

החברה הגיאולוגית הישראלית



Israel Geological Society

מדריך סיור דרום ירדן החברה הגיאולוגית הישראלית

חנן גינת
בר אלישע

אוקטובר 2015



מרכז מדע
ים המלח והערבה
Dead-Sea & Arava
Science Center



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
Ben-Gurion University
of the Negev

3	הקדמה.....
4	1. יחידות הנוף בדרום ירדן.....
4	(חנן גינת).....
7	2. ההיסטוריה הגאולוגית של דרום ירדן ועמק הערבה.....
7	(ירון קציר, חנן גינת, חיים בינימיני, קרן קולודנר).....
15	חלק שני - תחנות הסיור.....
15	1. יחידות סלע צעירות מדרום לעקבה.....
22	2. אבן חול נובית בדרום ישראל וירדן.....
26	3. סיור בואדי ע'וויר, מחוז טפילה, ירדן.....
30	4. ארץ אשר הרריה נחושת: פינאן (פונון) בירדן.....
43	5. הגיאולוגיה באזור פינאן.....
52	בבליוגרפיה.....

הקדמה

דרום ירדן הינו אזור מגוון מאוד מבחינה נופית, גיוון הנובע מחשיפה של סלעים משלל טיפוסים, צבעים והרכבים על פני תבליט טופוגרפי הררי ותלול. בדרום ירדן נחשפים סלעים מארבעת השלבים העיקריים של ההסטוריה הגיאולוגית של אזורנו: התשתית הקריסטלינית הפרהקברית אבני החול הפליאוזואיות, סלעי משקע ימיים מן המזוזואיקון והקנוזואיקון וסלעי משקע יבשתיים ואגמיים צעירים ששקעו בניאוגן לפני ובמהלך התנועה על טרנספורם ים המלח.

מיד לאחר חתימת הסכם השלום בין ישראל וירדן בשנת 1994 יזמה החברה הגיאולוגית הישראלית מספר אירועים שמטרתם להניע שיתוף פעולה עם עמיתינו בירדן. גיאולוגים ירדנים נתנו את הרצאות האורח בכנס החברה בזכרון יעקב ב-1995, ושנה לאחר מכן בכנס החברה באילת התקיים יום סיור לדרום ירדן בהובלת שמוליק מרקו. ב-1997 כבר נערך סיור גיאולוגי מקיף יותר בארגון הנשיא דאז, יהודה איל. למרות הקשיים, התקיים במהלך 20 השנים האחרונות שיתוף פעולה חוצה גבולות בין ישראל וירדן בתחומים רבים וביניהם גיאולוגיה. נעשו עבודות משותפות במגוון נושאים כגון מים, רעידות אדמה, מחצבים ועוד. ישנה פעילות תיירותית נרחבת ועשרות אלפי ישראלים הגיעו לביקור בירדן.

בסיור זה אנו חוזרים, לאחר 18 שנים, לנופיה של דרום ירדן וסלעיה. המטרה בסיור זה להגיע לאזורים בעלי עניין גיאולוגי בדרום ירדן. בחוברת זו, שהוכנה לקראת הסיור הנוכחי, נמצא פרק מבוא על יחידות הנוף בדרום ירדן ותאור קצר של ההסטוריה הגיאולוגית של האזור. בחוברת ישנה התייחסות לדמיון הרב בין יחידות הסלע החשופות משני צידי בקע ים המלח, כמו גם לשוני בין היחידות השונות והמשמעות שלהם ביחס להסטוריה הגיאולוגית של האזור.

הסיור מתמקד באזורים עקבה, ואדי רם, פטרה, וואדי עווייר ופינן, כאשר ההתמקדות תהיה באתרים המייצגים את פן הגיאולוגי של אזורים אלו. החוברת כוללת התייחסות מפורטת למרבית האתרים בצירוף איורים ותמונות.

בכתיבת החוברת והדרכת הסיור לקחו חלק: מיכאל בייט, יואב אבני, בועז לנגפורד, ארז בן יוסף, קרן קולודנר, בר אלישע, ירון קציר וחנן גינת. אנו מודים לכולם על תרומתם הרבה. עריכת החוברת והדפסתה נעשו באדיבות המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה באוניברסיטת בן גוריון בנגב.

בברכה

ירון קציר, נשיא החברה הגיאולוגית

חנן גינת, סגן נשיא ומרכז הסיור לירדן



1. יחידות הנוף בדרום ירדן

(חנן גינת)

הנוף בדרום ירדן כולל רמות נרחבות בקעות מוקפות צוקי אבן חול וקניונים עמוקים החתורים בסלע מגוון הכולל גיר, אבן חול וסלעי מחדר ופרץ. למגוון הנופי הרחב אחראים מספר גורמים: 1. הסטוריה גיאולוגית עשירה במהלכה נוצרו סלעים מגמטים ומותמרים, אבני חול נוביות, סלעי משקע ימיים, משקעים יבשתיים ואגמיים, וסלעי בזלת צעירים. 2. פעילות טקטונית שעיקרה בשולי בקע ים המלח ובזכותה פעילות ארוזיבית נרחבת שהביאה לחשיפת סלעים עתיקים לצד צעירים. 3. הפעילות הטקטונית היא גם המכתיבה את המבנה הטופוגרפי שכולל את עמק הערבה ממערב, רכס הרי אדום ואזור המדבר שמזרח לרכס. הפרשי הגובה בין האזורים השונים וגם בתוכם וכן ערוצי נחלים החתורים לעומק רב גורמים לחשיפת יחידות הסלע העתיקות ביותר. 4. מדבר צחיח קיצון במרבית השטח שבזכותו נחשפות לעין יחידות הסלע השונות. 5. פעילות סחיפה בנחלים והסעה איאולית גורמות להשקעה נרחבת של סחף נחלי וחולות.

ניתן לחלק את האזור של דרום מערב ירדן לשש יחידות נוף (איור 1):

א. **האזור שלמרגלות חזית ההרים מדרום לעקבה ועד הגבול עם ערב הסעודית.** אורכו כ-27 ק"מ ורובו הוא שטח שניתן בשנת 1965 לירדן מערב הסעודית תמורת החלפת שטחים עם חלקים מואדי סירחאן. בחלקו הצפוני של אזור זה העיר עקבה שבה מתגוררים כיום כ-130,000 איש. לאורך קו החוף דרומית לעקבה נבנו מספר נמלים וכן תשתית תיירותית הכוללת בתי מלון וחופי רחצה. מזרחה יותר מצויים משקעים אלוביאליים של קונגלומרטים ואבני חול אדומות וכן משקעים של גופי מים (פרוט בהמשך). אזור זה ועמק הערבה, החזמא והרי אדום הדרומיים מאופיינים באקלים מדברי צחיח קיצוני עם כמות משקעים שנתית ממוצעת הנעה בין 20 ל-50 מ"מ. תחנה 1 בסיוור תהיה באזור זה.

ב. **עמק הערבה הדרומי** שרוחבו כ-15-10 ק"מ ולאורכו עובר הגבול הבינלאומי בין ישראל וירדן. בערבה הדרומית רצף של מניפות סחף המסתיימות בשטח מישורי בגודל 40 קמ"ר המכונה מלחת יטבתה (ובפי הירדנים קע טאבה) המהווה בסיס סחיפה לכל הנחלים באזור. בסיסי סחיפה קטנים יותר בערבה הדרומית הם קע סעידין ומלחת עברונה, אליה מתנקזים הוודיות בקצה הדרומי של הערבה. אין באזור זה נחל המנקז את הערבה למפרץ אילת וכל הניקוז הוא לבסיסי הסחיפה המקומיים. באזור זה ישנה פעילות חקלאית בישובים רחמה ואל קטאר, וכן נמל תעופה ואזור התעשייה של העיר עקבה.

ג. **הערבה התיכונה מאזור גב הערבה, שגובהו כ-210 מטר מעל פני הים באזור הרכסים ג'בל א-חריג וג'בל א-רישה וצפונה לכיוון ים המלח.** השטח כולו מנוקז כיום ע"י נחל ערבה הזורם לים

החברה הגיאולוגית הישראלית

המלח ולאורכו עובר קו הגבול בין ישראל וירדן. הערבה התיכונה מכוסה בדרומה במניפות סחף של הנחלים המתנקזים לנחל ערבה וצפונה יותר מסלעי משקע אגמיים ואבני חול אדומות (תצורת הצבה). באזור זה פעילות חקלאית בעיקר בכפרים א-רישה, ביר מדקור וגרגרה. הגבול הטבעי בין אזור הערבה התיכונה להרי אדום שממזרח להם אינו חד וברור וממזרח לערבה רכסי הרים וגבעות שגובהם עשרות מטרים מעל הערבה. תחנות 5,6 ו-7 בסיוור יהיו באזור זה.

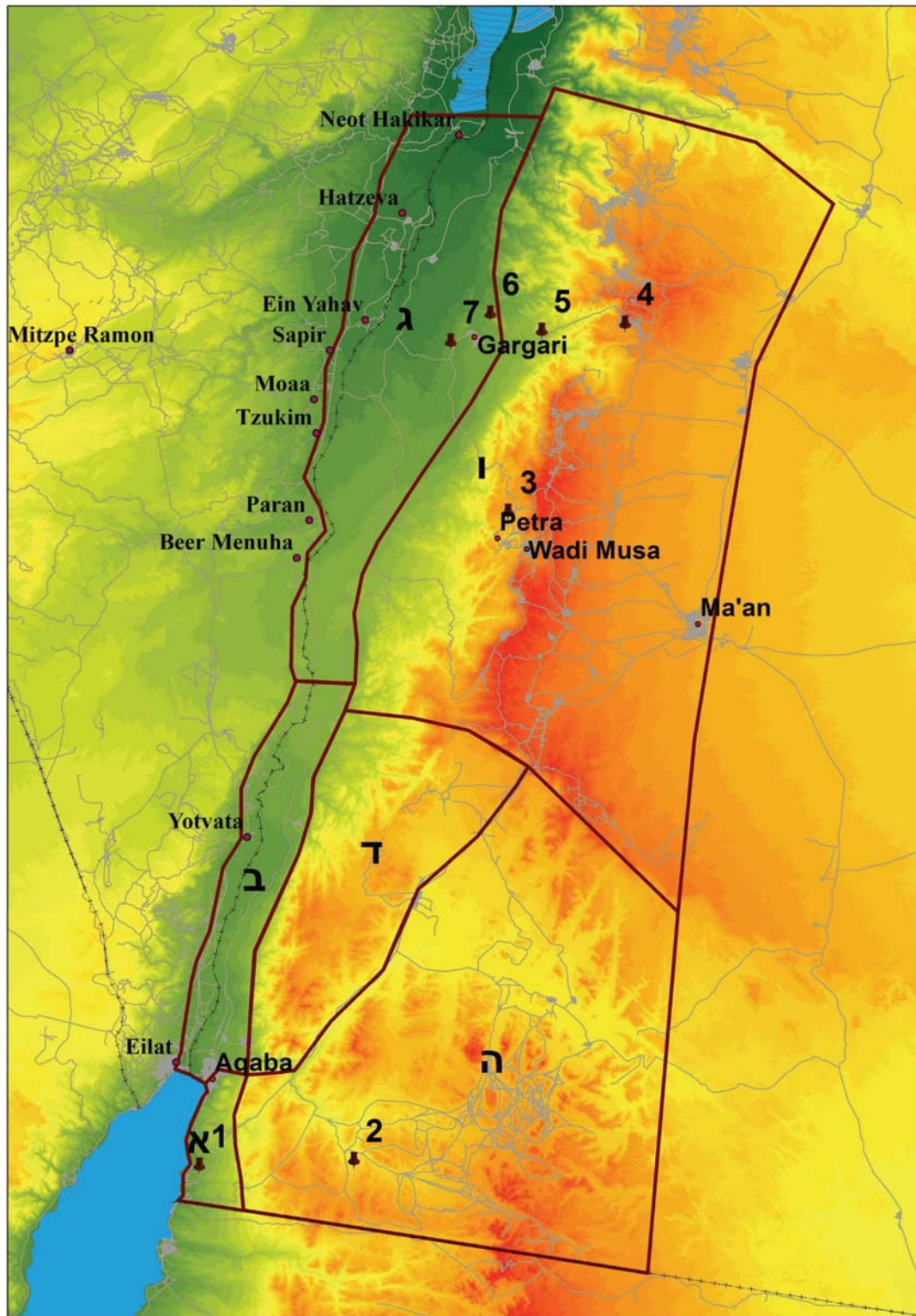
ד. **אזור הרי אדום הדרומיים בין רכס ההרים שמעל עקבה ועד לראס א-נקב** בנויים ממגוון גדול של סלעים מגמטים ומותמרים וצפונה יותר גם מאבני חול נוביות. גובה ההרים עד 1620 מטר (ג'בל באכר) ומדרונותיהם המערביים תלולים למדי. על גבי הרכס עובר קו פרשת המים המפריד בין הנחלים הזורמים לערבה לבין הנחלים הזורמים מזרחה לאזור ואדי רם. בחלקו הדרומי קו הרכס נחצה ע"י ואדי יותום שמקורותיו באזור ואדי רם ועד לשטח ערב הסעודית. גודל אגן הניקוז שלו כ-3400 ק"מ (דומה לנחל פארן). אבני חול נוביות מונחות על גבי הפנפלין באזור שמצוי כ-40 ק"מ ויותר מצפון לעקבה. העתקים שכיוונם צפון-דרום יוצרים בלוקים מדורגים בשולי הערבה. הפעילות האנושית העיקרית היא רועיית צאן וגמלים.

