

מקור החום במנסרת הקוורציט, מכתש רמון המרכזי

אורי שטאובר¹

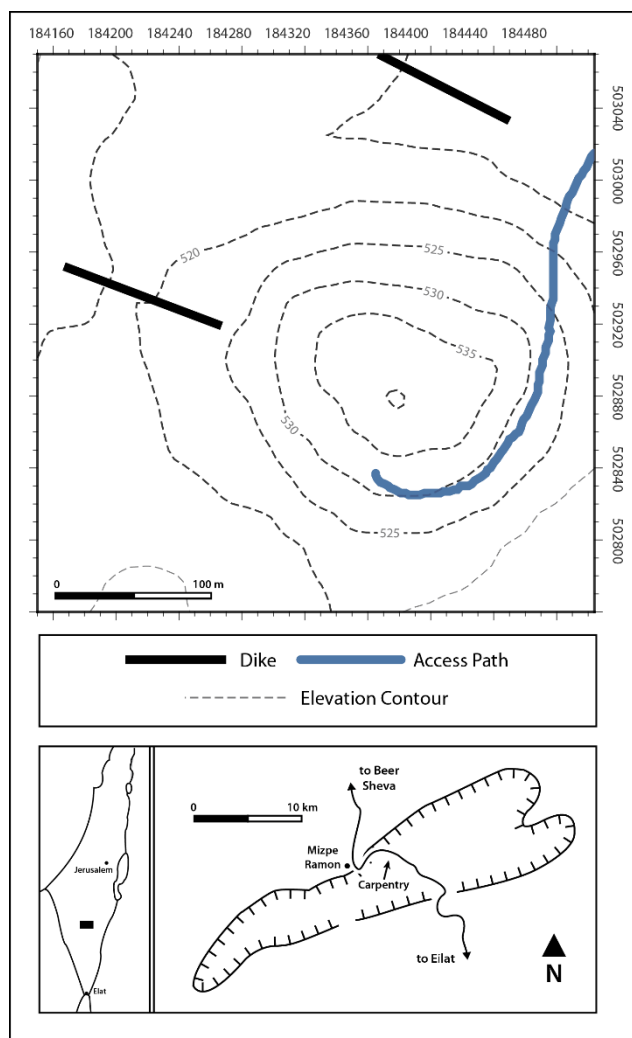
הנחיה: פרופסור רועי גרנות²

¹ ביה"ס מיתרים רעננה

² המחלקה למדעי כדור הארץ והסביבה, אוניברסיטת בן-גוריון

תקציר

הופעת סלע הקוורציט במכתש רמון משויכת לאירועי התמרה מקומיים שהתרחשו בעומק רדוד ובטמפרטורה גבוהה. מחקרים קודמים הראו כי מקור החום לאירועים הללו קשור בגופים מגמטיים שחדרו אל תוך אבני החול היוראסיות והתמירו אותם. אחד המקומות שבהם ההופעה של הקוורציט היא המרשימה והנרחבת ביותר הוא גבעת המנסרה הנמצאת במרכז מכתש רמון. אולם, אין בשדה עדויות חותכות לגבי נוכחות של גוף מגמטי שיכול היה לספק את החום הדרוש כדי ליצור את ההופעה הנרחבת באופן יחסי של הקוורציט הנצפה. במסגרת עבודה זו ערכתי סקר מגנטי רגלי באתר המנסרה כדי למצוא ולאפיין את גוף המחדר המגמטי שגרם להיווצרות הקוורציט שבונה את הגבעה. מדדתי 1362 מדידות על פני שטח של כ-60,000 מטרים רבועים. ביצעתי עיבוד נתונים שכלל שיוך כל מדידה לנקודה במרחב, החסרת ערך השדה הגיאומגנטי בזמן המדידה וניקוי רעשים. מפת האנומליות שהתקבלה מצביעה על הימצאות דייק הקבור בדרום-מזרח הגבעה שהתגלה כאן לראשונה. חשוב מכך, נמצאה אנומליה מגנטית במרכז הגבעה המצביעה על נוכחות של גוף מגמטי רחב בקוטר 180 מטרים הקבור בתת-הקרקע הרדוד מתחת לגבעה. צורתה הטופוגרפית של גבעת המנסרה מלווה את הגיאומטריה של האנומליה הזו ולכן אני מציע כי גוף מחדר זה היווה את מקור החום בתהליך התמרת הקוורציט. העובדה כי האנומליה היא בעלת ערכים שלילים מצביעה על מיגנוט של הגוף המגמטי ההפוך בכיוונו לכיוון השדה המגנטי של כדור הארץ כיום ולכן אני משייך את היווצרותו לאירוע המגמטי הקרטיקוני הראשון או השני במכתש רמון (לפני 123-125 או 108-119 מיליוני שנים). לסיום, לדייקים החשופים מסביב לגבעה וגם לדייק הקבור שגיליתי במהלך עבודה זו ישנם מאפיינים מגנטיים שונים מהאנומליה המרכזית ולכן עושה רושם שהם אינם קשורים גנטית לגוף המחדר העיקרי שקרוב לוודאי היווה את מקור החום העיקרי בהיווצרות הקוורציט.



איור 1. מפת מיקום אתר המנסרה ואזור המחקר. למעלה: מפה טופוגרפית של אתר המנסרה, שני הדייקים שחשופים בפני השטח ושביל הגישה. למטה: מיקום האתר ביחס לישראל ולמכתש רמון (Summer & Ayalon, 1995).

בקרטיון העליון האזור עבר השתפלות כללית, וים כיסה והציף את האזור כולו. בתקופה זו, שבה חל באזור שקט טקטוני יחסי, שקע טור ארוך של סלעי משקע קרבונטיים בעיקרם, בדרך כלל גיר ודולומיט (חבורת יהודה).

בטורן העליון עד הקמפן התפתח קמר הרמון בזמן היווצרותה של הקשת הסורית באזור, כשצפון הלוח האפריקאי נלחץ והתקמט בכיוון מערב-צפון-מערב – מזרח-דרום-מזרח. קימוט זה, יחד עם שבירה אופקית ואנכית לאורך העתק הרמון, ייצר מבנה מורס שצדו התלול בדרום-מזרח וצדו המתון בצפון-מערב (Ben David, 1992). תהליכים סטרוקטורליים אלו לוו בהצפה ונסיגה של ים ששקעו בו בעיקר קירטון וצור (חבורת הר הצופים), ושכבות מסלע אלו התרדדו בשל מאמצי הלחיצה.

אזור המחקר נמצא במכתש רמון (איור 1), שהוא הגדול שבמכתשי הסחיפה בנגב, וממוקם במערב קמר מחמל, הגדול בקמרי הנגב (Avni, 1991). בשל המבנה הייחודי של המכתש נחשף בו טור סטרטיגרפי ארוך ומגוון (איור 2). ראשיתו של טור זה בטריאס, במהלכו האזור חווה מספר נסיגות והצפות מחודשות של אוקיאנוס תטיס. בעקבות זאת הורבדו באזור סלעי משקע בהתאם לסביבת ההשקעה – גיר ודולומיט, אבן חול, פצלים, גבס ועוד (חבורת רמון). הרבדת סלעי המשקע המשיכה ביורה (חבורת ערד), במהלכה הורבדה יחידה מסיבית מאוד של אבני חול קוורציזיות (תצורת אינמר). גם בתחילת הקרטיון התחתון נמשכה הרבדת סלעי משקע (חבורת כורנוב) הכוללת גיר וחרסיות (תצורת מחמל) ואבני חול קוורציזיות עם מעט גיר (תצורת חתירה).

החל מסוף היורה ועד הקרטיון העליון התרחשו באזור הלבנט חמישה אירועים מגמטיים (Segev et al, 2005), לשלושת האירועים הצעירים יותר נמצאות עדויות בנגב. במכתש רמון, האירוע הראשון (וולקני תיאסיר) מהברסיאן-וולנגיניאן (133-139 לפני מיליוני שנים, למ"ש) מיוצג כלקוליט ודייקים בזלתיים בעיקרם שחדרו למסלע הטריאס-יוראסי; האירוע השני מהברמיאן (123-125 למ"ש) מיוצג כמחדרים קוורץ-סיאנטיים וטרכיטיים, והאירוע השלישי (וולקני רמון) מסוף האפטיאן-תחילת האלביאן (108-119 למ"ש), מיוצג במגוון תופעות וולקניות - זרמי לבה, חרוטים פירוקלסטיים ודייקים, והן שלובות באבני החול של חבורות ערד וכורנוב.

