

מחקרי עיר דוד וירושלים הקדומה

דברי הכנס העשרים ושניים | עורך: אייל מירון | מכון מגלי"ם - עיר דוד ירושלים | אלול תשפ"א | 16



מגלי"ם
עיר דוד ירושלים הקדומה



תוכן העניינים

ברכות

9 אהרן הורביץ, אלי אסקוזידו, שאול גולדשטיין

דבר העורך

13 אייל מירון

רוני רייך

17 סיכום חפירות משלחת רייך-שוקרון בעיר דוד (1995-2010)

ישראל פינקלשטיין

37 הופעתה והפצתה של הכתיבה ביהודה

אלי שוקרון | חגי כהן קלונימוס

59 משקולות מסוף ימי בית ראשון שנמצאו ליד הכותל המערבי

ג'ו עוזיאל | אורטל כלף

67 עדויות ארכיאולוגיות לרעידת אדמה בבירת ממלכת יהודה

יואב וקנין | רון שער | יובל גדות | יפתח שלו | עודד ליפשיץ | ארז בן יוסף

81 על חורבן ירושלים בימי הבית הראשון והשדה המגנטי של כדור הארץ

יובל ברוך | אורי בסון | עמרי נחום | רוני רייך

99 קשת רובינסון, סקירת תוצאותיו של מחקר גיאופיזי

יובל ברוך | ארי לוי | נעמה סוקניק | יונה מאור

117 חצי נר ברונזה רומי מעיר דוד, ירושלים

רוני רייך

131 חפירות צ'רלס וילסון בירושלים (1865)



Greetings

Ahron Horovitz, Eli Eskozido, Shaul Goldstein 7*

Editor's Introduction

Eyal Meiron 12*

Ronny Reich

The Reich-Shukron Excavations in the City of David (1995–2010)..... 17*

Yotam Asscher

The Development of Archaeological Sciences: Perspective from the Israel Antiquities
Authority..... 41*

Joe Uziel | Ortal Chalaf

Archaeological Evidence of an Earthquake in the Capital of Judah..... 51*

Yuval Baruch | Uri Basson | Omri Nachum | Ronny Reich

Robinson's Arch: Results of a Geophysical Study..... 67*



"וַיִּשְׂרֹף אֶת־בֵּית־ה' וְאֶת־בֵּית הַמֶּלֶךְ וְאֶת כָּל־בְּתֵי יְרוּשָׁלַם וְאֶת־כָּל־בֵּית גָּדוֹל שָׂרָף בָּאֵשׁ" (מלכים ב כה, ט)

על חורבן ירושלים בימי הבית הראשון והשדה המגנטי של כדור הארץ

יואב וקנין^{1,2} | רון שער² | יובל גדות¹ | יפתח שלו³ | עודד ליפשיץ¹ | ארז בן יוסף¹

¹המכון לארכיאולוגיה, אוניברסיטת תל אביב | ²המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים | ³רשות העתיקות



■ מבוא¹

השדה המגנטי של כדור הארץ, ובפרט השינויים בכיוון השדה ובעוצמתו המתרחשים כל הזמן, הם אחת החידות הגדולות במדעי כדור הארץ (בפט 2000). פליאומגנטיזם הוא תחום מחקר העוסק בשחזור השדה המגנטי של כדור הארץ בעבר. תיעוד כיוון השדה המגנטי החל כבר לפני כ-400 שנה ואילו תיעוד עוצמת השדה החל לפני קרוב ל-190 שנה. על מנת לשחזר את השדה המגנטי בתקופות שקדמו לתחילת המדידות הישירות המחקר הפליאומגנטי עושה שימוש בחומרים שמהם ניתן ללמוד על השדה, בעיקר חומרים גיאולוגיים. בשנים האחרונות מתפתח שדה מחקר חדש ושמו ארכיאומגנטיזם. המחקר הארכיאומגנטי עושה שימוש בחומרים ארכיאולוגיים שנשרפו כדי לשחזר מהם את השדה המגנטי ששרר בזמן השריפה. תחום מחקר זה משלב שיטות פליאומגנטיות במדעי הארכיאולוגיה. האופי הבינתחומי של ארכיאומגנטיזם פועל באופן דו כיווני: מצד אחד אנו משתמשים בשיטות גיאופיזיות על מנת לענות על שאלות ארכיאולוגיות, ומצד שני אנו משתמשים במידע הארכיאולוגי כדי לענות על שאלות גיאופיזיות. בכדי להבין את הדרך שבה ממצא ארכיאולוגי יכול לסייע בשחזור השדה המגנטי של כדור הארץ עלינו להבין באופן בסיסי איך "מוקלטים" (כלומר, נשמרים) נתוני השדה המגנטי באופן המאפשר את מדידתם. חומרים רבים, למשל חומרים חרסיתיים, עשירים במינרלים פרומגנטיים אשר פועלים כרכיבי זיכרון זעירים (למשל המינרל הפרומגנטי מגנטיט Fe_3O_4). ברמה האטומית, אפשר לדמות את האות המגנטי של המינרלים הפרומגנטיים למחט זעירה של מצפן. כל עוד ה"מחט" חופשיה לנוע, היא תשאף להתיישר בכיוון השדה המגנטי החיצוני שנמצא בסביבתה. באנלוגיה למחט המצפן, גם האות המגנטי של המינרלים הפרומגנטיים יכול לעתים לנוע אך בשונה ממחט המצפן, חופש תנועתו של האות המגנטי במינרלים פרומגנטיים תלוי בטמפרטורה: מעל "טמפרטורת הנעילה", התלויה בסוג המינרל ובגודלו, האות המגנטי "משתחרר" ונוטה להתיישר עם כיוון השדה של כדור הארץ. מתחת לטמפרטורה זו האות המגנטי קבוע ואינו יכול להשתנות. גם בחומרים ארכיאולוגיים שלא עברו שריפה קיימים לרוב מינרלים פרומגנטיים אך האותות המגנטיים של המינרלים האלה מפוזרים באופן אקראי ולכן המגנט הכולל שלהם חלש מאוד. כאשר, לעומת זאת, החומר מתחמם לטמפרטורה גבוהה (כמה מאות מעלות) כל האותות "מתיישרים" לכיוון השדה המגנטי של כדור הארץ, וכשהחומר מתקרר, האות המגנטי ננעל. כך, חומרים ארכיאולוגיים מקליטים מגנט כאשר הם נשרפים. האות המגנטי הינו וקטור, כלומר גודל פיזיקלי בעל כיוון, שניתן למדידה. באופן זה ניתן לשחזר את כיוון השדה המגנטי ששרר בזמן שהחומר התקרר. גם עוצמת השדה של כדור הארץ תשפיע על האות המגנטי שמוקלט בחומר השרוף. ככל שהשדה של כדור הארץ חזק יותר, המגנט של המינרלים הפרומגנטיים שהקליט אותו יהיה חזק יותר. כך, על סמך עוצמת המגנט של השדה המוקלט בממצא השרוף

1 מאמר זה הוא גרסה עברית מקוצרת של מאמר שהתפרסם בכתב העת PLoS ONE למאמר המקורי המכיל את התוצאות וההפניות המלאות ראו: וקנין ואחרים 2020.

ניתן לשחזר גם את עוצמת השדה של כדור הארץ.

כדי להמחיש את השיטה ניקח לדוגמה כבשן קרמיקה שבו נשרפים כלי חרס במהלך הייצור שלהם. מינרלים פרומגנטיים נמצאים גם בטין שממנו יוצרו כלי החרס וגם בקירות הכבשן. במהלך שריפת הכלים הטמפרטורה הגבוהה בכבשן מביאה למחיקת האות המגנטי שהיה בכלים ובקירות הכבשן. במהלך הקירור, הכבשן והכלים שבתוכו, מקליטים את השדה המגנטי של כדור הארץ ששורר באותו זמן. כדי לשחזר את כיוון השדה המגנטי עלינו לתעד את האוריינטציה המדויקת שבה הממצא התקרר. לכן, הזות כלי החרס מתוך הכבשן תמנע מאתנו לשחזר את כיוון השדה שהוקלט בזמן שריפת הכלי. לעומת זאת, אם קירות הכבשן נחשפים במצבם המקורי, הם יכולים לאפשר את שחזור כיוון השדה בזמן השריפה. את עוצמת השדה המגנטי ששרר בזמן השריפה ניתן לשחזר הן מכלי החרס והן מקירות הכבשן, שכן אין חשיבות לאוריינטציה שבה הם נדגמו.

