן אקספוננציאלי, כי הן סיפקו מתודה זמינה לתיעוד באור הנראה עם רזולוציה מרחבית איכותית ומשופרת. נוסף לקרינה באור הנראה, יכולים חיישני מצלמה דיגיטלית למדוד קרינה אינפרה אדום ואולטרה סגול, מה שהופך אותה לכלי מולטיספקטרלי, עם יכולת לניתוח מידע בעל ערך בתחומים ספקטרליים של חומרי מורשת.

פיתוח שיטות לא פולשניות לאפיון ציורי קיר ופיגמנטים באתרים ארכיאולוגיים הוא בעל חשיבות מכרעת לשימור פרסקאות יקרות ערך, כגון אלה המצויים בפומפי, בעיקר בגלל מצב השימור הרדוד של ציורי הקיר עקב תיירות מוגברת, זיהום אוויר והתגבשות מלחים; דיגום למטרות ניתוח מיקרו-פולשני מוגבל מאוד ולא מקובל באתרי UNESCO חשובים. שיטות לא פולשניות לזיהוי ומיפוי פיגמנטים בשני ממדים קיימות במוזיאונים, על בסיס שילוב בין צילום היפרספקטרלי ברזולוציה גבוהה וספקטרומטר פלואורסנציה המשלב מידע כימי. טכניקות אלה מבוססות על מכשור עדין, לא נייד, שלרוב מוגבל לסביבת המוזיאון (Perez et al. 2013; Maguregui et al. 2013; Amadori et al. 2015).

באתר הארכיאולוגי, השימוש בטכניקות תיעוד מולטיספקטרלי הכולל צילום במספר אורכי גל מועט ולא ברזולוציה גבוהה, מוגבל באפליקציות לזיהוי אִיקוֹנוֹגְרָפִיה ועיטורים על בסיס הצפייה באורכי גל אולטרה סגול ואינפרה אדום נוסף לאור הנראה. צילום עם מסנני אור המעבירים רק אורכי גל מסוימים באור הנראה, אולטרה סגול ואינפרה אדום יכול לעזור לזיהוי שכבות ואלמנטים שלא נראים בעין (Chaban et al. 2017). הכימות היחסי של עוצמת האור מאפשר ניתוח מולטיספקטרלי המבוסס על יחסי פיקים הייחודיים למינרלים המצויים בפיגמנטים. הניתוח הספקטרלי היה בראשיתו בשימוש לאפליקציות גיאולוגיות של מיפוי מינרלים בכדור הארץ, באמצעות חישה מרחוק בלוויינים המצוידים במצלמות לאורכי גל מסוימים (Solomon et al. 1985). בהמשך, אפשרו יחסי פיקים של אור מוחזר להעריך את כמות הצמחייה ופוטוסינתזה, באמצעות ניתוח המבוסס על יחסי פיקים באור מוחזר באורכי גל של האור הנראה והאינפרה אדום (Asrar et al. 1984). אימוץ הניתוח הספקטרלי מעולם הגיאולוגיה והחישה מרחוק לאפליקציות במורשת תרבות התחיל לאחרונה במוזיאונים, שיש להם יכולות מעבדה להצליב מידע כימי עם תמונות ספקטרליות וניתוחים סטטיסטיים (Delaney et al. 2016; Cucci et al. 2016). כאשר מאמצים את הגישה הזו לאתר הארכיאולוגי, יש רעשי שטח הנובעים ממשטח לא נקי וממלחים מבליה של ציורי הקיר, מה שמקשה על המדידות.

נוסף על כך, מאפשר תיעוד מולטיספקטרלי לזהות נקודות של עניין, ואפשר לחקור אותם על בסיס דיגום לא פולשני, נקודתי, אבל אנליטי יותר. שיטות אנליטיות לא פולשניות לאפיון הרכבים כימיים ומינרולוגים, על בסיס התגובה בין אור לחומר באורכי גל שונים, נכנסות לסל הכלים של משמרים ארכיאולוגים ומדענים המגיעים לשטח לחקור פיגמנטים בציורים (Bruni et al. 2002; Maguregui et al. 2012; Delaney et al. 2014). בין השיטות השונות אשר מבוססות על מכשירים ניידים, קיים מכשיר הספקטרומטר למדידת הפלאורוסנציה של החומר לאחר תגובה עם קרני רנטגן (pXRF, ספקטרומטר קרני X נייד), שנותן מידע חצי כמותי על הרכב היסודות הכימיים של החומר (Asscher et al. 2019). כאשר משלבים XRF עם כנה ממונעת, אפשר למפות כימית בשני ממדים ציורים שצולמו באמצעות מצלמה היפר-ספקטרלית. מכשיר נוסף מודד את החזר האור באורכי גל שונים (FORS, ספקטרופוטומטר אור נראה נייד) הכוללים את האור הנראה, אולטרה סגול ואינפרה אדום (UV-VIS-NIR). המכשיר מספק מידע מולקולרי-מבני המקביל למידע ממצלמות מולטיספקטרליות והיפר-ספקטרליות שמודדות את האור המוחזר באורכי גל שונים, אבל לרוב ברזולוציה גבוהה יותר, ובאופן נקודתי (Cucci et al. 2015).

במאמר זה אנו מציגים מתודולוגיה משולבת של מדידות לא פולשניות לזיהוי, מיפוי וקביעת ריכוזים יחסיים של פיגמנטים בציורי קיר באתרם. האסטרטגיה שלנו היא לשלב שיטות ספקטרוסקופיות המבוססות על XRF ו-FORS עם צילום מולטיספקטרלי נייד על ציורי הקיר ב-frigidarium של קומפלקס המרחצאות Sarno בפומפי. הצילום המולטיספקטרלי מבוסס על מצלמה דיגיטלית מותאמת בעלות נמוכה שהייתה לאחרונה בשימוש לזיהוי סטנדרטים של פיגמנטים. השיטה מבוססת על צילום באורכי גל באור הנראה, אינפרה אדום ואולטרה סגול באמצעות מסננים חיצוניים עם פלאש מותאם (Dupis et al. 2002; Miliani et al. 2007; Di Maio et al. 2012; Cosentino et al. 2015). עם זאת, השיטה לא נבדקה עדיין בקנה מידה גדול לזיהוי ומיפוי פיגמנטים באתר הארכיאולוגי. אנו משלבים מדידות נקודתיות של ההרכב הכימי באמצעות pXRF ואפיון ההרכב המולקולרי-מבני באמצעות FORS, כדי להשלים את התמונה הספקטרלית. התוצאות מלמדות שאפשר למפות ולזהות מספר מינרלים אשר שימשו לפיגמנטים בפומפי, כגון המטיט, גואטיט, וכחול מצרי בציורי הקיר ב-frigidarium של קומפלקס המרחצאות Sarno בפומפי.

בעיר העתיקה פומפי שנשארה קבורה לאחר התפרצות הר הגעש ויזוביוס (79 לספירה), נחשפו מספר רב של ציורי קיר שיכולים ללמד ישירות על שיטות הציור וסוגי החומרים באימפריה הרומית. קומפלקס המרחצאות Sarno בפומפי נמצא תחת סיכון בליה גדול ובלתי הפיך, לאור הגדילה בתיירות המעלה את זיהום אוויר וגדילת מלחים שנובעים מהשימוש במלט

לחיזוק הקירות בעת חשיפת ציורי הקיר (Kruse et al. 2007; Legrand et al. 2014; Mosca et al. 2016). סגנון ציורי הקיר והרכב הפיגמנטים מראים שימוש מוגבל בפלטת הצבעים שכוללת בעיקר כחול, שחור, אדום וצהוב, המשויכים לשימוש במינרלים כחול מצרי, פחם, המטיט וגואטיט בהתאמה (Angelini et al. 2019).

שיטות מחקר

צילום מולטיספקטרלי

במחקר זה, מצלמה D800FR של חברת Nikon (פרויקט Profilocolore עם Nikon), המצוידת בחיישן CMOS עם רזולוציה של 36 מגה פיקסל, הייתה בשימוש עבור לקיחת תמונות באורכי גל שונים. מסננים חיצוניים ספציפיים שסופקו על ידי חברת Profilocolore™ אִפשרו צילום באורכי גל אינפרה אדום, אור נראה ואולטרה סגול. במהלך הצילום ממוקמים הפלאשים ב-45° ביחס למשטח הנמדד, בעוד שהמצלמה ממוקמת בין הפלאשים בצורה מאונכת לפני השטח, ועוצמת הפלאש השתנתה באתר כדי להתאים לתנאי האור הסביבתיים (Zhang et al. 2017). מנגנון זה של הבזקים ומסננים חיצוניים מאפשר גמישות גבוהה יותר ללקיחת תמונות, כפי שהוכח בעבר בזיהוי פיגמנט כחול מצרי במוזיאונים (Verri et al. 2009).

התמונות כוילו באמצעות בודק צבעים מכויל שסופק עם המצלמה ואשר הונח במסגרת הצילום ליד ציורי הקיר. ארבעה מסנני פס-מעבר חיצוניים היו בשימוש, כאשר האור הנראה בעל טווח ספקטרלי רחב יחסית (מכסה 0.7-0.4 מיקרון), האולטרה סגול צר יחסית (בין 0.35-0.4 מיקרון) והאינפרה אדום גם כן רחב יחסית, עם 3 מסנני-פס חיצוניים: IR1 (מכסה 1-0.715 מיקרון), IR2 (מכסה 1-0.85 מיקרון), IR3 (מכסה 1-0.95 מיקרון). כיוון שחיישן CMOS הוא בעל מערך מסנני צבע כחלק מהמבנה, לכל פיקסל יש פילטר פנימי (מטריצת באייר) של אדום, ירוק וכחול (RGB), שיש להם אורכי גל באור הנראה של 0.63±0.03 מיקרון (אדום), 0.53±0.03 (ירוק) ו-0.45±0.03 (כחול).

סדרת מערכי המסננים מאפשרת יצירת בסיס מידע רחב של תמונות באורכי גל שונים והם נאספו והוסבו מתמונות גלם לתבנית TIFF בפורמט 16 ביט, עם עיבוד תמונה מינימלי (הימנעות מאיזון לבן ותיקוני בהירות או סיבוב ומתיחת פיקסלים) באמצעות התוכנה החופשית DCRAW. קובצי TIFF נורמלו ונערמו זה על זה באמצעות תוכנת ENVI v5.3.1, כדי לקבל מידע מולטיספקטרלי (Cosentino et al. 2015). לבסוף, הנתונים עובדו באמצעות כלי "מתמטיקה" המאפשר להפעיל יחסי עוצמת אור פיקסל על גבי פיקסל. האזור שבו נעשה שימוש בכלי המתמטיקה נבחר על בסיס תצפיות חזותיות, במטרה למזער את השפעת הבליה, הקילוף והרבדת מלחים על גבי ציור הקיר. הפרוטוקולים מפורסמים בפירוט ב-Asscher et al. (2019).

ספקטרומטר קרני X (pXRF)

ניתוחי הרכבים כימיים על בסיס ספקטראות קרני X בשטח (XRF) בוצעו בנקודות נבחרות של ציורי הקיר בפומפי, תוך כדי שימוש בספקטרומטר XRF נייד Spectro Analytical GmbH GmbH, Kleve מגרמניה. המכשיר מצויד במקור קרינת X מסוג Rh-anode, בעלת מתח מקסימלי של 50 קילו-וולט, עם גלאי סיליקון ברזולוציה גבוהה, Peltier-cooled (SDD) עם רזולוציה ספקטרלית טיפוסית של כ-150 eV. מדידות XRF בוצעו באמצעות הנחה, בעדינות, של הקצה הקדמי של ספקטרומטר במגע ישיר עם משטחים צבועים. הקוטר של המדידה הוא כ-7–8 מ"מ, והמיקום המדויק צולם באמצעות מצלמה משולבת בתוך המכשיר. הפרוטוקולים מפורסמים בפירוט ב-Asscher et al. (2019).

ספקטרופוטומטר אור נראה (FORS)

ספקטרופוטומטר אור מוחזר נלקח באמצעות סיבים אופטיים (FORS) מסוג HR2000 + ES, עם מקור אור UV-VIS-NIR DH-2000 (Ocean OpticsTM). פרוטוקול המדידה בשטח כלל הנחת המכשיר על שולחן סמוך לציור הקיר, ומדידה באמצעות תא מדידה של אור מוחזר (integration sphere) עם חור כניסה בקוטר 8 מ"מ, ב-0.1 שנייה לכל ספקטרום, ממוצע של 10 ספקטרה עבור סטטיסטיקה. מתחת לשולחן הייתה סוללה של 24V ומתאם חשמל (DC/AC מהפך) ל-220V. הספקטראות נמדדו בטווח של 0.4–0.95 מיקרון (להלן UV-VIS-NIR), אשר מותאם לטווח הספקטרלי של המצלמה. הפרוטוקולים מפורסמים בפירוט ב-Asscher et al. (2019).

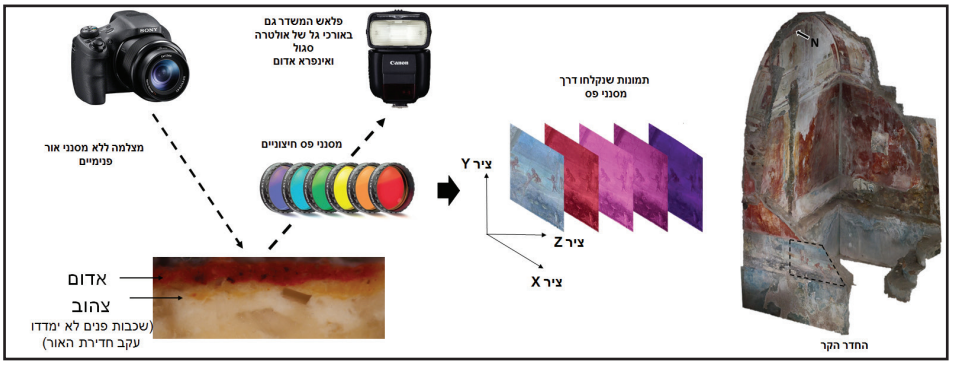
דיפרקציית קרני X (XRD)

ניתוחי הרכבים מינרולוגים על בסיס דיפרקציית קרני X (XRD) בוצעו על שני שברים של ציורי קיר בעלי צבעים שונים (אדום וכחול, נספח 1) שנמצאו מתחת לקירות בחדר הקר. השברים נטחנו לאבקה של כ-1 גרם. השכבות שנדגמו הם הטיח, תשתית הטיח ושכבת הצבע. המדידה בוצעה באמצעות Bragg–Brentano θ-θ diffractometer (PANalytical X'Pert PRO, Co Kα radiation, 40 kV and 40 mA) בעל חיישן זמן אמת: real time multiple strip (RTMS) detector (X'Celerator by Panalytical). הניתוחים היו לפי הפרוטוקולים שמשווים סטנדרטים של קריסטלים ופאזות שונות לתוצאות המדידה לפי Angelini et al. (2019).

תוצאות ודיון

צילום ציורי קיר במצלמה המולטיספקטרלית מורכב מכמה תמונות הנלקחות דרך מסננים המעבירים רק אורכי גל מסוימים (מסנני פס). בחדר הקר של המרחצאות, על הקיר המערבי, יש ציורי קיר עם מספר שכבות פיגמנטים (Angelini et al. 2019). בשיטת הצילום המולטיספקטרלי

אפשר לראות רק את שכבות הפיגמנטים החיצוניים, עקב עומק החדירה של אורכי הגל של האולטרה סגול, האור הנראה והאינפרה האדום. לאורכי גל אלו החדירה של האור דרך החומר היא רק מיקרונים בודדים, והיא מאפשרת לאפיין רק את השכבות החיצוניות ביותר שהם השכבה האחרונה של הפיגמנטים. לכן חשוב להכיר ביכולות הצילום המולטיספקטרלי לצלם ב-2 ממדים, אבל לא בממד העומק. הצילום המולטיספקטרלי של הקיר המערבי מורכב מ-5 תמונות שנלקחו תחת תנאי צילום שונים, עם מסנני-פס ספקטרלי של האור הנראה, האולטרה סגול (UV) והאינפרה אדום בשלושה טווחים IR1, IR2 ו-IR3 (איור 1).