במהלך האירועים המגמטיים חלה הפוגה בהרבדת סלעי המשקע והוסר חתך של כ-350 מ' בתהליכי בלייה ממושכים. המסלע שחדר בתקופה זו הוא כאמור אקסטרוסיבי, והרכב הסלעים הוא אולטרה-מאפי או מאפי, כלומר מכיל כמות קטנה יחסית של סיליקה (SiO_2); ואלקליני, כלומר מכיל כמות גדולה יחסית של אשלגן ונתרן (K_2O , Na_2O). בשל המחסור בסיליקה והעושר בברזל ובמגנזיום נוטים סלעים אלה להיות כהים מאוד ביחס לסלעים מגמטים מאפיים פחות. ניתן לתאר את מגוון טיפוסי המסלע שנוצרו בחדירה זו לפי חלוקה לשני טיפוסים של גופי מסלע: א. מסלע בסניט-נפליניטי (טרכיטי בהרכבו), שהוא וולקני או סוב-וולקני, ומורכב מסלעים כמו טפריט, בסניט, ואוליביין-נפליניטי; ב. מסלע גברו-מונוזוניטי (בזלתי בהרכבו), שהוא סוב-וולקני, ומורכב מסלעים כמו אוליביין-גברו וגברו, מונודויריט ודויריט, ולעתים סיאניט (Eyal et al, 2000).

SYSTEM	SERIES	STAGE	GROUP	FORMATION	THICKNESS (m)	LITHOLOGY
Pleistocene						
Pliocene			Dead Sea	Arava	0-30	
Miocene			Saqiye	Hazeva	0-100	
				Nahal Yeter		
Eocene			Avedat	Nizzana	+ 95	
Paleocene						
Cretaceous	Upper Cretaceous	Turonian	Mount Scopus	Taqiye	0-50	
				Ghareb	0-66	
				Mishash	0-100	
				Menuha	0-80	
				Zihor	0-38	
		Senonian	Judea	Gerofit	56-120	
				Ora	30-67	
				Tamar	40-45	
				Avnon	60	
				Zafit	30-45	
	Lower Cretaceous	Albian	Kurnub	En Yorq.	10-66	
				Hevyon	108-140	
				Uza	200-230	
				Malhata	0-220	
				Ramon V.	10-55	
Jurassic	Middle	Arad	Arod	0-10		
			Mahmal	80		
			Inmar	80-340		
			Ardon	40-50		
			Mish'hor	25		
	Lower	Toarcian-Hettangian				
Triassic	Upper Triassic	Carnian	Ramon	Mohilla	206	
				Saharonim	170	
				Gevanim	166	
				Ra'af	+ 25	
	Middle Triassic	Ladinian	Anisian			

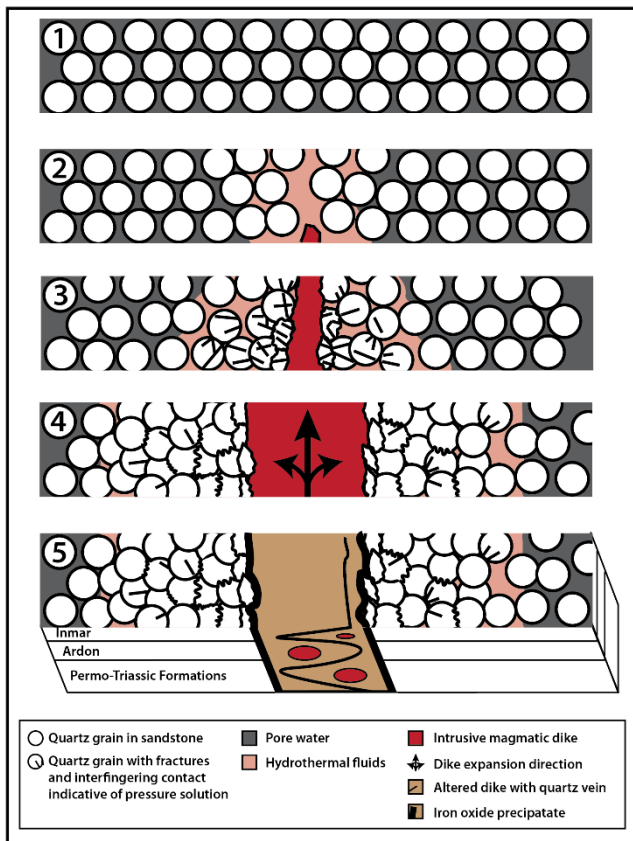
LEGEND	
	Limestone
	Cellular Limestone
	Dolomitic Limestone
	Dolomite
	Chalk
	Clay
	Gypsum
	Marl
	Porcelanite
	Conglomerate
	Chert beds, Concretions
	Phosphorite
	Sandstone
	Quartzitic sandstone
	Quartz-syenite, Trachyte
	Tuff
	Basanite, Tephrite
	Gabbro
	Plant remains

Magmatic Event III

Magmatic Event II

Magmatic Event I

אייל 2. הטור הסטרטיגרפי במכתש רמון ושלוש האירועים המגמטיים. מודגש החתך שחשוף באזור המחקר (Segev et al, 2005; Summer & Ayalon, 1995).



איור 3. תהליכי היווצרות הקוורציט בחדירת הדייקים בתצורת אינמר (Summer & Ayalon, 1995).

אפשרה למשטח הקוורציט החיצוני ביותר להתקרר באופן יעיל אנרגטית.

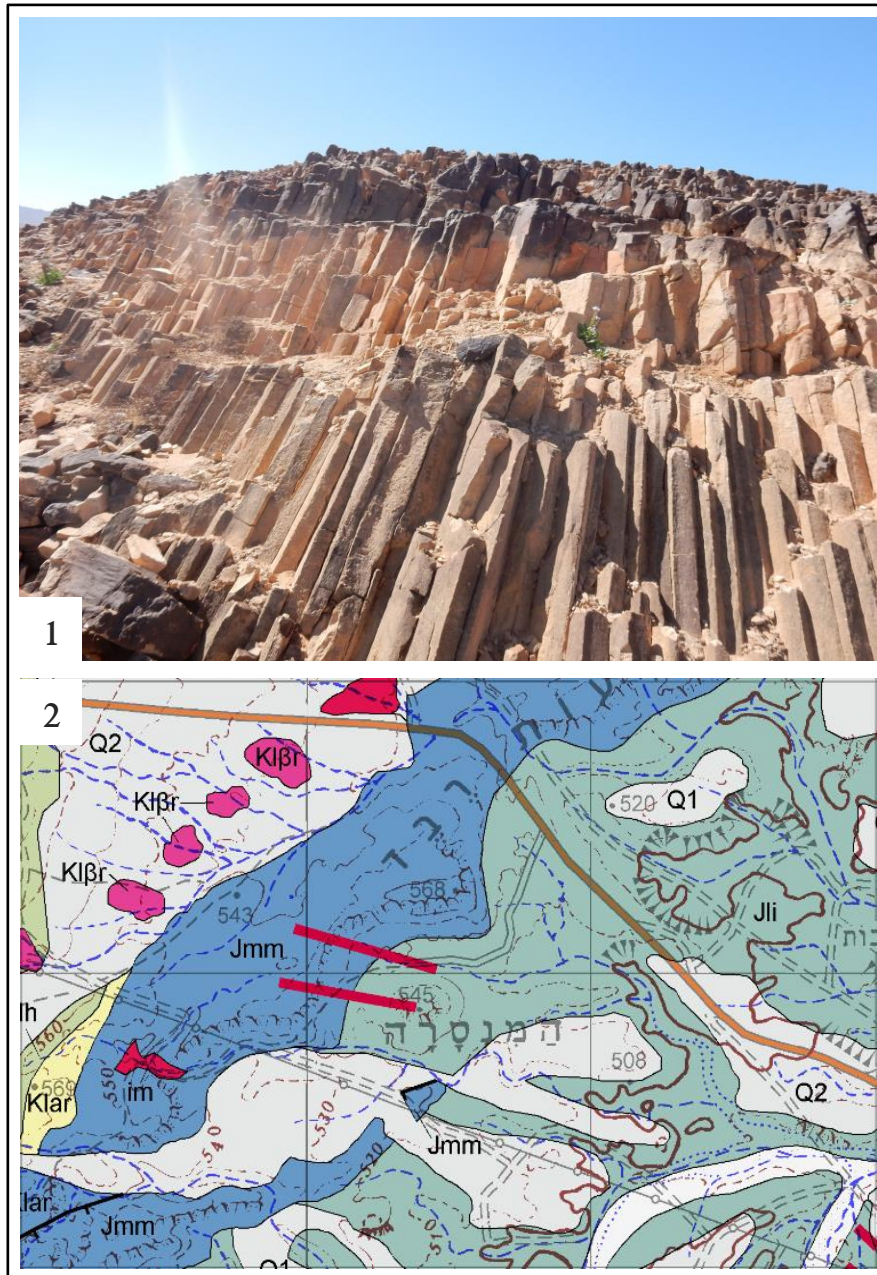
עם הצטננות המגמה והיווצרות הסידוק העמודי התרחשו הן בדייקים והן בקוורציט תהליכי החלפה (alteration) ושטיפה (leaching) מתונים בשל חדירת נוזלים הידרותרמלים במעלה שולי הדייקים, בתהליך קצר-טווח שהיה מוגבל לדייקים ולשוליהם בלבד. סלע המקור הבזלתי או הטרכיטי בדייקים הוחלף בחלקו במינרלים חרסיתיים (קאלוניט ומונטמורילוניט), התפתחו בו עורקי קוורץ, והופרשו תחמוצות ברזל וטיטניום מהתמיסה אל שוליו ואל תוך סדקים בגרגרי הקוורציט הסמוכים לשוליים.