בשלב זה של המחקר, התיארוך של האות המגנטי שמוקלט בממצאים ארכיאולוגיים מבוסס על שיטות התיארוך הארכיאולוגיות המקובלות של הממצאים עצמם (תיארוך היסטורי, פחמן 14, טיפולוגיה של כלי חרס וכו'). עם זאת, הצטברות נתונים מגנטיים מתוארכים היטב, יכולה לאפשר שיחזור מדויק של תהליך השתנות השדה המגנטי באזור מסוים ובתקופה מסוימת. במחקר הארכיאולוגי של ארץ ישראל וסביבתה, ההצטברות של נתונים ארכיאומגנטיים (בן יוסף ואחרים 2017; שער ואחרים 2018) מאפשרת לתארך ממצאים שונים תוך השוואה לממצאים אחרים ברמת מהימנות הולכת וגדלה (בן יוסף ואחרים 2010; שער ואחרים 2015; שער ואחרים 2016; פיטרס ואחרים 2018; שער ואחרים 2020). במערב אירופה שיטת תיארוך זו התבררה כשימושית במיוחד בתקופות שבהן לא ניתן לתארך ברזולוציה גבוהה באמצעות פחמן 14 (הרווה ואחרים 2018). ארכיאומגנטיזם יכול גם לשמש ככלי רב עוצמה לשחזור תהליכי היווצרות אתרים. למשל, כדי לקבוע אם ממצאים מסוימים נשרפו, ללמוד על טמפרטורות השריפה ולקבוע אם הם התקררו במנח שבו הם נחשפו (שחק-גרס ואחרים 2018).

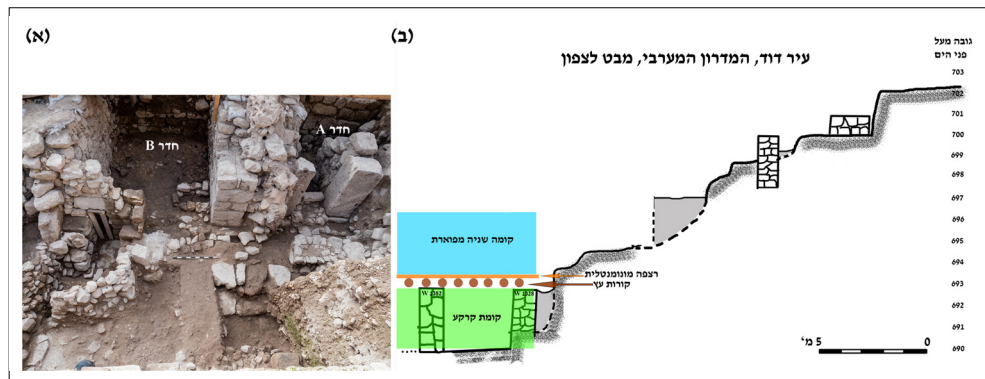
קיים קושי מובנה בתיארוך מדויק של אירוע החימום האחרון של חומרים ארכיאולוגיים שחוממו שוב ושוב במהלך השימוש היומיומי שלהם, כמו כבשנים, תנורים וטאבונים. קושי קיים גם בתיארוך המידע המגנטי המוקלט בכלי חרס במהלך ייצורם, שכן עשויים לחלוף כמה עשורים מזמן הייצור ועד ליציאתם משימוש. מסיבות אלה, בסיסי נתונים ארכיאומגנטיים מתאפיינים לעיתים באי-ודאות גדולה בציר הזמן. בניגוד לחומרים שהוזכרו לעיל, חומרים שחוממו במהלך אירועי חורבן מתוארכים לנקודת זמן מוגדרת היטב, בעיקר אם מדובר באירוע בעל תיארוך היסטורי ידוע. סוג מידע ייחודי זה הוא קריטי במיוחד לתקופות עם שינויים מהירים בשדה המגנטי (בן יוסף ואחרים 2009; שער ואחרים 2011; שער ואחרים 2016), וכאשר אין אפשרות לתארך ברזולוציה גבוהה באמצעות פחמן 14 (גילדרסון 2005).

במאמר זה אנו מתמקדים בחורבן ירושלים בידי הבבלים בחודש אב (אוגוסט), 586 לפסה"נ (ליפשיץ 2005). מחקרים קודמים הראו שפרק הזמן שלפני שנת 586 לפסה"נ התאפיין בשדה

מגנטי חזק, שהשתנה במהירות הן בארץ ישראל וסביבתה (שער ואחרים 2016; שער ואחרים 2017) והן במערב אירופה (אוסטה ואחרים 2020). יש לציין שמנקודת מבט כרונולוגית, חורבן ירושלים בשנת 586 לפסה"נ התרחש במהלכה של תקופה בה תיארוך באמצעות פחמן 14 מתאפיין באי וודאות גדולה במיוחד. כל דגימה שהתיארוך האמתי שלה הוא בין שנת 800 לשנת 400 לפסה"נ עשויה להניב תאריך מכויל עם טווח שגיאה שמכסה את כל פרק הזמן הזה או לפחות את רובו (ריימר ואחרים 2016). מכאן שלמידע כרונולוגי אמין שמקורו במחקר הארכיאומגנטי יש חשיבות גבוהה במיוחד בפרק הזמן הזה.

■ הקשר ארכיאולוגי והיסטורי

המחקר הנוכחי נערך במסגרת החפירות המיוחדות בחניון גבעתי, על המדרון המערבי של רכס "עיר דוד" (שלו ואחרים 2020). במסגרת חפירות אלה נחשף קטע בגודל של 10X17 מ' ממבנה ששימש בית אמידים או מבנה ציבורי, וזאת על בסיס אופי בנייתו והממצאים שהתגלו בו (להלן מבנה 100. איור 1). מן הקומה התחתונה של המבנה (איור 1א) נחשפו שלושה חדרים (חדרים A-C). חדרים אלה נמצאו מלאים בשכבת הרס ומפולות בעובי של עד 2.3 מ', הכוללת עפר ואבנים, שהמקור של חלקם בקומתו השנייה של המבנה (שלו ואחרים 2019). בתוך המפולות נמצאו כמות גדולה של אפר וקורות עץ מפוחמות, מה שהוביל את החופרים להשערה שהמבנה נהרס בשריפה עזה. חשוב לציין כי המבנה נבנה במדרון תלול, המשתפל מערבה מפסגת שלוחת עיר דוד לעבר ערוץ הטירופיון (איור 1ב). מדרגות אחדות, כל אחת ברוחב של יותר מחמישה מטרים, נחצבו בסלע, ככל הנראה כדי לאפשר את בניית המבנה יוצא הדופן הזה. כלי חרס, האופייניים לסוף תקופת הברזל (תקופת הברזל 2ג), נמצאו בתוך המפולות, כשרובם