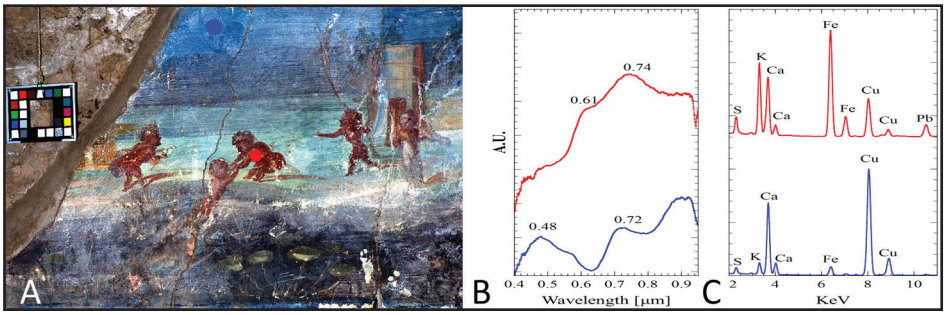
איור 1: תיאור גרפי פשטני של שיטת צילום ציורי הקיר המערבי במצלמה המולטיספקטרלית.

לאחר נרמול של עוצמת האור בתמונות הצבעוניות השונות, יישור התמונות ופיצוי על תנאי צילום שונים, התמונה של האור הנראה התפצלה ל-3 מרכיבי ה-RGB שלה (על בסיס מטריצת הבאייר – ראה שיטות וחומרים). תמונות האינפרה אדום נורמלו, אך התמונה של האולטרה סגול לא הייתה בשימוש במקרה מבחן זה, עקב בעיות בצילום. המידע המולטיספקטרלי הוא קוביית מידע תלת ממדית של תמונות מונוכרומטיות (סרגל צבעים אפור), המורכבת מצירי XY (ממדי הציור) וציר Z שהוא התמונות הספקטרליות (נספח 2).

האיקונוגרפיה בציור הקיר היא של נהר עם צמחים תת-מימיים וננסים המשתכשכים במים עם בתים ועצים ברקע (איור 2). האנליזות הנקודתיות שבוצעו מתחלקות ל-FORS המלמדת על המבנה המולקולרי-מבני של הפיגמנטים, ו-pXRF המלמד על ההרכב הכימי. שיטת FORS נותנת מידע על החזר האור בתחום UV-VIS-NIR, שמקבילה בתחומה למצלמה המולטיספקטרלית.

ספקטראות FORS של הנקודות האדומות מראות שהמינרל הוא המטיט, תחמוצת הברזל Fe_2O_3, וצבע הכחול המשויך למינרל סילקתי עם נחושת בשם קופרוריאויט (איור B2) (שמו הסינטטי כחול מצרי, $CaCuSi_4O_{10}$) (ספקטרום של הסטנדרטים של מינרלים אלו מצוי בנספח 3). אנליזה כימית על בסיס פלואורסנציה לאחר הקרנה בקרני X (XRF) תומכת בממצאים אלו,

כאשר הספקטראות של הפיגמנטים האדומים עשירים בברזל ושל הכחולים עשירים בנחושת. הפיגמנטים הצהובים אופיינו למינרל גואטיט (Angelini et al. 2019). יסודות אחרים, כגון אשלגן וגופרית, משויכים לתוצרי בליה כימית כגון מלחים (איור 2C). הסידן משויך למטריצה שבה עורבב הפיגמנט (סיד), והעדות לנחושת גם בפיגמנט האדום מראה שהרקע שבציור היה כחול, לפני הוספת הצבע האדום של הננסים. תוצאות אלו נובעות מכך שעומק חדירת ה-XRF הוא לפחות כמאה מיקרונים ועובי הפיגמנטים הוא לרוב עשרות מיקרונים בודדים. לכן המידע כולל לעיתים גם את תשתית הציור (סיד) ושכבות פיגמנטים עמוקות (Angelini et al. 2019). תפרחות מלחים נראות גם כן על התמונה, בצורה שמחזירה את האור הלבן בצורה בוהקת על גבי הרקע הצבוע (איור 2A).

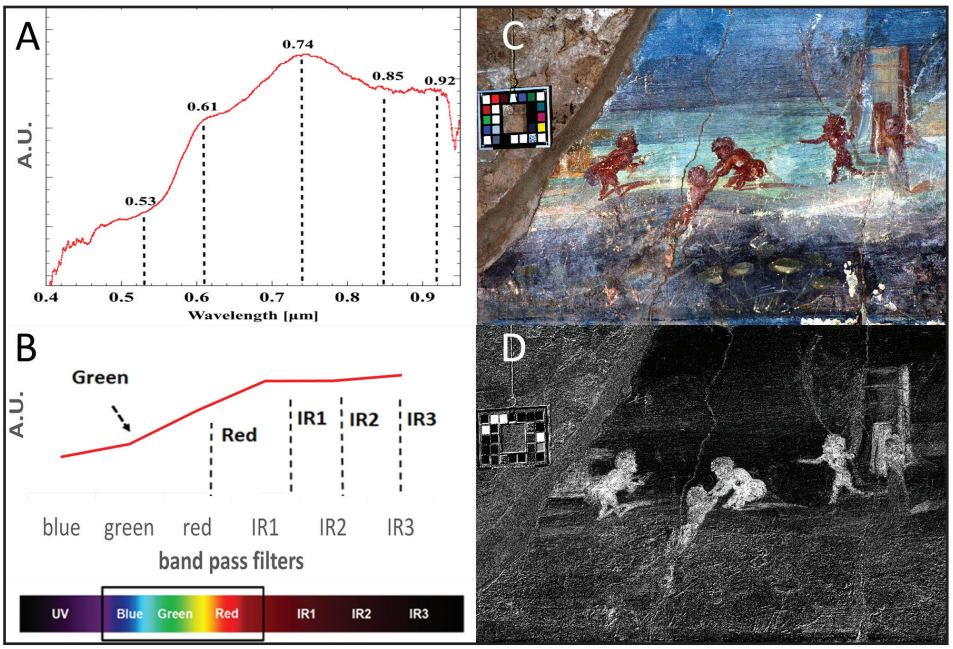


איור 2: (A) ציור הקיר המערבי ב-frigidarium, עם מיקום נקודות של פיגמנטים אדומים (ספקטראות אדומים) וכחולים (ספקטראות כחולים) אשר נותחו בשיטות pXRF ו-FORS. (B) ספקטראות FORS (אשר נותנת מידע מולקולרי-מבני) מראות שהנקודות האדומות מכילות את המינרל המטיט (תחמוצת ברזל) והנקודות הכחולות מכילות את המינרל קופרוריאויט (כחול מצרי), מינרל סיליקתי של נחושת. (C) ספקטראות XRF (אשר נותנות מידע על ההרכב הכימי), מראות שהיסודות הכימיים של הצבעים האדומים עשירים בברזל, והספקטראות של הצבעים הכחולים עשירים בנחושת.

על בסיס המידע הכימי והמולקולרי-מבני, פותחו יחסים ספקטרלים ייעודיים לזיהוי המינרל המטיט בדומה לפיתוח שנעשה לזיהוי קופרוריאויט (Asscher et al. 2019). אינדקס המטיט מבוסס על יחס הפיקים ב-0.74 מיקרון, הכתף של הפיקים ב-0.61 מיקרון וב-0.92 מיקרון, ונקודת השֵׁפֶל ב-0.53 מיקרון, שמקבילים לשימוש במסנני הפס IR1, IR2, IR3, ואורך הגל האדום והירוק באור הנראה במצלמה המולטיספקטרלית (איור 3). היחסים הספקטרלים הם:

$(I_{0.74}+I_{0.92})*I_{0.61})/(I_{0.53}*I_{0.85})$ בספקטרופוטומטר UV-VIS-NIR, ו-$(I_{IR1}+I_{IR3})*I_{red})/(I_{green}*I_{IR2})$ בתמונות המולטיספקטרליות מיועדים להעצים את הניגודיות בעיבוד התמונות, כדי לקבל מפה ויזואלית של המקומות הפוטנציאלים של המינרל המטיט. תהליך קביעת היחסי הספקטרלים לאינדקס המטיט הוא על בסיס מציאת הדומה והשונה בין הספקטראות של FORS (איור 3A) אשר מראה את הספקטרום ברזולוציה גבוהה (±0.001 מיקרון), לעומת

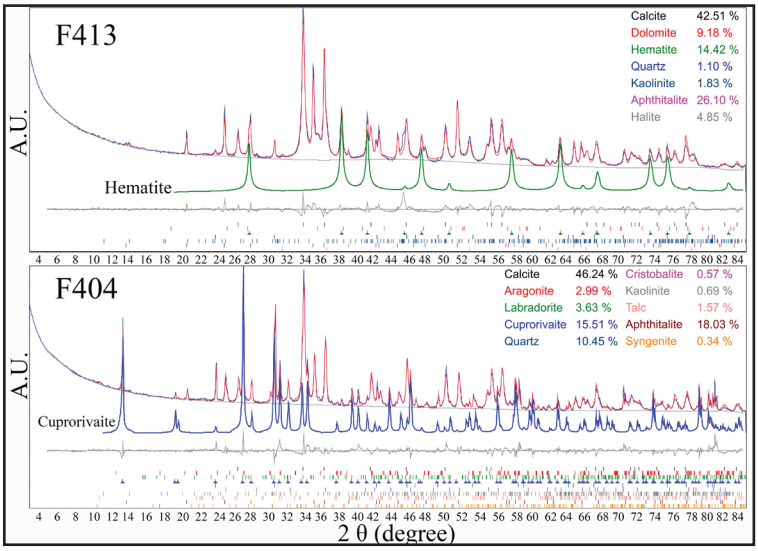
השימוש במסנני פס רחבים בצילום המולטיספקטרלי של הנקודות האדומות בציור הקיר (איור 3B). יחסי פיקים אלו נמצאו בצורה אמפירית המאפשרת העצמת ניגודיות בעיבוד התמונות, ביחס ישיר לכמות הפיגמנטים וריכוז היסודות הכימיים בפיגמנטים (Asscher et al. 2019). כיוון שאנו משווים בין אפיון נקודתי ברזולוציה גבוהה (הנקודה שנמדדה מסומנת באדום באיור 2A) לניתוח מולטיספקטרלי של רזולוציה נמוכה על אותו האזור, האינקס המטיט מספק חיזוי הסתברותי של מיקום המינרל המטיט (איור 3D), שתואם לנצפה ויזואלית באור הנראה (איור 3C).



איור 3: ניתוח ספקטרלי של המינרל המטיט בציור הקיר המערבי ב-frigidarium. **(A)** ספקטרום החזר אור באור הנראה, עם מיקומי הפיקים למטרת חישוב המינרל המטיט $(I_{0.74}+ I_{0.92})*I_{0.61})/(I_{0.53}*I_{0.85})$, (B) וספקטרום על בסיס תמונות מולטיספקטרליות המראה את מיקום מסנני הפס שהיו בשימוש $(I_{IR1}+ I_{IR3})*$ $(I_{red})/(I_{green}*I_{IR2})$, (C) תמונת אור נראה של ציור הקיר המערבי, (D) אינקס המטיט המבוסס על ניתוח מולטיספקטרלי של העצמת הניגודיות של המינרל המטיט על בסיס יחסים ספקטאליים.

זיהוי המינרלים בפיגמנטים בציורי הקיר ב-frigidarium, על בסיס אור מוחזר בנקודות בדיקה בודדות על בסיס FORS (רזולוציה ספקטרלית גבוהה) או על בסיס צילום מולטיספקטרלי (רזולוציה ספקטרלית נמוכה), נכנס לתוקף לאחר השימוש בשיטה מבוססת של זיהוי מינרלים (הלקוחה מעולם הגיאולוגיה) הנקראת דיפרקציית קרני X (XRD). שיטה זו היא הרסנית ובאמצעותה אפשר לזהות את כל המכלול המינרולוגי ולא רק את הצבענים בפיגמנטים. שיטה

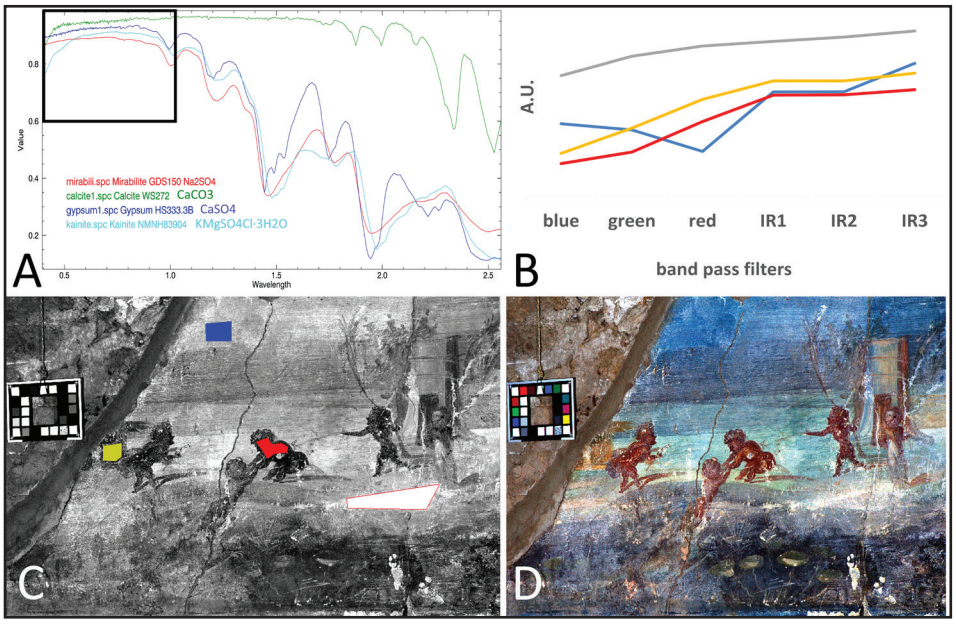
זו משלימה את הניתוחים הלא הרסניים שהם ממוקדים לזיהוי מינרלים צבעונים, אבל היא דורשת הכנת הדוגמה לאבקה באמצעות כתישה של החומר. לרוב זה לא אפשרי בציורי קיר, אך ב-frigidarium נמצאו שברים מציור הקיר שנמצאו קבורים בתחתית ואשר עברו אנליזה (Asscher et al. 2019). תוצאות המדידה מראות שההרכב המינרולוגי המלא (איור 4) של שתי דוגמאות, אחת צבועה באדום (F413) והשנייה בכחול (F404), כוללות מלחים של בליה, את תשתית הטיח, האגרגטים של הטיח ואת הפיגמנטים. הפיגמנטים מאששים את המסקנות מניתוח FORS ו-XRF אשר הראו שהמינרלים הם המטיט וקופרוריאויט. הקלציט של הטיח מראה בין 42%–46%, והצבענים בשברי הקיר אדומים (F413) היו על בסיס 14% מינרל המטיט (Fe_2O_3) ובשברי הקיר הכחולים (F404) היו על בסיס 15% המינרל קופרוריאויט (כחול מצרי). שברי קיר צהובים לא נמדדו במחקר זה, אבל אופיינו למינרל גואטיט במחקרים קודמים (Ivana Angelini). כמו כן יש בין 18%–26% תוצרי מלחים של סולפטים על בסיס אשלגן (K), נתרן (Na) כגון אפטיטוליט ($(K,Na)_3Na(SO_4)_2$ -aphthitalite).



איור 4: תוצאות מדידות דיפרקציה של קרני X על שברי קיר הצבועים באדום (F413) וכחול (F404). התוצאות מראות את ההרכב המינרולוגי המלא, כולל מלחים של בליה (בעיקר אפטיטוליט), תשתית הטיח והאגרגטים של הטיח (קלציט וארגוניט) ואת המינרלים המטיט (בפיגמנט האדום) וקופרוריאויט (בפיגמנט הכחול).

