

עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ: תגליות חדשות מתוך מחקר ארכאומגנטי של סיגי נחושת בערבה

רון שער, ארז בן-יוסף*

השדה הגאומגנטי הוא אחת התכונות המסתוריות והמסקרנות של כדור הארץ. הידע על אופן התפתחותו מועט מאוד, ולפיכך הבנת דרכי היווצרותו ותיאור התנהגותו בעבר הם מן האתגרים הגדולים של הגאופיזיקה המודרנית. שדה מגנטי ניתן לתיאור באמצעות שני מרכיבים: כיוון ועוצמה. מרכיב הכיוון מתבטא בתנועת מחט המצפן והתיישרותה בהתאם לצפון המגנטי, והוא שמאפשר לבעלי חיים כמו עופות נודדים ויונקים ימיים לנווט. מרכיב העוצמה של השדה מוכר פחות ולא ניתן לחוש בו, אך הוא ממלא תפקיד חשוב בחיינו, שכן השדה הגאומגנטי פועל כמסך ההגנה על כדור הארץ מפני קרינה קוסמית קטלנית. שני מרכיביו של השדה, הכיוון והעוצמה, משתנים על פני פרקי זמן הנעים בין ימים ספורים למיליוני שנים. שחזור שינויים שחלו בשדה בעבר אפשרי מתוך מחקר פלאומגנטי של סלעים וחפצים ארכאולוגיים ממוגנטים. חומרים אלה מכילים גבישים מגנטיים, והם יכולים 'להקליט' את השדה המגנטי בעת היווצרותם ולשמר בתוכם את תכונותיו. בעוד הנתונים הפלאומגנטיים הנמצאים בידינו כיום מספקים מידע רב ושימושי על שינויים בכיוון של השדה העתיק, הנתונים על שינויים בעוצמה הגאומגנטית מועטים באופן יחסי. הסיבה להבדל נעוצה במיעוט החומרים המתאימים לחקר

* ארז בן-יוסף, גאולוג וארכיאולוג בהכשרתו. למד באוניברסיטה העברית בירושלים, כותב עבודת דוקטור בנושא הפקת הנחושת בתקופת הברזל בדרום הלבנט באוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו. רון שער, גאולוג במכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים, כותב עבודת דוקטור בנושא שינויים קצרי טווח בעוצמת השדה הגאומגנטי.

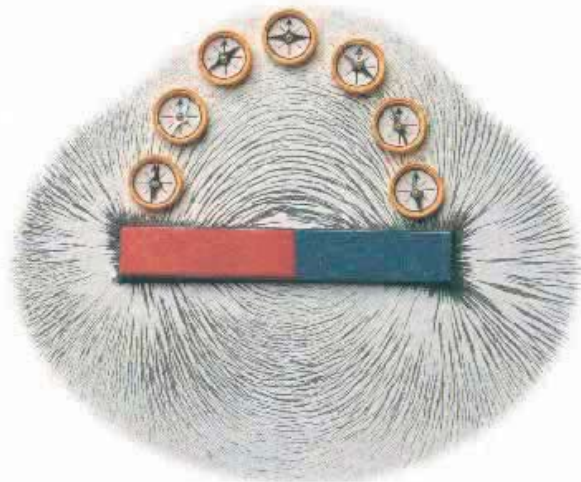
העוצמה הגאומגנטית העתיקה. במהלך השנים האחרונות נערך מחקר משותף של המכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית בירושלים והמכון האוקיינוגרפי 'סקריפס' (Scripps Research Institution) באוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו, שמטרתו לשחזר את עוצמת השדה הגאומגנטי באלפי השנה האחרונות בעזרת סיגני נחושת. המחקר הראה שלסיגים – פסולת תעשייתית של מתקנים עתיקים להפקת נחושת – יש תכונות מגנטיות ייחודיות ונדירות המאפשרות שחזור מדויק של עוצמת השדה בזמן היווצרותם. אתרים ארכאולוגיים ובהם סיגני נחושת נמצאים בבקעת הערבה, בעיקר באזורי המכרות העתיקים בתמנע ובוואדי פינאן (בירדן). חקר הסיגים מאפשר בנייה של בסיס נתונים חדשני מסוגו המתאר את השינויים בעוצמת השדה בששת אלפי השנים האחרונות (מאז החלה הפקת הנחושת באזור), וזאת באיכות גבוהה ובהפרדת זמן ברורה. בסיס הנתונים הזה מספק תגליות חדשות על אופן השתנתו של השדה הגאומגנטי לאורך זמן. למשל, המחקר הראה שלפני כ־3,000 שנה זינקה עוצמתו הגאומגנטית של השדה לשיאים שטרם נמדדו במחקרים דומים. השיאים הגאומגנטיים לוו בשינויים מהירים שהתרחשו על פני כמה עשרות שנים לכל היותר, והם מציבים רף עליון לעוצמה המרבית של השדה ולקצב השינויים המרבי שלו. מכיוון שתנודות מעין אלה אינן מאפיינות את השדה כפי שאנו מכירים אותו היום מתוך מדידות מכשירים ישירות, הרי שמדובר בתגלית ראשונה מסוגה, המעידה על אופיו הבלתי יציב של השדה הגאומגנטי.

במאמר זה נציג היבטים שונים של המחקר. בחלק הראשון נסביר מהו השדה הגאומגנטי, כיצד נוצר ומה ניתן ללמוד עליו באמצעות המחקר הפלאומגנטי. בחלקו השני נציג את שיטת העבודה שפיתחנו עבור סיגני נחושת ואת תוצאות המחקר עד כה. בסיכום המאמר נדון בהשלכותיהן של התגליות החדשות. כמו כן, כללנו במאמר שתי הרחבות (במסגרות) למידע על סיגני נחושת ברקורד הארכאולוגי ועל הסיגים כרשם ארכאומגנטי.

מהו שדה מגנטי?

המגנט (שהתגלה ככל הנראה ביוון במאה השישית לפסה"ג) נזכר בספרו של אריסטו 'על הנפש'. אריסטו ייחס למגנט 'נשמה', לאור השפעתו על תנועתם של

חלקי ברזל ללא כל מגע ביניהם. כיום ידוע לנו כמובן כי מגנט מייצר סביבו שדה מגנטי ובכך 'משדר' לסביבה על קיומו. כל חפץ בעל תכונות מגנטיות שיוצב במרחב הסובב את המגנט יגיב לשדה המגנטי וירגיש משיכה, או במילים אחרות, יופעל עליו כוח מגנטי. המידע האצור בשדה המגנטי מכיל את שני מרכיביו של הכוח המגנטי, עוצמה וכיוון (וקטור). המשמעות הפיזיקלית של המושג 'שדה מגנטי' היא אם כן שלכל נקודה במרחב ניתן לייחס וקטור, ולכן נהוג לקרוא לשדה המגנטי 'שדה וקטורי'. איור 1 ממחיש כיצד נראה שדה מגנטי סביב מגנט פשוט בעל שני קטבים ('מגנט דיפולי'). בתמונה נראים שבבי ברזל שפוזרו על נייר סביב מגנט. שבבי הברזל נוטים להסתדר לאורך קווים סגורים המחברים את שני קטביו של המגנט. קווים אלה נקראים 'קווי השדה המגנטי', והם מבטאים את הכיוונית של השדה המגנטי. צפיפות הקווים מבטאת את מרכיב העוצמה של השדה. היא גבוהה יותר קרוב לקוטבי המגנט, אך הולכת ודועכת ככל שמתרחקים ממנו. כפי שמראה איור 2, השדה המגנטי של כדור הארץ מתנהג בצורה דומה מאוד לזו של שדה המגנט הדו־קוטבי, המתואר באיור 1, ומכאן חשיבותו.