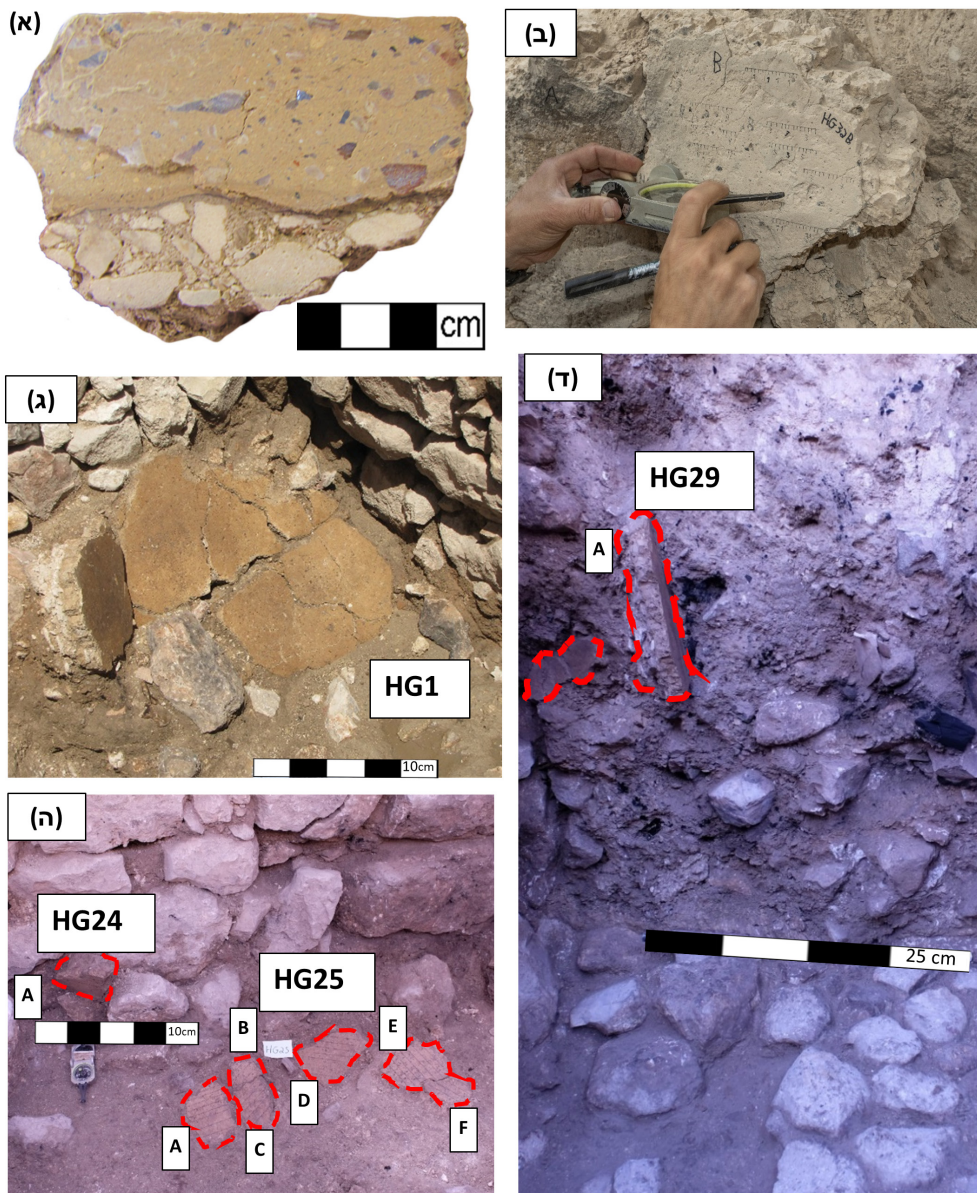
איור 1א-ב. מבנה 100 שנחשף בחפירת חניון גבעתי. (א) תצלום של חלק ממבנה 100, בכיוון דרום (צילום: אסף פרץ). (ב) שחזור מוצע של מבנה 100 בחתך מזרח-מערב של שיפוע האתר. האזור המסומן בירוק בהיר מסמן את החלק המזרחי של הקומה התחתונה. הקומה השנייה ורצפתה המונומנטלית משוחזרות באופן סכמטי.

מנופצים באתרם על רצפת הקומה התחתונה של המבנה. מכלול קראמי זה דומה מאוד למכלולים שנחשפו בשכבות החורבן משנת 586 לפסה"נ, שנחשפו במקומות אחרים בירושלים (שילה 1984, אביגד וגבע 2000, כלף ועוזיאל 2018), כמו גם באתרים אחרים ביהודה (אוישיקין 2004). בין השאר נמצא בתוך חדר C קנקן שלם שעל הידית שלו הוטבע סמל ורדה, קודם לשריפתו בכבשן. השימוש בחותמות אלה אופייני למערכת המנהל המלכותית ביהודה בשליש האחרון של המאה ה-7 לפסה"נ ועד לחורבן ירושלים בידי הבבלים בשנת 586 לפסה"נ (קוך וליפשיץ 2013). במבנה נמצאו גם חותם וכמה טביעות חותם, האופייניים לסוף תקופת הברזל (מנדל-גברוביץ' ואחרים 2019). כל אלה מחזקים את ההתייחסות למבנה כאל בית אמידים או מבנה בעל אופי ציבורי, והם גם מסייעים בתיאור החורבן שלו לסוף תקופת הברזל. נתונים ארכיאולוגיים אלה והעדויות החזקות לחורבן בשריפה של מבנה זה תואמים לתיאור המקראי על החרבת ירושלים בשריפה בחודש אב בשנת 586 לפסה"נ. על פי תיאור זה, החורבן בוצע על ידי "מחריבי ערים" מקצועיים, בפקודו של נבוזראדן, פקיד בבלי רם-דרג: "וּבַחֲדָשׁ הַחֲמִישִׁי בְּשַׁבָּעָה לַחֹדֶשׁ הָיָה שְׁנַת תְּשַׁע עָשָׂרָה שָׁנָה לְמֶלֶךְ נְבֻכַדְנֶאצַּר מֶלֶךְ בָּבֶל בָּא נְבוֹזַרְאֲדָן רֹב טַבָּחִים עֶבֶד מֶלֶךְ בָּבֶל יְרוּשָׁלַם. וַיִּשְׂרֹף אֶת בֵּית ה' וְאֶת בֵּית הַמֶּלֶךְ וְאֶת כָּל בֵּית יְרוּשָׁלַם וְאֶת כָּל בֵּית גָּדוֹל שָׂרָף בָּאֵשׁ" (מלכים ב כה, ח-ט). התיאורים המקראיים המפורטים אודות סוף תקופת הברזל בכלל, והתיאור אודות חורבן ירושלים על ידי הבבלים בפרט, נחשבים למהימנים מבחינה היסטורית (ליפשיץ 2005, גבע 2006, קוך וליפשיץ 2013). מלבד התיאור של שריפת בית המקדש וארמון המלך, הדגיש המחבר המקראי גם את הרס בתי בני המעמדות הגבוהים. המונומנטליות של המבנה שנדון לעיל, החרבתו המוחלטת באש (כפי שהוכח על ידי התוצאות המוצגות להלן) ותיאורו לסוף תקופת הברזל, הביאו אותנו למסקנה כי מדובר באחד מאותם מבני ציבור או מבני האליטה הירושלמית, שנהרסו על ידי נבוזראדן ואנשיו.

נקודת המוצא למחקרנו היא עשרות שברים של משטח רצפה, עשוי באיכות יוצאת דופן ומעוצב להפליא, שהתגלו במפולות המבנה (איור 2). קורות עץ מסיביות מפוחמות, שנמצאו מונחות על גבי עמוד אבן מונוליטי ובתוך שכבת המפולות, הובילו אותנו להשערה שמדובר ברצפת הקומה השנייה, שהונחה במקור על קורות העץ והתמוטטה כשאלה נשרפו. בשל המדרגות הרחבות שנחצבו בסלע המדרון התלול, אנו מניחים שהכניסה הראשית לבניין הייתה ממזרח, היישר לקומתו השנייה, ששימשה, ככל הנראה כקומת האירוח (איור 1ב). השערה זו, מסבירה את ההשקעה הגדולה בבניית הרצפה של הקומה השנייה.

משטח הרצפה מורכב משתי שכבות שונות בהרכבן (איור 2א). השכבה התחתונה עשויה מחומר גס ושרבי אבני גיר. השכבה העליונה עשויה חומר גרגרי דק, והכילה שברי קלציט, שכנראה נצצו לאחר שהרצפה לוטשה. פני השטח העליונים של הרצפה היו שטוחים וחלקים לחלוטין. מעולם לא נמצאה רצפה דומה מתקופת הברזל בירושלים או באתרים אחרים בארץ ישראל ובסביבתה.