ה. **אזור החזמא הנמצא מדרום לראס א-נקב ועד הגבול הסעודי.** אזור זה הידוע בכינוי התיירותי "ואדי רם" בנוי מהרי בדד רחבים ומצוקיים המתנשאים לגובה של 700 מטר ויותר מעל העמקים. העמקים רחבים ומכילים כמות רבה של חול, מרביתו אדום, שמקורו בבליית אבני החול שהתפוררו מגיל קמבריום ואורדוויק. חלק מהחול הצטבר בדיונות שגובהן מגיע ליותר מ-100 מטר למרגלות המצוקים. ג'בל אום אדמי, האזור הגבוה ביותר בירדן, נמצא בקרבת הגבול הסעודי ומתנשא עד לגובה של 1,875 מטר. באזור זה פעילות תיירותית נרחבת של טיולי מדבר וכן פעילות חקלאית. בחלק הצפוני באזור של בקעת א-דיסה מצוי אקוויפר מים ממנו שואבים הירדנים עשרות מיליוני מ"ק בשנה. תחנה 2 בסיוור תהיה באזור זה.

ו. **החלק המרכזי של הרי אדום מאזור ראס א-נקב ועד לנחל זרד (ואדי חאסה).** לאורך רכס זה חשופים סלעים מגמטים, מותמרים, אבני חול וסלעי משקע ימיים. על גבי קו הרכס סלעי משקע ימיים שגילם קרטיקון עליון (חבורות יהודה והר הצופים). ממערב לשיא הרכס לכיוון הערבה הצפונית מצויים בלוקים שבהן נחשפות אבני חול מגיליים שונים. בשולי הערבה התיכונה רכסים מגמטים הבונים את ג'בל תאבה, חמרת פידאן ועוד. הנחלים המנקזים אזור זה זורמים מערבה אל נחל ערבה ואל ים המלח. הבולטים שבהם הם ואדי מוסא, ואדי ע'וויר, ואדי דנה ונחל זרד שלאורכם נחשפות אבני חול עתיקות וכן סלעי טרוורטין וטרסות נחל. הנחלים הזורמים מקו פרשת המים מזרחה מתנקזים אל בסיס סחיפה גדול המצוי במרכז החלק הדרומי של ירדן והוא קע ג'אפר, המנקז שטח שגודלו כ-13,000 קמ"ר. הפעילות האנושית באזור זה כוללת חקלאות ותיירות. עיקר התיירות

החברה הגיאולוגית הישראלית

מתרכזות באזור פטרה (ליד הכפר ואדי מוסא). כרייה והפקה הסטורית של נחושת התקיימו באזור פינן. האקלים בעיקרו באזור זה צחיח וממוצע המשקעים הרב שנתי בין 50 ל-150 מ"מ. באזור הגבוה בין פטרה וצפונה האקלים צחיח למחצה וכמות המשקעים השנתית הממוצעת עד 300 מ"מ. תחנות 3 ו-4 בסיוור יהיו באזור זה.



איור 1: מפת יחידות הנוף ותחנות הסיוור בדרום ירדן

2. ההיסטוריה הגאולוגית של דרום ירדן ועמק הערבה

(ירון קציר, חנן גינת, חיים בינימיני, קרן קולודנר)

בשוליהם המזרחיים של בקע הערבה ומפרץ עקבה חשופים סלעים המתעדים היסטוריה גאולוגית ארוכה שהחלה בעידן הפרה-קמבריום לפני יותר מ-700 מיליון שנים. בעמק הערבה נחשפות יחידות סלע צעירות יותר שהושקעו תוך כדי התפתחות בקע ים המלח להוצר לפני כ-20 מיליון שנה (גינת, 2000; רבקיין וחובריה, 2014). השלבים העיקריים בהתפתחות הגיאולוגית של דרום ירדן מתוארים להלן:

1. בבסיס החתך הגיאולוגי בדרום ירדן מצויים המחשופים הצפוניים ביותר של השילד הערבי-נובי מתקופת הניאו-פרוטרוזואיקון אשר בונים את התשתית הקריסטלינית באזור. סלעים מגמתיים ומטמורפיים אלו נוצרו במהלך האורוגנזה המזרח אפריקאית (600-800 מ.ש) שהסתיימה בהתנגשות מזרח ומערב גונדוונה ויצירת יבשת העל גנדוונה. סלעי התשתית חשופים על פני שטח של כ-1400 קמ"ר המשתרע ממזרח, צפון מזרח ומצפון לעקבה, ומחשופיה ממושיכים צפונה באופן בלתי רציף עד החוף הדרומי של ים המלח. התשתית בנויה ברובה המכריע (80%) מפלוטונים גרניטואידים מגיל 625-580 מיליון שנה החודרים לסלעים מטמורפיים עתיקים יותר ונפוצים הרבה פחות (Jarrar et al., 2013).

התשתית נחלקת לשתי יחידות ליתוסטרטיגרפיות, קומפלקס עקבה וקומפלקס ערבה. יחידות אלו כוללות מאספי סלעים שונים בהרכב ובגיל כאשר ביניהן מפרידה אי התאמה רגיונלית מגיל ~600 מיליון שנה (קורלטיבית לאי ההתאמה של חמת עבדו בהר הגבוה בסיני; Bentor, 1985). קומפלקס עקבה מכיל סלעים מטמורפיים של שיסט וגנייס החוזרים על ידי גרניטים קלק-אלקליניים מגיל 630-610 מיליון שנה ואילו קומפלקס ערבה מכיל גרניטים אלקליניים, ריוליטים ודייקים מורכבים מגיל 595-570 מיליון שנה וקונגלומרטים המכילים בלוקים מזוותים שהצטברו באגנים תוך-הרריים מקומיים (לדוגמא, קונגלומרט סרמוג'; Yaseen et al., 2013).

הרבדת קונגלומרט סרמוג', הקורלטיבי בגיל ובאופי לקונגלומרט אילת, מעידה על פאזת הרמה ואירוזיה משמעותית ביותר, ולמעשה על שיא האורוגנזה המזרח אפריקאית באזורנו. לפני כ-620 מ.ש. הסלעים המטמורפיים החשופים בואדי אבו ברקה (ממזרח לע'רנדל) רשמו לחצים שוי ערך לעומק מקסימלי של 18 ק"מ (Jarrar et al., 2013). לפני כ-600 מ.ש הם כבר נמצאו בפני השטח והורבדה עליהם באי התאמה חבורת צאפי (קונגלומרט סרמוג'). כלומר, גידוע משמעותי ביותר המסיר חתך בעובי של כ-20 ק"מ התרחש בשלבים האחרונים של האורוגן ולא במהלך המשטר הפלטפורמי שלאחריו. קצב האירוזיה במהלך משטר "תוך הררי" זה הוא שווה ערך לקצב האירוזיה הנוכחי בהימלאיה.

החברה הגיאולוגית הישראלית

למסקנה דומה הגיעו Garfunkel (1999) וגם Avigad & Gvirtzman (2009) לגבי אזור אילת: הגידוע שלפני הרבדת קונגלומרט אילת משמעותי לאין ערוך מן הבלייה שלאחר 580 מ.ש. המתרחשת כמעט במצב סטטי ומייצרת את הפנה-פליין. תהליכי בלייה כימית אינטנסיביים גרמו להיווצרות מישור גידוע על פני שטחים נרחבים לפני כ-540 מיליון שנים.

2. מעל מישור הגידוע, המכונה פנה-פליין, הורבדו משקעים סיליסיקלסטיים בסביבה יבשתית ובים רדוד במשך תקופות ארוכות. לאורך תקופת הפליאוזואיקון והמזוזואיקון הצטבר חתך סדימנטרי עבה, אשר נפחו היה אחד מהעבים שנמצאו לאורך כל ההיסטוריה הגיאולוגית וייחודו בכך שהוא מורכב בעיקר מגרגרי קוורץ (Mackee, 1962; Klitzche, 1981). בתקופה הראשונה לאחר הגידוע, תקופת הקמבריום, שלטו בנוף נחלים עוצמתיים שהסיעו את תוצרי הבליה של שרשרת ההרים הקדומה ממקורות רחוקים, בעיקר מדרום. בכך הם סייעו ליצירת מישור הגידוע רחב ההיקף אשר שינה את פני הנוף הקדומים ללא הכר. חתך הסלעים הפליאוזואי כולל בבסיסו בעיקר אבני חול צבעוניות יחד עם שכבת חלוקים מעוגלים ומזוותים של קוורץ וסלעים מגמתיים ומטמורפיים ומעליהם שכבות של דולומיט חולי, פצלים ואבני חול. גילם של הסדימנטים הקדומים ביותר הוא 530-515 מ"ש (Garfunkel, 1999). מעל החתך הקמברי בדרום ירדן (למשל באזור ואדי רם ופטרה) חשופות גם אבני חול מגיל אורדוביק וסילור אשר אינן קיימות בצד הישראלי. הכיסוי הסדימנטרי כיסה את מישור הגידוע של המאסיב הערבו נובי כשהוא מתקדם בהדרגה כלפי דרום (Garfunkel, 1999; Alsharhan and Nairn, 1997). רצועת ההשתרעות של החתך הקמברי במזרח בקע ים המלח נמשכת מירדן עד לערב הסעודית ואורכה כ-500 ק"מ, רצועת החתך האורדוביקי נמשכת דרומה יותר ובמקומות מונחת באי התאמה ישירות על סלעי התשתית. סלעי משקע יבשתיים הכוללים אבני חול, שכבות חלוקים, אבני סילט ועוד המשיכו לשקוע בכל תקופת המזוזואיקון ובקרטיקון התחתון, עד לפני כ-100 מיליון שנה. עוביו של החתך מגיל פליאוזואיקון-מזוזואיקון נע בין 500 ל-4000 מטר. שני אירועי התרוממות משמעותיים בעקבותיהם נגדעו חלקים נרחבים מן החתך הקלסטי התרחשו בקרבן המוקדם ובקרטיקון התחתון. הם קשורים כפי הנראה לחימום ודיקוק הליתוספירה (Feinstein et al., 2013)

3. כתוצאה מהצפות ומנסיגות של אוקיאנוס הטתיס (100–34 מיליון שנים) הושקעו סלעי משקע ימיים מגוונים, החשופים כיום לאורך גבולה המערבי של הערבה ובאזורים הגבוהים ממזרח לה. עובי החתך נע בין 3,000 מטר בנגב ובערבה לכיוון דרום עד ל-1,000 מטר באזור אילת. הדקקות החתך קשורה בעיקר במשך זמן של ההצפה הימית בכל אחד מהאזורים.

טור הסלעים המזוזואי-איאוקני בדרום ירדן שונה במקצת מזה המוכר בדרום ישראל. ההבדלים נובעים מהמשך לכוון דרום ומזרח של מגמות השינוי המוכרות בחתך של ישראל. שתי מגמות

החברה הגיאולוגית הישראלית

בולטות, האחת רגיונלית והשנייה טמפורלית. המגמה הרגיונלית היא חתכים פרוקסימלים ורדודים יותר כלפי דרום ומזרח, כשקו החוף, לעיתים דמיוני, אינו ישר במיוחד. המגמה השנייה, לאורך זמן, מתבטאת בהעמקה הדרגתית, כשהחתך בקרטיקון מתחיל בחשיפה ובאי התאמה, השקעת סדימנטים של סביבות יבשתיות, של ים רדוד ועד להעמקה לסביבה הפלגית בקרטיקון העליון השולטת כ-40 מיליון שנה. בסוף האיאוקן מתחילה מגמת היפוך, שמהר מאוד מגיעה להרמה בקנ"מ של קילומטרים.