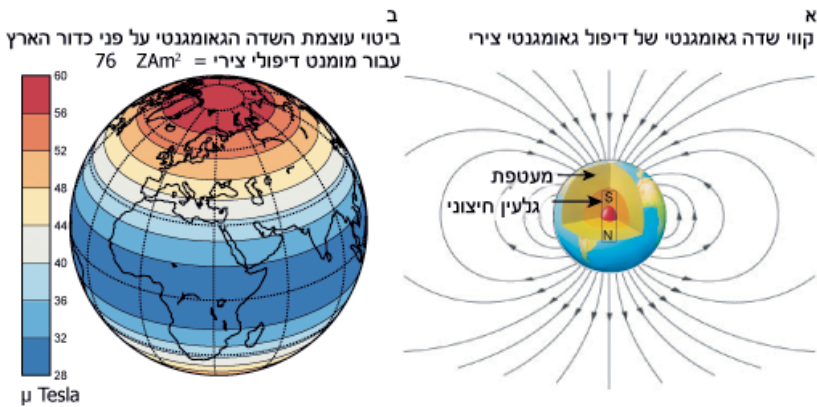
איור 1: גאומטריה של שדה מגנטי הנוצר ממגנט דו־קוטבי (דיפול)
 שבבי הברזל שפוזרו סביב מגנט מסתדרים לאורך קווי השדה, המחברים את שני קוטבי המגנט. צפיפותם של קווי השדה מבטאת את עוצמת השדה (מקור:
http://www.teachnet-lab.org/ps101/bglasgold/magnetism/lesson_2.htm).

השדה המגנטי של כדור הארץ (השדה הגאומגנטי)

התופעה של התיישרות מחט מגנטית חופשית לכיוון צפון־דרום התגלתה במאה העשירית לסה"נ בסין העתיקה, והאדם למד עד מהרה לנצל את התגלית לצורך ייצור המצפן. המצפן הגיע לאירופה במאה האחת עשרה, ומאז ועד היום הוא משמש כמכשיר ניווט פופולרי ויעיל. עד המהפכה המדעית של המאה השבע עשרה נהגו להסביר את פעולתו של המצפן במשיכה של גרמי השמים. אלא שבשנת 1600 העלה המדען הבריטי ויליאם גילברט, רופאה של המלכה אליזבת הראשונה, רעיון חדש ומהפכני, שלפיו כדור הארץ הוא בעצמו מגנט ענק ולכן משפיע על כיוון המחט המגנטית של המצפן. הוא עיצב מגנט דו־קוטבי בצורת כדור המדמה את כדור הארץ, ומיפה את הכיוון המגנטי על פני הכדור בעזרת מצפן. כך, באמצעים פשוטים מאוד, גילה גילברט שתכונת השדה המגנטי היא תכונה של כדור הארץ כולו ולא של מקום מסוים, דהיינו כדור הארץ עצמו מייצר שדה מגנטי (השדה הגאומגנטי). גילברט גם ניסח את אחת התכונות החשובות של השדה: השדה הגאומגנטי הוא בקירוב ראשון שדה דיפולי (דו־קוטבי) צירי. במילים אחרות, קווי השדה של השדה הגאומגנטי הם בקירוב טוב קווי שדה של מגנט דו־קוטבי (כמו זה הנראה באיור 1) הנמצא במרכז כדור הארץ וצירו מקביל לציר הסיבוב של כדור הארץ (איור 2).

המסקנה שגילברט הגיע אליה נכונה, אך ההסבר שלו למקור השדה הגאומגנטי אינו מדויק. כדור הארץ אינו מגנט, ומידת החום בפנים כדור הארץ כה גבוהה, עד שאינה מאפשרת את קיומו של חומר מגנטי כלשהו. מהו אפוא המקור לשדה הגאומגנטי? התשובה לשאלה זו עדיין אינה ידועה, ומציאתה היא אחד האתגרים הגדולים של מחקר כדור הארץ בימינו. לפי התאוריה המקובלת, במקום המגנט הענק שהגה גילברט נמצא בליבת כדור הארץ מנגנון פעיל שמייצר את השדה הגאומגנטי. מנגנון זה, הנקרא גאודינמו, מובן כמערכת מסובכת של זרמים חשמליים בגלעין החיצוני של כדור הארץ, בעומק של יותר מ־2,800 קילומטר (איור 2). הלחץ והטמפרטורה הגבוהים בעומקים הללו גורמים לחומר המתכתי הבונה את הגלעין (בעיקר ברזל ומעט ניקל) להפוך לנוזל הנושא מטען חשמלי. הנוזל הטעון מתערבל ונע בגלעין בתנועות סביבון

תוך כדי התקררות והתגבשות, ותנועתו מושפעת מסיבוב כדור הארץ סביב צירו. זרימת החומר נוטה ככל הנראה להסתדר בעמודות הדומות לתנועת האוויר החם בציקלון. כך נוצרים בגלעין מעין 'סלילים' גאומגנטיים הפועלים לייצר שדה מגנטי במבנה של דיפול (בדומה לאופן שבו סליל בשנאי או במנוע חשמלי מחולל שדה מגנטי). תיאור הכוחות החשמליים והמכניים הפועלים בגלעין וניסוח מלא של תאוריית הגאודינמו הם אחד ממוקדי המחקר פורצי הדרך בגאופיזיקה. אלא שלשם כך דרושים נתונים מפורטים על התנהגות השדה המגנטי על ציר הזמן, כלומר נתונים פלאומגנטיים שיספקו תנאי שפה למודלים הפיזיקליים.



איור 2: מודל הדיפול הגאומגנטי הצירי וביטוי על פני כדור הארץ
 א. מבנה פנים כדור הארץ, הכולל את הגלעין הפנימי המוצק, הגלעין החיצוני הנוזלי (שניהם מורכבים בעיקר מברזל ומעט ניקל) והמעטפת הסיליקטית, המשמשת כמבודד חשמלי ותרמי. השדה הגאומגנטי נוצר בגלעין החיצוני על ידי הזרמים המערבולתיים של החומר הטעון (גאודינמו). קווי השדה שמייצר הגאודינמו דומים לקווי שדה שמייצר מגנט דיפולי דמיוני הממוקם במרכז כדור הארץ (דיפול גאומגנטי צירי); ב. עוצמת השדה הגאומגנטי על פני כדור הארץ בהנחה של דיפול גאומגנטי צירי (מומנט הדיפול הצירי בהווה הוא $ZAm^2 = 76$ האות Z מייצגת מספר בערך של 10^{21}). עוצמת השדה על פני כדור הארץ תלויה בקו הרוחב. בעזרת הנחת דיפול צירי ניתן לחשב את מומנט הדיפול הגאומגנטי (של כדור הארץ) מתוך מיצוע של מדידות שדה מקומיות.