במסגרת מחקר זה נבדקו 54 שברים שונים של משטח זה, שחלקם השתמרו בעובי של יותר מ-15 ס"מ, עדות לעוביו המקורי של המשטח. קבוצה גדולה אחת של שברי רצפה (HG1) נחשפה נפולה ושבורה



איור 2א-ה. דוגמאות מייצגות של קטעי רצפה שנחשפו בחפירה. (א) חתך בשבר רצפה אופייני. השכבה התחתונה, שנראית רק בחלקה באיור זה, הייתה במקור בעובי של יותר מ-12 ס"מ והכילה אבנים קטנות. (ב) מדידת האוריינטציה של שבר רצפה שהתגלה במנח כמעט אנכי (צילום: שי הלוי). (ג) קבוצה גדולה של שברים שנחשפו צמודים זה לזה (HG1). (ד) שני שברי רצפה שנחשפו בתוך שכבת המפולות שעוביה 2.5 מ'. השבר משמאל פונה החוצה משכבת המפולות ואילו זה בצד ימין פונה ימינה ומעט למעלה. ניתן לראות גושי עץ מפוחמים גדולים וכן את רצפת הקומה התחתונה המרוצפת באבנים. (ה) שבעה שברי רצפה שנחשפו קרוב לרצפת הקומה התחתונה. קבוצה אחת של שברים (HG25A-F) מונחת כמעט אופקית על רצפת הקומה התחתונה, ואילו שבר אחר (HG24A) נתגלה במנח כמעט אנכי.

(איור ג2). כל יתר שבירי הרצפה נחשפו בנפרד על רצפת הקומה התחתונה או בתוך שכבת המפולות, במיקומים ובגבהים שונים, ובאוריינטציה שונה זה מזה (איור ג2-ה). לא נצפו סימני אש ברורים על גבי הרצפה, אך קורות העץ המסיביות השרופות וסימנים אחרים של חומר שרוף, הביאו אותנו להשערה כי הקורות האלה נשרו במהלך השריפה והביאו לקריסת הרצפה והקומה השנייה שמעליה. שריפה זו היא העדות העיקרית לאפשרות שחומרים פרומגנטיים בתוך הרצפה הקליטו את כיוון השדה המגנטי ואת עוצמתו, כפי שהתקיימו בזמן החורבן.

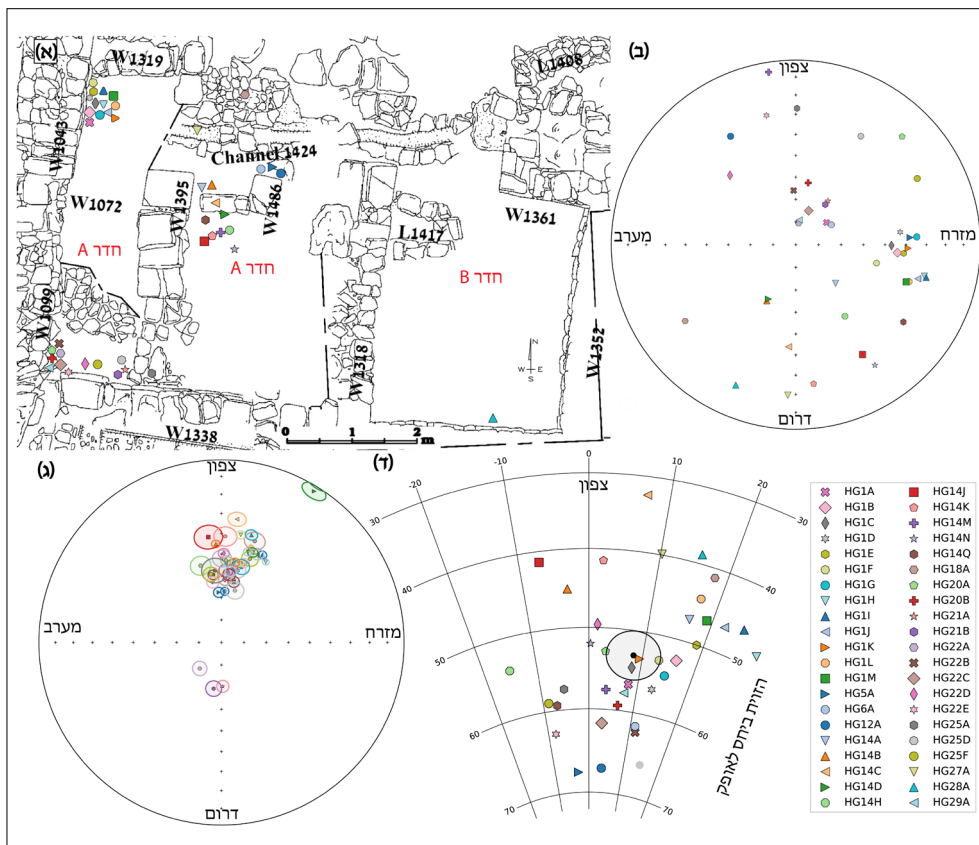
■ שיטת העבודה

לאחר חשיפת גושי הרצפה, לפני שהוזזו ממקומם, סומנו קווים אופקיים על פני השטח של כל אחד מהגושים. האוריינטציה המדויקת של כל אחד מהגושים נמדדה בעזרת מצפן מגנטי (איור ג2) וכן בעזרת מצפן צל-שמש המאפשר לתקן את ההשפעה האפשרית של חריגות מגנטיות מקומיות על המדידות המגנטיות. מכל אחד מ-54 גושי הרצפה שנחקרו, נלקחו 6-10 דגימות, תוך שמירת האוריינטציה שנמדדה בשדה. לאחר מכן מדדנו את המגנט המוקלט בדגימות אלה. על מנת לוודא שהשדה שנמדד יציב ומייצג אירוע בודד, שהוקלט בזמן השריפה, בוצעו במעבדה ניסויים בהם נמחק המגנט בהדרגה, תוך מדידת המגנט שנותר בדגימה לאחר כל שלב מחיקה. במהלך תהליך זה נחלשת עוצמת האות המגנטי, אך אם מדובר באות מגנטי שהוקלט באירוע יחיד כיוון האות נשאר קבוע. לאחר בחינה של תוצאות הניסוי חישבנו את הכיוון הממוצע של השדה המגנטי מכל אחד משבירי הרצפה בניסיון לגלות אילו שבירים התקררו במנח שבו נחשפו ואילו זה באופן משמעותי לאחר הקירור. מרבית השבירים הניבו כיוון ממוצע דומה, והוא המייצג להבנתנו את כיוון השדה המגנטי בזמן השריפה. ארבעה שבירי רצפה הניבו כיוונים שונים ורחוקים ביותר מ-40 מעלות הן מהכיוון הממוצע של השדה הרגיל בירושלים והן מהממוצע של כל האחרות. להבנתנו, גושי רצפה אלה זהו באופן משמעותי לאחר שנפלו והתקררו. לאחר ניתוח נתוני הכיוון נבחרו גושי רצפה שהניבו כיוונים המקובצים סביב הכיוון הממוצע ומכאן שהאות המוקלט בהם מייצג ללא ספק את זמן חורבן המבנה. דגימות מגושי רצפה אלה עברו ניסוי שבו שיחזרנו את עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ ששרר בזמן השריפה. כל ניסויי המעבדה הניבו ייצוג וקטורי מלא של השדה המגנטי של כדור הארץ בשעת החורבן: כיוון השדה ועוצמתו. ניסויים נוספים אפשרו לנו לשפוך אור על טמפרטורת השריפה במקומות שונים באתר ועל הרכב המינרלים המגנטיים שנמצאים בשבירי הרצפה.