תיעוד תוצרי בליה, כגון מלחי הסולפטים, יכול ללמד על תהליכי הבליה ומצב השימור של ציור הקיר. עם זאת ניתוח ספקטרלי ברזולוציה גבוהה של תוצרי בליה מראה שאין פיקים משמעותיים אשר יכולים לעזור בבנייה של אינדקס ספקטרלי. תוצרי בליה מבוססים על התגבשות מינרלים, כגון סולפטים על בסיס נתרן (Mirabillite מסומן באדום באיור 5A), מגנזיום (kainite מסומן

בטורקיז באיור 5A) וסידן (gypsum מסומן בכחול באיור 5A), נוסף לקלציט (מינרל התשתית של הטיח, מסומן בירוק באיור 5A, המראה על נקודות ששכבת הציור התקלפה וחשפה את התשתית). לעומת זאת, ניתוח מולטיספקטרלי של כמות עוצמת האור המוחזר באזורים הלבנים המעידים על התגבשות מלחים או נשירה של שכבת הציור, אכן מראה שלמלחים יש עוצמת החזרה גבוהה יותר יחסית לפיגמנטים האדומים והכחולים (כי הם לא בולעים באור הנראה ולכן הם נראים לבנים/שקופים). ישנה עלייה הדרגתית ומתונה של עוצמת החזר האור מאורכי גל קצרים לאורכי הגל הארוכים (איור 5B), יחסית למינרל גואטיט (הצבען הצהוב) והמינרל המטיט (הצבען האדום) שגם להם עלייה הדרגתית בעוצמה. כיוון שהאזור הנדגם בניתוחים מולטיספקטרלים יכול להיות גדול סטטיסטית יחסית לנקודות הדיגום הנעשות באמצעות FORS ו-XRF (איור 5C), אפשר להוסיף את עוצמת האור המוחזר לסל הכלים של הניתוחים המולטיספקטרלים ככלי לזיהוי בליה.



איור 5: ניתוח ספקטרלי של מינרלים המשויכים לבליה. (A) ספקטראות האור המוחזר של תוצרי בליה מסטנדרטים של USGS של נתרן סולפטי (mirabili-אדום), קלציט (ירוק), סידן סולפטי (gypsum- כחול) ומגנזיום סולפטי (kainite – טורקיז). ריבוע שחור מסמן את התחום הספקטרלי הרלבנטי לתחום המצלמה המולטיספקטרלית. (B) ספקטרום על בסיס תמונות מולטיספקטרליות המראה את עוצמת האור המוחזר של המטיט (אדום), קופרוריאויט (כחול), גואטיט (כתום) ומלחי בליה (אפור). (C) מיקום שטח האנאליזות המולטיספקטרליות של הננסים האדומים (אדום), השמיים (כחול), מבנה צהוב, ומלחי הבליה (לבן). הפוליגונים המשויכים לניתוח המולטיספקטרלי הם פיגמנטים האדומים (155,196 פיקסלים), הכחולים (121,992 פיקסלים), צהובים (77,235 פיקסלים), והלבנים (538,376 פיקסלים) בנתונים המולטיספקטרלים (כל פיקסל כ-200 מיקרונים בשטח). (D) תמונה באור הנראה להשוואה של מיקומי הדוגמאות.

תיעוד מולטיספקטרלי משולב עם מדידות אנאליטיות נקודתיות מאפשר מיפוי מינרולוגי בציורי הקיר של החדר הקר (frigidarium) של קומפלקס מרחצאות ה-Sarno בפומפי. ניתוח נקודתי כימי ומולקולרי-מבני מראים שוני מהותי בין שני פיגמנטי עיקריים בציור הקיר, המטיט שהוא תחמוצת הברזל הקיימת באוכרות והשני קופרוריאויט (כחול מצרי). הניתוחים הנקודתיים היו מבוססים על מכשירים ניידים, הראשון מכמת את עוצמת החזר האור באורכי גל של האינפרה אדום והאור הנראה (FORS), בתחום אורכי הגל המותאמים לתחום של המצלמה המולטיספקטרלית, והשני מודד את עוצמת הפלאורוסנציה של החומר לאחר הקרנה עם קרני pxrf (pXRF). כיוון שהמכשירים ניידים, אפשר לקחת אותם לשטח החפירה ולהצליב אותם עם צילומים מולטיספקטרלים (Asscher et al. 2019). צילומים אלו יכולים ללמד לרוב על האיקונוגרפיה של ציורי הקיר באמצעות הבלטה והחסרה של צבעים, ניגודיות ועוצמה עקב תגובת החומר עם אורכי גל שונים (Chaban et al. 2017). זיהוי הפיגמנטים אושש במדידות מינרולוגיות נוספות של שברי ציורי הקיר ומדידתם בשיטת דיפרקציית קרני X (XRD). שיטה זו לא ניידת, ולכן אפשרית רק אם יש שברים או אם אפשר לדגום את ציור הקיר, מה שלרוב לא אפשרי. עבודה זו מראה שאפשר לשלב בין כל השיטות, כדי ליצור מערך נתונים חצי כמותי של כמות הפיגמנט, זיהוי ומיפוי של המינרל המטיט שהיה בשימוש לצביעת הננסים על גדות הנהר. זה תורם להבנת האלמנטים האִיקוֹנוֹגְרָפִים אשר כוללים חיות בנהר, ננסים, וגרדיאנטים של שימוש בצבע כחול להעמקת ההבדלים בין השמים לנהר. נוסף על כך, אפשר לקבוע שהננסים מכילים רק את הצבע האדום ללא תוספות מינרולוגיות נוספות כגון גואטיט הנמצא לעיתים בתשתית הטיח, על בסיס ניתוח שברי ציורי הקיר דרך (Angelini et al. 2019). המיפוי התבצע ברזולוציה מרחבית גבוהה עם פיקסלים של מיקרונים המאפשרים גם להעריך את מצב השימור והבליה. הבליה של ציורי קיר באתרים ארכיאולוגים תלויה בכמות התיירים ואיכות האוויר, חשיפה לגורמי מזג האוויר וניסיונות קודמים לשימור. מיפוי הפיגמנטים מאפשר לתת הכוונה למקומות שצריך לשמר, לתקן או לשחזר או לבנות בהם אסטרטגית שימור. תיעוד מצב השימור קריטי בחדר הקר עקב הבליה המרובה (נספח 4), ותיעוד מולטיספקטרלי מוסיף לסל כלי המחקר בזיהוי איקונוגרפי, מיפוי הפיגמנטים ותוצרי בליה, עם פוטנציאל לתיעוד דיגיטלי פוטוגרמטרי ב-3 ממדים (Lanteri et al. 2019). חשוב לציין שזיהוי הפיגמנטים במכשירים אנליטיים המבוססים על דגימה נקודתית לא יצליח לשקף את המורכבות בחומרים, ולכן הגישה הכללית במחקר היא לנסות למצוא שיטות חדשות למיפוי, כדי לגלות ולהעשיר את המידע על שימוש בפיגמנטים בתקופות קדומות. החסרונות במיפוי הם שהצילומים לרוב הם לא היפר-ספקטרליים עקב עלויות המכשירים, וקיימים רק מספר מוגבל של מסנני פס המאפשרים צילום של ציורי הקיר.

שיטות למיפוי המינרל באמצעות אינדקס ספקטרלי ברזולוציה גבוהה (על בסיס מידע מה-FORS) שמומר לאינדקס ברזולוציה ספקטרלית נמוכה (על בסיס מספר מוגבל של מסנני פס), מראה שאפשר לעשות את המיפוי רק כאשר אין מינרלים שונים עם אותו האופי הספקטרלי (כגון גואטיט, תחמוצת נוספת של ברזל שהייתה בשימוש בתקופה הרומית). בעיר העתיקה פומפי, המינרל גואטיט הפך למינרל המטיט בגלל החשיפה לחום ההתפרצות הוולקנית (Marcaida et al. 2017) ויהיה קשה למפות אותו. שני המינרלים הם בעלי אותו אופי ספקטרלי ברזולוציות נמוכות של מסנני הפס. אפשר להפריד ביניהם בשימוש ב-FORS שיש לו רזולוציה ספקטרלית גבוהה ו-XRF (Asscher et al. 2019).

אפליקציות נוספות של צילום מולטיספקטרלי על בסיס מצלמות עם פילטרים חיצוניים הם תיעוד בזמן החפירה הארכיאולוגית, כאשר מינרלים מסוימים יכולים להיות במעקב שגרתי בשלבים השונים של החפירה, כדי למפות טוב יותר אלמנטים ארכיטקטוניים וסדימנטים שיש להם צבעים דומים, עם הרכב מינרולוגי שונה. הידע הנוסף מהשימוש באורכי גל באינפרה אדום הוא גם תגובת החומר וגם חדירת האור כמה מיקרונים לתוך החומר. זה יכול לבוא לידי שימוש בציפויי פטינה או בתוצרי בליה אשר לא משקפים את מהות החומר (לדוגמה פטינה על חפצי צור). מיפוי המינרל המטיט המצוי באוכרה, היה בשימוש מאז הפרהיסטוריה בציור קיר, מחשופי סלע, ומצוי אפילו בסדימנטים באתרים ארכיאולוגים המכילים קרקעות כטרה רוסה. מיפוי המינרל יכול לשמש למיפוי ציורי קיר ברזולוציה מרחבית גבוה שנהרסו עם הזמן (Linn et al. 2017).

סיכום

צילום מולטיספקטרלי במצלמה רגילה עם הוספת מסננים חיצוניים מאפשר למפות את המינרל המטיט אשר מצוי באופן טבעי באוכרות, והיה בשימוש כצבען של ציור הקיר בחדר הקר בקומפלקס מרחצאות Sarno בפומפי. ספקטראות של אור מוחזר בשיטת FORS מראה ששני פיגמנטים עיקריים היו בשימוש: אדום (המטיט) וכחול (קופרוריאויט). ניתוח כימי בשיטת XRF וניתוח מולקולרי-מבני בשיטת FORS מאפשר לנו לזהות את הפיגמנטים ולפתח אינדקס מיפוי של המינרל המטיט לפי יחסי פיקים בעוצמת האור המוחזר באורכי הגל באור הנראה. היחסים הספקטרליים בתמונות המולטיספקטרליות ובספקטרופוטומטר אור נראים לא תואמים ומצריכים כיול מחדש על כל פיגמנט. המינרל המטיט היה בשימוש ציור ננסים על גדות נהר בציורי הקיר המערבי של החדר הקר. תוצרי בליה ניתנים לזיהוי ואפיון גם כן באמצעות כימות עוצמת האור המוחזר של אזורים עשירים במלחים או נשירת שכבת הצבע. מיפוי המינרל המטיט יכול לשמש למיפוי ציורי קיר, מיפוי קרקעות וסדימנטים באתר הארכיאולוגי ברזולוציה מרחבית גבוהה.

תודות

אני מודה לחברי הסגל באוניברסיטת פאדובה, איטליה: Michele Secco, Ivana Angelini, Gilberto Artioli and Rita Deiana.

אני מודה גם ל-Matteo Parisatto מחברת GeoMEB S.r.l.s, על תרומתו למחקר במסגרת הפרויקט של אוניברסיטת פאדובה בפומפי:

Multidisciplinary methodological Approaches to the knowledge, conservation and valorization of Cultural Heritage: application toarcheological sites
(project: STPD11B3LB 002)

ביבליוגרפיה

Amadori, M.L., Barcelli, S., Poldi, G., Ferrucci, F., Andreotti, A., Baraldi, P. and Colombini, M.P. (2015). Invasive and non-invasive analyses for knowledge and conservation of Roman wall paintings of the Villa of the Papyri in Herculaneum. *Microchemical Journal* 118: 183-192.

Angelini, I., Asscher, Y., Secco, M., Parisatto, M. and Artioli, G. (2019). The pigments of the frigidarium in the Sarno Baths, Pompeii: identification, stratigraphy and weathering. *Journal of Cultural Heritage* 40: 309-316.

Asrar, G.Q., Fuchs, M., Kanemasu, E.T. and Hatfield, J.L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat 1. *Agronomy journal* 76(2): 300-306.

Asscher, Y., Angelini, I., Secco, M., Parisatto, M., Chaban, A., Deiana, R. and Artioli, G. (2019). Combining multispectral images with X-ray fluorescence to quantify the distribution of pigments in the frigidarium of the Sarno Baths, Pompeii. *Journal of Cultural Heritage 40*: 317-323.

Bruni, S., Cariati, F., Consolandi, L., Galli, A., Guglielmi, V., Ludwig, N. and Milazzo, M. (2002). Field and laboratory spectroscopic methods for the identification of pigments in a northern Italian eleventh century fresco cycle. *Applied spectroscopy* 56(7): 827-833.

Chaban, A., Deiana, R., Parisatto, M., Asscher, Y. (2017). Analysis of on-site multispectral images: a case study of degraded wall paintings in Sarno Baths, Pompeii. *Actis Arta Academia*

Cosentino, A. (2015). Panoramic, macro and micro multispectral imaging: an affordable system for mapping pigments on artworks. Journal of Conservation and Museum Studies, 13(1).

Cucci, C., Delaney, J.K. and Picollo, M. (2016). Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: old master paintings and illuminated manuscripts. *Accounts of chemical research* 49(10): 2070-2079.

Delaney, J.K., Ricciardi, P., Glinsman, L.D., Facini, M., Thoury, M., Palmer, M. and Rie, E.R.D.L. (2014). Use of imaging spectroscopy, fiber optic reflectance spectroscopy, and X-ray fluorescence to map and identify pigments in illuminated manuscripts. *Studies in Conservation* 59(2): 91-101.

Delaney, J.K., Thoury, M., Zeibel, J.G., Ricciardi, P., Morales, K.M. and Dooley, K.A. (2016). Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings and improved reflectography. *Heritage Science* 4(1): 6.

Di Maio, R., Meola, C., Grimaldi, M. and Pappalardo, U. (2012). New insights for conservation of Villa Imperiale (Pompeii, Italy) through nondestructive exploration. *International Journal of Architectural Heritage* 6(5): 562-578.

Dupuis, G., Elias, M. and Simonot, L. (2002). Pigment identification by fiber-optics diffuse reflectance spectroscopy. *Applied Spectroscopy* 56(10): 1329-1336.

Kruse, F.A. and Perry, S.L. (2007). March. Regional mineral mapping by extending hyperspectral signatures using multispectral data. In IEEE AeroSpace Conference, pp. 1-14.

Lanteri, L., Agresti, G. and Pelosi, C. (2019). A new practical approach for 3D documentation in ultraviolet fluorescence and infrared reflectography of polychromatic sculptures as fundamental step in restoration. *Heritage* 2(1): 207-215.

Legrand, S., Vanmeert, F., Van der Snickt, G., Alfeld, M., De Nolf, W., Dik, J. and Janssens, K. (2014). Examination of historical paintings by state-of-the-art hyperspectral imaging methods: from scanning infra-red spectroscopy to computed X-ray laminography. *Heritage Science* 2(1): 13.

Linn, R., Tepper, Y. and Bar-Oz, G. (2017). Visible induced luminescence reveals invisible rays shining from Christ in the early Christian wall painting of the Transfiguration in Shivta. *PloS one*, *12*(9), p.e0185149.

Maguregui, M., Knuutinen, U., Castro, K. and Madariaga, J.M. (2010). Raman spectroscopy as a tool to diagnose the impact and conservation state of Pompeian second and fourth style wall paintings exposed to diverse environments (House of Marcus Lucretius). *Journal of Raman Spectroscopy* 41(11): 1400-1409.

Maguregui, M., Knuutinen, U., Martínez-Arkarazo, I., Giakoumaki, A., Castro, K. and Madariaga, J.M. (2012). Field Raman analysis to diagnose the conservation state of excavated walls and wall paintings in the archaeological site of Pompeii (Italy). *Journal of Raman Spectroscopy* 43(11): 1747-1753.

Marcaida, I., Maguregui, M., de Vallejuelo, S.F.O., Morillas, H., Prieto-Taboada, N., Veneranda, M., Castro, K. and Madariaga, J.M. (2017). In situ X-ray fluorescence-based method to differentiate among red ochre pigments and yellow ochre pigments thermally transformed to red pigments of wall paintings from Pompeii. *Analytical and bioanalytical chemistry 409*(15): 3853-3860.