פלאומגנטיות: שחזור השדה הגאומגנטי העתיק על ידי חקר סלעים

המושג 'מגנט' נגזר ממילה יוונית שפירושה 'הסלע של מגנוזיה'. מדובר ככל הנראה במגנוזיה שביוון העתיקה, שמיקומה אינו ידוע בבירור, אך היא התאפיינה במרבצים של אחד המינרלים המגנטיים הנפוצים בטבע, מגנטיט (Fe_3O_4). גבישי מגנטיט הם למעשה מגנטים זעירים, ובסלע המיוחד של מגנוזיה ריכוזם גבוה באופן חריג. עוצמת המגנט של סלע המגנט המקורי ממגנוזיה הייתה גבוהה בהרבה מזו של סלעים מגנטיים אחרים (ככל הנראה בעקבות מכת ברק ששיבשה את המגנט המקורי של הסלע), ואנשים הבחינו בכך שחפצים ברזליים נמשכים אליו. בטבע נפוצים סלעים מגנטיים רבים מסוגים שונים, חלקם סלעים מגמתיים (סלעים שמקורם בהתקררות של מגמה) וחלקם סלעי משקע (סלעים שהצטברו על פני השטח או בקרקעיתו של מקור מים). סלעי בזלת, למשל, הם סלעים מגנטיים ומתנהגים כמו מגנט חלש. (באחד מאתרי הטיולים ברמת הגולן, סמוך לצומת ווסט, מצוי סלע בזלת שהכה בו ברק. בעקבות מכת הברק הפכה עוצמת המגנט של הסלע לחזקה במיוחד, ממש כפי שקרה לסלע המגנט העתיק ממגנוזיה. אמנם סלע הבזלת בגולן אינו מושך חלקי מתכת, אך מחט מצפן שתוצב בקרבתו תוסט ויתאבד את הצפון!).

עם התפתחות הגאופיזיקה במאה העשרים התפתח תחום מחקר חדש הנקרא 'פלאומגנטיות' (מגנטיות קדומה), שמטרתו העיקרית מדידה ואפיון של המגנט הטבעי הטבוע בסלעים. החוקרים מסווגים את הסלעים המגנטיים לפי האופן שבו רכשו את המגנט שבהם. סלעים מגמתיים בדרך כלל רוכשים מגנט תוך כדי התקררות (מסגרת 1), סלעים סדימנטריים תוך כדי שקיעה, ותהליכי בלייה כימיים הפועלים על שני סוגי הסלעים מעניקים לחומר מגנט ממקור כימי. מגנטונים אלה הם ביטוי לתהליך שבו הסלעים 'מקליטים' את השדה הגאומגנטי בזמן היווצרותם. הסלעים הם אפוא מעין מכשירי הקלטה עתיקים. במחקרים פלאומגנטיים מנסים החוקרים לקרוא ולפענח את המידע המגנטי המקודד בסלעים, ועל ידי כך לשחזר את השדה הגאומגנטי בזמן היווצרות הסלע. המחקר הפלאומגנטי הוביל בשנות השישים לאחת מהמהפכות המדעיות הגדולות של מדעי כדור הארץ: התאוריה של טקטוניקת הלוחות. המחקרים הראו שמתוך מדידת הכיוון הפלאומגנטי הטבוע בסלע ניתן לשחזר את קו הרוחב שבו היה הלוח בזמן שהסלע רכש בו את המגנט

(זאת מאחר שהשדה על פני כדור הארץ הוא שדה דיפולי-צירי, וכיוון קווי השדה תלוי בקו ברוחב, כפי שניתן לראות באיור 2). כך, בעזרת פלאומגנטיות, ניתן לשחזר את מסלול תנועתם של הלוחות הטקטוניים.

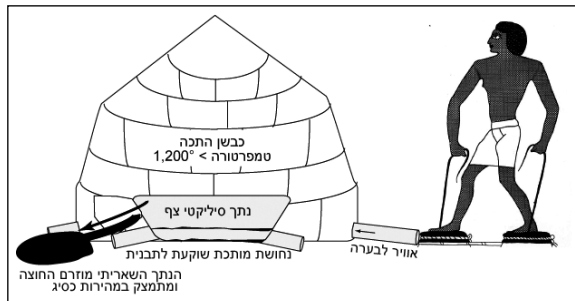
שינויים בשדה המגנטי של כדור הארץ

עוד בתחילת המאה העשרים הבחינו קבוצות מחקר שונות בעובדה מפתיעה: חלק מהסלעים מאופיינים בכיוון פלאומגנטי 'הפוך', המצביע לכיוון דרום במקום צפון. רוב החוקרים פירשו את התוצאות כטעות מדידה. אולם בשנות השישים, לאחר מחקר שיטתי של סלעי בזלת ממקומות שונים בעולם, הובילו התצפיות למסקנה שנראתה אז כבלתי אפשרית: הקוטביות של השדה הגאומגנטי אינה קבועה, אלא מתהפכת בתדירות בלתי סדירה. מכאן שבמהלך ההיסטוריה של כדור הארץ המצפן לא הצביע תמיד צפונה, אלא לעתים גם דרומה. תופעה זו, הנקראת 'היפוך גאומגנטי', עדיין נטולת הסבר ברור. המדידות הפלאומגנטיות מצביעות על כך שבזמן ההיפוך קורסת עוצמת השדה במהירות אדירה (בקנה מידה גאולוגי) על פני כמה אלפי שנים, וכשהשדה מתאושש הצפון הופך דרום ולהפך. מדידות ישירות של עוצמת השדה המגנטי מ-150 השנים האחרונות הראו שעוצמת השדה דעכה בכ-10% מאז שנת 1850, והיא ממשיכה לדעוך בקצב כמעט קבוע. חישובים גאופיזיים מעלים שקצב הדעיכה בהווה מאפיין התחלה של היפוך, ומבחינה סטטיסטית ייתכן שאנו נמצאים בפרק זמן מתאים להיפוך (במהלך 165 מיליון השנים האחרונות התרחשו היפוכים אחת לכחצי מיליון שנה בממוצע, כשההיפוך האחרון התרחש לפני כ-780 אלף שנה). אמנם ייתכנו הסברים נוספים וקיימת מחלוקת באשר לפרשנותם הנכונה של הנתונים, אך עדיין עולה השאלה: האם ייתכן שבעוד כמה מאות או אלפי שנים יתהפך השדה?