בחתך המזוזואי חסרים סלעי הטריאס והיורא הגדועים בדרום ירדן. מעל מישור גידוע זה מופיעות אבני חול של חבורת כורנוב, המתוארכים בירדן לאלביאן ולקנומן. בחבורת כורנוב מיוצגות שלוש סביבות השקעה יבשתיות ואחת ימית. מעל אי ההתאמה הסביבה העיקרית היא של נהרות קלועים המובילים חול עם מעט אופקי פליאוסול. כלפי מעלה הנהרות הופכים למפותלים יותר ובעלי מישור פשוט. אלו עוברים כלפי מעלה למישור חוף נרחב עם התפתחות של קרקעות רטובות. אבני חול ימיות המכילות אופקי גיר ודולומיט חולי, גלאוקוניט ומעט אמוניטים מעידות על סביבות סוב-טידליות. קרקעות הסביבות היבשתיות מעידות בדרך כלל על אקלים חם ומעט רטוב, ללא התפתחות של סבחות באיזור האינטרטידלי.

הסלעים הדומים לחבורת יהודה כלולים בחבורת עג'לון, מגיל קנומן ועד קוניאק. סלעים אלו מעידים על מעבר מסביבה יבשתית לימית בדרך כלל ללא אבפוריטים במעבר, דבר המצביע על המשך אקלים חם ורטוב יחסית. עדויות לאקלים נהיות דלות עם השתלטות הסביבה הימית ואירוע בודד הכולל השקעת גבס בטורון התחתון במרכז ירדן מעיד על תמורות אקלימיות במהלך הקרטיקון. הסלעים מתוארים כנוצרים במים רדודים, על אף כי רוב הגירים הם מיקריטיים או חווארים סוב-טידאליים, לעיתים עם אמוניטים המאפיינים מדף חיצוני או מדרון יבשת. מספר שכבות עם אואוליטים וביוקלסטים מעידות על תופעות אנרגטיות המתאימות למדף פנימי יותר. אלו, וכן ריפים קטנים של רודיסטים ואוסטריאות עשויים לציין את קצה המדף הקרבונטי וחוסמים לפחות חלקית את המוצא לים של סביבה לגונרית רדודה ופנימית יותר. בסביבה זו יוצרו גירים ודולומיטים עם תופעות כמו סדקי בוץ וקרומי אצות וכן פורמיניפרים גדולים ומולוסקה מאפיינים.

המשך מגמת ההעמקה מגיעה לקיצוניות בסביבות המעבר קוניאק - סנטון, שבעקבותיו השתחררו תנאים פלגיים של חבורת "בלקה" המזכירה את חבורת הר-הצופים ועבדת. השתלטות ביוטה כפורמיניפרים פלנקטוניים, ננומאובנים גירניים ולעיתים רדילריות ומחטי ספוגים צורניים כמרכיבים עיקריים בסלע מאפיינת סביבות של ים עמוק. המערכת הקרבונטית הפרוקסימלית של חבורת עג'לון (יהודה) נמחקה בכל האיזור. בסביבה הפלגית מתגברת השקעה משמעותית של צור שהוכח שמקורו במוביליזציה משנית של אופל ביוגני. עושר בגרגרים פוספטיים היא תוצר של פעילות מיקרוביאלית במים עשירים בניוטריוניטים, שבתנאים אנרגטיים מتركזים עד כדי הווצרות

החברה הגיאולוגית הישראלית

מרבצים כלכליים של פוספט. מערכת עתירת צור ופוספט וכן הצטברות חומר אורגני בסביבה הקרבונוטית הפלגית מוסברות כרצועות פציאליות המתפתחות מתחת למערכת ימית הנשלטת על ידי זרמי מעלה (upwelling). לפי מודלים מקומיים, ההעמקה גרמה לקו החוף להעלם מהאיזור והסביבה הפנימית יותר הינה לגונה עמוקה ונרחבת שמימיה משוכבים שבתחתיתה שוקעים פצלי שמן. הלגונה מופרדת ממדרון היבשת על ידי רצועת ביוקלסטים גיריים ופוספטיים וריפים מקומיים של אוסטריות. לפי שיטה זו, הסביבה החיצונית לרצועת ה-upwelling תהיה מדרון יבשת, אך למעשה רצועה חיצונית זו מוכרת בישראל כחבורת הר הצופים, על כל מגוון הסביבות שבה.

הים ממשיך להעמיק בסביבה הפלגית במשך המסטריוט והטרצייר התחתון ומרכיב הפוספט והחומר האורגני נהיים משניים יותר בחלק העליון של חבורת "בלקה". כנראה הרצועה העשירה בניוטריינטים נדחקה מזרחה ודרומה, כפי שמעידים פוספטים באיאוקן בערב הסעודית, סוריה ודרום סיני. מחשופי האיאווקן הם מעטים אך כנראה באיאוקן הצור נהיה מרכיב דומיננטי לפחות ככל שניתן להבין מתוצאות בלייתו, דהיינו עיקר "צור היבוא" המוכר בסדימנטים הקלסטים הצעירים יותר מעבר לבקע מערבה. מחשופי איאווקן מאוחר נדירים בדרום מערב ירדן, אך ככל הנראה במן זה נכנס לסביבה הפלגית מרכיב חול של קוורץ ופורמיניפרים גדולים, בעיקר נומוליטים. אלה הסימנים הראשונים של הרדדה, שבהמשך נהפכת להרמה הדרמתית של האוליגו-ניאוגן ומביאה לקיצו של השקעת החתך הימי בכל האזור.

4. תהליך התרוממות של האזור כולו שהחל לפני כ-34 מליון שנה הביא לנסיגתו של ים תטיס לכיוון צפון-מערב. סלעי המשקע הימיים נחשפו והחלה תקופה ארוכה של בלייה שבמהלכה נגדעו ונסחפו מרבית הסלעים שהיו בחלק העליון של החתך. לאורך תקופה זו התקיימו כנראה באזור מערכות זרימה שזרמו לים תטיס הנסוג בהדרגה. נוצרה סביבה של ים רדוד, אגמי מים מתוקים ונחלים והושקעה שכבה עבה של תלכידי נחלים. פעילות נרחבת של בלייה יצרה את "מישור הגידוע האוליגוקני". יחידות אלו הוגדרו ע"י Bender, 1974 כחלק התחתון של היחידה הסינטקטונית התחתונה וע"י Avni et al (2012) כחבורת תמד. סלעים אלו חשופים בדרום ירדן בג'בל עזפיר (ליד הישוב קטר, מול קיבוץ סמר), בסמוך לג'רנדל ובג'בל א-רישה ובישראל בסמוך למוצא נחל רחם לערבה. עובי החתך הכולל החשוף עד 300 מטר.

5. שלוש מערכות קימוט והעתקה עיקריות עיצבו את המבנה הגאולוגי של האזור כולו:
א. מערכת הקשת הסורית שהחלה לפני כ-90 מליון שנים ויצרה קמטים מסוריה ועד לצפון סיני; מערכת זו לא השפיעה כלל על דרום ירדן.

החברה הגיאולוגית הישראלית

ב. בשולי הערבה הופעלה מחדש מערכת שברי הרוחב שכללה שישה העתקים בעלי הסטה אופקית ימנית הנמשכים מחלקו המערבי של חצי האי סיני עד לערבה והם מלווים במבני קימוט ושבירה קטנים; ביטוי לשברים אלו קיים בחלק המרכזי של ירדן.

א. מערכת ההעתקה העיקרית של טרנספורם ים המלח הנמשך מצפון ים סוף ועד לטורקיה. טרנספורם ים המלח מהווה את הגבול שבין הלוח הערבי לתת-הלוח של ישראל וסיני, ולאורכו החלה תנועה צפונה ותנועת פתיחה של הלוח הערבי ביחס ללוח של ישראל. לאורך טרנספורם ים המלח החלה כבר בתקופת המיוקן תנועה צפונה של הלוח הערבי ביחס לישראל שהצטברה עד היום לכ-105 ק"מ. קיימות דעות שונות לגבי גיל ההעתקה הראשוני של טרנספורם ים המלח. יש הטוענים שהשבירה החלה לפני כ-35 מיליון שנים באיאוקן המאוחר-אוליגוקן מוקדם, כאשר הופעלו מחדש מישורי העתק קדומים (Avni et al., 2012). אחרים טוענים שהשבירה החלה רק בתקופת המיוקן המוקדם לפני כ-18 מיליון שנים (Garfunkel, 1981). עם זאת קיימת הסכמה כי עיקר הפתיחה שיצרה את הבקע כשקע טופוגרפי רחב החלה לאחר השקעת תצורת חצבה בסוף המיוקן (לפני כ-8–10 מיליון שנים) והואצה בפליוקן פליוקן (לפני 5–1.8 מיליון שנים) ובפלייסטוקן (לפני 1.8–0.001 מיליון שנים).

6. מעל למישור הגידוע האוליגוקני הושקעו קונגלומרטים המכילים בעיקר חלוקים של סלעי המשקע הימיים. קונגלומרטים אלו הוגדרו כחלק התחתון של תצורת חצבה וכקונגלומרט רחם (באזור אילת) והם הושקעו בעיקר בתקופת המיוקן המוקדם (שהחלה לפני 23 מיליון שנים). תצורת חצבה מורכבת משישה פרטים שמרביתם הושקעו במערכות נחלים קדומות שזרמו אל הים התיכון. בבסיס החתך הורבד קונגלומרט שמרכיביו נגזרו ממקורות מקומיים, במערכות נחלים בעלי אנרגיית זרימה גבוהה; לאחריו התקיים שלב של הצטברות משקעים אגמיים ונחליים דקי-גרגר במערכות ניקוז נרחבות של אנרגיית זרימה נמוכה. בשלב הבא הורבד חתך עבה מאוד שעיקרו חולות קוורץ וחלוקי "צור יבוא", במערכות נחלים בעלי אנרגיית זרימה גבוהה. אגן הניקוז של מערכות אלו נמצא הרחק במזרח או בדרום-מזרח (קלבו, 2000). עוביה החריג של תצורת חצבה בערבה (2,000 מטר) נובע מהשקעה בתוך העמק שנוצר כתוצאה מהעתקה בתקופה זו. בעקבות המשך ההעתקה והרמת שולי האזור התמלא הבקע בתוצרי סחיפה של תצורת חצבה והקשר אל הים התיכון נותק. במקביל נמשך תהליך הביקוע וכן מתרחשת העתקה אינטנסיבית לאורך שברי הרוחב. האגנים הטקטוניים העמיקו והתרחבו בהדרגה, והגדול ביניהם היה כבר אז דרום ים המלח. באזור ים המלח הצטבר בתקופה זו לצד חולות וקונגלומרטים גם חתך עבה של מלח. כנראה שמפרץ עקבה התפתח גם בסוף תקופת המיוקן או תחילת הפליוקן. אבן החול האדומה החשופה מדרום לעקבה שקעה כנראה בשלב זה.

החברה הגיאולוגית הישראלית

במקביל לתהליכי ההעתקה האופקית והביקוע שגרמו ליצירת המבנים הגיאולוגיים המפותחים בערבה ובשוליה התרחשו במהלך תקופת המיוקן תהליכי סחיפה, בעיקר במתלול הערבה, שהביאו לחשיפתם ההדרגתית של הסלעים המגמטים העתיקים ואבני החול הנוביות. אלו נחשפו בהרי אדום ובאזור ואדי רם. בתחילת תקופת הפליוקן, לפני 5.5 מליון שנה התקיים כנראה נוף דומה לנוף הנוכחי.

7. לפני כ-3 מיליון שנים מתפתחת באזור מערכת ניקוז נרחבת המנקזת שטחים גדולים במזרח סיני ובנגב אל אגן ים המלח, ובה שוקעת תצורת ערבה. בבסיסה מורבד קונגלומרט שבו חלוקים בגדלים שונים ועיקר המטריקס הוא חול גס גרגר שהורבד במערכת של נחלי פזרות עם משטר שיטפוני. מעל הקונגלומרט התחתון מושקעים קונגלומרט דק-גרגר, חוואר, חרסית וגיר שהורבדו בנחלים ובאגמים. בגבול הצפוני של הערבה מצויים משקעים של אגמים קדומים (אגם עמורה ואגם הלשון), שהתקיימו באזור במהלך שלושה מיליון השנים האחרונות (Ginat et al., 1998). קצב התנועה הממוצע של טרנספורם ים המלח בשלושת מיליון השנים האחרונות מוערך בכחצי ס"מ בשנה. חלקו מתרחש בתנועה רציפה ואטית ("זחילה סייסמית") וחלקו ב"קפיצות" במהלך רעידות אדמה. קצב השקיעה של הבקע היה מהיר מקצב המילוי שלו בסחף נחלים, וכך בהדרגה נוצר שקע טופוגרפי עמוק שהערבה היא חלק ממנו.