■ תוצאות הניסויים

ניסויי מחיקת מגנט

בסך הכל, 397 דגימות מ-54 שבירי רצפה עברו ניסוי של מחיקת מייגנט בשלבים אחדים, ו-341 מתוכן הניבו וקטור מגנטי אחיד יחסית המעיד על הקלטה אחידה של השדה המגנטי בזמן השריפה בלי תזוזה משמעותית של גוש הרצפה בזמן הקירור. 56 דגימות הניבו וקטור שאינו אחיד שעשוי להעיד על תנועת שבר הרצפה במהלך תהליך הקירור.



איור 3א-ד. מיקום, אוריינטציה בשדה וכיוון ממוצע של השדה המוקלט בשברי הרצפה. (**א**) מפת מיקום של שברי הרצפה שעמדו בקריטריונים. (**ב**) האוריינטציה בשדה של כל אחד מהגושים: הכיוון ביחס לארבע רוחות השמיים והנטייה ביחס לאופק (מרכז המעגל - מישור אנכי; שולי המעגל - מישור אופקי). (**ג**) כיוונים ממוצעים של השדה הממזעזע המוקלט בשברי הרצפה עם קונטורי אי הוודאות האפשריים שלהם: הכיוון האופקי מוצג ביחס לארבע רוחות השמיים והנטייה ביחס לאופק מוצגת על ידי המרחק ממרכז המעגל (מרכז המעגל - וקטור אנכי; שולי המעגל - וקטור אופקי). (**ד**) הכיוונים הממוצעים של כל הגושים שהוצגו ב-(ג) למעט 4 הגושים שהניבו כיוון שונה משמעותית מהממוצע. הכיוון הממוצע של כלל הגושים הללו מוצג באיור זה. הקווים העבים מציגים את הכיוון הממוצע של השדה המוקלט בכל הרצפות השרופה.

שחזור כיווני השדה שהוקלטו בשברי הרצפה השונים

ראשית, חישבנו את הכיוון הממוצע של השדה שהוקלט בכל שבר רצפה בנפרד על סמך 10-6 הדגימות שנמדדו מכל שבר. 42 שברי רצפה עמדו במדדי איכות שהוגדרו. למרות שהשברים האלה התגלו בשטח במקומות שונים (איור 3א) ובאוריינטציה אקראית (איור 3ב), הכיוונים המוקלטים בהם אינם אקראיים, כפי שנראה בבירור באיור 3ג. מתוך 42 שברים אלה, 38 הניבו כיוון הקרוב לכיוון הממוצע בישראל: כיוונים אופקיים סביב הצפון הגיאוגרפי ונטייה מתחת לאופק בין 33 מעלות ל-66 מעלות, בפזיור סביב הזווית הממוצעת ביחס לאופק בירושלים (51

מעלות). התוצאות מלמדות ש-38 גושי הרצפה האלה קרסו במהלך השריפה בעודם חמים, לא זזו ממקומם בעת הקירור ומאז הקירור עברו תזוזות קלות, לכל היותר. לעומת זאת, ארבעת גושי הרצפה האחרים הניבו וקטור אחיד בכיוון שונה לחלוטין מכיוון השדה הממוצע בישראל. להבנתנו, גם גושי רצפה אלה הקליטו את המגנט במהלך השריפה אך זזו באופן משמעותי לאחר שהתקררו ולפיכך הכיוון שמדדנו מגושים אלה לא מייצג כלל את כיוון השדה המגנטי של כדור הארץ.

כדי לאמוד את כיוון השדה המגנטי הקדום, חישבנו את הממוצע ואת קונוס אי הוודאות בהתייחס לכיווני 38 שברי הרצפה, שהניבו כיוונים המקובצים סביב הכיוון הממוצע בישראל (איור 3ד). זה נעשה מתוך הנחה ששברים אלה, שנחשפו במיקומים שונים ובאוריינטציה שונה, חוו תנועות קלות ואקראיות מאז שהתקררו. מהחישוב עולה שהשדה הממוצע היה בנטייה של 53.1 מעלות מתחת לאופק וכיוון הרכיב האופקי שלו היה בממוצע 8.3 מעלות מזרחה מהצפון הגיאוגרפי. וקטור ממוצע זה וקונוס שגיאה אפשרית של 3 מעלות מסביבו, כפי שהתקבלו מהחישוב הסטטיסטי, מייצגים את כיוון השדה המגנטי של כדור הארץ בזמן השריפה.

חישוב עוצמת השדה

לצורך שחזור עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ בזמן השריפה דגמנו 36 דגימות מ-18 שברי רצפה שונים, כולם מבין 38 השברים שהניבו כיוונים המקובצים סביב הכיוון הממוצע בישראל (איור 3ג-ד). מתוך 36 הדגימות שנמדדו, 30 עמדו בקריטריונים המחמירים המקובלים במחקר. התוצאה של דגימה אחת (HG18A02i) נפסלה שכן היא הניבה תוצאה הנמוכה ביותר מ-19% מהממוצע של 29 הדגימות האחרות. לאחר מכן חישבנו את עוצמת השדה הממוצעת ואת סטיית התקן עבור 29 הדגימות הנותרות. 29 דגימות אלה הניבו תוצאה קרובה מאוד זו לזו ולפיכך החישוב הסטטיסטי אפשר לנו לשחזר בדיוק רב את עוצמת השדה המגנטי בירושלים בזמן השריפה: 78.2 ± 1.7 מיקרוטסלה. מן הנתונים עולה שעוצמת השדה המגנטי בירושלים בשנת 586 לפסה"נ היתה חזקה יותר מפי 1.7 מהשדה היום בירושלים, ומייצגת שדה חזק במיוחד, בהשוואה לבסיס הנתונים ההיסטורי העולמי. יתרה מכך, בחינת נתונים מהאלף הראשון לפסה"נ ממקורות ארכיאומגנטיים וגאולוגיים מלמדת שאזור ארץ ישראל התאפיין בשדה אנומלי חזק מזה ששרר בשאר העולם באותו פרק זמן. המהימנות של הנתונים, והתיארוך המוחלט שלהם מספקים לגיאופיזיקאים כלי חשוב ביותר לשחזור השדה האנומלי באזור ארץ ישראל ולניסיון לפענח את האופן שבו האנומליה הזאת התפתחה.

■ השלכות המחקר

השילוב הנדיר של ממצאים ארכיאולוגיים שהתגלו בשכבת חורבן עם נתונים היסטוריים מהימנים המתקשרים לאותו אירוע, אפשר לנו ללמוד מקרוב את האירוע המכונן של חורבן ירושלים בידי הבבלים גם בשיטות ארכיאומגנטיות חדשות. הכלים הארכיאומגנטיים אפשרו לנו לשחזר את תהליכי החורבן ולהראות כי שברים רבים של משטח עבה, שנמצאו בתוך שכבת המפולות שנחפרה לאחרונה, הן למעשה חלקי רצפה של קומתו השנייה של מבנה ציבורי. התוצאות הוכיחו כי הרצפה שימשה בחדרי הקומה השנייה של המבנה, ושהיא קרסה מטה אל חדרי הקומה הראשונה במהלך השריפה, עקב קריסת קורות העץ המסיביות שעליהן הונחה (איור 1ב).

בחינת האות המגנטי והמחיקה ההדרגתית של המגנט הראו אחידות רבה בין רוב שברי הרצפה, למרות שנמצאו במקומות שונים במבנה (איור 3א) ובזוויות נטייה שונות ביחס לאופק. חלק מהשברים נמצאו בנטייה כמעט אופקית ואחרים בנטייה כמעט אנכית (איור 3ב). האחידות של האות המגנטי מעידה כי שברים אלו קרסו והתקררו במקומם, במצב דומה לזה שבו נחשפו, ולכן שמרו על כיוון השדה המגנטי של כדור הארץ כפי שהיה בזמן השריפה. ארבעה שברי רצפה שהניבו כיוונים שונים, החורגים משמעותית מכיוון השדה הממוצע, זו ככל הנראה בצורה משמעותית במשך הזמן, ושינו את התנוחה בה קרסו והתקררו במקור. יתכן שהם התקררו במצבם המקורי האופקי ורק אז קרסו, או לחילופין, ייתכן שהם התמוטטו, התקררו ואז עברו תזוזה משמעותית נוספת. תזוזה כזו צפויה להתרחש במשך הזמן, בפרט במקרה של שכבת מפולות, הכוללת חללי אוויר וחומרים אורגניים המתכלים עם הזמן.