הדינמיות של השדה מתבטאת גם בשינויים קטנים של כיוון ועוצמה, הנקראים 'שינויים סקולריים', אשר מתחוללים על פני פרקי זמן שבין ימים לבין אלפי שנים. השינויים הסקולריים באים לידי ביטוי בין השאר באי-אחידות מרחבית של השדה על פני כדור הארץ ובנדידה בלתי פוסקת של הצפון המגנטי סביב הצפון הגאוגרפי. הסטייה באזורים גאוגרפיים שונים משתנה בשיעורים שונים, לדוגמה: הצפון המגנטי בירושלים מוסט בכארבע מעלות מהצפון הגאוגרפי, ובניו יורק

הוא מוסט בכ־13 מעלות. כיום ניתן למדוד את השינויים הסקולריים בדיוק רב בעזרת מכשירי מדידה מודרניים ומדויקים, אך בעבר נמדד השדה בעזרת מצפן. מדידות כאלה בוצעו על ידי נוטים של ספינות שהפליגו באוקיינוסים ודאגו, למרבה המזל, לתעד את הנתונים ביומני המסע שלהם. הרישומים ההיסטוריים האלה, יחד עם מדידות שביצעו מדענים באירופה, הותירו אחריהם תיעוד חשוב של כיוון השדה הגאומגנטי בכ־400 השנים האחרונות ושל עוצמת השדה בכ־150 השנים האחרונות. באשר לעבר הרחוק יותר יש צורך בנתונים ארכאומגנטיים (חקר חומרים ממקור ארכאולוגי) או פלאומגנטיים (חקר סלעים). המחקרים הפלאומגנטיים ייצרו כמות נתונים עצומה על שינויי כיוון בעבר, אך הם מתקשים לספק תמונה ברורה של שינויי העוצמה. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שקשה יותר לשחזר במדויק את עוצמת השדה העתיק מאשר את כיוונו. לשם כך יש צורך ברשם מגנטי בעל תכונות מגנטיות מסוימות (למשל, חומר המכיל גבישים מגנטיים בגודל מסוים אשר הקליטו שדה מגנטי תוך כדי קירור), אך לרוע המזל חומרים כאלה נדירים.

במהלך המחקר הנוכחי התגלה לאחרונה שלסיני נחושת תכונות מגנטיות יוצאות דופן, והם חומר מקור אידיאלי לחקר השדה הגאומגנטי העתיק. בסיס הנתונים שנאסף מתוך בדיקות מעבדה של הסיגים מייצג אזור מסוים של כדור הארץ. על מנת להשוות את התוצאות למחקרים אחרים, מניחים שהן משקפות התנהגות גלובלית. מתוך ההנחה שהשדה הוא בקירוב ראשון דיפול גאומגנטי צירי מושלם עולה שניתן לחשב את עוצמת הדיפול הגאומגנטי בכל מקום על פני כדור הארץ, זאת בהתאם לקו הרוחב שבו נמדדה עוצמת השדה (איור 2). עוצמת הדיפול המחושבת לפי קו הרוחב נקראת 'מומנט גאומגנטי צירי וירטואלי',



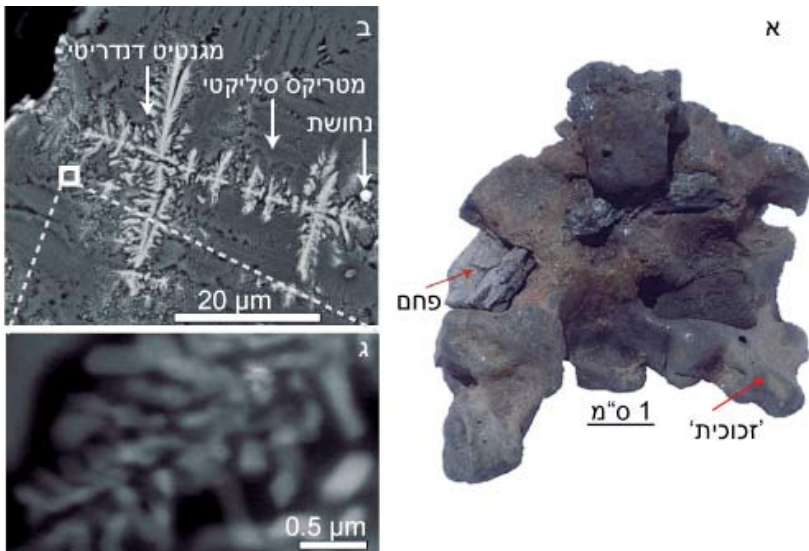
מסגרת 1: סיגים ברקורד הארכאולוגי

והגדרה זו משמשת כאן לצורך הצגת התוצאות באיורים והשוואת נתונים מקווי רוחב שונים.

הפקת נחושת ראשונית מבצר החלה בדרום הלבנט (ישראל, ירדן וסיני) לפני כ־6,500 שנים, בתקופה הכלקוליתית, ונמשכה כמעט ברציפות עד התקופה הממלוכית (המאה השלוש עשרה). טכנולוגיית ההפקה וצורת הכבשנים השתנו במרוצת הזמן, מבור פשוט החפור באדמה עד ל'כבשני פיר' בנייים שנעזרו במערכת מפוחים ובמנגנון הזרמה של הנתך השאריתי. כמעט בכל טכנולוגיות ההפקה תוצר הלוואי של התהליך הוא סיגים. סלעי הבצר (אבני חול, סלעים קרבונטיים ופצלים) מותכים בחום של 1,200 מעלות לפחות, והנחושת הנקיה נפרדת מהמינרלים נושאי הנחושת ושוקעת בתחתית הכבשן, בדרך כלל בצורת גושים אי־רגולריים שנאספו לזיקוק בהתכה משנית ליצירת מטילים למסחר. שאר הנתך מתמצק בתהליך זה לסיגים. בתקופות הקדומות אלה גושים קטנים באופן יחסי, שהתמצקו בתוך הכבשן ('סיגי תנור'). בדרך כלל הם נמצאים שבורים לחתיכות כיוון שנכתשו באופן מכוון לניצול מרבי של חתיכות נחושת מתכתית שנלכדו בתוכם. מסוף תקופת הברונזה המאוחרת, בערך 1300 לפסה"נ, הטכנולוגיה העיקרית הייתה בכבשנים שאפשרו הזרמה מבוקרת של הנתך אל 'בור סיגים' בקדמת הכבשן. נוסף על עלייה משמעותית בתפוקת הנחושת בכל מחזור התכה, התהליך יצר פלטות סיגים גדולות, לעתים בקוטר 50 ס"מ ויותר ('סיגי הזרמה', המכונים לעתים 'סיגי עוגה'). הייצור התעשייתי בטכנולוגיה המשוכללת לווה בהיווצרותן של ערמות סיגים גבוהות, הכוללות בין השאר גם שברי כבשנים ותוכנם – פחמים ו'סיגי תנור' (הכבשנים נשברו במכוון בסוף כל תהליך התכה על מנת לאסוף את הנחושת מתחתית התנור). ערמות אלו הצטברו במהלך עשרות עד מאות שנים ומשמשות מפתח לחקר השינויים בעוצמת השדה הגאומגנטי בהפרדת זמן גבוהה. הסכמה המטלורגית־טכנולוגית של דרום הלבנט מקבילה באופן כללי להיסטוריה המטלורגית של העולם הישן, ומרכזי הפקה אחרים, כמו קפריסין ואנטוליה, יכולים לשמש בסיס חשוב נוסף לשחזור עוצמתו של השדה. במסגרת המחקר הנוכחי הראינו שגם סיגי ברונזה הם חומר מתאים, ולא מן הנמנע שסיגים מתעשיות מטלורגיות אחרות ייצאו מתאימים אף הם.