Miliani, C., Rosi, F., Borgia, I., Benedetti, P., Brunetti, B.G. and Sgamellotti, A. (2007). Fiber-optic Fourier transform mid-infrared reflectance spectroscopy: a suitable technique for in situ studies of mural paintings. *Applied Spectroscopy* 61(3): 293-299.

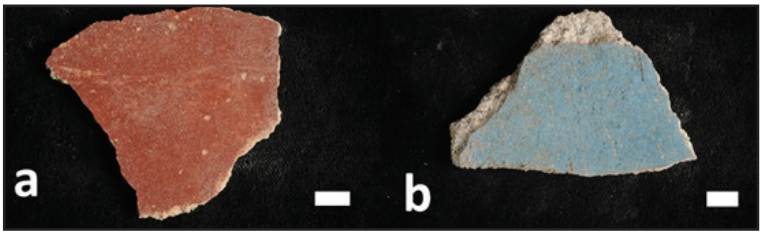
Mosca, S., Frizzi, T., Pontone, M., Alberti, R., Bombelli, L., Capogrosso, V., Nevin, A., Valentini, G. and Comelli, D. (2016). Identification of pigments in different layers of illuminated manuscripts by X-ray fluorescence mapping and Raman spectroscopy. *Microchemical Journal* 124: 775-784.

Pérez García, M.D.C., García Diego, F.J., Merello Giménez, P., D'Antoni, P., Fernández Navajas, A., Ribera i Lacomba, A., Ferrazza, L., Pérez Miralles, J., Baró Zarzo, J.L., Merce, P. and D'Antoni, H.L. (2013). Ariadne's house (Pompeii, Italy) wall paintings: A multidisciplinary study of its present state focused on a future restoration and preventive conservation. *Materiales de Construcción 63*(311): 449-467.

Verri, G. (2009). The spatially resolved characterisation of Egyptian blue, Han blue and Han purple by photo-induced luminescence digital imaging. Analytical and bioanalytical chemistry 394(4): 1011-1021.

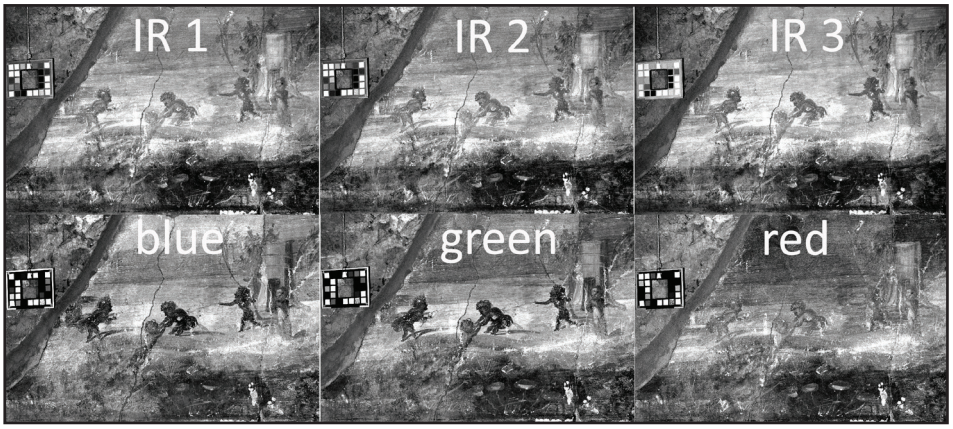
Zhang, X., Wang, Q., Li, J., Zhou, X., Yang, Y. and Xu, H. (2017). Estimating spectral reflectance from camera responses based on CIE XYZ tristimulus values under multi-illuminants. *Color Research & Application* 42(1): 68-77.

נספח 1



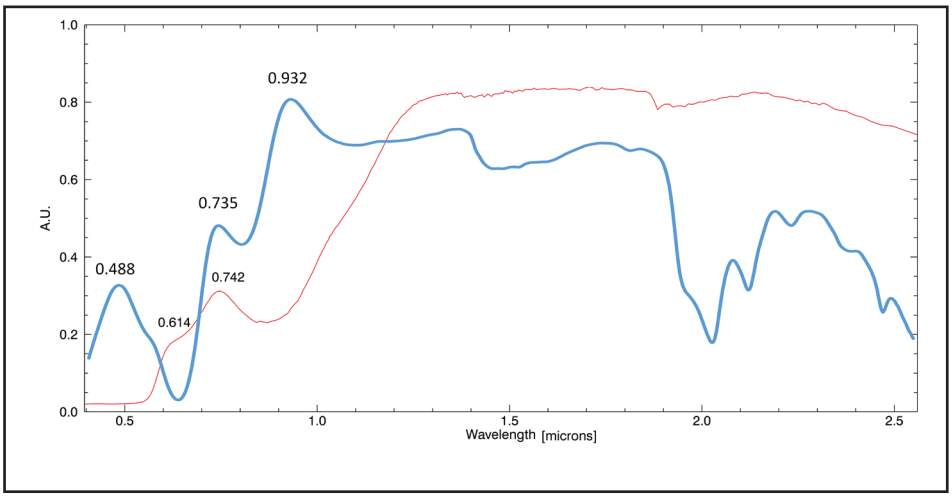
תמונות של שברי ציורי קיר שנמצאו מתחת לציור המערבי בחדר הקר ואשר נבדקו במחקר זה באמצעות דיפרקציית קרני X. ראה תוצאות באיור 4 בטקסט, כאשר a היא דוגמא 413, ו-b היא דוגמא 404.

נספח 2



שש תמונות באורכי גל שונים המרכיבים את קוביית המידע התלת ממדית. התמונות הן מונוכרומטיות (סרגל צבעים אפור) והן ממוקמות בצירי XY שלהם זו על גבי זו במדויק (לפי ממדי הציור) וציר Z שמהווה את התמונות הספקטרליות השונות. אפשר לראות שינויים בתמונות הנובעת מחדירת האור לתוך החומר ותגובת החומר עם האור.

נספח 3



ספקטראות האור המוחזר של סטנדרטי USGS של המטיט (אדום) GDS27 וקופרוריאויט (כחול מצרי).

נספח 4

הקיר הצפוני ב-frigidarium של קומפלקס הבריכות. אפשר לראות את המצב המקורי (שמאל, ציור משוחזר אחרי Niccolini, 1898), בשנת 1992 (ימין, אחרי Ioppolo) וכיום (אמצעי). בתמונה הקטנה אפשר לראות את המלחים המתגבשים על ציורי הקיר.

ארכיאולוגיה דיגיטלית - הזדמנויות וסכנות

חי אשכנזי

אוניברסיטת חיפה

תקציר

הארכיאולוגיה הדיגיטלית מספקת שפע של אפשרויות מהפכניות לאגירה וניתוח של המידע שנאסף בחפירות ובסקרים. בשנים האחרונות יותר ויותר משלחות וארכיאולוגים משתמשים בכלי מידול, דימוי ומיפוי על מנת כדי לתעד ולנתח את החפירה והממצאים שנמצאו בה.

כמו כל התחומים הקשורים למחשבים ותוכנה, גם תחום זה מתקדם בצעדים גדולים: כוח המִחשוב גדל, נפח האחסון עולה וכלים שרק לפני כמה שנים היו שיא הטכנולוגיה כבר מעלים אבק במחסנים. התקדמות זו טומנת בחובה גם סכנה גדולה והיא שרידות המידע. החוקר שינסה לגשת היום למידע הדיגיטאלי שנצבר בחפירות הראשונות שהשתמשו במחשבים יגלה שאם מאגרי הנתונים ואמצעי האחסון שלהן לא עודכנו ושודרגו במשך השנים, הנגישות אליהם תהיה נמוכה ביותר. הסיבות יכולות להיות תוכנות מיושנות שאי אפשר להריץ על מערכות הפעלה מודרניות, מידע שנמחק מאמצעי אחסון או חוסר בחומרה לקריאת אמצעי אחסון אלה.

גם כיום איננו חסינים מבעיות דומות. עם התקדמות הטכנולוגיה, הנתונים שאנו שומרים כיום עלולים להיות לא קריאים בעתיד. אפילו האחסון בענן אינו חסין מתקלות, למשל: הקבצים שאנו שומרים בו נכתבו באמצעות תוכנות שיהפכו למיושנות; אובדן סיסמה משמעו אובדן הגישה לכל החומר; החברה המפעילה את האתר עשויה להיעלם בתוך כמה עשורים והמידע איתה ועוד. מצב זה יגרום לכך שבעוד 50 שנה המידע שנצבר על נייר בחפירות מתחילת המאה ה-20 יהיה נגיש יותר מהמידע הדיגיטלי של תחילת המאה ה-21.

המידע הדיגיטלי הוא חשוב והכרחי למחקר המודרני. הכמות, האיכות והאפשרות לגשת אליו ולשלוח אותו לכל מקום בעולם מאפשרות שיתוף ידע בקנה מידה מהפכני ממש. עם זאת, עלינו לראות כיצד אפשר לשמור ולתחזק אותו לדורות הבאים.

הקדמה

המידע שנצבר בחפירות ומחקרים ארכיאולוגיים הופך בשנים האחרונות ממידע כתוב ומודפס למידע דיגיטלי שנשמר במגוון של אמצעי אחסון ממוחשבים. בעקבות "מהפכה דיגיטלית" זו כמויות המידע גדלו בצורה מרשימה והנגישות אליו הפכה קלה בהרבה. מעבר זה טומן בחובו יתרונות רבים, אך גם סיכונים, בעיקר בתחום שרידות המידע בטווח הארוך. מאמר זה דן בסיכונים אלו ובמה אפשר לעשות כדי לצמצם אותם.

רקע

עד לפני שנים לא רבות חפירות ארכיאולוגיות התנהלו ברובן בצורה אנלוגית על גבי נייר וצלולואיד. המידע נרשם בטפסים וטבלאות והמידע המרחבי נרשם כל יום בתוכנית יומית. צילומים צולמו בפילם, אם על ידי מנהלי החפירה או על ידי צלם מקצועי. בסוף העונה, ולעיתים גם במהלכה, הגיע לשטח שרטט שבנה תוכנית אבן-אבן של האתר. בסוף החפירה הסתכמו קובצי הנתונים בניירות ובמחברות, כמו גם בנגטיבים, שקופיות ובתמונות מודפסות. כאשר פורסמה החפירה, הועברו רוב הפריטים האלו לידי ארכיון רשות העתיקות. בידי החופר נשארו לרוב יומן החפירה ואולי מספר תמונות ושקופיות. במקרה של חפירה שלא פורסמה, נשאר כל המידע בידי החופר, יורשיו או במרתפי האוניברסיטה או המוזיאון שבהם עבד.

מאז סוף המאה העשרים חלו שינויים משמעותיים בדרך שבה מתנהלת חפירה ארכיאולוגית ובצורות איסוף המידע. החפירות מתנהלות לרוב בשיטות חפירה איטיות ודקדקניות יותר, ופרט לארכיטקטורה וקרמיקה נאספים עוד סוגי מידע רבים אחרים – החל מעצמות וצור ועד לדגימות קרקע, פולן, משקעים ופחמן 14. כיום אחוז גדול מהמידע שבעבר נרשם ביומני שטח ותוכניות יומיות, נאסף בצורה דיגיטלית על גבי מחשב נייד או טאבלט. גם רשימות שנעשות בשטח על גבי נייר מוזנות לאחר מכן לתוך בסיס נתונים. רשות העתיקות עוברת בשנים האחרונות מהפך בצורת איסוף הנתונים עם הכנסת מערכת DANA, ויותר חפירות הופכות נטולות נייר. רבות מהחפירות האוניברסיטאיות, ולא מעט מחפירות ההצלה הפרטיות, מתנהלות בצורה דומה: גבהים ומיקומים נמדדים באמצעות total station ומוזנים ישירות לתוך בסיס הנתונים, רישומי מנהלי החפירה והשטחים נעשים בטאבלטים וכל הצילומים מתבצעים באמצעות מצלמות דיגיטליות. גם החפירות שעדיין משתמשות בנייר שומרות אחוז גדול מהמידע שלהן במחשבים: במאגרי מידע, תוכנות עיבוד תמלילים, גיליונות אלקטרוניים וכמובן צילומים דיגיטליים. המידע הדיגיטלי ממשיך להצטבר גם בשלבי עיבוד החומר והסיכומים שלאחר החפירה, בצילומי ממצאים, שרטוטים, מפות ומודלים ממוחשבים, ניתוחים כמותיים על גבי גיליונות ממוחשבים וסיכומים ומאמרים כתובים.

פרט לחפירות, מחקרים ארכיאולוגיים רבים אחרים גם הם דיגיטליים. אפשר למנות ביניהם סוגי מחקר "מסורתיים" שנערכים כיום על גבי פלטפורמות דיגיטליות, כמו גם סוגי מחקר שנוצרו בזכות ה"מהפכה הדיגיטלית". לסוג הראשון שייכים למשל סקרים שמתבצעים כיום בסיוע של GPS או RTK ומעובדים על גבי GIS. לסוג השני שייכים בין השאר מחקרים שמשלבים מידול וניתוח תלת ממדי של אתרים ופריטים. המידע הדיגיטלי במחקרים אלו הוא מורכב, לרוב אינו ניתן להדפסה ויכול להיות מעובד ומנותח רק בתוכנה שנוצר בה.

הגדרת הבעיה

המהפכה הדיגיטלית המתוארת למעלה היא שינוי מבורך בהשוואה לדורות קודמים: כמויות המידע שנאסף גדולות בהרבה (הצילום הדיגיטלי לדוגמה מאפשר תיעוד רציף של החפירה ומידול תלת ממדי של האתר והממצאים), המידע נגיש מאוד (אפשרויות חיפוש ממוחשב מאפשרות הגעה קלה לכל פריט מידע), זמין (אפשר לגשת אליו מיד לאחר סיומו של יום החפירה), אפשר להפיצו בלחיצת כפתור (כדי שמספר חוקרים יוכלו לעבוד עליו בו זמנית ובאופן מיידי לאחר שנאסף), ואפשר לבצע עליו מניפולציות רבות באמצעות כלים ממוחשבים מגוונים. כמויות המידע הגדולות והזמינות שלו מאפשרות עבודה במקביל ושיתוף ידע עם חוקרים ברחבי העולם.

נוסף לכל יתרונותיו, טמונים גם סיכונים במידע הדיגיטלי. אפשר לתמצת אותם בשני מושגים: Survivability ו-Reliability (Li et al. 2012). בעברית אפשר לתרגם מושגים אלו לשרידות הנתונים ואמינותם.

שרידות הנתונים קשורה באופן ישיר לקצב החידושים במדעי המחשב. כמו כל התחומים הקשורים למחשבים, מתקדמים תחומי התוכנה והחומרה בצעדים גדולים – כוח המחשוב גדל, נפח האחסון עולה וכלים שרק לפני כמה שנים היו שיא הטכנולוגיה כבר מעלים אבק במחסנים. התקדמות זו טומנת בחובה גם סכנה גדולה והיא שרידות המידע, Survivability. אם חוקר ינסה לגשת היום למידע הדיגיטלי שנצבר בחפירות הראשונות שבהן השתמשו במחשבים, הוא יגלה שאם מאגרי הנתונים ואמצעי האחסון שלהן לא עודכנו ושודרגו במשך השנים, הנגישות אליהם תהיה נמוכה ביותר. הסיבות יכולות להיות תוכנות מיושנות שלא ניתן להריצן על מערכות הפעלה מודרניות, מידע שנמחק מאמצעי אחסון מגנטיים או חוסר בחומרה לקריאת אמצעי אחסון אלה.