הרי אדום התנשאו בתקופה זו מעל עמק הערבה ומהם התנקזו נחלים שזרמו לכיוון ים המלח ומפרץ אילת. רק באזור הערבה התיכונה (אזור א-רישה וג'רנדל) התקיימה מערכת ניקוז שזרמה מערבה לכיוון הנגב המערבי. נחל זה התנקז לכיוון נחל פארן ודרכו אל ים המלח (גינת, 1997, אבני, 1998). במהלך תקופת הפליוקן נמשכה פעילות הסחיפה בעמקי הנחלים שירדו מהרי אדום ומואב והושקעו קונגלומרטים שעוביים הגיע לעשרות מטרים. על פי מאסף החלוקים בקונגלומרטים אלו ניתן לקבוע שבמרבית אגני הניקוז היו בתקופה זו כבר חשופים סלעים ממרבית קבוצות הסלעים הנחשפים היום באותם אזורים. באותה תקופה התקיימו בשקעים טקטוניים אגמי מים מתוקים ורדודים בהם הושקעו בעיקר סלעי גיר וחוואר. כנראה שבתקופה זו התקיימו גם גופי מים מתוקים וברקים בשולי מפרץ עקבה אילת ובהם הושקעו סלעים מתצורות עקבה ואילת.

8. הטייה טקטונית של הנגב המזרחי והמשך הפעילות הטקטונית לאורך בקע ים המלח והערבה החל מתקופת הפלייסטוקן המוקדם הביאה להדגשת המבנה הגיאולוגי והטופוגרפי של בקע הערבה. תוואי הנחל הקדום שחצה את הערבה במהלך הפליוקן נותק ולפיכך נקבעה מתקופה זו ואילך הרציפות הטופוגרפית של עמק הערבה בין מפרץ אילת וים המלח. במהלך תקופת הפלייסטוקן התקיימו בערבה מערכות זרימה דומות לנוכחיות ועם בסיסי סחיפה מקומיים (מלחת אילת, מלחת עברונה, מלחת יטבתה, קע סעידין). בתקופות גשומות יותר שהתקיימו במהלך הפלייסטוקן ובעיקר בפלייסטוקן המאוחר התקיימו בבסיסי הסחיפה אגמי מים מתוקים. הגדול והמוכר מכולם היה אגם הלשון. אגמי

החברה הגיאולוגית הישראלית

מים מתוקים התקיימו גם ממזרח להרי אדום בקע ג'אפר, מודווארה (בסמוך לגבול עם סעודיה), בחלקים העליונים של ואדי חסה וכן בערבה באזור חמרת פידאן והג'רנדל (Ginat et al, 2015). לצידם של גופי מים אלו נמצאו כלים מסותתים ע"י האדם הקדמון המעידים על פעילות אנושית קדומה לצד האגמים בתקופת האבן במהלך תקופת הפלייסטוקן. לפני כ-20,000-70,000 שנה, בתקופת הקרח ירד מפלס כל האוקיאנוסים ובמפרץ עקבה ב-100 מטר. בתקופה זו נוצר מדף היבשת במפרץ (Sade et al, 2009).

9. עם המעבר לאקלים צחיח קיצון בסוף תקופת הפלייסטוקן והמשך השקיעה של עמק הערבה התפתח בהדרגה הנוף הנוכחי. ימת הלשון וגופי המים הנוספים התייבשו וגוף המים הקבוע שנותר הוא ים המלח. בבסיסי הסחיפה בערבה הדרומית התפתחו מלחות. לאורך מניפות הסחף במוצא הנחלים לערבה ולאורך העמקים במתלול הערבה החלו תהליכי התחתרות. תהליכים אלו הביאו ליצירתן של טרסות נחל שגובהן מגיע לכמה עשרות מטרים. תהליכי בליה של הסלעים העתיקים ממשיכים להתקיים באזור כולו ואילו את עמק הערבה מעצבים בעיקר תהליכי סחיפה והשקעה הקשורים בזרימה שיטפונית ובאקלים הצחיח הקיצוני השורר באזור היום.

החברה הגיאולוגית הישראלית

קיים דמיון רב ביחידות הסלע (התצורות) המצויות משני צידי הערבה. בטבלה המצורפת להלן מופיעו שמות התצורות המופיעות במפות הגיאולוגיות בקנה מידה 1:50,000 מדרום ישראל ודרום ירדן

Name of Formation	Thickness (meters)	גיל (במיליוני שנה)	שם התצורה בישראל
Alluvial, Fluvial and Lacustrine sediments	100	1.8 - Today	יחידת סלע צעירות
Lisan Marl	0-100	0.07 - 0.02	לשון
Dhira Ibn Salih Conglomerate A-Reisha Conglomerate	100	5 - 1.8	צחיחה ערבה
Dana Conglomerate (Lower and Upper) Wadi Bustan	300	20 - 16	חצבה
Umm Rijam Chert - Limestone	230	55 - 50	מור ונצנה
Muwaqqar Chalk - Marl	200	71-55	ר'רב וטאקיה
Al Hisa Phosphorite (Amman Silicified Limestone)	130	83 - 71	מישאש
Wadi Umm Ghudran	120	83 - 86	מנוחה
Wadi as Sir Limestone	120	90 - 86	גרופית וציחור
Fuhays/Hummar/Shu'ayb	80 - 110	93 - 90	אורה
Na'ur Limestone	60 - 80	100 - 92	חצרה
Kurnuv Sandstone	120 - 160	130 - 100	אמיר, עברונה וסמר (חתירה)
Disi Sandstone	250	480 - 440	
Umm Ishrin Ssandstone	300	500 - 480	שחורת ונטפים
Burj (Dolomite-Shale)	0-120	520 - 500	תמנע
Salib Arkosic Sandstone	0-250	540 - 520	עמודי שלמה



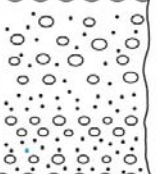
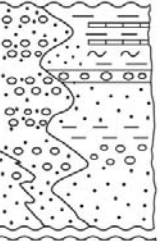

חלק שני - תחנות הסיוור

1. יחידות סלע צעירות מדרום לעקבה

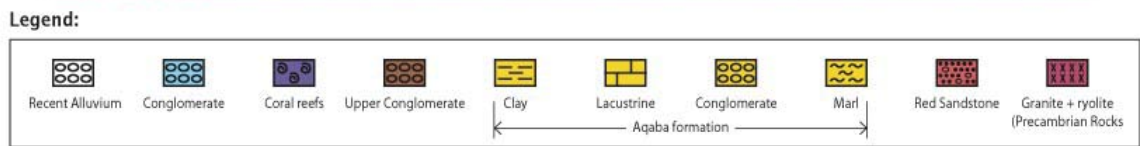
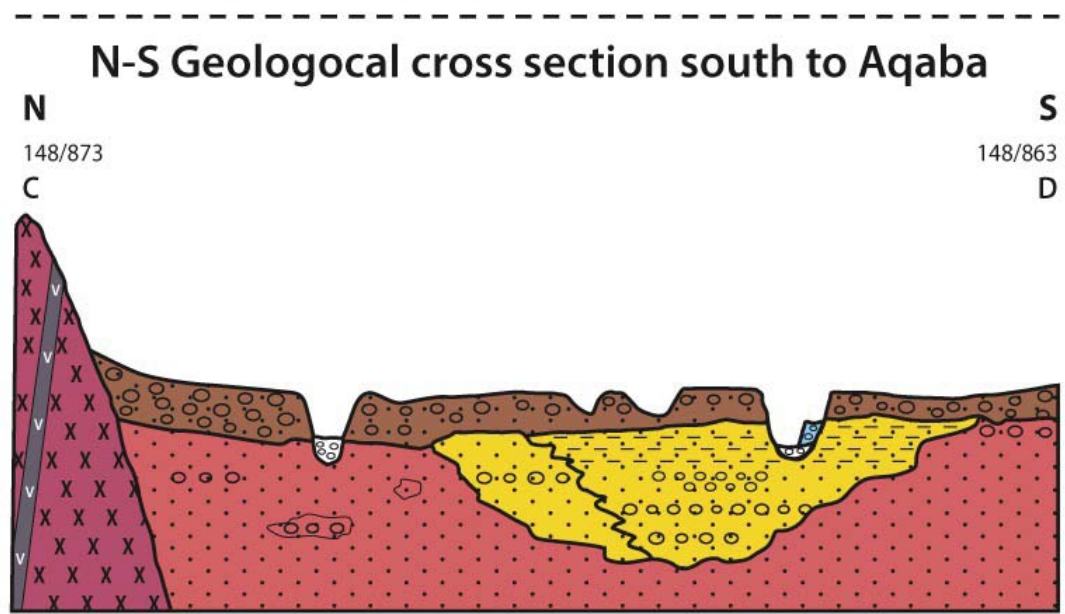
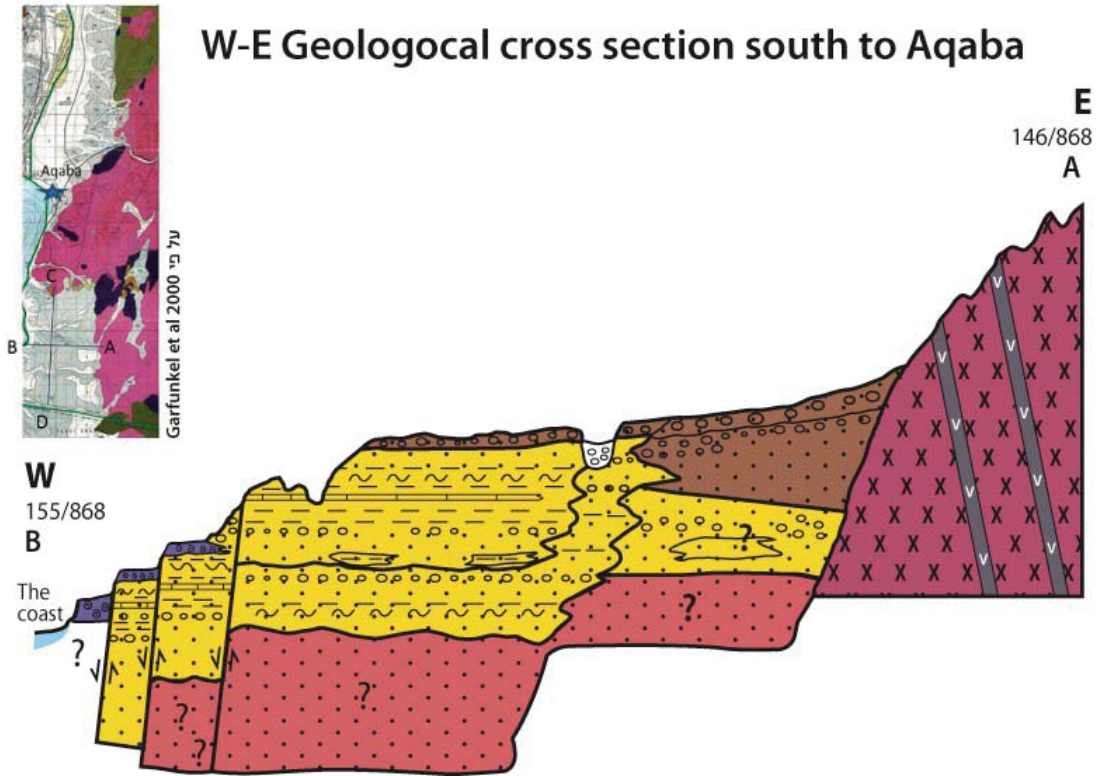
(חנן גינת)

מפרץ עקבה ואילת הינו החלק הדרומי של טרנספורם ים המלח שאורכו מעל 1,000 ק"מ מדרום המפרץ ועד לדרום טורקיה. לאורך הטרנספורם קיימת סדרה של העתקי מתיחה היוצרים עמק צר וארוך וכן הסטה אופקית שעוצמתה באזור ראש המפרץ כ-105 ק"מ. לאורך המפרץ שלושה אגנים עמוקים שהצפוני ביניהם הוא אגן אילת המגיע לעומק של 700 מטר מתחת לפני הים בקצה הצפוני של המפרץ. לימוד מפורט של המפרץ ניתן למצוא בפרסומים של צבי גרפונקל, צבי בן אברהם ורבים אחרים (Garfunkel et al., 1981; Ben Avraham, 1985; Ben Avraham et al., 2012 and others). סמוך לחוף של אילת קיים מדף יבשת שעומקו כ-100 מטר שהתפתח כנראה בתקופת הקרח האחרונה (Sade et al., 2009). במחקר שנעשה לאחרונה בצפון מפרץ אילת נמצא שישנה פעילות לאורך העתקים שכיוונם צפון-דרום ועוצמת התנועה כ-2.3-3.4 מ"מ בשנה (Hartman et al., 2014). באזור שמדרום לעיר עקבה ועד לגבול עם סעודיה נחשפות מספר יחידות סלע יבשתיות וחופיות שגילן מיוקן ועד פליסטוקן עליון. יחידות סלע אלו מכסות שטח נרחב שגודלו 30 קמ"ר והוא מצוי בין חזית הרי אדום ממזרח ועד לחוף של מפרץ עקבה ממערב (איורים 2,3):