6,000 שנה של שינויים בעוצמת השדה לפי סיגי נחושת

סיג נחושת הוא תוצאה של התמצקות שארית של נתך שמקורו בתהליך הפקת נחושת מתכתית מִמְּצָר (מסגרת 1). לאחר הפרדת הנחושת המתכתית מהתערובת המותכת בכבשנים מתמצקת השארית לגושים כהים המאפיינים כמעט את כל אתרי ההפקה הקדומים. תהליך ההפקה התרחש בטמפרטורות גבוהות, כ־1,200 מעלות, ולעתים בקנה מידה תעשייתי. עדות לכך הן עֲרֻמוֹת סיגים גדולות, תוצאה של הצטברות הדרגתית לאורך עשרות ומאות שנים. ערמות אלו עשירות גם בפחם היכול ללעטים בתוך הסיגים עצמם (איור 3א). מאפיין זה עוזר לתיארוך



איור 3: דוגמת סיג נחושת ואפיון מיקרוסקופי של החומר. א. סיג מאתר תמנע־30, המכיל בתוכו פחם. שולי הסיג מאופיינים בטקסטורה זכוכיתית (התצלום באדיבות חגי רון וליסה טאוקס); ב. תצלום מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM) של החלק הזכוכיתי בסיג. החצים מסמנים: גביש פרומגנטי של מגנטיט במבנה דנדריטי (ענפים מתפצלים ההולכים וקטנים, מבנה הנוצר בעקבות התגבשות מהירה בזמן קירור מהיר), מטריקס שמכיל זכוכית סיליקטית ושאריית של נחושת מתכתית; ג. הגדלה של החלק המסומן בריבוע באיור 3ב. הענפים של הדנדריט מאופיינים בגודל תת־מיקרוני. הגודל הזעיר של הגבישים הפרומגנטיים בסיגים הזכוכיתיים מעניק לסיגים תכונות נדירות של רשם מגנטי מעולה (מתוך Shaar et al, 2010a).

מדויק של הסיגים באמצעות מדידות פחמן 14. אופן היווצרותם של סיגי נחושת דומה לזה של סלעים וולקניים (התגבשות מנתך), ובזכות ההרכב המינרלוגי שלהם הם נושאים אות מגנטי חזק.

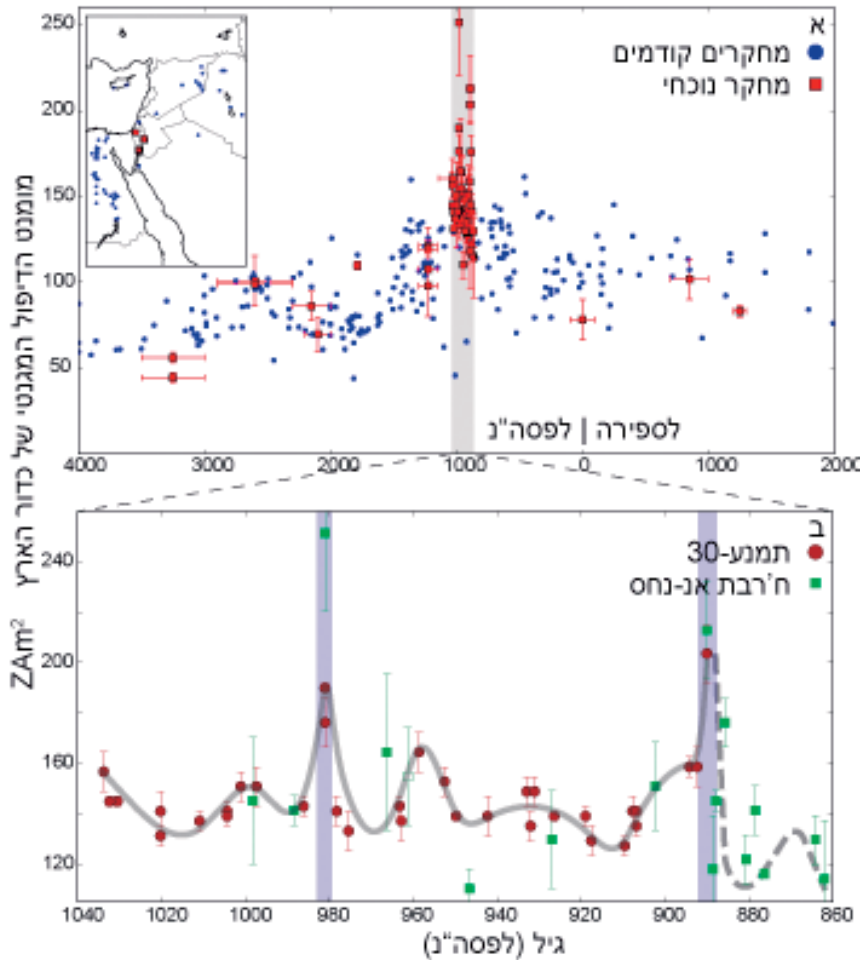
מה הופך את הסיגים להיות מכשירי הקלטה מעולים של השדה הגאומגנטי (מסגרת 2)? בטרם התגבש היה הנתך עשיר במתכות כמו ברזל ומנגן, ולכן בזמן הגיבוש נוצרו מינרלים פרומגנטיים (גבישים שהם למעשה מגנטים טבעיים), בעיקר מגנטיט (Fe_3O_4) וג'קובסייט ($MnFe_2O_4$). אך עצם נוכחותם של מינרלים פרומגנטיים אינו מספיק כדי להעניק לחומר תכונות מגנטיות מעולות. ניתן להסביר זאת באנלוגיה לדיסק קשיח של מחשב. דיסק כזה, בדיוק כמו סיג, מכיל מינרלים פרומגנטיים ועירים המסודרים עליו. דיסק קשיח מודרני נבדל מן הדיסקטים הגדולים והלא יעילים של ראשית עידן המחשב בגודלם, בצורתם ובצפיפותם של הגבישים הפרומגנטיים, כמו גם באופן הסידור שלהם. הכלל הזה נכון גם באשר לחומרים 'טבעיים': חומר מגנטי איכותי הוא כזה שהגבישים בו קטנים וריכוזם בחומר גבוה. מאחר שחלק גדול מהסיגים התקררו באוויר הפתוח במהירות רבה, הגבישים שנוצרו בסיג בעת התקררות הנתך לא גדלו מעל לגודל סף כלשהו. כך נוצרו בשולי הסיג גבישים פרומגנטיים זעירים בדיוק בגודל הנכון (אזורים 3, 3). מידע מגנטי שמוקלט על ידי גבישים כאלה יציב יותר, חזק יותר ומקודד באופן פשוט יותר ממידע המוקלט על ידי גבישים גדולים.



מסגרת 2: כיצד סיג מקליט ומשמר את השדה המגנטי בעת היווצרותו?