דוגמה לשרידות הנמוכה של המידע הדיגיטלי אפשר לראות בסיפור הבא: לפני כמה שנים ביקש ממני אחד הפרופסורים שעבדתי איתם לעזור לו לקרוא את קובצי המחשב שבהם שמורה עבודת הדוקטורט שלו. אתגר ראשון היה שקבצים אלו נמצאו על גבי Floppy disks. למזלנו היה ברשותו מחשב עם כונן מתאים ויכולנו לגשת אל הקבצים. לאחר מכן גילינו שהקבצים נכתבו בעברית בסיועה של תוכנת עיבוד תמלילים ישראלית ישנה, שעובדת על מערכת הפעלה DOS. גם לאחר חיפושים רבים לא הצלחנו למצוא תוכנת המרה מתאימה, כפי הנראה מכיוון שמדובר בתוכנה ישראלית ומערכת הפעלה ישנה. הפתרון היחיד שנשאר היה להקליד באופן ידני את הקטעים הדרושים מתוך עותק מודפס של העבודה. זו דוגמה לבעיית Survivability, הקבצים אומנם קיימים, אך לא נשארה תוכנה שיכולה לקרוא אותם. בעוד כמה שנים מהיום גם לא תהיה חומרה שתוכל לקרוא את הדיסקטים שעליהם נשמרו קבצים אלה. בשורה הסופית,

הנתונים לא שרדו אף כי עברו לא יותר מעשרים שנה מאז שנכתבו. במילים אחרות, המידע הדיגיטלי לא שרד ורק העבודה המודפסת נשארה נגישה.

גם הנתונים שאנו מייצרים כיום אינם חסינים מבעיות דומות. עם התקדמותה המהירה של הטכנולוגיה, הנתונים שאנו שומרים כיום עלולים להיות לא קריאים בעתיד. אפילו האחסון בענן אינו חסין מתקלות: הקבצים שאנו שומרים בו נכתבו באמצעות תוכנות שיהפכו למיושנות; אובדן סיסמה משמעו אובדן הגישה לכל החומר (כמו במקרה של מנהל בורסת ביטקוין שמת ב-2019 מבלי להשאיר את סיסמאות הכניסה לחשבונותיו; Morris 2019); החברה המפעילה את האתר עלולה להיעלם בתוך כמה עשורים או להפסיק לשמור את הקבצים (כמו במקרה שבו נמחקה בטעות כמות אדירה של קבצי MySpace בתחילת 2019; Gibson 2019; Krukowski 2019). ללא שימור מתאים, בעוד כמה עשרות שנים אנו עלולים לעמוד בפני מצב שבו המידע הדיגיטלי של תחילת המאה ה-21 יהיה פחות נגיש מהמידע שנצבר על נייר בחפירות שנערכו במאה ה-20 (!). עם כל חסרונותיו של המידע האנלוגי השרידות שלו גבוהה בהרבה, ומקרים כמו גילוי מחדש של מחברות חפירה ישנות או כרטסות ממצא של חפירות שלא פורסמו מדגימים זאת. מידע שנכתב על נייר יכול להישמר במשך שנים רבות ללא שימור מיוחד ואין צורך בחומרה או תוכנה מיוחדות כדי לקרוא אותו.

הבעיה הנוספת שעימה אנו עלולים להתמודד בעתיד היא אמינות הנתונים, Reliability. גם אם נמצא חומרה שיכולה לקרוא את המדיה ותוכנה שתוכל לקרוא את הקבצים, המידע בהם עלול להיות לא תקין. יש סיכוי לא קטן שקבצים שנשמרו על גבי מדיה דיגיטלית מכל סוג שהוא הפכו corrupted והמידע בהם לא ניתן לקריאה, חלקית או מלאה.

נתונים נוספים שנמצאים בסיכון גבוה במיוחד הם נתונים דיגיטליים מורכבים (Delve and Anderson 2014) כגון מודלים תלת ממדיים, שנבנו על בסיס צילומים, על בסיס סריקת לייזר (LIDAR) או באמצעות תוכנות לשרטוט גרפי. מודלים כאלה הם רגישים במיוחד מכיוון שברוב המקרים מדובר במודל אינטראקטיבי שאין טעם להדפיסו על גבי נייר וצריך לשמר גם התוכנה הספציפית שבאמצעותה הוא מוצג. כמו כן כמות המידע שעל בסיסו נבנה המודל היא לרוב עצומה ודורשת קיבולת נתונים גבוהה. אפשר להניח שבעתיד כמות הנתונים הארכיאולוגיים ומידת הסיבוכיות של המודלים רק תגדל. כמו בענפי מדע אחרים, אפשר להניח שגם בארכיאולוגיה כמות המידע תגדל בעתיד עד לרמות של Big Data.[1]

1 Big Data הוא הכינוי למאגרי מידע הכוללים מידע רב מאוד מסוגים ופורמטים שונים ומגוונים.

המצב כיום

בישראל, לאחר שהחוקרים סיימו לעבוד על החומר ופרסמו אותו, מקבלת רשות העתיקות את נתוני החפירה. נתונים אלה כוללים סיכומים, צילומים, פירוט לוקוסים ופירוט ממצא. המידע העיקרי מוגש בצורה מודפסת והשאר מועבר בצורה דיגיטלית. בחפירות הרשות שנערכות בסיוע מערכת DANA, אכן עובר כל המידע, אולם בחפירות אחרות קיימים נתונים שלא מגיעים בהכרח לידי הרשות, כמו מאגר הנתונים של החפירה. במקרה של מחקרים שאינם חפירות ואין עליהם חובת העברה לרשות, נשאר כל החומר אצל החוקר.

החומר הדיגיטלי שמועבר לרשות נשמר בשרתים והחומר המודפס נשמר בארכיון. רשות העתיקות מנסחת כיום נהלים חדשים שיגדירו איזה חומר יועבר אליה ובאיזה פורמטים דיגיטליים, כדי לאפשר את שימורם לטווח הארוך. מידע דיגיטלי מורכב נשמר גם הוא ברשות, אולם כיום התמיכה היא רק למודלים תלת ממדיים שנבנו ברשות עצמה על בסיס תוכנת Bentley.

פרט לאמור לעיל, אין בישראל גוף מרכזי לשימור מידע דיגיטלי, אך גם בשאר העולם המצב אינו טוב יותר. לפני כעשור נכתבה אמנת London Charter[2], שמייעצת איך לשמור את המידע הדיגיטלי. אלו הם קווים מנחים ותיאורטיים למדי ליצירת מודלים ממוחשבים של Cultural Heritage. למעט מידע כתוב שנשמר על גבי קובצי PDF, לא קיימת כרגע מתודולוגיה של שימור מידע דיגיטלי, בין אם לטווח הקצר ובין אם לטווח הארוך (Charisse 2014; Pletinckx 2014).

פתרונות אפשריים

פתרון חלקי לבעיות הנזכרות לעיל הוא הדפסה של הנתונים. פתרון זה הוא חלקי, כי כך הנתונים מפסיקים להיות דיגיטליים, על כל המשתמע מכך; הם תופסים מקום פיזי רב, עלות ההדפסה גבוהה ובמקרה של חפירות שבהן נאספה כמות גדולה של נתונים אין זה מעשי להדפיס את כולם. נוסף לכך, הדפסות מודרניות נעשות לרוב באמצעות דיו שעם הזמן ידהה בצורה משמעותית. הדפסה באיכות גבוהה וברמה ארכיונית אינה מעשית עבור רוב החפירות. כפי שהוזכר קודם לכן, הדפסה אינה יכולה להיות פתרון מעשי עבור נתונים דיגיטליים מורכבים, כגון מודלים תלת ממדיים.

יש מספר אפשרויות לשימור המידע הדיגיטלי ואפשר לחלקן לשני סוגים: עדכון רציף או שימור סביבת העבודה. עדכון רציף משמעו שדרוג רציף של הקבצים כדי שיתאימו לגרסאות התוכנה החדשות. לדוגמה, עדכון של קובצי תוכנת Word עם יציאת גרסאות חדשות או מידי

2 http://www.londoncharter.org/index.html

כמה שנים. צריך לבצע זאת בצורה רציפה, כי עדכוני תוכנה מופיעים מידי כמה שנים ובשלב מסוים, כאשר מפסיקים לייצר את התוכנה, צריך להמיר את הקבצים כך שאפשר יהיה לקרוא אותם באמצעות תוכנה אחרת. שיטה זו פשוטה יחסית אך דורשת תחזוקה רציפה. חסרון נוסף הוא שבתהליך ההמרה עלולות להיווצר שגיאות בקובץ, וצריך לבדוק כל קובץ לאחר המרתו בצורה דיגיטלית או ידנית.

בשיטה השנייה, שימור סביבת העבודה, אנו משמרים את גרסאות הקובץ והתוכנה, כולל החומרה שעליהם היא רצה. זהו כנראה הפתרון היעיל ביותר לנתונים דיגיטליים מורכבים, שהשדרוג שלהם לגרסאות חדשות יותר או תוכנות אחרות עלול להיות מורכב ואף לא מעשי. לצד זאת , חומרה היא מוצר פיזי שמתבלה ומזדקן ומשך החיים שלו נמדד בשנים לא רבות. סביר להניח ששימור בשיטה זו ישרוד לכל היותר עשרות בודדות של שנים.

בכל שיטה לשימור המידע, יש צורך לבדוק באופן רציף את אמינותו. אין כיום אמצעי אחסון אמין לחלוטין, ולכן יש לבדוק את אמינות הנתונים ולגבות אותם. כפי שבארכיון פיזי יש לבדוק מידי פעם את מצב החומר המאוחסן בו, כך צריך לבדוק את הקבצים הדיגיטליים. הדבר יכול להיעשות בצורה פשוטה יחסית באמצעות כלים אוטומטיים המשווים את המקור והגיבוי.

דיון

כפי שהראיתי למעלה, למעבר למידע דיגיטלי יתרונות רבים ששינו וישנו את המחקר הארכיאולוגי ללא היכר. יחד עם זאת שרידותו של מידע זה בטווח הארוך מוטלת בספק, וצריך לעשות מאמצים משמעותיים כדי שגם הדורות הבאים יוכלו לנצל אותו. כאשר באים לבחון על מי מוטלת האחריות לשימור המידע, אפשר לחשוב על כמה גופים: החוקרים עצמם, האוניברסיטאות, החברות הפרטיות שעורכות חפירות הצלה או רשות העתיקות.

סביר להניח שלרוב החוקרים אין את המידע הטכנולוגי המתאים ואת משאבי הזמן לשדרוג הרציף של החומרה והתוכנה, ולכן אי אפשר לסמוך עליהם שישמרו את החומר שעבדו עליו.

לאוניברסיטאות יש אינטרס בשמירת החומר וסביר להניח שאפשר לעשות זאת במסגרת הספריות. כיום הן אינן עושות ובהיעדר מימון לא נראה שהמצב ישתנה. כמו כן אפשר להניח שכל אוניברסיטה תשמור את המידע בשיטות שלה, ויתכן שמידע זה לא יהיה נגיש לחוקרים או אוניברסיטאות אחרות.

החברות והעמותות המקיימות חפירות הצלה הן ארגונים פרטיים או פרטיים למחצה, ואין להם אינטרס להפנות משאבים לשימור המידע לטווח ארוך. נוסף על כך ארגונים מסוימים עלולים לפשוט את הרגל או להתפרק בשלב מסוים.

כאמור לעיל רשות העתיקות מרכזת כיום את המידע הדיגיטלי והפיזי שנצבר בחפירות שפורסמו, ויש לה את הבסיס לתשתיות הדרושות כדי לעשות זאת גם עם המידע הדיגיטלי.

מסקנות

המידע הארכיאולוגי, הדיגיטלי והלא דיגיטלי, צריך להישמר ברמה הלאומית (Pletinckx 2014). כיום מרכזת רשות העתיקות ממצאים ודוחות מחפירות שפורסמו, כמו גם מחקרים שביצעו חוקריה. הרשות היא הגוף היחיד שיש לו את היכולת והידע לעשות זאת בהיקפים גדולים. כדי שתוכל לעשות זאת, צריכה רשות העתיקות להוציא נוהל מסודר ומעודכן המגדיר לחוקרים את סוגי המידע להעביר, הדרכים להעברתו ותאריכי היעד להגעתו לידי הרשות. חומר זה כולל כבר כיום את הנתונים שפורסמו, אך הוא צריך גם לכלול את כל הנתונים הדיגיטליים שבידי החוקרים, כמו מאגרי נתונים ותוכניות דיגיטליות יומיות. נוסף לחפירות שפרסומן הסתיים, על החוקרים לשתף פעולה ולהעביר לרשות גם עותקים של בסיסי הנתונים והמידע הדיגיטלי שנצבר במחקרים אחרים.

כפי שהיא עושה גם כיום, על רשות העתיקות להמשיך ולדרבן חוקרים לפרסם את חפירותיהם. לנושא אקוטי זה מצטרפת גם שרידותו הנמוכה של המידע הדיגיטלי – להבדיל מחפירות שבוצעו בעבר, חפירה מודרנית שלא תפורסם תיעלם לחלוטין. אם בחפירות עבר שלא פורסמו היה סיכוי סביר שארכיון הנייר של החופר יישמר במשך לא מעט שנים, במקרה של ארכיון דיגיטלי פרטי אפשר להניח שבעוד עשרות ספורות של שנים לא יישאר שום מידע זמין לחוקרים העתידיים.

המוצע לעיל הוא פרויקט לאומי בסדר גודל גדול. לשם ביצועו על רשות העתיקות להקים מערכת מתאימה של חומרה, תוכנה ואנשי מקצוע שיתמודדו עם הכמויות העצומות של המידע ועם תחזוקתו ועדכונו השוטפים.

המידע הדיגיטלי חשוב והכרחי למחקר המודרני. הכמות, האיכות והאפשרות לגשת אליו ולשלוח אותו לכל מקום בעולם מאפשרות שיתוף ידע בקנה מידה מהפכני. עם זאת, בהיעדר תחזוקה הוא עלול להפוך ללא נגיש. עלינו לראות כיצד אפשר לאסוף, לשמור ולתחזק אותו לדורות הבאים.

תודות

תודה לאריה רוכמן ויואב ציונית מרשות העתיקות, ולו בל-אשכנזי מאוניברסיטת חיפה שעזרו לי להבין את המצב כיום.

ביבליוגרפיה

Charisse, P. (2014). “Archiving Software and Content in Visual Film Effects: an Insider’s Perspective”, in: J. Delve & D. Anderson (eds.), *Preserving Complex Digital Objects*, London, pp. 291-96.

Delve, J. & Anderson, D. (eds.), (2014). *Preserving Complex Digital Objects*, London: Facet Publishing.

Gibson, K. (2019). “MySpace Deletes 12 Years' Worth of Music and other Content”, <https://www.cbsnews.com/news/myspace-music-lost-as-12-years-worth-of-data-wiped-out/>.

Krukowski, D. (2019). “History Disappeared When Myspace Lost 12 Years of Music, and It Will Happen Again”, <https://pitchfork.com/thepitch/history-disappeared-when-myspace-lost-12-years-of-music-and-it-will-happen-again/>.

Li, Y., Miller, E.L., & Long, D.D.E. (2012). “Understanding Data Survivability in Archival Storage Systems”, in: *SYSTOR '12 Proceedings of the 5th Annual International Systems and Storage Conference*, Article No. 16.

Morris, C. (2019). “Cryptocurrency Owners Can't Access Funds After Exchange CEO Dies—Because No One Knows the Password”, <http://fortune.com/2019/02/04/cryptocurrency-quadrigacx-gerald-cotten-frozen-funds/>.

Pletinckx, D. (2014). “Preservation of Complex Cultural Heritage Objects - a Practical Implementation”, in: J. Delve & D. Anderson (eds.), *Preserving Complex Digital Objects*, London, pp. 273-80.

IAA Survey website. 2018. http://survey.antiquities.org.il/index_Eng.html#/MapSurvey/67

Idowu, J. and R. Flynn. 2015. *Growing Plants in Caliche Soils*. Guide A-151, Cooperative Extension Service. New Mexico State University.

Knapp, A.B. and Ashmore, W. 1999. Archaeological landscapes: constructed, conceptualized, ideational. In *Archaeologies of landscape: Contemporary Perspectives*. A.B. Knapp and W. Ashmore (eds.). pp.1-30. Blackwell Publishing.

Ladefoged, T.N., M.W. Gravesb, M.D. McCoyc. 2003. Archaeological evidence for agricultural development in Kohala, Island of Hawaiʻi. *Journal of Archaeological Science* 30: 923–940.

Manspeizer, N. 2006. The Mediation of a Functional-Aesthetic Landscape in New England: New Braintree, Massachusetts and the Identity of Place. *Middle States Geographer* 39:84-92.