לאחר היחשפותם מחדש של הדייקים המוחלפים והקוורציט עם היווצרות מכתש רמון המורפולוגי, במקומות רבים לא נותר כמעט זכר לדייקים שנשחקו והתמלאו תוצרי בלייה. הקוורציט המלוכד והקשיח לעומתם נשחק פחות, ונותרו ממנו מעין קירות בשולי הדייקים בתהליך הבלייה הדיפרנציאלי, לכן הוא מהווה "מראה-מקום" להתפרשותם של הדייקים במרחב.

מהאוליגוקן ואילך חל באזור רצף תהליכי גידוע ובלייה אינטנסיביים ביותר, שנגרמו בין היתר בשל היווצרות נחלים בעלי זרימה וכוח סחיפה גדולים. נחלים אלו, שכיוון זרימתם היה צפונה, חשפו את אבן החול מהירה, החלו לבלות אותה, ובתוך כך נחשפו גם חלק מהגופים המגמטיים בתוך שכבות המסלע (Ben David, 1992). הבלייה המהירה וסילוקה של אבן החול נמשכו עד חשיפת הסלעים מהטריאס, וכתוצאה מכך נוצר קער טופוגרפי, הוא מכתש רמון הנוכחי. תוצרי בלייה עכשוויים מהרביעון כיסו אזורים נוספים בתוך המכתש בהתאם לכיווני זרימת הנחלים בתקופה זו.

בעת האירוע המגמטי הראשון (133-139 למ"ש), חדירתם של דייקים בזלתיים וטרכיטיים אל אבן-החול של תצורת אינמר שהייתה חשופה אז בפני השטח, גרמה להתמרת מגע ניכרת, שהביאה ליצירת סלע הקוורציט המסמן את אזור המגע (Summer & Ayalon, 1995). ההתמרה כללה שני שלבים עיקריים, שהחלו עם חדירתם של הדייקים אל תוך אבן-החול הפרייה והנקבובית של תצורת אינמר (איור 3). בשלב הראשון, מאמצי הלחיצה שנוצרו מהדחפות והתרחבות הדייק אל תוך השכבות עיוותו את גרגרי הקוורץ הן על ידי סידוקם (אינטראקציה קשיחה) והן על ידי ארגונם ודחיסתם מחדש (אינטראקציה אלסטית). לאחר מכן, כתוצאה מהשפעת מפל טמפרטורה תלול באזור המגע, הגרגרים הבלויים הולחמו ו"נתפרו" זה לזה על ידי המסתם של שולי הגרגרים תחת תנאי הלחץ והחום הגבוה (אך מתחת לנקודת ההתכה) ששררו בנקודות המגע בין הגרגרים הבודדים, ונדידת החומר המומס לאזורים בהם הלחץ נמוך יותר (pressure solution). התוצאה היא סלע מלוכד היטב, "מולחם", דחוס וקשיח מאוד - קוורציט. העובי של שולי ההתמרה בהם ניכרים תהליכים אלה נע בין 1 ל-10 מטרים (Summer & Ayalon, 1995).

בשלב השני, עם התקררות המגמה בדייקים, ובעקבותיה התקררות הקוורציט סמוך לפני השטח, נוצרו בו סדקים עמודיים (columnar jointing) בתהליך הדומה לזה של היווצרות סידוק זהה בשפכי בזלות. מאחר שמרבית המאמצים האלסטיים והדחיסה המכנית השתחררו ב"רמת המיקרו" על ידי השבירה והדפורמציה של הגרגרים בשלב הראשון, המאמץ התרמו-אלסטי שמקורו בחימום השתחרר ב"רמת המאקרו" על ידי התכווצות גוף המסלע וכתוצאה ממנה היווצרות הסידוק העמודי המשתרעים על פני מספר מטרים. אופן ההתכווצות הוכתב בהתאם לגיאומטריה של משטר הטמפרטורה שהתפתח במקביל לדייקים המתקררים. דבר זה הכתיב את כיוון הסדקים, שהתהוו בניצב לדייקים ולא במקביל אליהם. הצורה ה"משושית" האופיינית לסידוק זה נוצרה בעת הקירור כיוון שהיא



איור 4. 1. סידוק עמודי במנסרה; 2. מפה גיאולוגית מקומית של המנסרה (Jmm- מחמל, Jli-אינמר), הדייקים החשופים בפני השטח מסומנים באדום (המכון הגיאולוגי).

השטח כוללות סיל קיאולוניטי מוחלף המצוי במרכזה של הקווסטה החומה שמבחינה סטרטיגרפית נמצא מעל לגבעה. הסיל הוצע בעבר כמקור החום העיקרי להיווצרות הקוורציט (Idelman & Enmar, 2014). בנוסף לסיל נמצא דייק בלוי למחצה השוכן בגבולה הצפוני של הגבעה, ודייק בלוי כמעט לחלוטין הנחשף ממערב לגבעה ומכוון אל תוך מרכזה (איור 1). בניגוד למרבית אתרי קוורציט וסידוק עמודי אחרים הנמצאים בתצורת אינמר, שהתפרשותם מוגבלת לשולי דייק ברור, הגודל והסימטריות של אתר המחקר מחייבת מקור חום בעל גיאומטריה רחבה באופן יחסי.

אתר המחקר של עבודה זו הוא המנסרה הממוקמת במרכז מכתש רמון, ממערב לכביש 40 (איור 1), והוא מופיע כגבעה עגולה בעלת אופי סימטרי, הבנויה כולה קוורציט מתצורת אינמר ונפוץ בה סידוק עמודי שהקנה לאתר את שמו בשל צורת סלעי הבליה (איור 4). ממזרח וממערב לגבעה מצויה, במעבר חד, אבן-החול מתצורת אינמר. את חלקה הדרומי של הגבעה מכסים תוצרי בלייה מהפלייסטוקן, והיא גובלת מצפון בשכבות מאוחרות יותר, בפרט "הקווסטה החומה" המורכבת משכבות של אבני-חול, גיר ודולומיט מתצורת מחמל (איור 4).