סיגים מתמצקים באופן מהיר יחסית, במיוחד כאשר הם 'סיגי הזרמה' אך גם אם הם 'סיגי תנור' (מסגרת 1). בזמן הקירור המהיר נוצרים בשולי הסיג גבישים מוארכים ועירים שגודלם פחות ממיקרומטר (ראו תמונת מיקרוסקופ אלקטרוני באיור 33). כשהחומר ממשיך להתקרר ומגיע למידת חום הנקראת 'טמפרטורת קירי', חלק מהאלקטרונים המשתתפים בקשר הכימי נקשרים ביניהם כך שהמומנטים המגנטיים הפנימיים שלהם ('ספין') מורים לאותו כיוון, והגבישים הופכים להיות פרומגנטיים. לגביש הפרומגנטי מהסוג הנוצר בסיג יש מומנט מגנטי יחיד הפועל למעשה כמחט מצפן ועירה המקבילה לציר האורך של הגביש (א). כל עוד עולה מידת חומו של הסיג על 'טמפרטורת הסגירה המגנטית', המומנט המגנטי של הגביש חופשי להיות במצבים המותרים לו (המוכתבים לפי הגאומטריה והגודל של הגביש). בגלל השדה המגנטי יהיו מבחינה סטטיסטית מומנטים רבים יותר המכוונים לכיוון השדה. כשהסיג ממשיך להתקרר ומידת חומו יורדת מטמפרטורת הסגירה (ב), המומנטים ננעלים בתוך הגביש ואינם יכולים לנוע ללא מקור אנרגיה חיצוני. מבחינה סטטיסטית יש גבישים רבים יותר בעלי מומנט מגנטי המצביע לכיוון השדה שבו התקרר החומר, ולכן המומנט המגנטי השקול של הסיג מקביל לשדה המגנטי שבו נוצר. אפשר להוכיח שבמקרה כזה קשורה עוצמת המגנט שבסיג בקשר ליניארי לעוצמת השדה שבו הוא נרכש. במעבדה מתבצעים ניסויים שבהם אנו מחממים שוב את הסיג באופן מבוקר ומאפשרים לו לרכוש מגנט 'חדש' תחת שדה מגנטי ידוע ומבוקר. הסימולציה מאפשרת חישוב של היחס הליניארי בין עוצמת המגנט של הסיג לעוצמת השדה, ומתוך היחס הזה ניתן לחשב את עוצמת השדה העתיק. התהליך המתואר כאן נכון בנוגע לרכישת מגנט תוך כדי קירור (מגנט 'תרומגנטי'), שהוא תהליך טבעי המאפיין גם סלעים שנוצרו על ידי קירור נתך.

על מנת לנצל את התכונות המגנטיות הייחודיות של הסיגים פיתחנו שיטת מדידה שמסוגלת לקרוא את המידע המגנטי מהסיג בצורה יעילה ומדויקת. לשם כך הכנו סיגים מלאכותיים במעבדה, על ידי התכה וגיבוש של החומר הארכאולוגי בהשפעת שדה מגנטי מבוקר. שורה ארוכה של ניסויים אפשרו אפיון של הגבישים הפרומגנטיים בסיגים ופענוח האופן שבו מוקלט האות המגנטי. במקביל נחקר באופן דומה גם החומר הארכאולוגי. הידע שהצטבר בניסויים ובמדידות אפשר לנו לבדוד את הסיגים האיכותיים ביותר ולהבטיח בקרת איכות מרבית של מדידות העוצמה.



איור 4: מחקר עוצמת השדה המגנטי במזרח התיכון ותגליות המחקר הנוכחי.
 א. שינויים בעוצמת השדה הגאומגנטי במזרח התיכון על ציר זמן של 6,000 שנה. העוצמה הגאומגנטית מבוטאת בערכים של מומנט דיפול צירי וירטואלי (ראו איור 1). התמונה המתקבלת ממחקרים קודמים (נקודות כחולות) אינה אחידה. המחקר הנוכחי (ריבועים אדומים) מציע נתונים מדויקים ואמינים יותר; ב. האזור המודגש באפור באיור א נחקר בהפרדת זמן גבוהה על ידי ערמות הסיגים המתוארות באיורים 5 ו-6. ערמות הסיגים מאפשרות הפרדת זמן חסרת תקדים של פחות מעשרות שנים. אירועים חריגים של עוצמת שדה גבוהה במיוחד (ישיאים גאומגנטיים) מודגשים בכחול ומציינים שדה מגנטי בעוצמה שמחקרים דומים טרם מדדו בעבר (מתוך Shaar et al., 2010b)

איור 4 מציג את נתוני עוצמתו של השדה הגאומגנטי ב־6,000 השנים האחרונות, כפי שמדדנו אותם בעזרת הסיגים. נוסף על כך מוצגים להשוואה הנתונים שהיו בידינו לפני המחקר הנוכחי, כפי שנמדדו בחומרים שונים (בעיקר כלי חרס קדומים) ובעזרת שיטות מדידה מגוונות. הנתונים הנוספים נלקחו מאזורים קרובים על מנת לבטל טעות אפשרית הנובעת מאי־אחידות גאוגרפית של השדה הגאומגנטי. ניתן להתרשם שעד המחקר הנוכחי התמונה בנוגע לשינויים בשדה המגנטי כוללת ירעשי מדידה ואינה מציגה תמונה אחידה. שני גורמים עיקריים עלולים להוביל לטעות בכל אחת מהנקודות: טעות בהערכה של עוצמת השדה (עקב שימוש בחומר לא מתאים או בשיטת מדידה לא מדויקת) וטעות בהערכת גיל החומר. בסיס הנתונים המבוסס על סיגים מתגבר על שני המכשולים שמציבות הטעויות האפשריות: ראשית, שיטת המדידה אמינה ומדויקת יותר משום שפותחה במיוחד עבור החומר הנחקר ונבדקה בניסיונות מעבדה; שנית, תיארוך הסיגים מבוסס בעיקר על מדידות פחמן 14 של חומרים הקשורים באופן ישיר לתהליך יצירת הסיג.

מהירות השתנותו של השדה ומידת חוזקו – תגליות חדשות מתוך חקר סיגים

ידוע ממחקרים פלאומגנטיים שעוצמת השדה בעת היפוך קוטביות היא מזערית, בקירוב אפס, אך ערכי השיא של עוצמה זו אינם ידועים לנו. נתון לא ידוע נוסף, חשוב לא פחות, הוא קצב השינויים של עוצמת השדה. נתונים אלה הכרחיים לצורך כל מידול של מנגנון היווצרות השדה, המבנה הפנימי של כדור הארץ, אינטראקציה של האטמוספירה עם קרינה קוסמית ועוד. מחקר זה מספק תשובות חדשות ומפתיעות לשאלות אלה בעזרת חקר ערמות סיגים מפינאן ותמנע. אחד משיאייה של הפקת הנחושת בתמנע ופינאן היה בסוף תקופת הברונזה המאוחרת וראשית תקופת הברזל (בין המאה השתים עשרה למאה התשיעית לפסה"נ). הפעילות התעשייתית המואצת הותירה אחריה ערמות פסולת המכילות סיגים, שברי תנורים ופסולת אנושית מגוונת. נוסף על התיעוד הארכאולוגי המרתק הקבור בערמות אלה, ערמות הסיגים מספקות הזדמנות ייחודית ללמוד על התנהגות השדה הגאומגנטי על פני פרקי זמן קצרים. לשם כך ביצענו חפירות