מבחינה ארכיאולוגית, תוצאות המחקר הוכיחו את עוצמת החורבן של מבנה 100. הובהר, שהמידע המגנטי שהוקלט בשברי הרצפה נרכש על ידי חימום. מניסויים שונים שעשינו, אנו יכולים להסיק כי טמפרטורת השריפה, לפחות באזורים מסוימים של המבנה, הגיעה לכ-600 מעלות צלסיוס לכל הפחות. פיזורם של שברי הרצפה שנשרפו בכל רחבי המבנה מלמד על היקפה הנרחב של השריפה. העובדה שרובם לא הוזזו ממקומם מאז השריפה מעידה על כך שלא נעשה ניסיון משמעותי לפנות את ההריסות ולשקם את המבנה. החורבן המוחלט של המבנה בשריפה עזה משקף לדעתנו תכנון מראש מצד המחריבים ואין מדובר בהשלכה מקרית של לפיד בוער לעבר הבניין. יש בנתונים אלו בכדי ללמד שמחריבי הבניין, ככל הנראה חיילי הצבא הבבלי, עשו זאת באופן מתוכנן, תוך השקעת זמן וידע ולא כפעולה ספונטנית. למסקנה זו, העולה בקנה אחד עם תיאור האירועים במקרא, יש משמעות רבה בהבנת גורלה של העיר כולה בזמן המרד והחורבן, ובהבנת המדיניות בה נקטו הבבלים בזמן כיבוש העיר (וראו שלום ואחרים 2019).

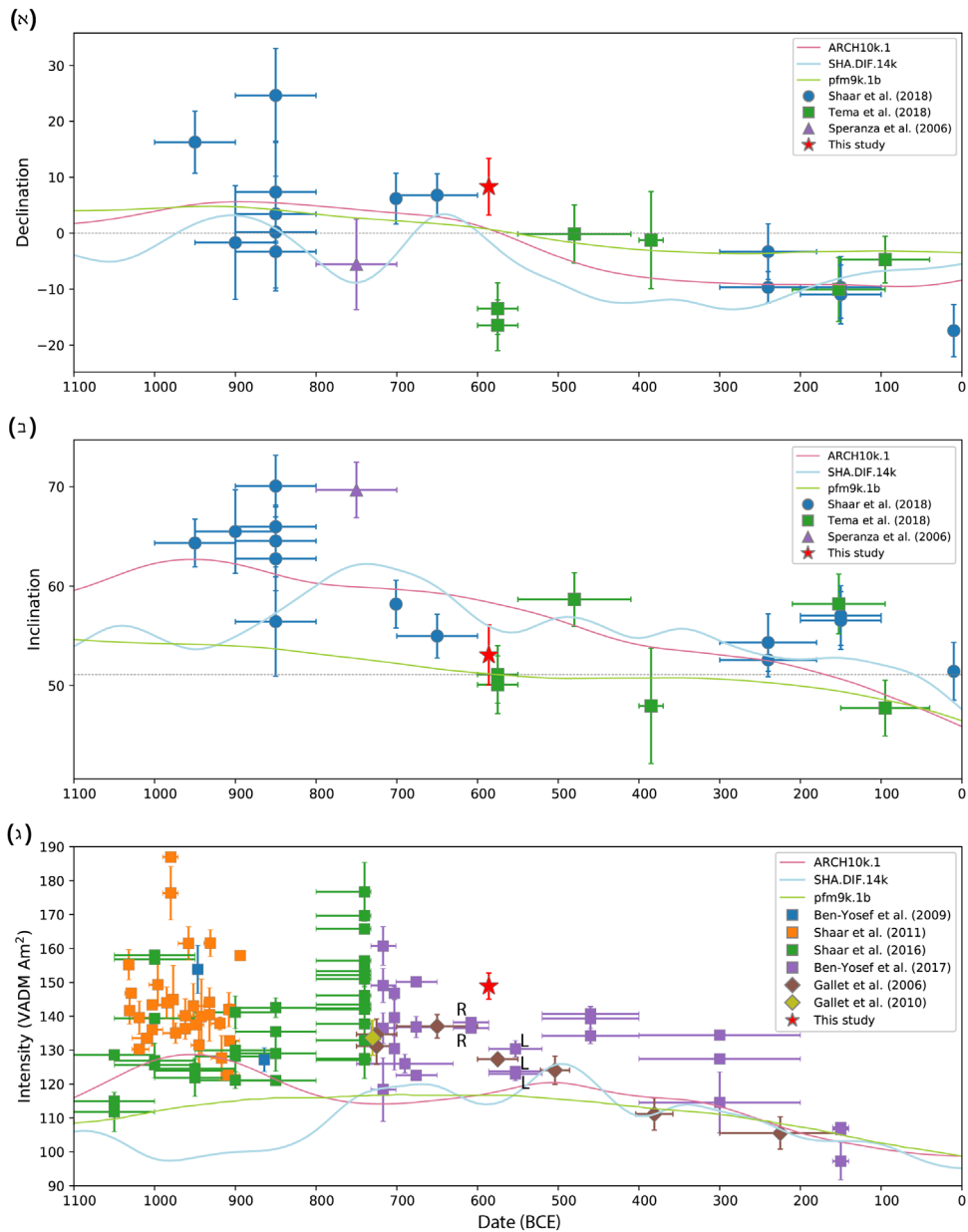
תרומה מרכזית של מחקר זה היא בכך שהוא מייצר עוגן כרונולוגי לשימוש של מחקרים עתידיים, הן ארכיאומגנטיים והן ארכיאולוגיים והיסטוריים. תוצאות הניסוי אפשרו לנו לקשור באופן ברור בין הקריסה של מבנה זה לבין אירוע השריפה, כלומר הוכחנו שהקלטת המגנט בשברי

הרצפה התרחשה במהלך חורבן המבנה בשריפה. שילוב התאריך המדויק של החורבן המבוסס היסטורית, אפשר את שיחזור השדה המגנטי בירושלים ברזולוציה של פחות משנה, נתון נדיר בדיוקו בתקופה כה מוקדמת. ניתן כעת להשתמש בעוגן זה בכדי לתארך אתרים ארכיאולוגיים וחפצים להם אין תיארוך מוחלט עצמאי. כך למשל נעשה שימוש בתוצאות העוצמה שהוצגו כאן לצורך תיארוך מערכות טביעות חותם על ידידות של קנקנים מממלכת יהודה (ליפשיץ 2018). מחקרים קודמים בחנו את עוצמת השדה המגנטי שהוקלטה בקנקנים נושאי טביעות ורדה וטביעות אריה (בן יוסף ואחרים 2017). כאן איור 4 - מסומנים ב"R" וב"L" בהתאמה). מרבית החוקרים סבורים כיום שמערכת טביעות החותם מסוג ורדה החלה בסוף המאה ה-7 לפסה"נ ויצאה מכלל שימוש בשנת 586 לפסה"נ. הצעות תיארוך מדויקות יותר התבססו בעיקר על פרשנות היסטורית ויש שפירשו את טביעות הורדה כחלק מההכנות של ממלכת יהודה לקראת המסע הבבלי ותיארוך את ייצורן של כל אלה לשנים הבודדות שקדמו לחורבן (אוישיסקין 2004). התוצאות החדשות משנת 586 לפסה"נ מראות ערכי שדה גבוהים בהרבה מאלו שנמדדו מידידות קנקנים המוטבעות בטביעות ורדה ולכן שוללות את האפשרות שקנקנים אלו נשרפו בסמוך לחורבן. הפרש כזה בעוצמת השדה מייצג להערכתנו שינוי של כמה עשורים לכל הפחות. לפיכך, ייצורן יכול היה להתחיל בעשור האחרון של המאה ה-7 לפסה"נ (קהיל 1995) אך ככל הנראה החל לפחות שני עשורים קודם לכן (קוך וליפשיץ 2013). התוצאות שלנו תומכות בהבנה ההיסטורית כי ייצור טביעות הורדה לא החל כחלק מההכנות של ממלכת יהודה לקראת המסע הבבלי. על בסיס התוצאות הארכיאומגנטיות, בשילוב עם שיקולים היסטוריים, ניתן להניח כי טביעות הורדה יוצרו במשך כמה עשרות שנים, כמו טביעות חותם מלכותיות אחרות מיהודה, כחלק ממערכת המנהל של ממלכה זו (קוך וליפשיץ 2013).