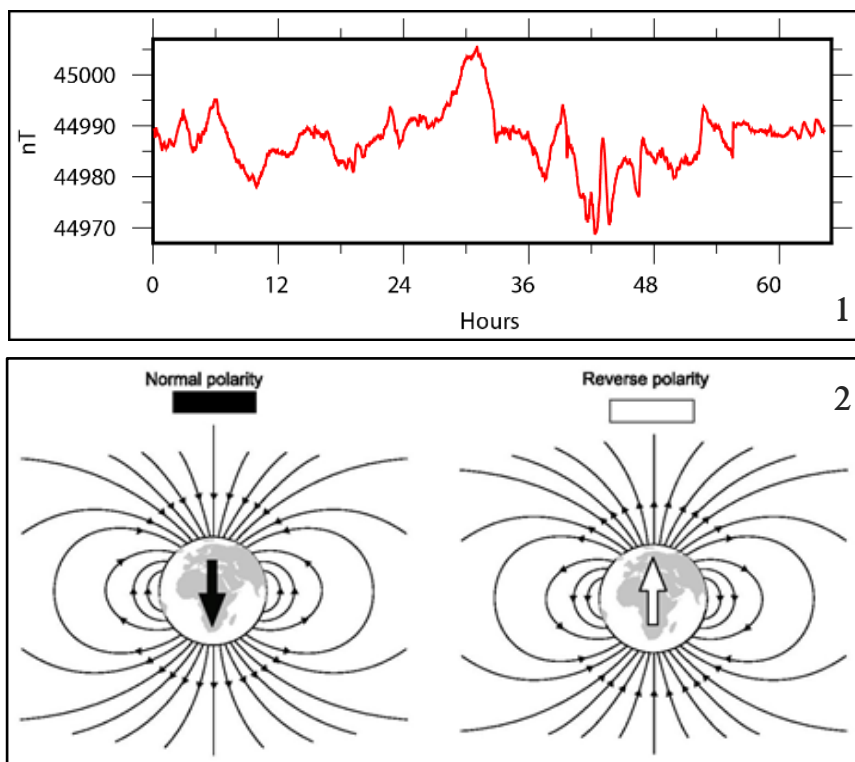
היווצרות קוורציט בסדר גודל כשל המנסרה דורש מקור חום בקנה מידה משמעותי. האפשרויות החשופות בפני

וההשפעה בחלקים שונים של היום של "רוח השמש" (זרם חלקיקים טעונים שנפלט מהשמש), שמשפיעה על עוצמת וכיוון השדה המגנטי בפני השטח. שינויים אלו נוחים יחסית ל"הסרה" ממדידות השדה משום שהם מתפרסים על פני יממה שלמה ומנוטרים על ידי תחנות מגנטיות קבועות; ב. שינויים מיקרו-פולסריים, המתרחשים בשל מגוון גורמים. שינויים אלה מאופיינים בדרך כלל במשך קצר מאוד (עד דקות ספורות) ובתלות רבה מאוד במקום – מיקרו-פולסים משתנים ממקום למקום, בטווח של עשרות קילומטרים. מסיבה זו קשה להעריך את תרומתם למדידות השדה; ג. "סערות" מגנטיות, המתרחשות בשל "כתמי שמש" - פעילות שמשית מוגברת המספקת אנרגיה גבוהה מהרגיל ברוח השמש, ומעצימה את השדה בחלקים מסוימים של כדור הארץ, בעיקר קרוב לקטבים. "סערות" אלו אורכות בדרך כלל יום אחד לכל היותר.

לעומת שינויים קצרי-טווח אלה, סוג אחר של שינוי בשדה המגנטי של כדור הארץ הוא התהפכות הקטבים המגנטיים (איור 5.1). התהפכויות אלה התרחשו לאורך ההיסטוריה הגיאולוגית באופן תדיר ובמרווחי זמן בלתי-שווים, שאורכם נע מעשרות אלפי שנים ועד מיליוני שנים. תהליך ההתהפכות עצמו מתרחש בפרק זמן של 10^3 - 10^4 שנים.

המחקר הגיאומגנטי הוא תחום גיאופיסיקלי המתרכז במאפיינים של השדה המגנטי של כדור הארץ ובחתימה של שדה זה בגופים שונים בכדור הארץ. לצורך הפשטת הדיון, מתייחסים אל כדור הארץ כבעל שלוש "קליפות": הקרום, המעטפת והליבה. למעטפת אין השפעת מגנטית משמעותית ולכן, הקרום והליבה הם האיזורים הרלוונטיים למחקר זה: הליבה החיצונית, ברזלית ונוזלית - היא מחוללת השדה המגנטי של כדור הארץ (השדה הגיאומגנטי), והקרום - מקליטו של השדה ומחולל האנומליות המגנטיות (שדות מגנטיים משניים) שבהן עוסק המחקר.

עוצמת השדה המגנטי נמדדת ביחידות של טסלה (T), אך היות ועוצמת השדה הגיאומגנטי היא בסדר גודל של 10^{-5} טסלה, מקובל להשתמש ביחידות של ננו-טסלה (nT), כך שעוצמת השדה הגיאומגנטי כיום בישראל, לדוגמא, היא 44,300 nT (הערך המדויק משתנה כתלות במיקום). יש לציין כי השדה הגיאומגנטי אינו קבוע לאורך זמן, הן בעוצמתו והן בכיוונו. כאשר מדובר בפרקי זמן קצרים, שינויים אלו מסווגים לשלושה סוגים: א. שינויים יומיים (איור 5.2), הנובעים מסיבוב כדור הארץ סביב צירו



איור 5.1. השינויים בעוצמת השדה בנקודה קבועה לאורך שלושה ימים (29-31.01.2020) כפי שנמדדו בתחנת בר-גיורא; 2. משמאל, השדה הגיאומגנטי הנורמלי (במצבו העכשווי), ומימין, השדה הגיאומגנטי ההפוך (Butler).

1.2. כלי המחקר

החיישן המגנטי שבו נעשה שימוש בסקר (G-856AX Memory-Mag Proton Precession Magnetometer) מודד את עצמת השדה, ומבוסס על עקרון נקיפת פרוטונים. הוא מורכב ממיכל שבתוכו נוזל עתיר-מימן (למשל קרוסין) וסביבו סליל השראה. מדידת עצמת השדה מתבצעת על ידי העברת זרם חשמלי חזק בסליל וכתוצאה מכך מושרה שדה מגנטי בתוך המיכל. השדה הזה גורם לספיין של הפרוטונים שבאטומי המימן להתיישר בהתאם לשדה. כשהזרם מופסק, הפרוטונים חוזרים לכיוונם המקורי (כיוון השדה של כדור הארץ שבו היו שרויים בו קודם). בעת חזרתם, ציר הספיין של הפרוטונים מבצע נקיפה (פרצסיה) במהלכה הוא מסתובב סביב ציר השדה הגיאומגנטי. ככל שהשדה הגיאומגנטי חזק יותר, הסיבוב מהיר יותר ולכן תדירותו גדולה יותר. תדירות הסיבוב מכונה "תדר לרמור" והיא נמצאת בקשר ישר לעוצמת השדה הגיאומגנטי. היחס בין התדירות לעוצמת השדה נקראת "הקבוע הגיירומגנטי". הרגישות של החיישן היא 0.1nT וכפי שאראה בהמשך העבודה, מדובר בשלושה סדרי גודל של רגישות מעל עוצמת השדות המגנטים אותם מדדתי באזור המחקר. לצורך קבלת מדידות איכותיות שאינן מושפעות משדות מגנטים שאינם קשורים לגיאולוגיה, מפעיל החיישן פעל עם לבוש מתאים ללא חפצים אלקטרוניים ומתכתיים. הסקר המגנטי בוצע על ידי לקיחת מספר רב של מדידות מגנטיות ("נקודות") במרחב. כדי למדוד את מיקום הנקודות בסקר במדויק, נעשה שימוש במכשיר GPS Trimble R4 real-time kinematic, שלו רמת דיוק של כ-10 עד 20 סנטימטר עבור מיקום כל נקודת מדידה.

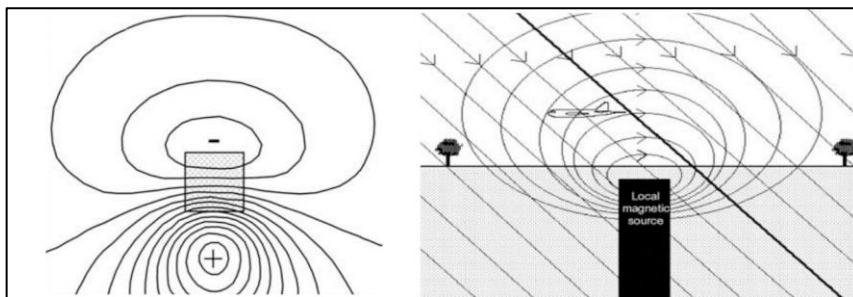
2.2. איסוף הנתונים

כהכנה לסקר, שטח המחקר חולק לשני אזורים: מלבן צפוני ומלבן דרומי (איור 7), כאשר ישנו קו מרכזי משותף

סקר מגנטי אידאלי מתבצע על ידי סדרת מדידות של עצמת השדה שנערכות לאורך קווים מקבילים זה לזה, במרווחים קבועים. כך מובטחת צפיפות שווה של מדידות לכל יחידת שטח באזור הסקר. הקווים המקבילים יוצרים בדרך כלל אזור שצורתו מלבנית בקירוב. ככל שצפיפות המדידות גדלה, כך ניתן לאתר אנומליות רבות יותר באופן מדויק יותר.