ארכאולוגיות ממוקדות שמטרתן לחשוף את ערמות הסיגים. באיור 5 נראות ערמות סיגים שנחפרו בח'רבת אני־נחאס שבפינאן. את החפירות האלה ערכה משלחת בראשותו של פרופ' תום לוי מאוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו, בחלקן כשיתוף פעולה עם המחקר הפלאומגנטי. גובהן של חלק מערמות הסיגים מגיע לשישה מטרים ויותר, והן הצטברו במהלך תקופה קצרה באופן יחסי – פחות מ־300 שנה. באיור 6 א רב נראית ערמת סיגים דומה מאתר תמנע־30, אתר מוקף חומה הנמצא למרגלות 'גבעת העבדים', אשר נחפר מחדש במיוחד לצורך המחקר הפלאומגנטי על ידי המכון למדעי כדור הארץ של האוניברסיטה העברית ואוניברסיטת קליפורניה סן דייגו. שתי ערמות הסיגים האלה, מתמנע ומח'רבת אני־נחאס, תוארכו בעזרת הפחם וחומרים אורגניים אחרים שהתגלו בהן, והסתבר שגיל שתיהן חופף בחלקו וכי הן נוצרו בין המאה האחת עשרה למאה התשיעית לפסה"נ. סיגים מרבדים שונים של הערמות נאספו ונותחו במעבדות הפלאומגנטיות של המכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית ושל המכון האוקיאנוגרפי באוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו. הנתונים הפלאומגנטיים הקודמים למחקר רמזו על כך שעוצמת השדה הגאומגנטי בתקופה שבה נוצרו הערמות הייתה גבוהה במיוחד, אולי הגבוהה ביותר בהיסטוריה של כדור הארץ. טרם המחקר עלתה אפוא השאלה, 'כמה חזק יכול להיות השדה הגאומגנטי?'. מכיון שבידינו שיטת עבודה בדוקה, הכוונה הראשונית בחקר ערמות הסיגים הייתה לענות על שאלה זו וללכוד דרך המדידות את עוצמת השדה המרבית. אלא שתוצאות המחקר הראו התנהגות מפתיעה ואתה תגלית חדשה על השדה הגאומגנטי.

איור 4 מציג את עקומת שינויי העוצמה של השדה הגאומגנטי במאות האחת עשרה עד התשיעית לפסה"נ, כפי שנמדדה בחתכים של אני־נחאס ותמנע־30. הנתונים מעידים על שני אירועים קצרים שבהם עוצמת השדה הגאומגנטי הגיעה לערכים חריגים וגבוהים במיוחד, והייתה כפולה ויותר מזו שבהווה. עוצמות דומות לאלה מעולם לא תועדו על ידי מדידות ישירות או על ידי מחקרים פלאומגנטיים. כך, הסיגים הקליטו בזמן היווצרותם את השיא הגאומגנטי הידוע של כל הזמנים. אירועי השיא הגאומגנטי נמשכו זמן קצר, ככל הנראה כעשרים או שלושים שנים, והם מאופיינים בזינוק מהיר של השדה לערך שיא ולאחריו צניחה מהירה לערך הקודם. זהו קצב שינויים מהיר וחריג שטרם נמדד במחקר השדה הגאומגנטי. השילוב של קצב שינויים יוצא דופן ועוצמה גאומגנטית חסרת תקדים כנראה אינו מקרי. ייתכן כי התופעות הבלתי מוכרות קשורות לעובדה שבתקופת הברזל היה



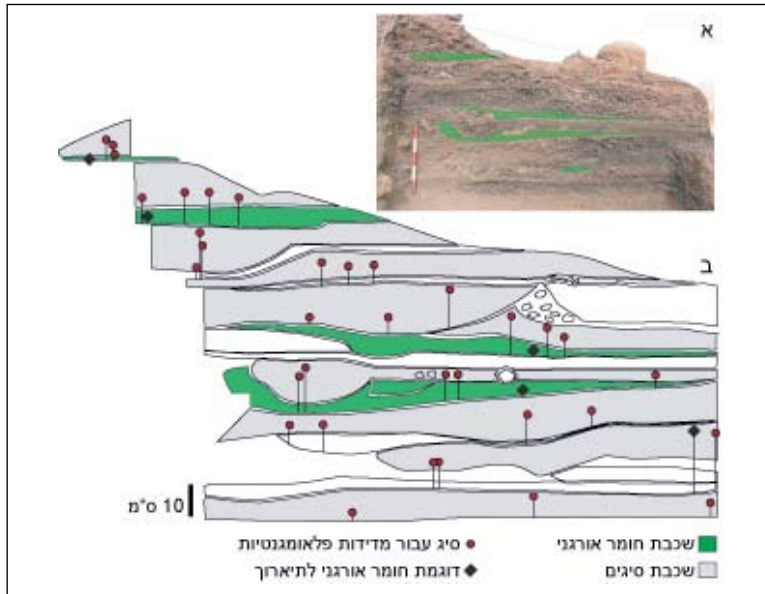
איור 5: ערמות הסיגים באתר ח'רבת אנ־נחאס בפינאן, ירדן
 השכבות הרבות של פסולת תעשייתית מאפשרות תיעוד של עוצמת השדה
 הגאומגנטי בהפרדת זמן גבוהה (התצלומים באדיבות פרופ' תום לוי ר־Edom
 Lowland Regional Archaeology Project – ELRAP).

השדה בשיאו של תהליך התחזקות (לעומת תהליך הדעיכה המואץ שהוא מצוי בו כיום), עם עוצמות שדה גבוהות ביותר גם לפני ואחרי השיאים הגאומגנטיים עצמם. חשוב לציין כי אין זה מפתיע ששינויים קצרי טווח מהסוג הזה לא הובחנו במחקר הפלאומגנטי והארכאומגנטי. רק מחקר של רשם גאומגנטי מהימן שהצטבר בהפרדת זמן רציפה וגבוהה, כמו במקרה של ערמות הסיגים שנחקרו, יכול לתעד שינויים בסדר גודל כזה.

סיכום: משמעותן של התגליות החדשות

שיטת העבודה שפיתחנו בעזרת סיגי הנחושת מאפשרת מחקר פלאומגנטי ייחודי שמטרתו שחזור שינויים בעוצמת השדה הגאומגנטי בדיוק רב והפרדה גבוהה של זמן. היישומים העיקריים של המחקר נוגעים בעיקר לחקר מנגנון הגאודינמו, אך נוסף על כך מעלות התוצאות שאלות הנוגעות לתחומי מחקר מגוונים במדעי כדור הארץ ומספקות בסיס נתונים שיש לו שימוש אפשרי במחקר הארכאולוגי:

האם השדה הגאומגנטי נמצא בתהליך קריסה או בשלבים מוקדמים של היפוך?
 אמנם השדה איבד 10% מעוצמתו ב־150 שנה וקשה להסביר זאת מבחינה חישובית,



איור 6: חתך רוחב בערמת הסיגים באתר תמנע-30 ומיקום דוגמאות הסיגים שנמדדו במסגרת המחקר הנוכחי
 א. חתך בערמת הסיגים באתר תמנע-30 כפי שנחשף בסיום עונת החפירות של 2009; ב. תרשים של החתך המראה עשר שכבות נפרדות של פסולת תעשייתית מתקופת הברזל ואת מיקומן בחתך של דוגמאות הסיגים למדידות פלאומגנטיות והחומר האורגני למדידות פחמן 14. קצב ההצטברות המהיר של השכבות מאפשר דגימה בהפרדת זמן גבוהה (מתוך Shaar et al., 2010b).