Manspeizer, N.M., 2007. Modeling the Hyperreal Dimension with The Gap-Burden Method™: Social-Ecological Change in the Laramie Range, Wyoming and the Asymmetry of Time. *Middle States Geographer*. 40:88-95.

Marks, A.E., 1971. Settlement Patterns and Intrasite Variability in the Central Negev, Israel 1. *American Anthropologist* 73(5): 1237-1244.

Mayerson, P., 1985. The wine and vineyards of Gaza in the Byzantine period. *Bulletin of the American Schools of Oriental research* 257(1): 75-80.

Mikesell, M.W. 1975. The rise and decline of" Sequent Occupance": A chapter in the history of American geography. In *Geographies of the mind: Essays in historical geography in honor of John Kirtland Wright*. D. Lowenthal, Bowden, M.J. and Lamberty, M.A. (eds). pp.149-169. Oxford University Press.

Patrich, J. 2004. *Monastic landscapes. In Recent Research on the Late Antique Countryside* (Vol. 2). pp.413-446. Brill.

Philips, J. and Bar-Yosef, O., 1974. Prehistoric sites near Nahal Lavan, Western Negev, Israel. *Paléorient*, 2(2): 477-482.

Shavit, A. 2013. Gezer 82. IAA Survey website. ISBN# 978-965-406-303-6

Schenke, G. 2019. Monastic Control over Agriculture and Farming: New Evidence from the Egyptian Monastery of Apa Apollo at Bawit Concerning the Payment of APARCHE. In *Authority and Control in the Countryside. From Antiquity to Islam in the Mediterranean and Near East (6th–10th Century).* Leiden Studies in Islam and Society (9): 420–431.

Steinmann, A., 2010. *Runoff generation in Mediterranean areas* (Doctoral dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg).

Taxel, I. 2008. Rural Monasticism at the Foothills of Southern Samaria and Judaea in the Byzantine Period: Asceticism, Agriculture and Pilgrimage. *Bulletin of the Anglo-Israel Archaeological Society* 26: 57-73.

Tendler, A. and Y. Elisha. 2017. Modiʻin, Horbat Ashun, Preliminary Report. *Hadashot Arkheologiot* 129, IAA Report.

Turner, B.L. and Ali, A.S., 1996. Induced intensification: Agricultural change in Bangladesh with implications for Malthus and Boserup. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93 (25), pp.14984-14991.

References

Ackermann, O. T. Svoray and M. Haiman. 2008. Nari (calcrete) outcrop contribution to ancient agricultural terraces in the Southern Shephelah, Israel: insights from digital terrain analysis and a geoarchaeological field survey. *Journal of Archaeological Science* 35: 930-941.

Ackermann, O., H. Zhevelev and T. Svoray. 2013. Sarcopoterium spinosum from mosaic structure to matrix structure: Impact of calcrete (Nari) on vegetation in a Mediterranean semi-arid landscape. *Catena* 101: 79–91.

Ackermann, O. 2018. Life on Nari (Calcrete) Outcrops: A Base for Ecological and Human Systems in the Judean Shephelah. In *Tell it in Gath: Studies in the History and Archaeology of Israel*. I. Shai, J.R. Chadwick, L. Hitchcock, A. Dagan, C. McKinny and J. Uziel (eds.). Zaphon: Munster.

Ackermann, O., Zhevelev, H.M. and Svoray, T., 2019. Agricultural systems and terrace pattern distribution and preservation along climatic gradient: From sub-humid mediterranean to arid conditions. *Quaternary International* 502 (B): 319-326.

Arkin, Y. 1986. *Geotechnical and Hydrogeological Concerns in Developing the Infrastructure Around Modi'in (Hebrew)*. GSI/49/86. Jerusalem: Ministry of Infrastructures, Geological Survey of Israel.

Bar, D. 2005. 'Rural Monasticism as a Key Element in the Christianization of Byzantine

Palestine', *Harvard Theological Review* 98: 49–65.

Birkenfeld, M., M.D. Avery and L. Kolska Horwitz. 2015. GIS Virtual Reconstructions of the Temporal and Spatial Relations of Fossil Deposits at Wonderwerk Cave (South Africa). Afr. *Archaeol. Review* 32:857–876.

Brush, S.B. and B.L. Turner II. 1987. The Nature of Farming Systems and Views of their Change. In *Comparative Farming Systems*. B.L. Turner II and S.B. Brush(eds.). New York: Guilford Press.

Dagan, Y. 2010. Agricultural Activity in the Ramat Bet Shemsh Region. In *The Ramat Bet Shemesh Regional Project: The Gazetteer*. Ch. 15. Jerusalem: Israel Antiquities Authority.

Davidovich, U., N. Porat, Y. Gadot, Y. Avni and O. Lipschits. 2012. Archaeological investigations and OSL dating of terraces at Ramat Rahel, Israel. *Journal of Field Archaeology* 37(3): 192-208.

Duniway, M.C., J.E. Herrick and H. Curtis Monger. 2007. The Water-Holding Capacity of Petrocalcic Horizons. *Soil Science Society America Journal* 71 (3): 812-819.

Grey, C. 2007. Revisiting the 'Problem' of Agri Deserti in the Late Roman Empire. *Journal of Roman Archaeology* 20: 362–376.

Grosman L., N. Goren-Inbar. 2016. Landscape Alteration by Pre-Pottery Neolithic Communities in the Southern Levant—the Kaizer Hilltop Quarry, Israel. PLoS ONE 11(3): e0150395.

Haiman, M. 2011. Churches and Agriculture in the Land of Israel during the Byzantine Period: Data from the Mapping Project of Ancient Agriculture (Hebrew). In *17th Conference for New Studies of Jerusalem at Bar Ilan University*. A. Broch, A. Levy-Raiper and A. Poust (eds.). pp. 403-426.

Haiman, M. 2012. Dating the agricultural terraces in the southern Levantine deserts, the spatial-contextual argument. *Journal of Arid Environments* 86: 43–49.

Haiman, M., 2018. The Challenge of Digitized Survey Data. In *Cyber-Archaeology and Grand Narratives*. T.E. Levy and I.W.N. Jones (eds.). pp. 111-122. Springer, Cham.

Hennesey, J.T., R.P. Gibbens, J.M. Trimle and M.Cardenas. 1983. Water Properties of Caliche. *Journal of Range Management* 36 (6): 723-726.

Hirschfeld, Y. 1997. Farms and Villages in Byzantine Palestine. *Dumbarton Oaks Papers* 51: 33-71.

Ramat Bet Shemesh in which population is used to describe the driving force of expansion into arable land. But, the use of statistical analysis based on land cover and geomorphological type within ancient agricultural fields added a quantitative measure to the extensification in this study. Thus, GIS is used to deconstruct a spatial-temporal pattern regarding agricultural extensification because the stratigraphy in ancient agricultural landscapes is often inadequate. Thirty-five ancient agricultural fields were classified according to soil-quality from orthophotos using GIS and compared through both simple-linear and non-linear regression analysis with a predictive hypothesis based on extensification order. The results indicate a general trend that agricultural land-use extensified vertically in the Horvat Ashun study area from the stream beds in the Prehistorical periods, to the broad valleys, saddle and hill tops during the Chalcolithic and Bronze Age, to the first and second order tributaries and the hill sides from the Hellenistic period through the Early Muslim periods in a non-linear manner. Non-aribility, or poor soil quality due to rocky soil and bedrock in the fields, was demonstrated correlated with the extensification process over time when the extensification was segmented from Prehistory to the Bronze Age and from the Bronze Age to the Early Muslim period. According to the results, 42% of all agricultural lands were settled during the Chalcolithic and Bronze Ages, while 38% of all agricultural lands were settled between the Hellenistic period to Early Muslim period. Understanding the general patterns in agricultural intensification, such as in this study, are important because they contribute to predictive studies for future trajectories and our understanding of human-environmental relations. Notions such as sequent occupance may then be deconstructed despite complex landscape archaeologies and reconstructed in order to understand the trajectories of agricultural change. GIS proved most effective for this goal as a spatial database because it enabled the deconstruction of a complex spatial-temporal pattern through data compilation, database query and visual analysis. More work is required to develop a more robust statistical model in order to test the agricultural extensification hypothesis and its correlation to soil quality.

Acknowledgements: The authors would like to thank Yaakov Arkin for his kind assistance and explanation of the regional geology; both in the field and at the Geological Survey of Israel.

Table 2: Description of Agricultural Lands based on geomorphology, slope, non-aribility and area.

A. Geomorphology Type	B. Predicted Order of Agricultural Use (Dep. Variable)	C. Percent non-arable Land per field (Ind. Variable)	D. Avg Slope in Percent	E. Total Hectares per Type	F. Percent Area of all Ag. Land
Lg. Stream Bed	1	25.38%	6.27%	850.644	7.95%
Stream Bed	1	27.14%	4.92%	1021.954	9.55%
Broad Valley	2	14.30%	4.55%	3025.363	28.27%
Hill Top	2	2.61%	3.59%	607.584	5.68%
Saddle	2	17.08%	6.14%	783.15	7.32%
2nd Order Stream	3	31.66%	6.25%	1216.629	11.37%
1st Order Stream	3	25.67%	7.35%	2633.99	24.62%
Hill Side	3	44.90%	12.08%	560.674	5.24%
	Total P-value R-value	 0.125 0.264			

Table 3: Summary Table with order of agricultural extensification according to time periods with amount of new land acquired in the study area during each period, and the segmented correlation between non-aribility and agricultural Extensification for two major periods.

A. Order of Agricultural Extensification in Time	B. Total Area of new agricultural land use (hectares)	C. Percent of Total Agricultural Change	D. P and R Value for non-arability per period	
1 (Paleolithic and Neolithic)	208.55	19.49%	P = 0.02 R = 0.612	← Periods 1 and 2
2 (Chalcolithic and Bronze Age)	454.1	42.44%		P = 0.008 R = 0.475
3 (Hellenistic to Early Muslim)	407.36	38.07%	→ Periods 2 and 3	

DISCUSSION

The results of the GIS study indicate that agricultural extensification occurred in the area of Horvat Ashun from Prehistory through the Early Muslim period. This is evident as a visual spatial exercise using GIS (Figures 4 and 5), through fieldwork and using a spatial-contextual analysis of agricultural intensification. This corresponds with Dagan's (2010) generalization at

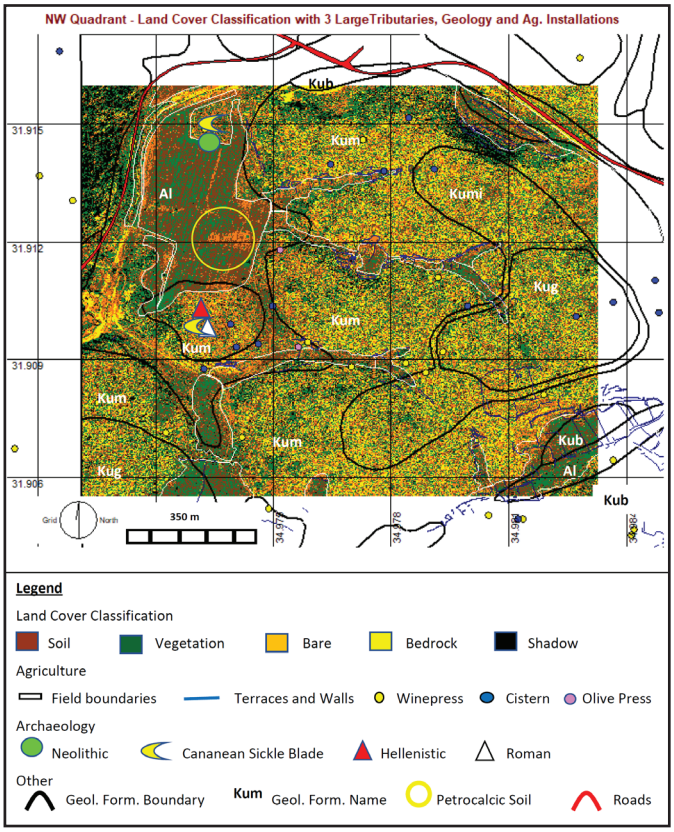


Figure 7: Land cover classification image derived from the orthophoto, NW quadrant of study area with geology and agricultural installations. This is the down-drop block west of the Modi'in fault (Fig. 5) with preserved Mt. Scopus Group Chalk covered by a thick cover of Caliche (Nari).

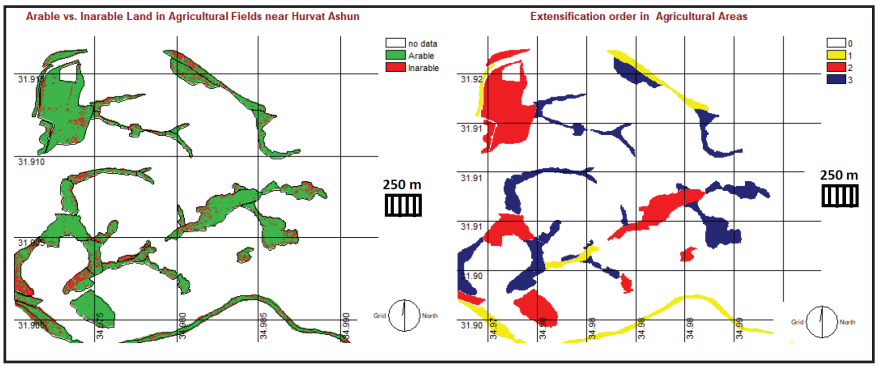


Figure 8: Left, arable vs. non-arable land in thirty-five ancient agricultural fields as derived from the land-cover classification. Right, extensification order of thirty-five ancient agricultural fields from Prehistory (1), Chalcolithic / Bronze Age (2) to Hellenistic to Early Muslim periods (3).

The results were compared in simple linear regression analysis with predicted field extensification order as the dependent variable and percent non-arability as the independent variable. A probability value (p-value) below 0.05 for an independent variable was deemed as statistically correlated with the dependent variable. The non-arable values had a P-value of 0.125, which is above 0.05, and therefore was deemed as coincidental and without a real relationship to the dependent variable, field extensification order (Table 2). The r-value, or correlation coefficient, was 0.264, which is considered a low correlation on a scale between -1 and +1. Therefore, in this data set, the relationship between soil quality and extensification order may be described as not highly correlated. The percent of non-arable, or land not suited for farming, in all of thirty-five agricultural fields in the study area was 27%. Based on the conclusions of the research however, there was more unsuitable land in the hills (tributaries and hill slopes that were terraced) than in the broad valleys and saddles. This supports notions that ancient agriculturalists were forced onto more marginal lands in the hills over time, especially after the Bronze Age. Therefore, a non-linear approach was taken by dividing the data set into two dominant period according to piecewise regression; 1) Prehistory to Bronze Age, 2) Bronze Age to Early Muslim. The results (Table 3D), demonstrate that there is correlation (r=0.612) found between soil quality and extensification between Prehistory to the Bronze Age as well as between the Bronze Age and Early Muslim Period (r=0.475). These correlations are also deemed as real and not coincidental as the p-value of both stages are below 0.05 (Table 3). Therefore a correlation exists when piecewise regression analysis is used because from the Bronze Age to the Early Muslim period the ancient agriculture moved onto more marginal lands in the hills from the broad valleys below. More research is necessary beyond this preliminary study in order to better understand the relationships and a more robust model established.

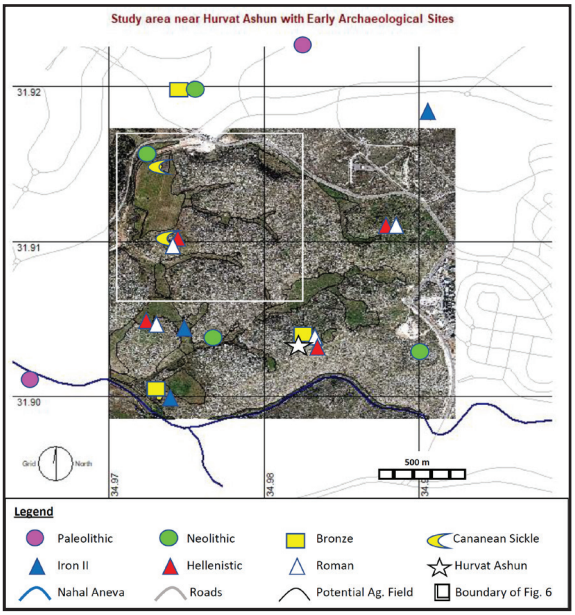


Figure 5: Orthophoto of the study area west of Modi'in near Horvat Ashun (white star). Potential agricultural fields are outlined along the drainage. Sources: IAA Survey website, Gezer 82 Map; Tendler and Elisha 2017.