השפעתם של גופים מגנטיים בתת-הקרקע על אנומליות מגנטיות תלוי במספר גורמים, גיאומטריים ואחרים. מבחינה גיאומטרית, ככל שעומק הגוף מתחת לפני השטח גדל או שמימדי הגוף עצמו קטנים, האנומליה שתתקבל בפני השטח תהיה קטנה יותר (כלומר תתבטא בשינוי קטן יותר בעצמת השדה), כך שלעיתים לא ניתן לדעת איזה גורם גיאומטרי דומיננטי (אם הגוף עמוק יותר או קטן יותר, למשל) לפי האנומליה עצמה. כמו כן ברור כי צורת הגוף (כדורי, שטוח, קווי וכו') מכתובה את צורת האנומליה.

לאחוז המינרלים המגנטיים בגוף ולהרכבם השפעה על עוצמת האנומליות, כלומר ככל שהגוף ממוגנט פחות האנומליה שהוא מייצר תהיה משמעותית פחות. כיוון המגנט של הגוף במרחב משפיע על עצמת האנומליה: אם כיוון המגנט קרוב לכיוון השדה הנכחי, השדה של הגוף יעצים את השדה הגיאומגנטי והאנומליה תהיה חיובית, ואם כיוון המגנט הפוך מכיוון השדה הנכחי, השדה של הגוף יקטין את השדה הגיאומגנטי והאנומליה תהיה שלילית. אנומליות מגנטיות הן בדרך כלל דו-אונתיות, בשל האופן שבו השדה של הגוף משפיע על השדה הגיאומגנטי (איור 6). בהתאם לכיוון המגנט בציר השדה המגנטי הנכחי (צפון-דרום או דרום-צפון), באונה אחת עוצמת השדה תגדל בשל השפעת הגוף, ובאונה השנייה עוצמתה תקטן בשל השפעת הגוף בכיוון ההפוך. עם זאת, המבנה הדו-אונתי הוא הפשטה של צורת האנומליות, ולעיתים קרובות ההשפעה המגנטית של הגוף בקושי מתבטאת באנומליה. הגורמים לכך יכולים להיות כיוון המגנט של הסלעים, צורת הגוף המגנטי או הפרעה של גופים נוספים.



איור 6. מימין: השדה המגנטי של גוף תת-קרקעי והשדה הגיאומגנטי; משמאל: האנומליה הדו-אונתית התיאורטית שתיווצר מגוף זה במבט על (Reeves, 2005).

מיקום, זמן מדידה ועוצמת השדה המגנטי. ב. החסרה של ערך השדה הממוצע (nT 44320) שהוא מדד לעוצמת השדה הגיאומגנטי של כדור הארץ באזור המחקר. הערכים המתקבלים הן ה"אנומליות המגנטיות". לאחר מכן הוחסר גם השינוי היחסי בשדה המגנטי בכל נקודת מדידה לפי השעה והיום שבה היא נמדדה, בהתאם לתוצאות מתחנת המדידה הקבועה של המרכז למיפוי ישראל הנמצאת בבר-ג'ורא. השינוי היחסי הזה הוא תוצר של שדות מגנטים חיצוניים וניתן להניח כי השינוי הזה דומה במכתש רמון ובאזור בר ג'ורא.

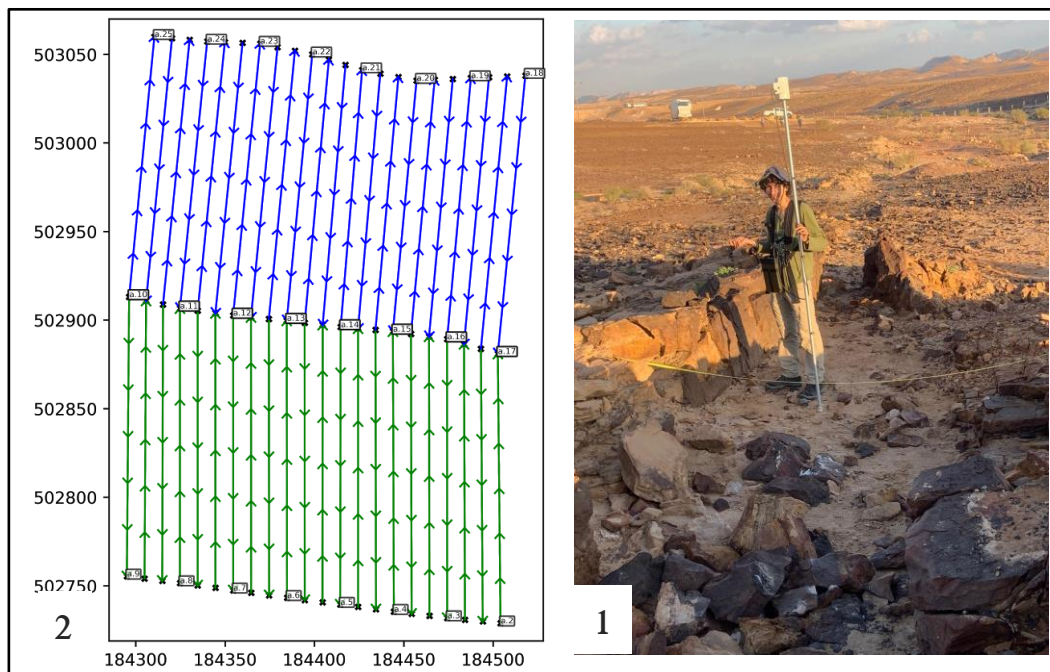
ג. ניקוי המדידות מרעש: מחקתי 78 מדידות שבוצעו במרחק הקטן מ-7.5 מ' משביל הגישה למנסרה, הבנוי על גבי קורות מתכת המשפיעות על המדידה. כמו כן מחקתי מדידות לא הגיוניות (de-spiking) על ידי מחיקת 15 מדידות שערכן סטה באורח חריג ונקודתי מהממוצע סביבן. מקור הרעש למדידות אלו אינן ידוע ויכול להיווצר כתוצאה מהבדלים בין ההשפעה של השדות החיצוניים על איזור מכתש רמון לעומת איזור בא ג'ורא, או שישנם חפצים אנטרופוגניים הקבורים באיזור המחקר שלא ידעתי על קיומם.

ד. התוצאות שימשו כבסיס ליצירת גריד מגנטי. הכנת מפת צבע של עוצמת השדה לפי הקואורדינטות באמצעות תוכנה מתאימה - GMT (General Mapping Tools). בהמשך המפה הונחה על גבי מפת טופוגרפיה מפורטת של אזור המחקר.