אך לפי התוצאות שהצגנו, שינויים חדים על פני זמן קצר הם חלק מאופיו של השדה. אנו מראים שלפני כ-3,000 שנה התרחשו נפילות חדות בהרבה בעוצמת השדה, והן לא גרמו לקריסה או להיפוך. לפיכך אנו סבורים כי אין להסיק מנתוני המכשירים שנאספו בשנים האחרונות על היפוך מתקרב.

מהו המנגנון שמייצר את הקפיצות המהירות בעוצמת השדה, והאם הוא מקומי או גלובלי? כרגע לא ברור איזה מנגנון גאודינמי מסוגל לייצר את אירועי השיא הגאומגנטי. לשם כך אנו מבצעים מחקר המשך, הכולל אתרים נוספים רחוקים ככל האפשר מאזור המחקר הנוכחי במטרה ליצור מיפוי מרחבי של התופעה. במקביל אנו פועלים לבדוק את שינויי הכיוון של השיאים הגאומגנטיים באותו

פרק זמן, על מנת לחקור אם שינויים חדים בעוצמה הגאומגנטית מלווים בשינויים חדים בכיוון הגאומגנטי.

האם יש קשר בין השדה הגאומגנטי למערכות האקלים של כדור הארץ? רוב החוקרים סבורים שהשדה הגאומגנטי אינו משפיע על מערכות אקלימיות, אולם לאחרונה גברו הקולות הטוענים שהשדה ממלא תפקיד מפתח בתהליכים סביבתיים. טענה זו מבוססת על העובדה שהשדה הגאומגנטי פועל כמסך ההגנה של האטמוספירה מפני קרינה קוסמית ורוח השמש. כלומר, הקרינה שמקורה בחלל או בשמש מפציצה את כדור הארץ בחלקיקים טעונים (בעיקר פרוטונים, חלקיקי אלפא ואלקטרונים), אך השדה המגנטי מסיט אותם כך שהם חולפים מעבר למסך ההגנה ואינם חודרים לאטמוספירה. כיצד משפיעים שינויים בעוצמתו של מסך ההגנה (עוצמת השדה הגאומגנטי) על האטמוספירה? זו שאלה בסיסית שטרם נחקרה לעומק בשל היעדר נתונים מדויקים. מחקר זה מציע לראשונה נתונים מתאימים ודרך מעשית לחקר הנושא.

האם ניתן ליישם את התוצאות ככלי תיארוך ארכאולוגי? תוצאות המחקר מראות שניתן למדוד שינויים קצרי טווח בשדה הגאומגנטי מתוך חומרים ממוגנטים. אנו בודקים כעת אם אפשר להשתמש בנתונים החדשים שאנו מפיקים ככלי תיארוך ארכאולוגי. לשם כך אנו אוספים נתוני עוצמה נוספים, מחומרים שונים ומתקופות שונות, על מנת ליצור בסיס נתונים רחב ככל האפשר.

המחקר המוצג כאן נמשך בימים אלו, ובעתיד אנו צפויים לעבות ולהרחיב את בסיס הנתונים. לא מן הנמנע שלאחר חקר ערמות סיגים נוספות יתגלו אירועים נוספים של שיאים גאומגנטיים. יהיה מעניין לבחון את מידת ההתאמה של נתונים שהופקו על ידי סיגים מאזורנו עם נתונים שיופקו מאזורים גאוגרפיים אחרים בשיטות דומות. אנו מזמינים את הקוראים להמשיך ולהתעדכן בתוצאות המחקר.

תודות

המחקר המוצג כאן הוא פרי של שיתוף פעולה בין חוקרים ומוסדות שונים: פרופ' חגי רון, ראש המעבדה הפלאומגנטית של המכון למדעי כדור הארץ של האוניברסיטה העברית, הגה את רעיון העבודה לראשונה, והוא מוביל את המחקר ביחד עם פרופ' ליסה טאוקס מהמכון לאוקיאוגרפיה סקריפס של אוניברסיטת

קליפורניה, סן דייגו. פרופ' אמוץ עגנון מהמכון למדעי כדור הארץ שותף לפרויקט מצעדי הראשונים. ד"ר רונית קסל מהמכון למדעי כדור הארץ מובילה את המחקר המינרלוגי-פטרולוגי של הסיגים ואת העבודה הניסיונית. פרופ' תום לוי מהמחלקה לאנתרופולוגיה באוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו מנהל את החפירות בפינאן ומדריך את עבודת הדוקטור של ארו בני-יוסף בארכאולוגיה. ברצוננו להודות לרשות העתיקות ולפארק תמנע על שיתוף הפעולה. תודות נתונות לפרופ' שמוליק מרקו על הערות והארות.

רשימת המקורות וקריאה נוספת

- בני-יוסף, א. 2006. 'עוצמת השדה הגאומגנטי בששת אלפי השנים האחרונות: עדויות מסיגי נחושת מאתרים ארכאולוגיים בדרום הלבנט', עבודת מוסמך, המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים.
- Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Ron, H., Agnon, A., Avner, U., Najjar, M. & Levy T.E. 2008a. 'A New Approach for Geomagnetic Archaeointensity Research: Insights on Ancient Metallurgy in the Southern Levant', *Journal of Archaeological Science* 35 (11): 2863–2879.
- Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A., Genevey, A., Levy, T.E., Avner, U. & Najjar, M. 2008b. 'Application of Copper Slag in Geomagnetic Archaeointensity Research', *Journal of Geophysical Research – Solid Earth* 113: B08101.
- Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Levy, T.E., Shaar, R., Ron, H. & Najjar, M. 2009. 'Geomagnetic Intensity Spike Recorded in High Resolution Slag Deposit in Southern Jordan', *Earth and Planetary Science Letters* 287 (3–4): 529–539.
- Shaar, R., Ron, H., Tauxe, L., Kessel, R., Agnon, A., Ben-Yosef, E. & Feinberg, J.M. 2010a. 'Testing the Accuracy of Absolute Intensity Estimates of the Ancient Geomagnetic Field Using Copper Slag Material', *Earth and Planetary Science Letters* 290 (1–2): 201–213.
- Shaar, R., Ben-Yosef, E., Ron, H., Tauxe, L., Agnon, A. & Kessel, R. 2010b. 'Geomagnetic Field Intensity: How High Can It Get? How Fast Can It Change? Constraints from Iron Age Copper Slag', *Earth and Planetary Science Letters*, in press.