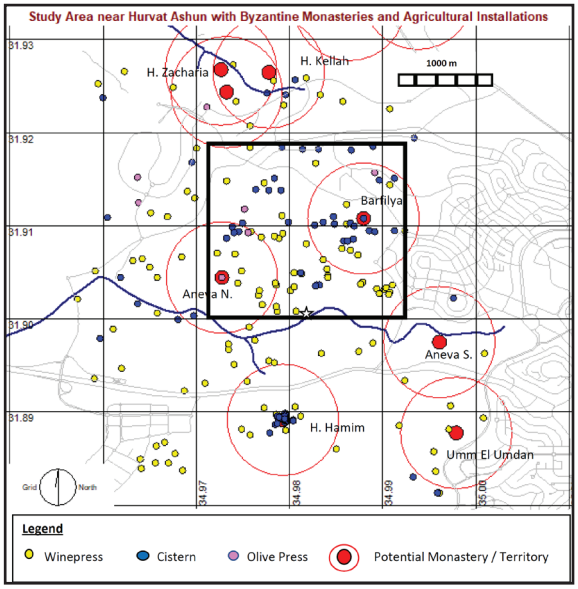


Figure 6: Agricultural installations from the Hellenistic period through the Early Muslim period (winepresses, cisterns and olive presses) and potential monastic sites from Byzantine period - from IAA Survey data, M. Haiman and A. Tendler. Note, there are 143 winepresses in a 5 km² radius surrounding H. Ashun and nearly 50 winepresses in the study area (black outline box) alone.

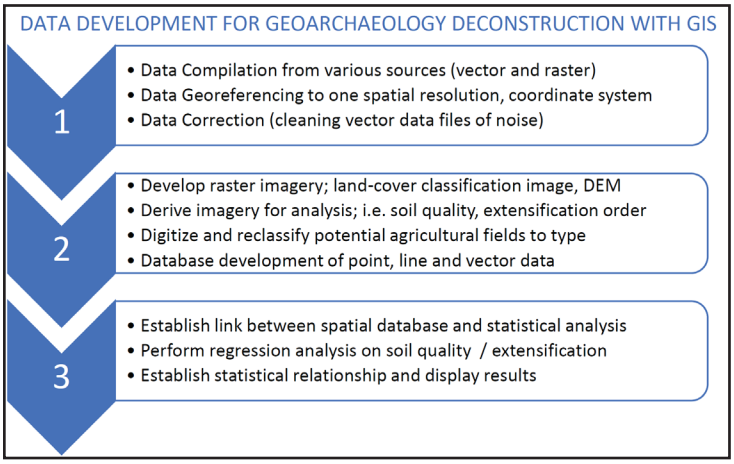


Figure 4: GIS research flow chart in three stages;
1) Data Compilation, 2) Data Development, 3) Analysis

The compilation and development of maps, a critical purpose of GIS, are visible in figures 5 and 6. Afterwards, a land-cover image was derived through unsupervised classification from the Survey of Israel (SI) 0.25 meter orthophoto and ground-truthing (Figure 7). The orthophoto bands are within the visible portion of the spectrum (~380 to 740μ) and therefore have limited but still valuable spectral information. The thirty-five agricultural fields with ancient installations were digitized, overlaid and compared visually with their proximity to the IAA Survey sites using GIS. Remote sensing methods were used to classify the land-cover based on an unsupervised methodology which enabled the spectral data of the orthophoto to be divided according to spectral pattern. The land-covers within the potential ancient fields were then reclassified as either arable or non-arable based on the land-cover classification and field analysis (Figure 8 left). Arability was defined as surface cover with soil, vegetation and vegetation shadow while non-arable was either bedrock or bare areas such as rocky soil. Third, all potential ancient agricultural fields were classified according to geomorphological type; large stream (nahal) bed, stream bed, broad valley, saddle, hill top, second order stream, first order stream, hill side. Then, the geomorphological types were ranked in predicted field extensification order from one through three (1, Prehistory; 2, Chalcolithic/Bronze; 3, Hellenistic to Early Muslim) based on the conclusions of the research from artifact locations and field work (Figure 8 right and Table 2).

According to Steinmann (2010), who measured runoff in the Aneva hills near Horvat Ashun, only 4% of the rainfall on the hills reaches the tributary or valley bottom even on a non-vegetated slope. This is inadequate for a runoff system (Ackerman *et al* 2013) although perhaps the slopes with their thick pockets of soil were utilized for viticulture or fruit trees in the past (Ackermann 2018). The more important aspect of the Caliche in agricultural settings is its relationship to rain water as both a sink (Dunniway *et al* 2007; Hennesey 1984) and because of nutrient depletion (Idowu and Flynn, 2015). Duniway et al (2007) and Hennesey (1984) both found that Caliche rock can absorb large amounts of water and retain it for several days. Additionally, Idowu and Flynn (2015) note that rain water which is leached from Caliche will cause a high soil pH (7-5-8.5). They further state that high pH can limit phosphorous availability to crops while Caliche leaching can also limit micronutrients in soil such as iron, boron, manganese and zinc. These factors, along with the nutrient depletion evident in the orthophotos of the study area at Horvat Ashun demonstrate that the soils may have been nutrient poor. This may have also been one factor in explaining why agriculture spread slowly into these areas although this may not have been well understood until after many growing seasons. A second reason involves the soil quality, as large parts (> 30%) of the 2nd order tributaries have rocky soil, uneven surfaces and even karstic features such as sinkholes (Arkin 1986). Hill side terracing may have been constructed between the Hellenistic to Early Muslim periods in order to counter nutrient depletion that occurred in the broad valleys and tributaries by moving the vineyards to new soils.

METHODOLOGY AND RESULTS

This research used GIS to develop a spatial-temporal database in order to map and analyze an ancient agricultural landscape near the Aneva Stream, Israel in which stratigraphic / temporal data is lacking. A statistical model that compared soil quality with a predictive model of agricultural extensification was built in order to test the extensification hypothesis and provide a substitute for the missing stratigraphic information. This was accomplished in several steps, namely compilation, development and analysis, detailed in Figure 4.

soils are identified, while in the Caliche hills north of Horvat Ashun, nutrient depletion is visible in the orthophotos (Figure 7). Rainfall in the study area is considered on average between 550-650 mm/yr (Israeli Meteorological Survey) which enables rainfed agriculture for most grains, orchards, vineyards and livestock known to the region. This raises a question regarding the use of a runoff type agricultural system within the tributaries such as check dams and wadi terraces. Similarities between the runoff system in the Shephelah should be compared to the construction in the Negev runoff systems during the Byzantine and early Muslim periods to research whether the same engineering was involved in both the Negev and Shephelah which would speak to Imperial scale initiative.

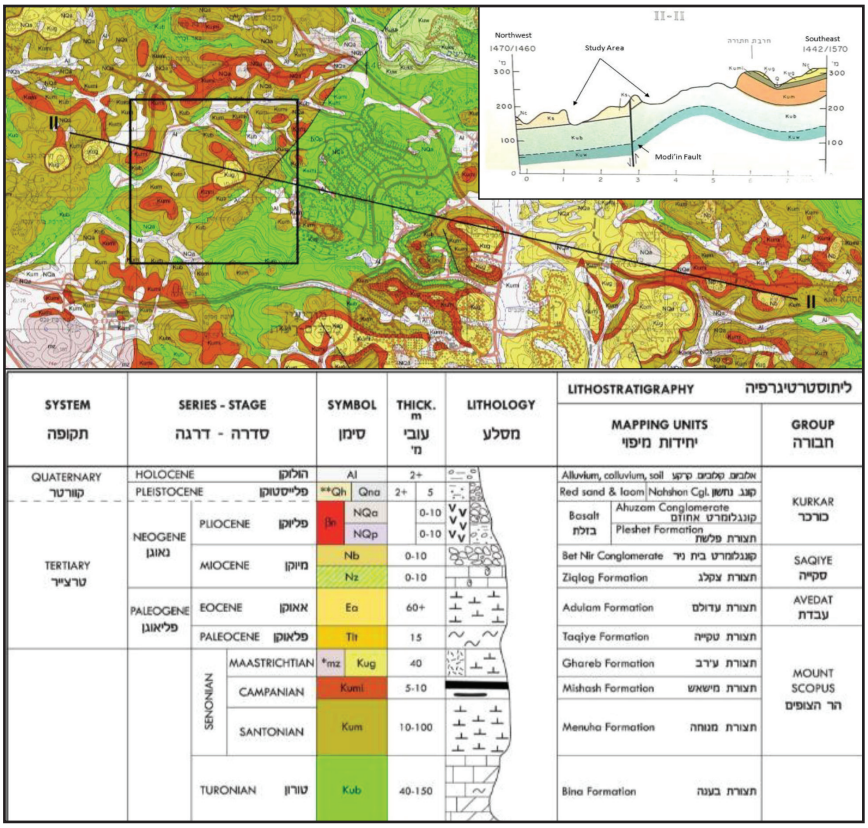


Figure 3: Geological Map (Lod Sheet 8-III, 2008) with stratigraphic section (Geological Survey of Israel) and cross-section inset (Arkin 1986). Note that the Modi'in Fault runs NE-SW through Barfilya toward Horvat Ashun while the axis of the Modi'in Anticline runs NE-SW east of the fault.

have been used for vineyards and olive orchards and there may have been some tributary farming of grains. But, during the 6th century AD major effort and investment was undertaken to conquer the 1st and 2nd order streams that cut into the Nari and limestone hills. Dating agricultural terraces is a difficult process and recently has relied upon OSL dating (see Davidovic et al 2012). Haiman (2012), describes efforts to utilize a more "spatial-contextual" approach at dating that could include contextual arguments. Procopius, for example, the Byzantine historian who wrote *The Secret History* about Emperor Justinian, also described momentous efforts of Imperial initiative at construction in *The Buildings*. Byzantine monastic agriculture is evident in the industrial size winepresses in which the monasteries and large land owners may have converted the landscape for monoculture production of wine.

ENVIRONMENTAL CONTEXT

The Aneva Hills near Modi'in-Reut (140-250m ASL) are geologically associated with the Judea-Samaria monocline system; a small fold within the syncline that defines the coastal plain. This fold, known as the Modi'in anticline is comprised of Upper Cretaceous age limestones and chalks from the Judea and Mt. Scopus groups, namely Bina limestone overlain by Menuha, Mishash and Ghareb chalks. Within the study area (Figure 3), the Modi'in fault cuts northeast-southwest from Barfiliya to Horvat Ashun. According to Arkin (1986), the downdrop block of this normal fault lies on the west where the soft chalk formations of the Senonian remain uneroded. On the east side of the fault, the soft chalks have been eroded on the the uplifted block with its higher elevation, and the underlying Bina Formation limestone remains exposed. Northwest of Horvat Ashun, a thick layer of hardpan Caliche (Nari) (1.5-2 meters) has been precipitated from the chalk formations which forms a cap with a distinct karstic erosionary surface. This surface is clearly visible in the orthophotos and also forms a pitted and uneven surface with exposed Caliche and pockets of rendzina soil. The tributaries of these Caliche hills form deep streams with steep walls (~ 1-2 meters). In agricultural fields within the Bina Limestone areas, no Caliche

kilometers from El-Midya, one of the possible locations of ancient Modi'in where the Maccabean Revolt began. The farmhouse had industrial aspects and served to produce olive oil and wine. Following the Great Revolt, and before the Bar Kochva Revolt, the farmhouse and the house at Horvat Hamutzav were further fortified with escape tunnels and hiding complexes. Still, despite the effort, the farmhouse would become a Roman estate (*villa rustica*) following the Bar Kochva Revolt and remain through the Byzantine period. During the Byzantine period, there were local villages at Barfilya, El Burj, Bet Aneba, Kharruba and Nekhes and sizable populations at nearby Moditha, Shaalbim, and Budros. The local population would have included Samaritans, Christian and Pagans. The majority of the rock-cut wine-presses, some 68 in the study area alone and 116 within a 5 km radius surrounding Horvat Ashun, are basic and most probably the remains of the agriculture of small land owners or share-croppers. These wine presses, 34 cisterns and 6 olive presses are the cumulative product of the residents of the villages in the area from the Hellenistic through Early Islamic periods (Figure 2).

During the 6th century, a change occurred in Palaestina Prima, based on historical records and ancillary data (Grey 2007; Hirshfeld 1997). This change included a desertion of agricultural lands due to high taxation and less rainfall that would lead eventually to drought before the Muslim Invasion in the 7th century. During this time, the Justinian Dynasty (6th century AD) may have enacted Imperial initiatives that can be seen in the agricultural landscape of the study area perhaps to bolster the region economically against the Sassanid threat or to produce wine for export on an industrial scale (Mayerson, 1985). During this period, monasteries begin to appear near Horvat Ashun – at Horvat Hamim, Horvat Zacharia, Horvat Khelah, Barfilya and Horvat Tantura. Nearby, Mevo Modi'in, Hagardi, Paosh, Huriah and Umm al Umdan. Still today, the 'Valley of the Monks' is only a few kilometers northwest near Zachariah while Emmaus/Latrun reminds of the monastic past. The Christianization of the landscape in the Shephelah during this period should not be overlooked (Bar 2005; Patrich 2004; Taxel 2008). Additionally, Schenke (2019) describes how the monastery at Apa Apollo in Egypt served as a large landowner and employed/leased land to local labor through an *aparche* system. Until the 6th century, the slopes of the hills could

field pointing to farming during these periods while a Beit Ta'amir knife for reaping was found near Horvat Zachariah. According to Shavit (2013), the Iron II period experienced substantial growth in the region that was curtailed by the Assyrian invasions and only resumed during the Hellenistic period.

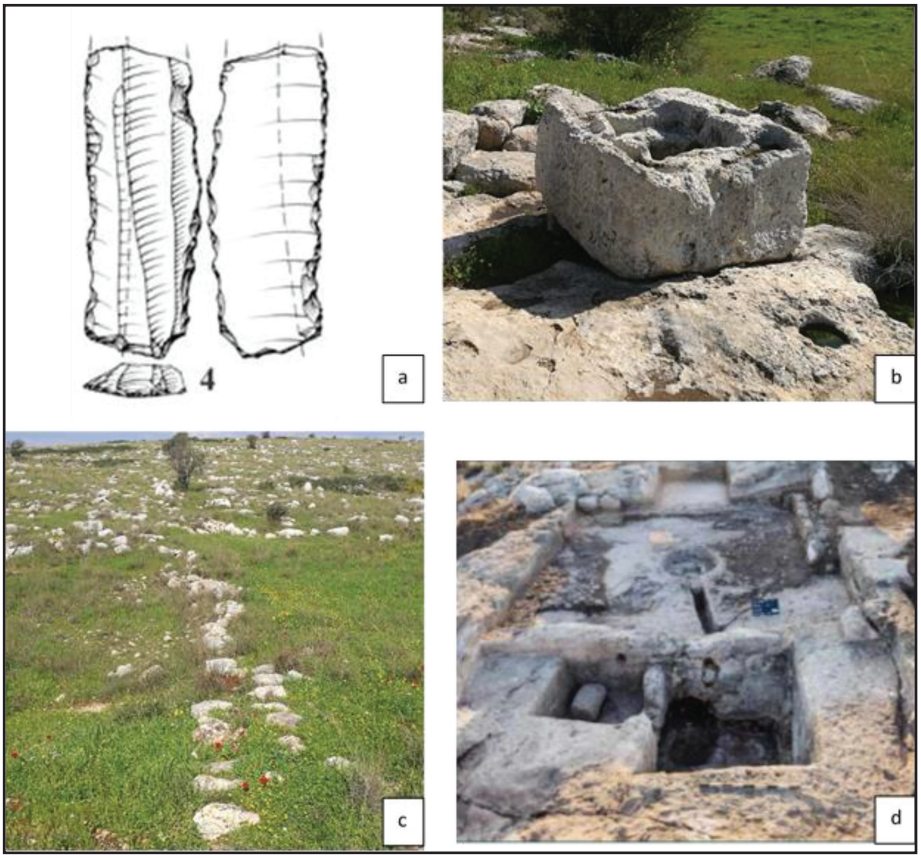


Figure 2: Material remains of the ancient agricultural landscape; a) Cananean sickle blades at Kharruba east (Shavit 2013), (b) rock-hewn cisterns with capstones (Manspeizer 2019), (c) wadi terraces (Manspeizer 2019) and (d) rock-hewn winepresses (Tendler and Elisha, 2017).