Morpho-stratigraphy section south to Aqaba

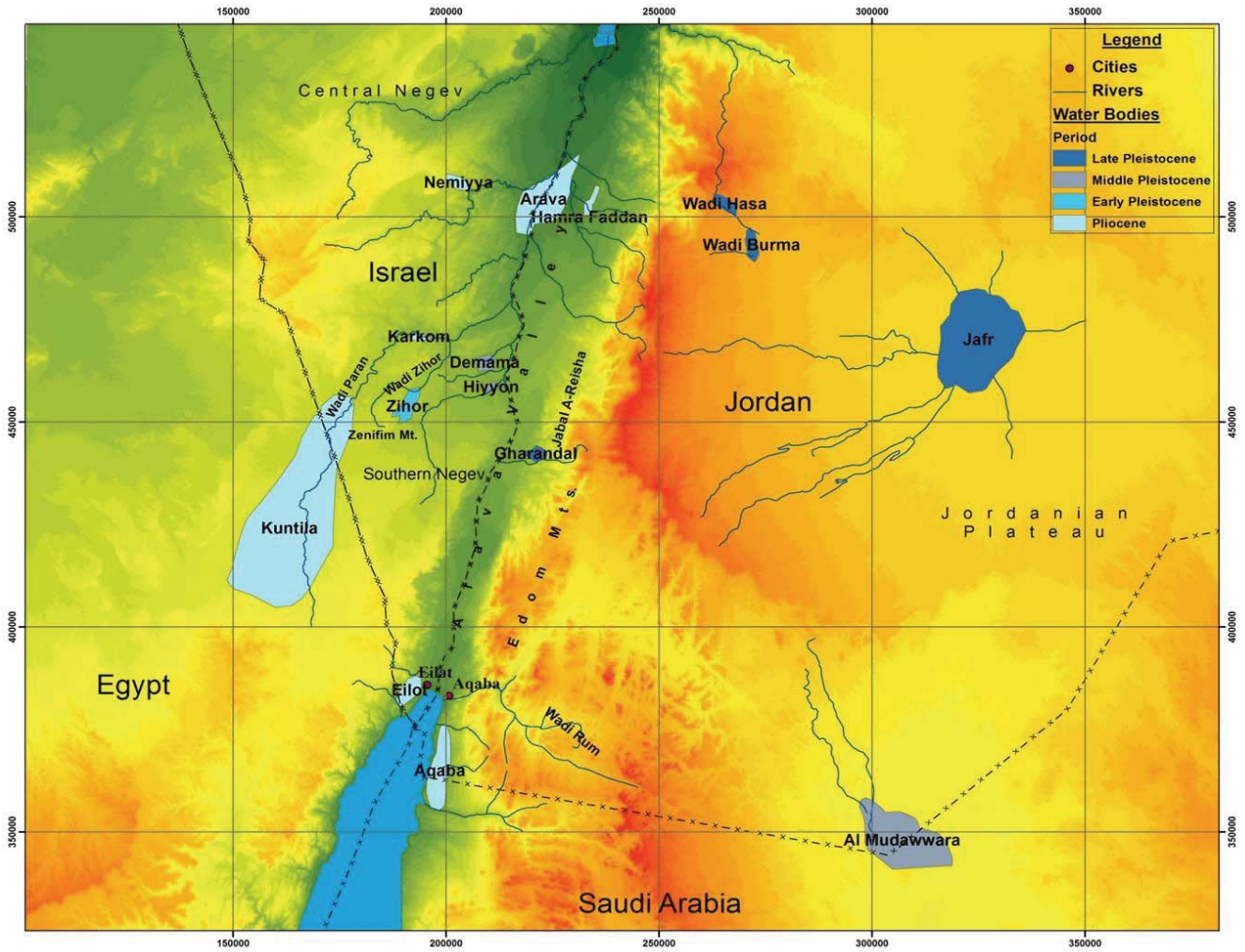
Age	Lithology	Color	Thick.	Remarks
Holocene				Alluvium in terraces and streams
Late Pleistocene				Conglomerate and fossil reefs beside it
early-middle Pleistocene			30	Coarse conglomerate with arkoza and sand. The upper layer contain boulders > 1 meter
Pliocene or early Pleistocene			70	Different facieses: marl, clay, and with thin carbonatel ayers and clastic grains of sand and pebbles
			+100	Red sandstone with some granite pebbles exposed in the south and north part of the region

איור 2: חתך מורפו-סטרטיגרפי של יחידות הסלע הציעורות דרומית לעקבה

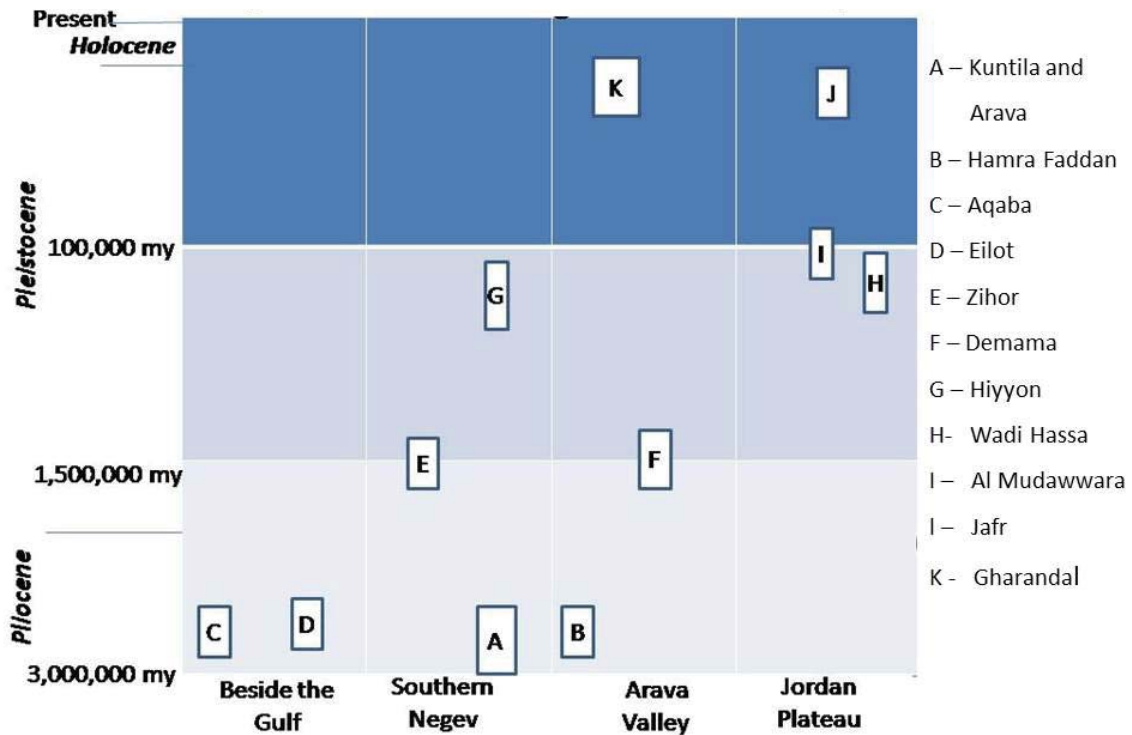


איור 3: חתכי רוחב של יחידות הסלע הצעירות דרומית לעקבה

החברה הגיאולוגית הישראלית



איור 4: מפת גופי מים קדומים בדרום ישראל וירדן



איור 5: תפוצת גופי המים הקדומים בזמן ובמרחב

אבני חול אדומות

אבני חול אדומות גסות גרגר נחשפות לצד הגבול עם ערב הסעודית וכן למרגלות הרי אדום בחלק הצפוני ביותר. כמו כן נחשפות אבני החול האדומות מתחת לסלעי תצורת עקבה. עובי החתך כמה עשרות מטרים ואבני החול פרירות. באבני החול גם חלוקים מגמטים וגם חלוקים של אבני חול מבורזלות וחלוקי קוורץ מעוגלים ("ביצי יונים"), תת מעוגלים עד מעוגלים. במקומות קיים שיכוב באבני החול לעיתים אופקי ולעיתים צולב. באבני החול לא נמצאו חלוקים של סלעי משקע ימיים. מקורן של אבני חול אלו כנראה בתוצרי בליה של אבני חול נוביות הנחשפות באזור ואדי רם. מערכות נחלים קדומות שזרמו ככל הנראה לכיוון מערב השקיעו את הסחף שבעיקרו חולי. על סמך יחסי השדה הגיל המוערך של אבני החול האדומות הוא מיוקן ויתכן שהן קורלטיביות לאבני חול אדומות המצויות בערבה ושייכות לפרט גדרון של תצורת חצבה. בשנים האחרונות משמש חול זה לחציבה לבניית הנמלים והדרכים שמדרום לעקבה.



היחידה האדומה

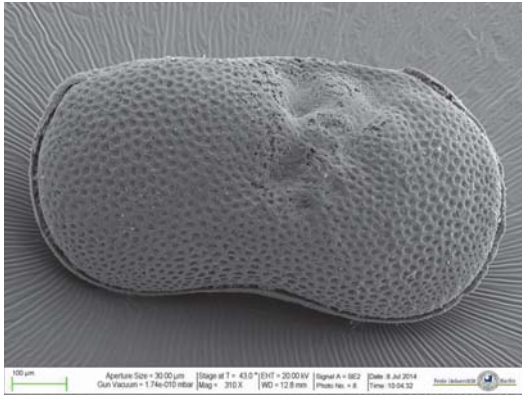


תצורת עקבה

תצורת עקבה

משקעים יבשתיים פלוביאליים ושל גופי מים מתוקים מכסים שטח נרחב מדרום לעקבה. עובי החתך בין 10 ל-110 מטר. תצורת עקבה בנויה מחילופין של גיר דטריטי בגוון ירוק, אבן חול אדומה דקת גרגר ובמקומות סילטי ושכבות של חלוקים (איור 3). כמו כן מצויות שכבות של סלע חרסיתי וסילטי אדום ובו תצבירי קרבונט שקוטרם עד 5"מ אחד. בחלק העליון של החתך ישנן שכבות דקות ושל גיר לבן בעובי של עד 10 ס"מ. סלעים אלו הוגדרו כתצורת עקבה ע"י Abbas (2014) ומתוארים גם ע"י Ginat et al (in preparation). בסלעים אלו נמצאו האוסטרקודים *Ilyocypris sp., Juvenile carapace (cpx)*

החברה הגיאולוגית הישראלית



carapace (cpx) *Ilyocypris* sp

carapace (juv cpx) *Candona neglecta* and shell fragments of *Ilyocypris* sp. אוסטרקודים אלו מעידים על השקעה במים ברקיים – מים מתוקים בסביבת השקעה של wetland. בתצורת עקבה לא נמצאו שכבות של גבס ומלח. על פי המאפיינים הליתולוגיים ניתן לקבוע שסלעי התצורה הושקעו השקעה קלסטית וביוגנית בסביבה של מים זורמים בשולי המפרץ בשלבים קדומים של התפתחותו.