לאחר חורבן ירושלים נכנסה לשימוש מערכת חדשה של קנקנים שעל ידיהם ולעתים גם על גופם, הוטבעה טביעת אריה (ליפשיץ 2018). השוואת עוצמת השדה שנמדדה במחקר הנוכחי לעוצמה שהוקלטה בידידות עם טביעת האריה (בן יוסף ואחרים 2017) מצביעה גם היא על הפרש משמעותי בעוצמת השדה. לפיכך, יש להניח שאלה יוצרו, ככל הנראה, פרק זמן משמעותי לאחר 586 לפסה"נ.

לבסוף, לתוצאות שהושגו יש גם השלכות על מחקר התנוודתיות בשדה המגנטי של כדור הארץ. איור 4 מציג את תוצאות הכיוון והעוצמה ממחקר זה בשילוב נתונים ארכיאומגנטיים נוספים מישראל ומאזורים סמוכים (ירדן, קפריסין וסוריה) מ-1200 לפסה"נ לערך עד סוף המאה הראשונה לפסה"נ (וקנין ואחרים 2020 ושם הפניות נוספות).

ניסויים ארכיאומגנטיים קודמים הראו כי במאה ה-10 לפסה"נ החלה תקופה של התנהגות יוצאת דופן של השדה המגנטי בלבנט וסביבתו, המאופיינת בערכי שדה גבוהים ובשינויים מהירים בכיוון השדה ובעוצמתו, כולל תקופות קצרות של שיאים חסרי תקדים בעוצמת השדה. עד כה תוארך סופה של תקופה זו למאה ה-7 לפסה"נ, בעיקר בשל ערכי שדה נמוכים יחסית



איור 4-ג. נתוני כיוון ועוצמה ארכיאומגנטיים באזור הלבנט (ישראל, סוריה, ירדן, קפריסין). התוצאות הממוצעות משכבת החורבן של 586 לפסה"נ בירושלים מיוצגות על ידי כוכבים אדומים וטווחי אי וודאות (א) סטייה של הרכיב האופקי מהצפון הגיאוגרפי. (ב) נטייה של הרכיב האנכי ביחס לאופק. כל הכיוונים מתוקנים לירושלים. הקווים האפורים המקווקוים מייצגים את הכיוון של השדה הממוצע בירושלים. (ג) עוצמת השדה המגנטי. הקווים הצבעוניים מייצגים שלושה דגמים גיאומגנטיים גלובליים שונים (וקנין ואחרים 2020 והפניות שם). מסומנות גם התוצאות של שני סוגים של טביעות חותם מממלכת יהודה: טביעות ורדה (רוזטה) מסומנות באות "R" וטביעות אריה מסומנות באות "L".

שנמדדו מטביעות חותם על כלי חרס מיהודה (בן יוסף ואחרים 2017) ומכלי חרס מסוריה (גלה ואחרים 2006). הנתונים הארכיאומגנטיים החדשים מאפשרים לעדכן ולהאריך את משך התקופה שכן נתוני השדה הגבוהים החדשים משנת 586 לפסה"נ מצביעים על חוסר יציבות השדה גם במאה ה-6 לפסה"נ.

לסיכום, משחזור כיוון השדה, שהוקלט בשברי הרצפה השונים, אנו מסיקים כי שברי הרצפה הנטויים היו במקור חלק מרצפת הקומה השנייה של המבנה ושרובם נשרפו, התמוטטו ומיד התקררו. תוצאה זו מוכיחה את השערת החופרים אודות קריסת המבנה בשריפה ומחזקת את החיבור בין חורבן המבנה בשריפה לבין הנתונים המגנטיים. לא זו בלבד שתוצאות המחקר והעוגן הארכיאומגנטי החדש, המתוארך לשנת 586 לפסה"נ, סייעו בהבנת שטח החפירה, אלא שהם גם משמשים בסיס למחקרים רבים נוספים. שיחזור עוצמת השדה וכיוונו, כפי שהוקלטו בשברי הרצפה, מלמדים על עוצמת שדה גבוהה יחסית, ועל סטייה של 8.3 מעלות של הרכיב האופקי של השדה ביחס לצפון הגיאוגרפי (ציר הסיבוב של כדור הארץ). כל אלה מלמדים על חוסר יציבות של השדה המגנטי במהלך המאה ה-6 לפסה"נ.

מחקר זה מדגים כיצד נתונים ארכיאומגנטיים שמקורם בחורבן מתוארך היסטורית עשויים לשמש כעוגן לתיארוך ארכיאומגנטי וכן את הפוטנציאל הגלום בשיטה זו, בייחוד בתקופות בהן שיטות אחרות (כדוגמת פחמן 14) לא מאפשרות תיארוך ברזולוציה גבוהה. חשובה במיוחד היכולת להשתמש במידע הארכיאומגנטי לצורך תיארוך, לדוגמא בקישור שכבות חורבן באתרים אחרים למסע הבבלי בשנת 586 לפסה"נ או בשלילת קשר כזה. לתיארוך ארכיאומגנטי, המבוסס על השוואה לתוצאות החדשות כעוגן כרונולוגי, יש יתרון גדול ככלי תיארוך בנוגע למכלולים ארכיאולוגיים מסוף תקופת הברזל. תקופה זו נמצאת בליבה של תקופת המישור בעקומת הכיול של פחמן 14 (גילדרסון 2005), ולכן תיארוך באמצעות פחמן 14 מוגבל בה מאוד ולעתים קרובות כלל לא נעשה בו שימוש. העוגן הארכיאומגנטי החדש ישמש אם כן, הן לתיארוך מדויק של שכבות חורבן וממצאים אחרים שאין להם תיארוך היסטורי, והן לצורך חקר ההתנהגות האניגמטית של השדה המגנטי הקדום בתקופה זו ובאזור זה.

■ תודות

כל הניסויים הפליאומגנטיים בוצעו במעבדה הפליאומגנטית ע"ש חגי רון במכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית בירושלים. אנו אסירי תודה לחברי צוות החפירה בחניון גבעתי וללילך גונן על עזרתם במהלך עבודת השדה. אנו מודים ליעל אברט על עזרתה הרבה במעבדה הפליאומגנטית. אנו מעריכים את הדיונים המועילים בנושא הרצפה עם ניצן שלום, אליזבטה בוארטו, יותם אשר ועליזה ואן זיידן. תודה מקרב לב שלוחה גם לאיגור קריימרמן ולרות שחק-גרס על כך ששיטתו אותנו בתובנות שלהם בנוגע למחקרם על שריפה וקצב הקירור של מבנים בנויים מלבני בוץ. ברצוננו להודות גם לאמיר שגיב על עיון בגרסה מוקדמת של כתב היד ועל הערותיו. תודה רבה לקרן נעמי פרוור קדר על תמיכתה.

■ ביבליוגרפיה

בן יוסף ואחרים 2017

Ben-Yosef E., Millman M., Shaar R., Tauxe L., Lipschits O., Six Centuries of Geomagnetic Intensity Variations Recorded by Royal Judean Stamped Jar Handles, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 114 (9): 2160-2165.

בפט 2000

Buffett B.A., Earth's Core and the Geodynamo, *Science* 288 (5473): 2007 - 2012. DOI: 10.1126/science.288.5473.2007

גבע 2006

Geva H., The Settlement on the Southwestern Hill of Jerusalem at the End of the Iron Age: A Reconstruction Based on the Archaeological Evidence, *Zeitschrift des Deutschen Palästina-Vereins* 122 (2): 140-150.