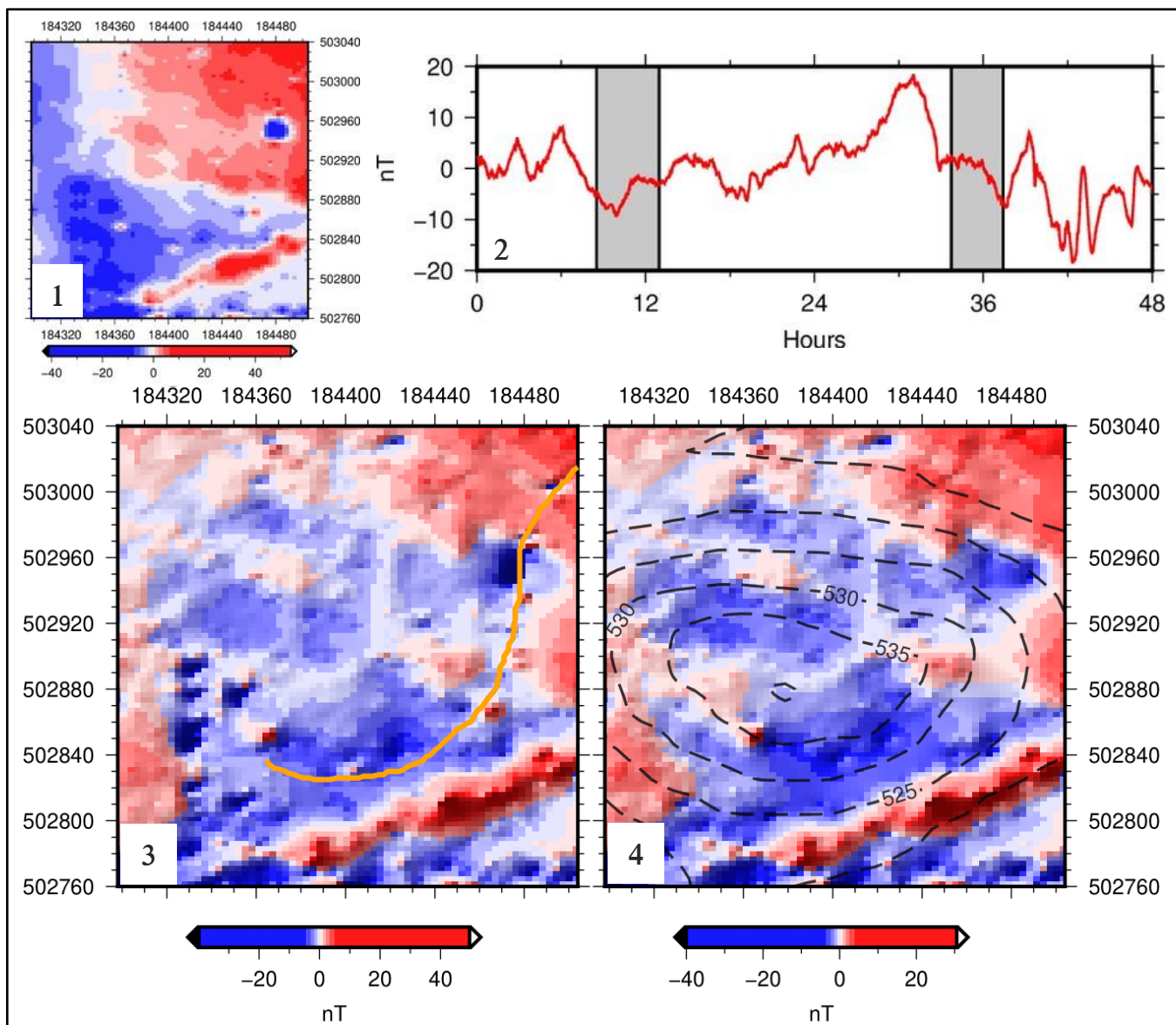
לשני האזורים. לאורך שלוש הפאות שכיוונן הכללי מזרח-מערב (הפאה הדרומית, מרכזית, והצפונית) נלקחו מדידות מיקום מדויקות בכל 30 מטר. נקודות אלו סומנו בשדה בעזרת רוג'ומים (תלי אבנים). כדי שהריווח בין שתי נקודות כאלה יהיה 10 מ', הונח סרט מדידה בין שני רוג'ומים סמוכים כך שכל קו הליכה יחל בסימון המתאים (10 מ' או 20 מ' מרחק). בנקודת הסיום של כל קו עמד אדם כדי לכוון את ההליכה של הסוקר. בתוך כל קו הליכה, נלקחה מדידה של עוצמת השדה בכל עשרה צעדים (ברוב המלבן הדרומי, מעיד על עשרה מטרים של מרחק) או בכל חמישה צעדים (בחלק מהמלבן הדרומי ובכל המלבן הצפוני, מעיד על חמישה מטרים של מרחק). השוני בריווח בין תחנות המדידה נבע מאילוצי זמן של הסקר. כל קו הליכה סומן כקו שונה (בסדר עולה החל מקו 1) בזכרון של המגנטומטר.

3.2. עיבוד הנתונים

ניתוח תוצאות הסקר כלל את השלבים הבאים:
 א. קביעת מיקום (קו אורך וקו רוחב) עבור כל נקודת מדידה מגנטית. ראשית, נערכה חלוקה פנימית בין כל שתי מדידות GPS הנמצאות לאורך אותה הפאה (איור 7) ל-3 חלקים, ותיוג של כל הנקודות הללו כנקודת ההתחלה או הסיום של כל קו הליכה לאורכו נלקחו מדידות מגנטיות. נערכה חלוקה פנימית של כל קו מדידה לנקודות המדידה על פי מספר המדידות בקו זה. לכל נקודת מדידה הוגדרו



איור 7. ביצוע הסקר המגנטי. 1. ביצוע המדידות בסקר, המכשיר הלבן בקצה המוט הוא המגנטומטר. ניתן לראות את סרט המדידה הצהוב על הקרקע; 2. מפת מסלול הסקר ונקודות בהן נלקחות מדידות מיקום מדויקות (מסומנות במלבנים שחורים). בירוק מסומנים הקווים לאורכם בוצעו מדידות במהלך יום המדידה הראשון (המלבן הדרומי) ובכחול המסלול ביום המדידה השני (המלבן הצפוני).



איור 8. תוצאות הסקר המגנטי ועיבוד הנתונים. 1. מפת התוצאות הראשוניות; 2. השינויים בעצמת השדה כפי שנמדדו בתחנת בר-גיורא בזמן ביצוע הסקר המגנטי (באפור), זמן 0 הוא חצות בתאריך 29.01.2020; 3. מפת האנומליות לאחר חיסור השינוי הטמפורלי, שביל הגישה מופיע בכתום; 4. המפה הסופית על גבי מפה טופוגרפית (בקווים אפורים מקווקוים) לאחר סינון המדידות במרחק 7.5 מטר מהשביל והמדידות הקיצוניות.

מגבולותיה הטופוגרפיים (איור 8.4). לאחר סינון המדידות הסמוכות לשביל והמדידות הקיצוניות (de-spiking) התקבלה המפה הסופית (איור 8.4), ובה ניכרים שני אלמנטים בולטים. הראשון, מבנה קווי מוארך בעל אנומליה חיובית חזקה (50 nT לערך), רוחבו כ-15 מ', אורכו בתחום הסקר כ-200 מ', וכיוונו המרחבי בקירוב מזרח-צפון-מזרח - מערב-דרום-מערב. במקביל לו מצפון ניכר קו זהה שהשפעתו על השדה שלילית. השני, מבנה אליפטי רחב מאוד המאופיין באנומליה שלילית (10-nT) של 15 ומרכזו בערך במרכז הטופוגרפי (שיא הגובה) של הגבעה, וקוטרו כ-180 מ'.

3. תוצאות

התוצאות הראשוניות של הסקר (raw data) גילו הבדלים ניכרים בין המדידות שנערכו באזור הצפוני ביחס לאזור הדרומי (איור 8.1). השינוי בעצמת השדה עם הזמן בתחנת המדידה בבר-גיורא (איור 8.2) הראה גם הוא, כי ישנם הבדלים ניכרים בעצמת השדה בזמן ביצוע הסקר. עם זאת, כבר בשלב זה ניכר מבנה חיובי חזק ואלכסוני בפניה הדרום-מזרחית של אזור הסקר (איור 8.1).