Columnar section – South to Aqaba scale 1:100 1472/6681

Age	Fm.	Lithology	Thick. mtr.	Unit	Description	
			1+		Upper Conglomerate	
			1		Fine sand with thin layers of shales	
	Aqaba		2	6.4	Light green shales with 5cm. and thin carbonate layers	
			2	6.3	Shales with fine sand and silt. Black and gray colors around ghosts of roots	
			1.5	6.2	Green clay, evidence for root (5 cm. thickness). Many carbonate nodules (1 cm. diameter)	
			2	6.1	Green clay in the base and red in the top	
			4	5	Coarse sandstone with magmatic, mostly rounded, pebbles	
	The Red unit		2	4	Orange shales	
Pliocene?				5	3	Fine grain sandstone, mostly orange
				2	2	Coarse sand with pebbles, mostly rounded, only magmatic and metamorphic pebbles
				4	1	Yellow sandstone. Fine-medium grains. Evidence for root. Base not exposed

איור 4: חתך עמודי של תצורת עקבה

שכבות הגיר, הסלעים האדומים עם תצבירי הקרבונט והעדר שכבות של סלעי גבס ומלח מעידים על כך שהאקלים באזור בתקופה זו היה צחיח עד צחיח למחצה ולא צחיח קיצון כמו האקלים הנוכחי. לא נקבע גיל מוחלט של התצורה ואולם על פי יחסי השדה והמיקום של היחידה ניתן לשער שגילה פליוקן. סלעי תצורת עקבה דומים מאוד בהופעתם לסלעי תצורת אילות החשופים ליד העיר אילת (במיוחד בפרק הולנד ובסמוך לחוף הדקל) כפי שתוארו ע"י לסמן ולנגוצקי, 1961, גרפונקל, 1970 וגינת וחובריו 1994. גוף מים זה הינו אחד מ-11 גופי המים המתוקים והברקיים מגיל פליוקן ופלייסטוקן שנמצאו בדרום ישראל וירדן (איורים 4,5).

הקונגלומרט העליון

מעל ולצד סלעי תצורת עקבה מצוי קונגלומרט שעוביו עד 50 מטר. הקונגלומרט כולל שכבות של חלוקים מגמטים ושל אבני חול מבורזלות שקוטרם עד 30 ס"מ המלוכדות בעיקר ע"י גרגרי חול. בחלק התחתון של היחידה בעיקר גרגרי חול ומעט חלוקים. בחלק העליון חלוקים גדולים יותר ולרוב ת מעוגלים עד מעוגלים. בחלק העליון ביותר של הקונגלומרט חלוקים של סלעים מגמטים שקוטרם מגיע עד שני מטר ואף יותר.

סלעים אלו מכסים שטח שגודלו 20 קמ"ר וגו מפלס שטוח שגובהו עד 200 מטר מעל פני הים הנוכחיים. סלעים אלו הושקעו במערכות נחלים רחבות שזרמו ממזרח אל מפרץ אילת. הבולדרים המצויים בחלק העליון של הקונגלומרטים נסחפו מספר קילומטרים ע"י שטפונות חזקים ביותר. את גובהם המוחלט של הקונגלומרטים בהתאמה למפרץ אילת ניתן להסביר בעיקר ע"י העתקים שכיוונם צפון-דרום ופעילותם היתה בתקופות הפליוקן והפליסטוקן. כיום הזרימה ממוקדת לאורך ערוצים החתורים בתוך אבני החול האדומות, סלעי תצורת עקבה והקונגלומרט העליון. סלעי הקונגלומרט דומים לסלעי תצורת גרופ המצויים מהצד המערבי של המפרץ (גרפונקל, 1970, גינת וחובריו, 1994). גם בחלק העליון של תצורת גרופ מצויים בולדרים שקוטרם עד שלושה מטר והם הובלו בשטפונות על מרחקים של לפחות חמישה ק"מ.

טרסות של אלמוגים מאובנים

מדרום לעקבה נחשפות מספר טרסות מורמות של אלמוגים מתקופת הפליסטוקן וההולוקן (Al Raifai and Sherif, 1987, El Asmar, 1987, Shaked, 2002, לזר וחובריו, 2010 ואחרים). גובהן של הטרסות עד כדי 70 מטר מעל מפלס הים הנוכחי.

האלמוגים בונים שילדיהם מהמינרל הקרבונטי ארגוניט אשר קולט לתוכו יונים וקומפלקסים של יסודות קורט כמו סטרונציום, מגנזיום, בריום ואורניום המשמשים כעוקבים פליאוגיאוגרפים. יחסי הסטרונציום והאורניום ומאפשרים לתארך את גיל האלמוגים המאובנים. האלמוגים במקורם היו בנויים מארגוניט שרובו הוחלף לקלציט בתהליך דיאגנטי, ככל הנראה במגע עם מי תהום מתוקים. טרסות מורמות אחרות של אלמוגים מגיל פלייסטוקן מוכרות מחופי דרום חצי האי סיני (למשל באזור שארם א-שיח) ובאי טיראן (שם מורמות טרסות האלמוגים לגובה של כ-500 מטר מפני הים).

הריפים המורמים מייצגים תנועות טקטוניות לצד קו החוף. מיקום הטרסות והעובדה שבצד המערבי של המפרץ לא מצויים כלל ריפים מורמים אלא עד גובה של חמישה מטר מעל המפלס הנוכחי של הים (וייל 2008) הם עדות לכך שטרסות האלמוגים מצויות בגבהן הנוכחי בגלל פעילות טקטונית ולא בגלל שינויים במפלס הים.

החברה הגיאולוגית הישראלית

בטרסות הגבוהות ביותר חושב גיל השקעת האלמוג (המינימלי) ל-250 אלף שנה וגיל הדאגנזה ל-220 אלף שנה (לזר וחבריו, 2010). הדאגנזה לקלציט דורשת אינטראקציה עם מי תהום מתוקים שכשלעצמה מעידה על תקופה רטובה יותר במפרץ עקבה.

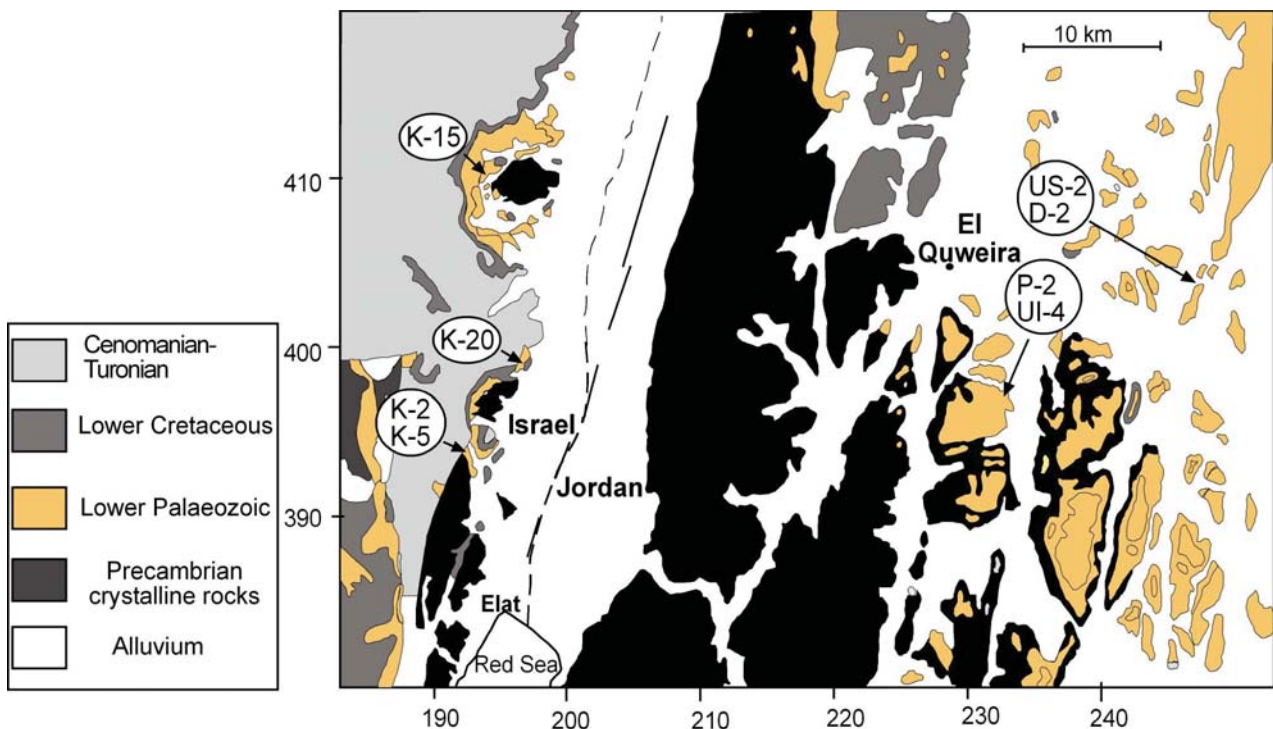
על גבי טרסה נמוכה יותר נמצאו אלמוגים הבנויים עדיין מארגוניט שגילם 120,000 שנה שעברו כנראה דאגנזה בסביבה ימית. סלעי החוף הבונים את משטח הריף ההולוקני בעקבה, וכן גם באזור תור ים שבאילת תוארכו ל 7,000 שנה ואף הם מעידים על פעילות של מי תהום מתוקים בשולי המפרץ. שתי התקופות הללו מוכרות כתקופות בין-קרחוניות ובעזרתן ניתן לקבוע שדווקא התקופות הבינקרחוניות היו לחות יותר, בהשוואה לאקלים הצחיח קיצון הקיים היום. טרסות האלמוגים הגבוהות מצויות במגע התאצבעות עם קונגלומרטים המצויים ממזרח להם. כנראה שבמהלך השקעתן זרמו, בדומה להיום, נחלים ממזרח אל מפרץ עקבה שמפלסו היה, באותן תקופות בינקרחוניות, כנראה דומה למפלס הים הנוכחי.

2. אבן חול נובית בדרום ישראל וירדן

(קרן קולודנר)

חתך של אבני חול מגיל פליאוזואיקון-מזוזואיקון הורבד בצפון אפריקה וערב לאחר סיום יצירת יבשת גונדוונה, בתום האורוגנזה הפאן-אפריקנית. החתך החולי (בעובי של 0.5-4 ק"מ) משתרע על פני אזור רחב ומקורו בבליה של סלעי תשתית יבשת גונדוונה. כיווני התנועה שתועדו באבני החול מצביעים על מקורות דרומיים כלשהם אך תפרוסת המחשופים של סלעי המקור אינה ידועה.

בדרום ישראל וירדן חשוף חתך של אבני חול אשר מונה ישירות על סלעי התשתית של המסיב הערבו-נובי (איור 7). בפרק הנוכחי יוצג שחזור תנועת החולות מגיל קמבריום-אורדוביק לכיוון צפון שולי יבשת גונדוונה בעזרת זיהוי סלעי המקור מהם נגזרו בשילוב עם מידע על השינויים הפליאוגאוגרפיים שהתרחשו בתקופה זו. איפיון סלעי המקור נעשה ע"י גילי אורנים-עופרת (U/Pb) של גרגרי זירקון דטריטיים, מגמטיים ומטמורפיים המצויים בחתך הסדימנטרי החולי בדרום ישראל וירדן.



איור 7: מפה גיאולוגית של דרום ישראל וירדן, עם אתרי הדיגום ומספרי הדוגמאות שנבדקו

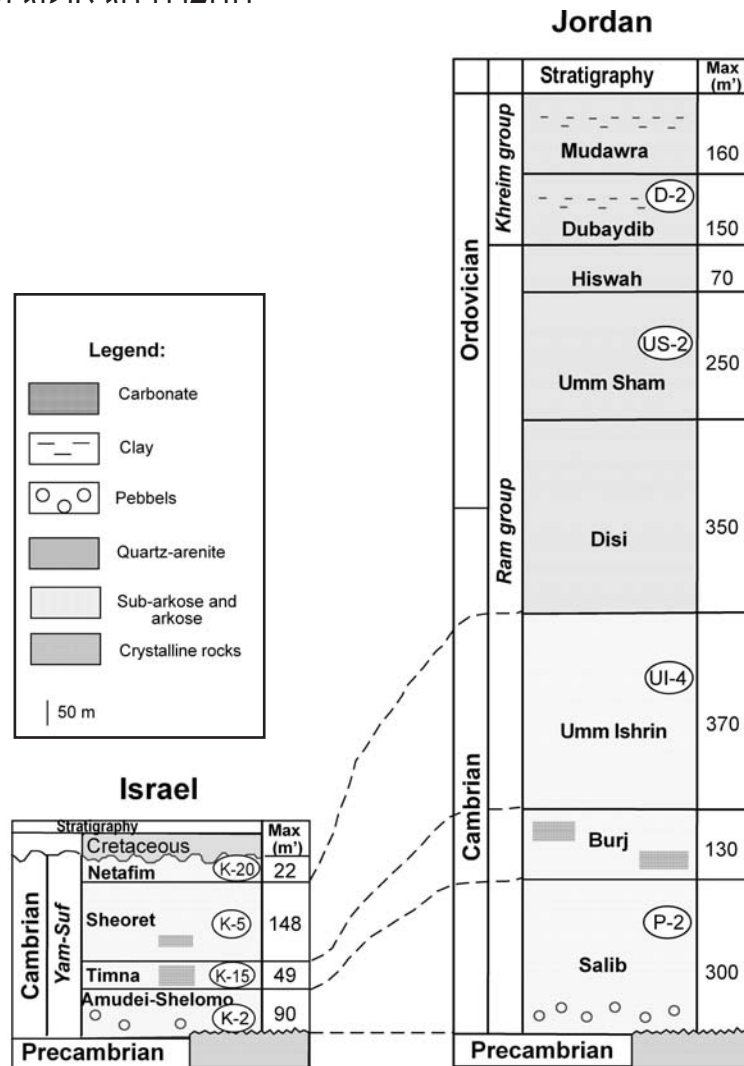
החתך הסדימנטרי מגיל קמבריום-אורדוביק

החתך הסדימנטרי מגיל קמבריום-אורדוביק בנוי מאבני חול בוגרות הכוללות מינרלים כבדים: גרגרי רוטיל, זירקון וטורמלין, קבוצה המכונה ZTR. הנוכחות הגבוהה של קבוצה זו בחתך אבני החול מעידה כי החלקיקים שבונה את האבני החול עברו גלגולים רבים בטרם הורבדו באגן סדימנטרי.