גילדרסון 2005

Guilderson T.P., Reimer P.J., Brown T.A., The boon and bane of radiocarbon dating, *Science* 307 (5708):362-364.

גלה ואחרים 2006

Gallet Y., Genevey A., Le Goff M., Fluteau F., Eshraghi S.A., Possible Impact of the Earth's Magnetic Field on the History of Ancient Civilizations, *Earth and Planetary Science Letters* 246: 17-26.

הרווה ואחרים 2018

Hervé G., Lanos P., Improvements in Archaeomagnetic Dating in Western Europe from the Late Bronze to the Late Iron Ages: An Alternative to the Problem of the Hallstattian Radiocarbon Plateau, *Archaeometry* 60 (4): 870-883.

אביגד וגבע 2000

Avigad N., Geva H., *Jewish Quarter Excavations in the Old City of Jerusalem: Conducted by Nahman Avigad, 1969-1982*, Jerusalem.

אוסטה ואחרים 2020

Osete M.L., Molina-Cardín A., Campuzano S.A., Aguilera-Arzo G., Barrachina-Ibañez A., Falomir-Granell F., et al., Two Archaeomagnetic Intensity Maxima and Rapid Directional Variation Rates During the Early Iron Age Observed at Iberian coordinates. Implications on the Evolution of the Levantine Iron Age Anomaly, *Earth and Planetary Science Letters* 533, 116047.

אוישישקין 2004

Ussishkin D., *The Renewed Archaeological Excavations at Lachish (1973-1994)*, Tel-Aviv.

בן יוסף ואחרים 2009

Ben-Yosef E., Tauxe L., Levy T.E., Shaar R., Ron H., Najjar M., Geomagnetic Intensity Spike Recorded in High Resolution Slag Deposit in Southern Jordan, *Earth and Planetary Science Letters* 287 (3-4): 529-539.

בן יוסף ואחרים 2010

Ben-Yosef E., Tauxe L., Levy T.E., Archaeomagnetic Dating of Copper Smelting Site F2 in Timna Valley (Israel) and Its Implication on Modeling Ancient Technological Developments, *Archaeometry* 52 (6): 1110-1121.

Shalom N., Gadot Y., A Newly Discovered Personal Seal and Bulla from the Excavations of the Giv'ati Parking Lot, Jerusalem, *Israel Exploration Journal* 69 (2): 154-174.

פיטרס ואחרים 2018

Peters I., Tauxe L., Ben-Yosef E., Archaeomagnetic Dating of Pyrotechnological Contexts: a Case Study for Copper Smelting Sites in the Central Timna Valley, Israel, *Archaeometry* 60: 554-570.

קהיל 1995

Cahill J.M., Rosette Stamp Seal Impressions from Ancient Judah, *Israel Exploration Journal* 45: 247-250.

קוך וליפשיץ 2013

Koch I., Lipschits O., The Rosette Stamped Jar Handle System and the Kingdom of Judah at the End of the First Temple Period, *Zeitschrift des Deutschen Palästina-Vereins* 129: 1-23.

ריימר ואחרים 2016

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., et al., IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP, *Radiocarbon* 55 (4): 1869-1887.

שחק-גרוס ואחרים 2018

Shahack-Gross R., Shaar R., Hassul E., Ebert Y., Forget M., Nowaczyk N., et al., Fire and Collapse: Untangling the Formation of Destruction Layers Using Archeomagnetism, *Geoarchaeology* 33: 513-528, <https://doi.org/10.1002/gea.21668>

וקנין ואחרים 2020

Vaknin Y., Shaar R., Gadot Y., Shalev Y., Lipschits O., et al., The Earth's Magnetic Field in Jerusalem During the Babylonian Destruction: A Unique Reference for Field Behavior and an Anchor for Archaeomagnetic Dating, *PLoS ONE* 15 (8): e0237029, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237029>

כלף ועוזיאל 2018

א' כלף וג' עוזיאל, "היציאה מן החומות: חידושים בחפירות ארכיאולוגיות על המדרון המזרחי של עיר דוד ומשמעותם להבנת ההתפתחות העירונית של ירושלים בשלהי תקופת הברזל", א' מירון (עורך), מחקרי עיר דוד וירושלים הקדומה, 13: 17-30.

ליפשיץ 2005

Lipschits O., *The fall and rise of Jerusalem: Judah under Babylonian Rule*, Winona Lake, Ind.

ליפשיץ 2011

Lipschits O., Shedding New Light on the Dark Years of the "Exilic Period": New Studies, Further Elucidation, and Some Questions regarding the Archaeology of Judah as an "Empty Land", In: B. Kelle, F.R. Ames, J.L. Wright (eds.), *Interpreting Exile: Interdisciplinary Studies of Displacement and Deportation in Biblical and Modern Contexts. Ancient Israel and Its Literature*, Atlanta: 57-90.

ליפשיץ 2018

ע' ליפשיץ, עידן האימפריות: היסטוריה ומנהל ביהודה לאור טביעות החותם על קנקנים (מהמאה הח' עד המאה הב' לפנה"ס), ירושלים.

מנדל-גברוביץ' ואחרים 2019

Mendel-Geberovich A., Shalev Y., Bocher E.,

שילה 1984

Shiloh Y., Excavations at the *City of David*, Jerusalem.

שלו ואחרים 2020

Shalev Y., Shalom N., Bocher E., and Gadot Y., New Evidence on the Location and Nature of Iron Age, Persian and Early Hellenistic Period Jerusalem, *Tel Aviv* 47.2: 149-172

שלום ואחרים 2019

י' שלום, י' שלו, ג' עוזיאל, א' כלף, א' בן-יוסף, ע' ליפשיץ, א' בוארטו ו' גדות, "כיצד מחריבים עיר?: עדויות ארכיאולוגיות חדשות לתוצאות המסע הבבלי לירושלים", חידושים בארכיאולוגיה של ירושלים וסביבותיה, יג: 229-248.

שער ואחרים 2011

Shaar R., Ben-Yosef E., Ron H., Tauxe L., Agnon A., Kessel R., Geomagnetic Field Intensity: How High Can It Get? How Fast Can it Change? Constraints from Iron Age Copper Slag, *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 297-306.

שער ואחרים 2015

Shaar R., Tauxe L., Ben-Yosef E., Kassianidou V., Lorentzen B., Feinberg J.M., Levy T.E., Decadal-Scale Variations in Geomagnetic Field Intensity from Ancient Cypriot Slag Mounds, *Geochemistry Geophysics Geosystems* 16: 195-214.

שער ואחרים 2016

Shaar R., Tauxe L., Ron H., Ebert Y., Zuckerman S., Finkelstein I. et al., Large Geomagnetic Field Anomalies Revealed in Bronze and Iron Age Archaeomagnetic Data from Tel Megiddo and Tel Hazor, Israel, *Earth and Planetary Science Letters*, 442: 173-185.

שער ואחרים 2017

Shaar R., Tauxe L., Goguitchaichvili A., Devidze M., Licheli V., Further Evidence of the Levantine Iron Age Geomagnetic Anomaly from Georgian Pottery, *Geophysical Research Letters* 44 (5): 2229-2236.

שער ואחרים 2018

Shaar R., Hassul E., Raphael K., Ebert Y., Segal Y., Eden I. et al., The First Catalog of Archaeomagnetic Directions from Israel with 4000 Years of Geomagnetic Secular Variations, *Frontiers in Earth Science* 6, 164.

שער ואחרים 2020

Shaar R., Bechar S., Finkelstein I., Gallet Y., Martin M.A.S., Ebert Y., Keinan J., Gonen L., Synchronizing Geomagnetic Field Intensity Records in the Levant between the 23rd and 15th Centuries BCE: Chronological and Methodological Implications, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 21 e2020GC009251. <https://doi.org/10.1029/2020GC009251>