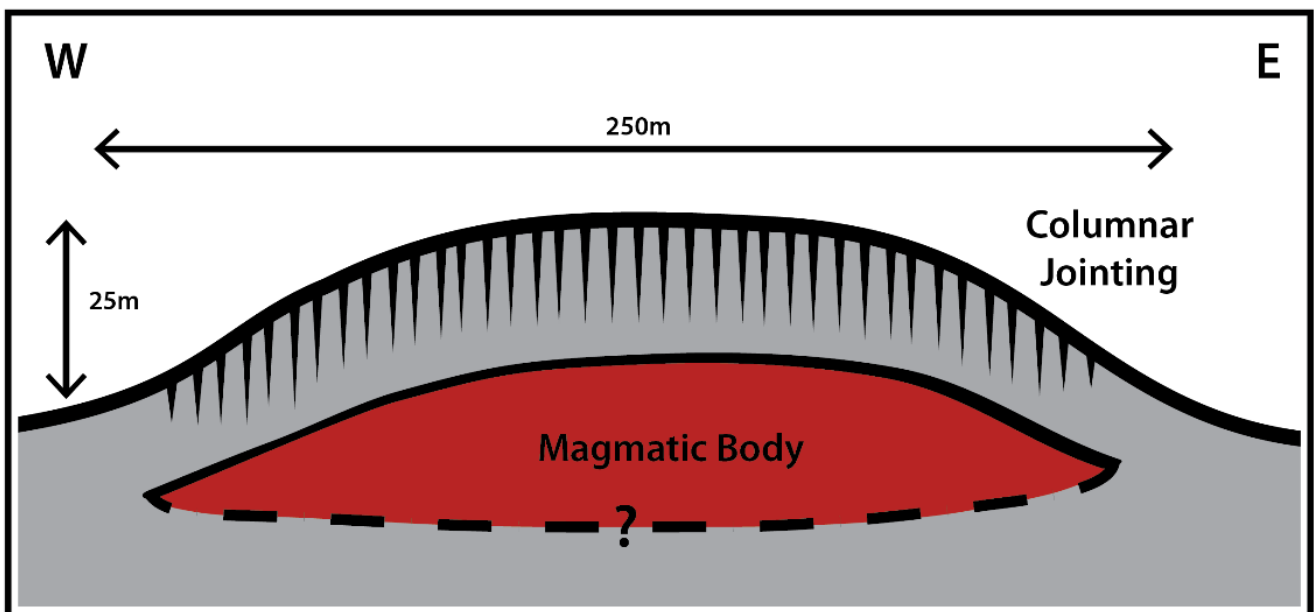
לאחר חיסור השינויים בעוצמת השדה המגנטי בזמן התקבלה מפה המראה מבנה שלילי, מעגלי-אליפטי בצורתו, הממוקם במרכז אזור הסקר והגבעה, אם כי גדול

ישנה התאמה ברורה בין התכונות הגיאומטריות של גוף המחדר לבין גבעת המנסרה כפי שהיא נראית מבחינת צורתה המורפולוגית. נראה כי הגוף מתאים בגבולותיו המרחביים לגבולות של הגבעה שכן האנומליה מופיעה במיקום המרכזי הטופוגרפי (שיא הגובה) של הגבעה. התאמה זו מרמזת על קשר גנטי בין גוף המחדר לבין הגבעה – הגוף שגרם לאנומליה המגנטית השלילית היווה את מקור החום שבסופו של דבר יצר ושלט במיקום הקוורציט במנסרה, כלומר צורת גוף המחדר ומיקומו הכתיבו את מיקום הקוורציט שבהמשך שלט במשטר הבליה ולכן גם במיקום וצורת הגבעה כיום.

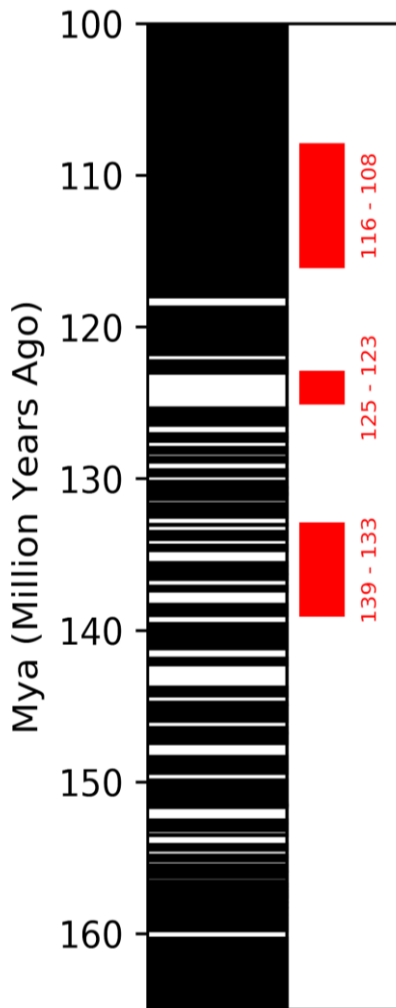
האנומליה החיובית המאורכת, המופיעה באזור הדרום-מזרחי של הגבעה (איור 8.4), מחייבת גוף מגמטי הנמצא בתת-הקרקע שצורתו מאורכת גם היא, והוא ממוגנט בכיוון זהה לשדה הגיאומגנטי. התפרשותו של גוף זה במרחב חייבת להיות במימד האנכי בשל צורת האנומליה, ונגזר מכך שלגוף המחדר שיוצר את האנומליה יש מבנה של דייק. גם את ההשתרעות במימד העומק של הדייק, בדומה לגוף דמוי הסיל, לא ניתן להסיק על פי מפת האנומליות בלבד מכיוון שצורות בעלות גיאומטריות ומיגנוט שונה יכולות ליצור את אותה האנומליה. עם זאת, על אף שהוא אינו נגלה בפני השטח, חתימתו של דייק זה חזקה ביחס לדייקים האחרים, הגלויים בפני השטח (איור 10). החתימה החזקה יכולה לנבוע ממספר גורמים: הגיאומטריה של הגוף, מרחק קטן מאוד בין הדייק לפני השטח, מגנוט חזק שקשור בנשא המגנטי, עוצמת השדה הגיאומגנטי בזמן התמגנטות הסלע או ההשפעה של תהליכי בלייה והחלפה.

הפרשנות שניתנת לאנומליות המגנטיות שזוהו בסקר (איור 8.4) תלויה באופי האנומליות ובקשר שלהן לתופעות הגיאולוגיות. ככלל, המקור של האנומליות המגנטיות חייב במינרלוגיה המכילה מינרלים מגנטיים בעלי מגנוט זהה. עבודות קודמות (Sherwood et al., 1992) הראו שהסלעים הוולקניים הם המקור המועדף ליצירת אנומליות מגנטיות. לכן אפשר את האנומליות המגנטיות אותן חישבתי כציינים של גופים מגמטיים ומכאן גם כציינים אפשריים של מקור החום ליצירת הקוורציט.

האנומליה השלילית העיגולית שמופיעה במרכז המפה ניתנת להסבר בהמצאתו של גוף מגמטי הנמצא בתת-הקרקע של הגבעה, אשר גבולותיו המרחביים זהים בקירוב לאלו של האנומליה, והוא ממוגנט בכיוון הפוך לשדה הגיאומגנטי העכשווי. יוצא מכך שבתת-הקרקע של הגבעה ישנו גוף מגמטי מעוגל, שעוביו ועומקו אינם ידועים ולא ניתן לגזור אותם ישירות מהמפה. הכיווניות הכללית של גוף זה במרחב צריכה להימצא על גבי מישור מקביל או תת-מקביל לאופק. למרות חוסר הוודאות באשר לעומק הגוף, האנומליה המגנטית מספקת מידע נוסף באשר לצורתו בממד האנכי. האנומליה אינה נחלשת או כמעט ואינה נחלשת במרכז הגבעה על אף שבמקום זה ישנה עליה טופוגרפית ולכן מרחק המדידה מן הגוף (אילו הוא היה אופקי לחלוטין) גדל, ולכן סביר שגם הגוף מתרומם כלפי מרכז הגבעה, באופן כמעט-סימטרי ותת-מקביל למבנה הטופוגרפי של הגבעה (איור 9).



איור 9. חתך סכמטי גיאולוגי המראה את מיקום וצורת גוף המחדר המשוערים בהסתמך על האנומליות המגנטיות שנמדדו בסקר זה.



איור 10. האירועים המגמטיים במכתש רמון (באדום), עם לוח הזמנים של התהפכות גיאומגנטיות (תקופות נורמליות בשחור, הפוכות בלבן) (Segev et al, 2005; Kent & Gradstein, 1985).

מאחר שהאירוע המגמטי הצעיר ביותר במכתש רמון (וולקני רמון) התרחש בעת הסופרכרון (superchron) הקריטיקוני (121-83 למ"ש, איור 10), במהלכו השדה הגיאומגנטי היה בעל כיוון נורמלי, גוף המחדר העגול לא יכול היה להיווצר בזמן אירוע זה. נובע מכך שהוא נוצר באחד משני האירועים העתיקים יותר, אולם לא ניתן להגביל את גיל היווצרותו מעבר לכך. עם זאת, ניתן לשער שהדייק הדרום-מזרחי חדר לאזור לאחר חדירת הגוף המרכזי, מאחר שנראה כי הוא נמצא בתוך האנומליה השלילית הגדולה, או לכל הפחות בשוליה. אם הדייק היה נמצא במקומו לפני היווצרות גוף המחדר, הגוף היה מעלה את הטמפרטורה של הדייק מעל לטמפרטורת קירי ובתהליך ההתקררות קרוב לוודאי היה משנה כיוון המגנטיות שלו לכיוון הפוך, ולמעשה, "נבלע" חלקית או כולו בתוך האנומליה של גוף המחדר.