החתך הקמברי בישראל חשוף באזור אילת וכולל סלעים מגיל קמבריום אשר עליהם מונחות באי התאמה תצורות צעירות מגיל קרטיקון. חבורת ים סוף כוללת ארבע תצורות: עמודי שלמה, תמנע, שחורת ונטפים (איור 8). תצורת עמודי שלמה מורכבת בד"כ מארקוזות בינוניות עד גסות גרגר עם גרגרים בעלי שוליים תת מזוותיים (subangular). בבסיס התצורה מופיעה שכבת קונגלומרט ובה חלוקים של סלעים מגמטים ומטמורפים הכוללת גם חלוקי קוורץ המכונים "ביצי קוורץ". תצורת תמנע בנויה משילוב של אבני חול סבארקוזיות ופציאס קרבונטי. מעל מונחת תצורת שחורת אשר בנויה משתי יחידות: בחלק התחתון סלעי סילט (siltstone) וחוארים לחילופין עם סבארקוזות דקות עד גסות גרגר ומעליהם שכבה עבה והומוגנית של סבארקוזות דקות גרגר. התצורה העליונה בחתך הקמברי היא תצורת נטפים אשר בנויה מקוורץ-ארניט דק גרגר ממוין היטב לחילופין עם שכבות של סילט וחרסית מלוכדת. התצורה גדועה בחלק העליון.

החתך הקמברו-אורדוביקי בירדן

רצועת ההשתרעות של החתך הקמברי במזרח בקע ים המלח משתרעת מירדן עד לערב הסעודית ואורכה כ-500 ק"מ, רצועת החתך האורדוביקי נמשכת דרומה יותר ובמקומות מונחת באי התאמה ישירות על סלעי התשתית. החתך הפליאוזואי בירדן כולל סלעים מגיל קמבריום-אורדוביק תחתון של תצורת רם וסלעים מגיל אורדוביק עליון-סילור של תצורת קריין (Khrein). להלן תיאורם מלמטה למעלה: חבורת רם כוללת את תצורת סליב (Salib) - ארקוזות גסות גרגר ושכבת קונגלומרט, תצורת בורג' (Burj) בנויה מסבארקוזות ממוצא ימי ובהם שכבות של דולומיט וחוארים, תצורת אום-אישרין (Umm-Ishrin) בנויה מקוורץ ארניט ואת חלקה התחתון של תצורת דיסי (Disi) הבנויה מקוורץ ארניט. החתך מגיל אורדוביק תחתון מורכב מהחלק העליון של תצורת דיזי ומתצורת אום סם (Umm-Sahm). החתך מגיל אורדוביק עליון כולל שלוש תצורות הבנויות מאבני חול בוגרות: הישוואה (Hiswah), דוביידיב (Dubaydib) וחלק התחתון של תצורת מודווארה (Mudawwara).



איור 8: חתכים עמודיים של היחידות מגיל קמבריום ואורדוביק בדרום ישראל וירדן. על גבי החתכים מופיעים קווי קורלציה ומספרי דוגמאות שנבדקו.

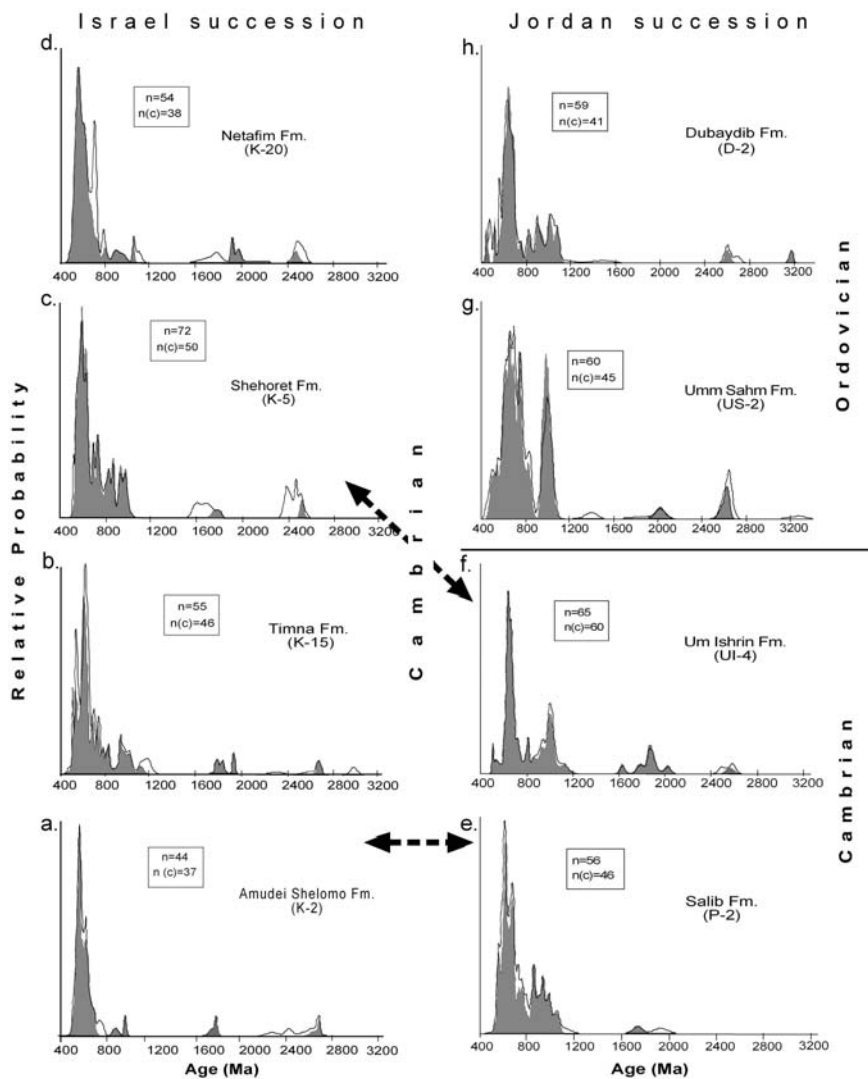
באיור 7 מוצג מיקומן של 8 דוגמאות שנבדקו: 4 דוגמאות מהחתך הקמברי בישראל, 2 מהחתך הקמברי בירדן ו-2 מהחתך האורדוביקי בדרום ירדן ובאיור 8 מוצגת החלוקה הסטרטיגרפית והקורלציה בין החתך בישראל לזה שבירדן.

480 גילי U-PB נמדדו בגרגרי זירקון משמונת הדוגמאות. במרבית גרגרי הזירקון נמדדו גילי U-Pb קונקורדיים בטווח שבין 530-900 מ"ש (גילי האורוגן הפאן-אפריקני), מרביתם בטווח שבין 550-650 מ"ש. באוכלוסיית הגרגרים נמצאו גם גילים קונקורדיים עתיקים מגילי האורוגן הפאן-אפריקני, המתקבצים בגרף הסתברות בטווח שבין 2.6-2.7, 1.8-1.9 ו-0.95-1.1 ב.ש. (איור 9). היחידות התחתונות בחתך הסדימנטרי בישראל (תצורת עמודי שלמה) וירדן (תצורת סליב) בנויות מארקוזות וסב-ארקוזות גסות גרגר שנגזרו ממקור לא רחוק. נמצא כי יותר מ-80% מאוכלוסיית גרגרי הזירקון

החברה הגיאולוגית הישראלית

שלהן היא מגיל האורוגן הפאן-אפריקני ומרבית הגרנים בעלי צורה אאוהדרלית. אפיונים אלו מלמדים על הסעה ממקור לא רחוק, ככל הנראה מסלעי המסיב הערבו-נובי. בחלק העליון של החתך כמות הגרנים העתיקים (קדומים לפאן-אפריקן) גבוהה יותר (עד 35%) ומכאן שנוספה תרומה ממקורות דרומיים רחוקים יותר, כמו למשל מהמדבר הדרום-מערבי במצרים, מאזור Afif בערב הסעודית או מהר Uweinat. החתך הירדני נבדל מהחתך הישראלי בכך שכולל כמות גדולה יותר של גרנים מקבוצת הגיל 0.95-1.1 ב.ש. (Kibaran). המחשוף הקרוב ביותר שכולל גרנים מגיל Kibaran נמצא כ-4000 ק"מ מאזור החתך בירדן וישראל. ברם, גודלם וצורתם האאוהדרלית של הזירקונים מגיל זה וכן נוכחותם בבסיס החתך אינם תומכים בהסעת הסדימנט על פני מרחק כה רב. מוצע שההתפלגות השונה של גילי

הזירקונים במעלה החתך הפליאוזואי מציינת את נדידת מקורות אבני החול עם הזמן כלפי דרום, בד בבד עם התפשטות הכיסוי הסדימנטרי במהלך תקופת הקמבריום והאורדוביק.



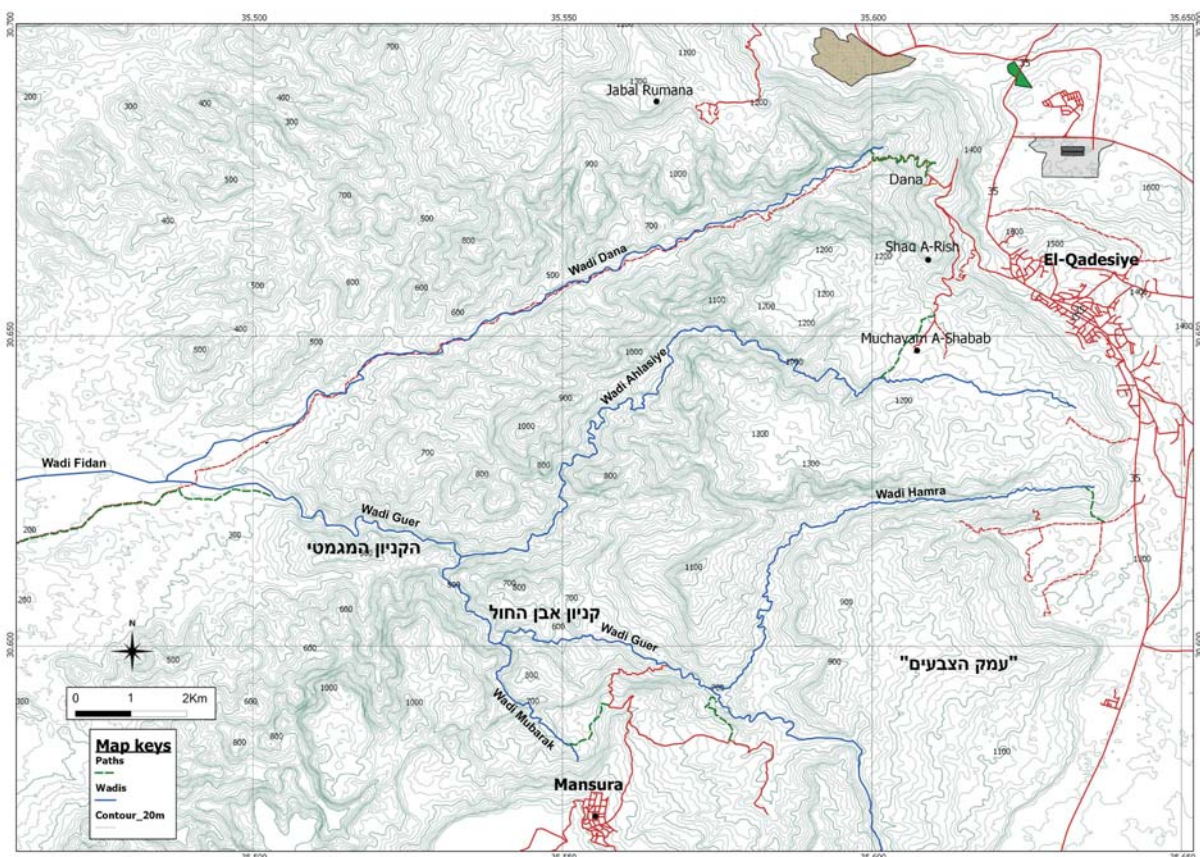
איור 9: עקומות היסטוגרמה של גילי U-Pb בזירקון בדוגמאות החול שנבדקו.