A farmhouse appeared at Horvat Ashun during the Hellenistic period. It was later fortified and expanded during the Hasmonean period richly and used in part to produce olive oil (Tendler and Elisha 2017). During this time, the fortified farmhouse was identified as Jewish and winepresses were carved in the local limestone bedrock. Mikvehs were found at the farmhouse and at nearby Horvat Hamutzav from this period. The site is located only four

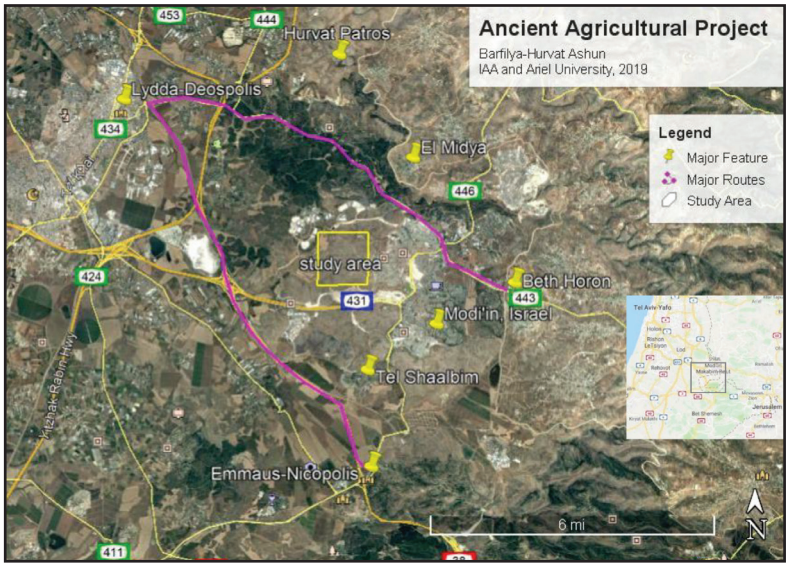


Figure 1: Google Earth Map with the study area (yellow box) west of modern Modi'in, and between the two main roads from Lod toward Jerusalem (purple line). The main features (Tels and Ruins (Horvat)) are marked with a pin. Note the location of the study area between Jaffa and Jerusalem (inset).

Within the study area along Nahal Aneva, one Paleolithic site in which a Levallois blade and other flint tools (IAA Survey) was found that may have been a hunting camp and for flint production. The local bedrock contains chert nodules in both Bina and Mishash Formations. There are four non-settlement sites within the study area defined as Pre-Pottery Neolithic (A and B) in which flakes and a bifacial tool were found that may be associated with resource processing tasks such as tool making, grain processing and felling trees (Shavit 2013). Resource collection, such as chert mining and tree felling, were conducted in the hills (Grosman and Goren-Inbar, 2016) and the processing may have been in proximity to the main stream drainage. Several researchers (i.e. Marks 1971; Philips and Bar-Yosef 1974) suggest a correlation in Israel between prehistoric sites and stream beds for water, animal routes, food gathering and other site-specific tasks. The four sites in the study area that represent the Chalcolithic and Bronze periods are located near to large broad horizontal fields above the stream beds. At two sites, Horvat Hamutzav and *Kharruba*, Cananean sickle blades, a Chalcolithic to Early Bronze Age tool for harvesting crops, were found near a large broad

metaphors, such as constraints and opportunities (Brush and Turner 1987), seem to better describe the notion that soil quality may have acted as a constraint to the agricultural extensification over time. This is tested through regression for predictive analysis using EXCEL, a statistical package, and IDRISI, a GIS program. The sequence demonstrates that *vertical* agricultural extensification was correlated to both archaeological period and soil quality in a non-linear manner.

HISTORICAL CONTEXT

The study is conducted in a 4 km^2 area west of Modi'in between Horvat Ashun and Horvat Hamutzav, north of Nahal Aneva and southwest of abandoned Barfiliya (Figure 1). Resource processing is evident in the study area from flint tools found near the main stream drainage that were used for hunting (Paleolithic) and the processing of local resources such as chert, trees and grains (Neolithic). The first farming practiced in the area can be found along a wide alluvial valley who's stream flows into Nahal Aneva. This has been dated through harvesting and reaping tools found at at *Kharruba*, Barfiliya West and H. Zachariah (IAA Survey, Map 82 Gezer) from the Early to Middle Bronze. A fortified Jewish farmhouse was constructed after the Persian period at Horvat Ashun that remained through the Late Roman Period when it became an agricultural estate (Tendler and Elisha 2017). During this time, small land-owners also worked the hills for grapes and the fields for grains leaving behind a large number of rock-hewn winepresses. During the Byzantine period, monastic settlement entered the region, perhaps assisted by heavy taxation, which led local Christian, Samaritan and Pagan residents to partially desert their agricultural lands. The study area lies within the main Christian pilgrim routes between Lydda (Diospolis), Emmaus-Nicopolis and the Horon Ascent (Figure 1). The landscape turned from low-scale agriculture production to industrial monastic agriculture that included agricultural terraces within the stream tributaries in the hills. Either during or after this period, hillside terraces and raised gardens (bustan) were constructed in some locations and used through the Ottoman period.

historical accumulation of material and the landscape. GIS contributes to Geoarchaeology by enabling the compilation and deconstruction of this complexity through georeferencing, database management, spatial analysis and visualization. GIS was first introduced to the Israel Antiquities Authority in 1995 (Haiman 2018). It is used in this research to derive an analysis born methodology and result when there is inadequate stratigraphic evidence as is often the case in agricultural archaeology. Tilled fields, terraces filled with soil wash and animal burrows can leave archaeologists with no clear evidence to define the stratigraphic record in these landscapes. GIS analysis can derive results within a properly formed research methodology in which deductive steps are supported with correct theoretical predictions.

Archeo-Agricultural Intensification

The fundamental premise of studying agricultural expansion within an archaeological study requires the recognition that material remains and location occur within a pre-existing landscape. Each successive layer of landscape use occurs upon a previously used landscape which gains agency (power) in the development of each new palimpsest or new landscape layer (Manspeizer 2006). Ladefoged *et al* (2003) describe how researchers have described agricultural expansion according to general sequences or trends of linearity that may be unique to different eco-regions, climatic zones and historical periods (Ackermann *et al* 2019). The trend itself follows a landscape pattern, represents the very trajectory of human-environmental relations over time and is part of a larger project of study. Based on visual interpretation of artifacts and their proximity to defined agricultural areas using GIS and fieldwork in 2018-2019, this paper hypothesizes that agriculture in the study area extensified vertically from Prehistory through the Early Muslim periods. Land-use began along Nahal Aneva and its larger tributaries during the Paleolithic / Neolithic, expanded to the broad valleys during the Chalcolithic / Bronze Age, to the hill sides and first / second order tributaries from the Hellenistic to the Early Muslim periods. Reasons for this generalized pattern of expansion, which will be discussed in the methodology section, have been defined through metaphors such as population pressure, affluence or technological progress (see Dagan 2010). But, cultural ecological

through the Early Muslim period including flints, sickles, farmhouses/ estates, wadi terraces, slope terraces winepresses, olive presses, cisterns and monasteries; 3) Database query and regression analysis to determine the impact of soil quality on agricultural intensification.

RESEARCH BACKGROUND

Agricultural extensification is a term that is derived from Agricultural Intensification research in Geography (Turner and Brush 1987) that speaks to the spread of agricultural systems through space over time. It is commonly considered that settlement patterns have considerable impact on the environment especially through agriculture and extensification is one of the means. The research therefore falls under the context of Mapping Agricultural Systems Project (Haiman 2011, 2018) which endeavors to derive a GIS enabled database of ancient agricultural landscape change over time in Israel. This database, combined with changes in precipitation, settlement patterns and political-economic factors can be important indicators of the directional development of the landscape (Manspeizer 2007) as well as the trajectories of intensification (Turner and Ali 1996). These trajectories of intensification define the agricultural change within place as vectors that may be described according to their driving forces and mapped accordingly. In the case of Israel within the Levant, the historical and archaeological record is well enough established to enable a model of the agricultural change, impact on the environment and causal influences over dozens of millennia. This greatly contributes to research in Global Environmental Change (GEC), Land-Use and Land-Cover Change (LUCC), Climate Change, and Landscape Archaeology.

According to Knapp and Ashmore (1999: 1), "In minimalist terms, a landscape is the backdrop against which archaeological remains are plotted…however, the most prominent notions of landscape emphasize its socio-symbolic dimensions…" Yet, symbolic dimensions are less concrete in the archaeological record and it is often difficult to deconstruct the symbolic nature of landscape. Material remains therefore become readable scars of sequent occupance (Mikesell 1975) which is the layer after layer stratigraphy that geographers and archaeologists explore in order to deconstruct the

the central mountains and coastal plain of Israel. According to Ackermann (2008), "Geoarchaeological research…enriches our understanding of the interrelationship between environmental conditions and human activities in the past." Geoarchaeology is also enriched by Geographic Information Systems (GIS) that assist the researcher to both quantify and visualize spatial relations within the archaeological record (Birkenfeld *et al* 2015, Haiman 2018). This study develops a comprehensive GIS database from four different sources that have surveyed the study area between 1964 to the present including the Israel Antiquities Authority (IAA) Survey (Table 1).

Table 1: List of Data Sources used in Study

#	Name	Source	Type / Use	Year
1	Orthophoto (0.25m)	SI, IAA	3 Visible band (~380 to 740μ) aerial photo, Land-cover classification	2015
2	Haiman 1	Haiman, M.	Field Survey Horvat Ashun, GPS line data, terraces, cisterns, winepresses and ag. installations	2017
3	Haiman 2	Haiman, M.	Field Survey Horvat Hamim, GPS line data, terraces, cisterns, winepresses and ag. installations	2008-2013
4	Haiman 3	Haiman, M.	Field Survey GPS point data; monasteries	2008-2013
6	Tendler 1	Tendler, A.	Horvat Ashun excavation data; winepresses	2016-2017
7	Manspeizer 1	Manspeizer, N.	On-Screen digitizing from orthophoto of all visible agricultural installations	2018/2019
7	IAA 1	Israel Antiquities Authority Survey	Gezer 82 Map, IAA Survey website; lat/long point and ancillary data including monasteries, flints, wine presses, cisterns, olive presses, sickle blades	1964-2018
8	IAA 2	IAA	Data from IAA GIS department server; roads, streams, topo 5 meter, geology	2018

This type of comprehensive database contributes to archaeological studies through use of GIS that can compile, geo-reference and analyze multiple data sets from multiple sources. Remote sensing was used, through classification of Survey of Israel (SI) orthophotos (0.25 meter spatial resolution) with IDRISI GIS, in order to assist in developing the land-cover context of the study. The GIS analysis had four main components: 1) Compilation and development of the spatial database from all sources; 2) Development of land-cover classification based on the orthophoto and field-truthing; 3) Map composition including locations of agricultural remains from the Paleolithic

Landscape Archaeology at Aneva Stream, Israel: Deconstructing a General Trend in Agricultural Intensification with GIS, Remote Sensing and Regression Analysis

Authors: N. Manspeizer, M. Haiman, O. Ackermann, A. Tendler, M. Birkenfeld, D. Levy, J. Marcus-Peretz

ABSTRACT: The study is conducted in a 4 km^2 area west of Modi'in, Israel. Archaeological remains from Prehistory through the Early Muslim period were mapped with Geographic Information Systems (GIS) from survey and excavation data (1964-2019). The data includes agricultural implements, installations in the study area (i.e. cisterns, winepresses and olive presses), agricultural terraces along the 1st and 2nd order stream tributaries, slope terraces, animal pens, farms and Byzantine monastic sites. Remote sensing methods were used to classify the land-cover from orthophotos to develop an agricultural potential map based on soil quality within the fields that contained agricultural installations. Then, the soil quality image was statistically compared through regression analysis with a predictive model of agricultural intensification based upon three stages from Prehistory through the Early Muslim period. The study found that extensification, the spatial spread of agriculture, had a probable non-linear relationship to a vertical pattern from Prehistory to the Early Muslim period - from stream beds to broad valleys to tributaries in the hills, and finally hill slopes. Given the current data set, poor soil quality was correlated to agricultural extensification in a non-linear manner, although further examination of the process by which extensification occurs into more marginal land is necessary. The research demonstrated that GIS was helpful in combining multiple data sets from different sources into one geographic database and as a statistical tool for deconstructing general trends in landscape archaeology.

INTRODUCTION

The Caliche (Nari) covered hills north of Aneva Stream and to the west of Modi'in contain the remains of a rich agricultural past evident, for example, in terraces, stone walls and winepresses carved directly into the bedrock. This landscape, located in the 'High Shephela', represents a sample of ancient agricultural patterns found within the foothills between

Landscape Archaeology at Aneva Stream, Israel: Deconstructing a General Trend in Agricultural Intensification with GIS, Remote Sensing and Regression Analysis

N. Manspeizer
Israel Antiquities Authority, Midreshet Ben Gurion
nmanspeizer@gmail.com

M. Haiman
Israel Antiquities Authority, Ariel University
haiman_or@bezeqint.net

O. Ackermann
Ariel University
orenack@gmail.com

A. Tendler
Israel Antiquities Authority
tendlerfamily@gmail.com

M. Birkenfeld
Israel Antiquities Authority
michalbi@israntinque.org.il

D. Levy
Israel Antiquities Authority
danitle@israntinque.org.il

J. Marcus-Peretz
Israel Antiquities Authority
awyr79@gmail.com

4*

content

Opening words – the first seminar on Digital Archaeology
Michal Birkenfeld and Yosef Garfinkel 9

Computational Archaeology – Prospects and Risks
Uzy Smilansky 11

Photogrammetric documentation at the salvage excavations of the Israel Antiquities Authority
Alexander Wiegmann 15

Photogrammetry as a tool for landscape documentation and subsequent spatial analysis
Michal Birkenfeld and Emil Aladjem 29

The material in the hands of the creator - Computational methods in the study of ancient technologies
Ortal Harush, Talia Yashuv, Lena Dubinsky, Francesco Valletta and Leore Grosman 41

Digital mapping and soil pollution survey of an early Iron Age copper production site in Timna Valley
Aaron Greener, Omri Yagel and Erez Ben-Yosef 59

Geographic Information System Application and Spatial Analysis as an Archaeological Research Tool, Options and Limitations: A Case Study from Tumuli Sites in the Eastern Negev.
Roy Galili and Eli Cohen Sason 77

On an Iron Age II Digital Onomasticon and the Relationship between Seals and Stamp Seals
Mitka R. Golub 97

Multispectral imaging as a tool to identify pigments in wall paintings: Pompeii as a case study
Yotam Asscher 109

Digital Archaeology – prospects and risks
Hai Ashkenazi 125

Landscape Archaeology at Aneva Stream, Israel: Deconstructing a General Trend in Agricultural Intensification with GIS, Remote Sensing and Regression Analysis
N. Manspeizer, M. Haiman, O. Ackermann, A. Tendler, M. Birkenfeld, D. Levy and J. Marcus-Peretz 5*

האוניברסיטה העברית
הפקולטה למדעי הרוח
המכון לארכיאולוגיה

ISRAEL ANTIQUITIES AUTHORITY
רשות העתיקות

Digital Archaeology

New Research and Advanced Technologies

Edited by Michal Birkenfeld and Yosef Garfinkel

Collection of articles from a joint seminar day

GIS Research Branch at the Israel Antiquities Authority
The Institute of Archeology of the Hebrew University