מאחר שכיוון השתרעות הדייק (מזרח-צפון-מזרח – מערב-דרום-מערב) ומיקומו ביחס לגבעה אינם מראים התאמה וקשר לאנומליה השלילית שמופיעה במרכז הגבעה, לא סביר להניח שהדייק קשור גנטית להיווצרות הקוורציט בגבעה, על אף שבאופן תיאורטי גם הוא יכול לספק חום שתרם להיווצרות הקוורציט, חוסר-ההתאמה הגיאומטרית לגבעה מונע ממנו להיות מקור החום העיקרי שלה. נוסף לכך, בפני השטח של הגבעה לא ניכר שינוי טופוגרפי או טקסטורלי כלשהו בסלעים באזור שמעל הדייק, ולכן לא סביר שלדייק הייתה תרומה משמעותית בהיווצרות הקוורציט.

בפני השטח בגבעה חשופים שני דייקים (איור 1, איור 4.2), שניהם מוחלפים ובלויים מאוד. לדייק הצפוני, שנכלל בשטח הסקר, יש חתימה מגנטית שלילית חלשה מאוד עד כדי בלתי-נראית. החוסר בחתימה מגנטית ברורה נובע ככל הנראה מהחלפה ובלויה כימית של המינרלים שבדייק שהתרחשו לאחר מיגנוטו הראשוני. בדומה לדייק הקבור בדרום-מזרח הגבעה, גם המיקום והכיווניות (מזרח-מערב) של דייק זה מונעים ממנו להיות מקור החום העיקרי בהיווצרות הקוורציט. לדייק המערבי, שמיקומו ברור מעט פחות בפני השטח וחלקו נמצא בשטח הסקר, חתימה מגנטית חיובית ברורה ביחס לדייק הצפוני. חתימה זו מעידה במידה מסוימת על כיווניות במרחב (מזרח-מערב) ונראה כי הוא אינו מגיע עד מרכז הגבעה. בדומה לשני הדייקים האחרים, המיקום והכיווניות שלו מונעים ממנו להיות מקור חום מרכזי עבור הקוורציט בגבעה.

מתוך ההנחה כי גוף המחדר שממוקם מתחת לגבעה והדייקים לא קשורים אחד לשני, לא ניתן לגזור את גילם היחסי. הדייקים יכולו לחדור לגבעה לאחר, לפני, או במהלך היווצרות הקוורציט באותה מידה מאחר שלא הייתה להם השפעה (או לכל היותר השפעה שולית מאוד) על תהליך זה.

בשל המיקום של המנסרה בחתך הסטרטיגרפי ובתוך מכתש רמון, כל הגופים המגמטיים שבסביבתה קרוב לוודאי נוצרו בזמן אחד משלושת אירועי המגמטיזם המאוחרים של מכתש רמון. בהתאם לשלושת האירועים האלו ניתן להגביל, לפחות במידה מסוימת, את זמן ההיווצרות של הגוף העגול ושל שלושת הדייקים במנסרה. החתימה המגנטית של גוף המחדר העגול היא שלילית, כלומר השדה המגנטי בסביבתו מוחלש. אם נניח שהמגנטיות שלו היא שירית לגמרי (כלומר, תיעוד של מיגנוט הסלע בזמן התקררותו הראשונית) והמינרלים שבו לא עברו החלפה מאסיבית ששינתה את אופן ההתמגנטות שלהם, גוף המחדר מתחת לגבעה מחוייב היה להיווצר בתקופה בה השדה הגיאומגנטי היה הפוך בכיוונו ממצבו כיום.

מקורות

- Avni, Y. (1991). The geology, paleogeography and landscape evolution in the central Negev highlands and the western Ramon structure. *Israel Geological Survey Report GSI/6/91*, 153.
- Ben David, R. (1992). The geology of the Be'erot Oded Area and Western Makhtesh Ramon and Stages of the Evolution of Landscape since the Late Miocene to the Present. M.Sc. thesis. Ben-Gurion Univ. of the Negev: Beer-Sheva.
- Eyal, M., Samoilov, V., Yudalevich, Z., Avni, Y. (2000). Volcanology and petrology of Western Makhtesh Ramon. Report to Ministry of Sciences, Ben-Gurion Univ., Beer-Sheva.
- Idelman, A. & Enmar, L. (2014). Geological Sites in Israel, Israel Nature and Parks Authority, 260-262.
- Kent, D. V., & Gradstein, F. M. (1985). A Cretaceous and Jurassic geochronology. *Geological Society of America Bulletin*, 96(11), 1419-1427.
- Reeves, C. (2005). *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation* (Vol. 155). Geosoft.
- Segev, A., Weissbrod, T., & Lang, B. (2005). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Aptian–Albian igneous rocks in Makhtesh Ramon (Negev, Israel) and its stratigraphic implications. *Cretaceous Research*, 26(4), 633-656.
- Sherwood, G., Shaw, J., Baer, G., & Mallik, S. B. (1993). The strength of the geomagnetic field during the Cretaceous Quiet Zone: palaeointensity results from Israeli and Indian lavas. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 45(4), 339-360.
- Summer, N. S., & Ayalon, A. (1995). Dike intrusion into unconsolidated sandstone and the development of quartzite contact zones. *Journal of Structural Geology*, 17(7), 997-1010.

באשר לעומק בו נמצא גוף המחדר מתחת למנסרה, מהמסקנה כי הוא מקור החום של הקוורציט במנסרה נובע כי הוא נמצא ככל הנראה בטווח של עד 10 מ' מתחת לפני השטח באתר, שכן זהו העובי המקסימלי של שולי ההתמרה הקוורציטיים במקומות אחרים בתצורת אינמר (Summer & Ayalon, 1995). עדות תומכת להערכה זו מגיעה מהעובדה שהאנומליה כמעט ואיננה משנה את עוצמתה בכל איזור התפרשותה ומכאן נובע שצורתה מלווה את צורתה הטופוגרפית של הגבעה והיא שומרת על מרחק קבוע מפני השטח.

5. מסקנות

מקור החום במנסרת הקוורציט הוא גוף מגמטי דמוי סיל או לקולית קטן, בעל רדיוס של כ-180 מטרים, המצוי בתת-הקרקע מתחת לגבעה, ככל הנראה כ-10 מ' מתחת לפני השטח. הגוף בעל צורה עיגולית, ובממד האנכי הוא מורם כלפי מרכזו (איור 9). צורתו של גוף זה הכתיבה את ממדי הגבעה ואת התפרשותה במרחב. לפי אופי החתימה המגנטית של גוף זה, לא סביר שהוא שייך לאירוע הצעיר ביותר של מגמטיזם במכתש רמון, וניתן להניח שהוא שייך לאירוע המגמטי הקרטיקוני הראשון או השני (איור 2). בנוסף לגוף המחדר הראשי חדרו לגבעה שלושה דייקים. שניים ממוגנטים חיובית והשלישי ממוגנט חלש מאוד שלילית. שניים מהם חשופים בפני השטח (הדייק הצפון-מזרחי והדייק המערבי) ואחד מהם אינו גלוי בפני השטח (הדייק הדרום-מזרחי) והתגלה כאן לראשונה. מתוך המופע הגיאומטרי של האנומליות השונות עושה רושם שהדייקים נוצרו באירועים מגמטיים נפרדים ביחס לחדירת גוף המחדר הראשי, ומכאן קרוב לוודאי שהם לא קשורים אליו ואינם סיפקו את החום הדרוש עבור היווצרות הקוורציט.

תודות

ארצה להודות למספר אנשים שתרמו למחקר זה. ראשית לפרופסור רועי גרנות, על התנדבותו היוצאת מגדר הרגיל להנחות אותי בעבודת הגמר הזו, ועל הליווי המקצועי והמעולה לאורך כל תהליך המחקר, מההכנות לסקר ועד כתיבת העבודה. תודתי גם לחזי שריד מהמרכז למיפוי ישראל על מתן הנתונים המגנטים מתחנת בר גיורא, ולד"ר ירון פינצי ממרכז מחקר ים המלח והערבה, מצפה רמון, על התמיכה במחקר ועל הדיון בתוצאות הסקר.