3. סיור בואדי ע'וויר, מחוז טפילה, ירדן

(בועז לנגפורד ויואב אבני)

ואדי ע'וויר (אנגלית: Wadi Guer ערבית: وادي غوير) הינו ערוץ גדול היורד מקו פרשת המים של הרי אדום ומזרחה עד בקעת פינן-גרגרה (איור 10). ערוציו העליונים של הנחל מנקזים שטח נרחב בין אזור דנה בצפון ואזור שובק בדרום. ערוצו העליון הצפוני ביותר הוא ואדי א-סד היורד ממורדותיו הדרומיים של ג'בל עטעטה (1636 מ') שמצפון-מזרח לדנא. ערוציו העליונים הדרומיים הם ואדי אל-בסטן וואדי אל-מקרעיה אשר מנקזים את תא השטח שמצפון לשובך וממערב לדרך המלך. מנקודת החיבור בין ואדי אל-בסטן וואדי א-סד נקרא הערוץ ואדי ע'וויר. במורד הנחל מתחברים אליו שני יובלים משמעותיים. אחד הוא ואדי דת'נת (מכונה גם ואדי חמם) והשני הוא ואדי דנא. מקטע הנחל שבין ערוצים אלו נקרא ואדי פינן ואילו מקטע הנחל שלאחר החיבור עם ואדי דנא נקרא ואדי פידאן.

אורך הנחל, מראש ערוצו העליון (הצפוני) ועד קצהו, כ-35 ק"מ, בהם הנחל יורד גובה אנכי של כ-1300 מ'. במהלך ירידתו נחשפות בערוץ הנחל מספר יחידות סלע המכתיבות את אופיו. ערוציו העליונים של הנחל יורדים באזור תלול המורכב מסלעי משקע שונים (מפורט בהמשך, תחנת התצפית). במהלך ירידתו מתחתר הנחל באבני-חול בהם הוא יורד בנקיקים ארוכים. מנקודת החיבור עם ואדי דת'נת חוצה הנחל העתק בולט הגורם לחשיפתם של סלעים מגמטים כהים, בהם מתחתר הנחל בקניון עמוק אך פתוח המסתיים בנקודת החיבור עם ואדי דנא.



איור 10: מפה טופוגרפית של הוואדיות ע'וויר ודנה וסביבתם הקרובה



ואדי ע'וויר לאורך קו ההעתק

לאורך רוב חלקי הנחל, ובעיקר בחלקיו התחתונים, זורם פלג מים קבוע שמקורו במעיינות רבים הפורצים בעיקר מאקוויפר אבני החול של תצורת אום עשרין.

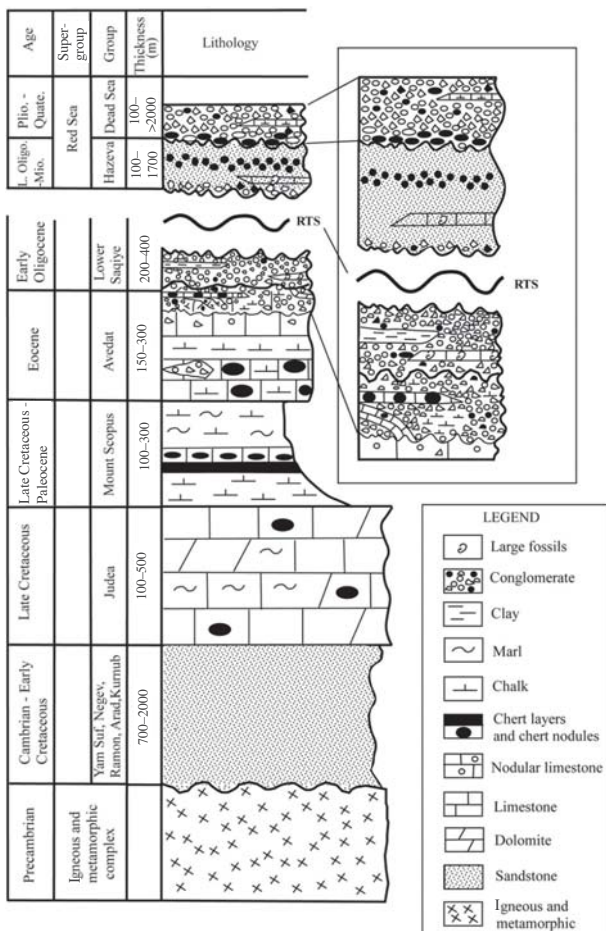
תצפית אל-מקרעייה – מונסורה:

הכפרים אל מקרעייה ומונסורה נבנו בצידו הדרומי של ראש ואדי ע'וויר. מהכביש המחבר בין הכפרים ניתן לתצפת אל ערוציו העליונים של הנחל אשר חורצים חתך הגיאולוגי הבנוי מכמה יחידות סלע מגיל איאוקן, אוליגוקן ומיוקן והמכסים טווחי זמן שבין כ- 50 מיליון שנה ועד לכ- 6 מיליון שנה לפני זמננו (איור 11). החתך בנוי מסלעי תצורת אום ריג'ם מגיל איאוקן תחתון, הבנויים מקירטון עם עדשות צור העובר במעלה החתך לסלעי גיר קירטוני עשיר בתרכיזי גיר גדולים דמויי בולבוסים. בחתך זה נפוצות תופעות של גלישות קדומות, תת ימיות, של קטעי חתך שלמים, שיוצרות הפרעות לשיכוב. תופעות תוך-פורמציונאליות איאוקניות כאלה פרושות על שטחים נרחבים במזרח התיכון והם מהווים מופע ליתולוגי מיוחד הנפוץ בחתך האיאוקני. מחשופים כאלה פורשו בעבר על ידי חוקרים שונים כקונגלומרט יבשתי מגיל מיוקן מוקדם. אנו מכנים תופעות אלה בשם "הקלסטים של תמד" (על שם מחשופים נרחבים של המופע הזה בסמוך לדרך עולי הרגל ולעיירה תמד במזרח סיני).

חתך תצורת אום ריג'ם אינו שלם באזור זה והוא גדוע באי התאמה ארוזיבית. מעל למישור אי ההתאמה מונח קונגלומרט של חלוקי גיר שניגזרו בעיקר מסלעים איאוקניים המהווה את בסיס החתך האוליגוקני של ואדי בוסתן וערוצי הע'וויר העליונים. החלוקים מלוכדים זה לזה על ידי גיר אגמי. החתך היבשתי – אגמי נמשך כלפי מעלה כשבו משולבים גירים אגמיים, אבני חול הבנויות מגרגירי גיר לבנים-צהובים

החברה הגיאולוגית הישראלית

ושכבות של חרסית אדומה. שילוב שכבות זה (המתחלף לסירוגין), יחד עם עוביו הגדול של החתך (העומד על כמה מאות מטרים), מקנה לאזור את צבעיו המגוונים. חתך זה שגילו אוליגוקן (23-34 מיליון שנים לפני זמנינו) מהווה חלק מסדרת מחשופים המוכרים מדרום ירדן (כמו באזור ע'רנדל ולאורך מזרח הערבה). עיקר החתך במחשופים אלה בנוי מקונגלומרט יבשתי ושכבות של חוואר וגיר אגמי והוא מכונה "קונגלומרט מהתרדי" על שם מחשוף גדול בערבה הדרומית בסמוך לג'בל מהתרדי. החתך מסתיים באי התאמה נוספת בעלת השתרעות נרחבת במזרח התיכון שמעליה מונה חתך הבנוי מיחידות עבות של קונגלומרט המכיל מגוון רחב של חלוקי גיר, צור ואבן חול שנגזרו מחתך הסלעים העבה והמגוון הבונה את דרום ירדן. חתך זה מכיל גם שכבות של חול וחרסית והוא שקע בתקופת המיוקן המוקדם במקביל לשקיעת תצורת הצבה בדרום ישראל. גג החתך המיוקני גדוע וחסר ועליו נשפכה בתקופת המיוקן העליון (6-8 מיליון שנים לפני זמנינו) שכבת בזלת שנבעה מהרי געש המצויים בסמוך לוואדי בוסתן, בעיקר באזור ג'בל עטעטה. שמירת החתך המיוחד הזה בערוציו העליונים של ואדי ע'וויר התרחשה כתוצאה משקיעת גרבת גדול המשתרע בין דנה ושובך שהתפתח לאורך שברים שכיוונם מזרח-מערב המהווים את המשכה המזרחי של מערכת שברי הרוחב המוכרת מדרום ישראל. החתך מגיל איאוקן - מיוקן תחתון שבתוך הגרבת נטוי בשיעור 20-30 מעלות למזרח. הטיה זו התרחשה לפני שפיכת הבזלת במיוקן המאוחר



איור 11: חתך עמודי כולל, בדגש יחידות הסלע היבשתיים מהאוליגוקן ועד היום (Avni et al., 2012)

שהיא כמעט אופקית, עם נטיה קלה למזרח. נטיה קלה זו התפתחה מאוחר להשקעת הבזלת, ככל הנראה בתקופת הפליוקן. בתקופה זו (2.6-5 מיליון שנה לפני זמנינו) החלה בכל האזור התפתחות אגני הניקוז במתווה המוכר לנו היום, בדגש על התחתרות ניכרת של מערכות הניקוז היורדות אל בקע הערבה שבמערב אגב יצירת קניונים עמוקים, ובכלל זה גם בואדי ע'וויר. במקביל התחתרה באופן מתון מערכת הנחלים הזורמת מזרחה על גב הבזלת הנטויה והיא מתכנסת אל אגן ג'פר - אגן ניקוז פנימי שאכלס מקווי מים ואגמים החל מתקופת הפליוקן ועד לפלייסטוקן העליון.

מסלול ירידה בואדי ע'וויר:

את מסלול ההליכה בואדי ע'וויר ניתן להתחיל סמוך לחיבורם של ערוצי הנחל העליונים (4). באזור זה נמשך הנחל כערוץ זורם לסירוגין, החתור בנוף הררי-מתון הבנוי מסלעי משקע ימיים מגיל איאוקן.

החברה הגיאולוגית הישראלית

בגדות הנחל גדלות חלקות מפותחות של עגבניות המושקות על ידי צינורות פלסטיק, הנמשכים כבר מחלקיו העליונים של הנחל. מנקודה חיבור הערוצים ניתן לעלות כשעתיים במעלה ואדי אל בוסתן, עד לנזיק גירני הנחסם ע"י מפל גבוה (כ-25 מ') שבו זורמים מים קרים (הנזיק מכונה סד אל-רולה).

ירידה מחיבור הערוצים עוברת בנוף דומה, המאופיין במעוקים קצרים החתורים בסלעי משקע ימיים. בגדות המעוקים פעורים צנירים רחבים אשר מתקרתם מטפטפים מעיינות קטנים בעלי שפיעה מעטה. סלעי מפולת גדולים הפזורים באפיק, יוצרים בו מפלונים נמוכים שאינם מקשים על ההתקדמות. כ-2.5 ק"מ לאחר תחילת הירידה בנחל נחשפות בו שכבות של אבן חול בהירה של תצורת דיסי. במקטע זה הנחל מתחת במעוק רחב בו פזורים סלעי מפולת גדולים היוצרים גשרי סלע טבעיים ומפלים נמוכים. כחצי ק"מ לאחר הופעת אבני החול מתחת הנחל בשכבת אבן חול כהה (תצורת אום עשרין) בה מצר האפיק לכדי נזיק צר ועמוק הנמשך בפיתולים עדינים. במהלך התקדמות האפיק מופיע בו פלג מים חלש המתחזק עם הגעה למעיינות שבמורד הערוץ. כמה מאות מטרים לאחר תחילתו יורד הנזיק במפל נמוך (כ-3 מ') בו ישנה זרימת מים קבועה. מול המפל, בגובה קירות הנזיק, ישנו סלע ענק התקוע בין שמים לארץ. יש ובין המפל לסלע התקוע מופיעה בריכה מוארכת המציפה את כל רוחב הנזיק. עומק הבריכה ועצם קיומה משתנה בהתאם לשיטפונות הפוקדים את הנחל ויש שנים בהן חציית הבריכה אפשרית בשחייה בלבד.

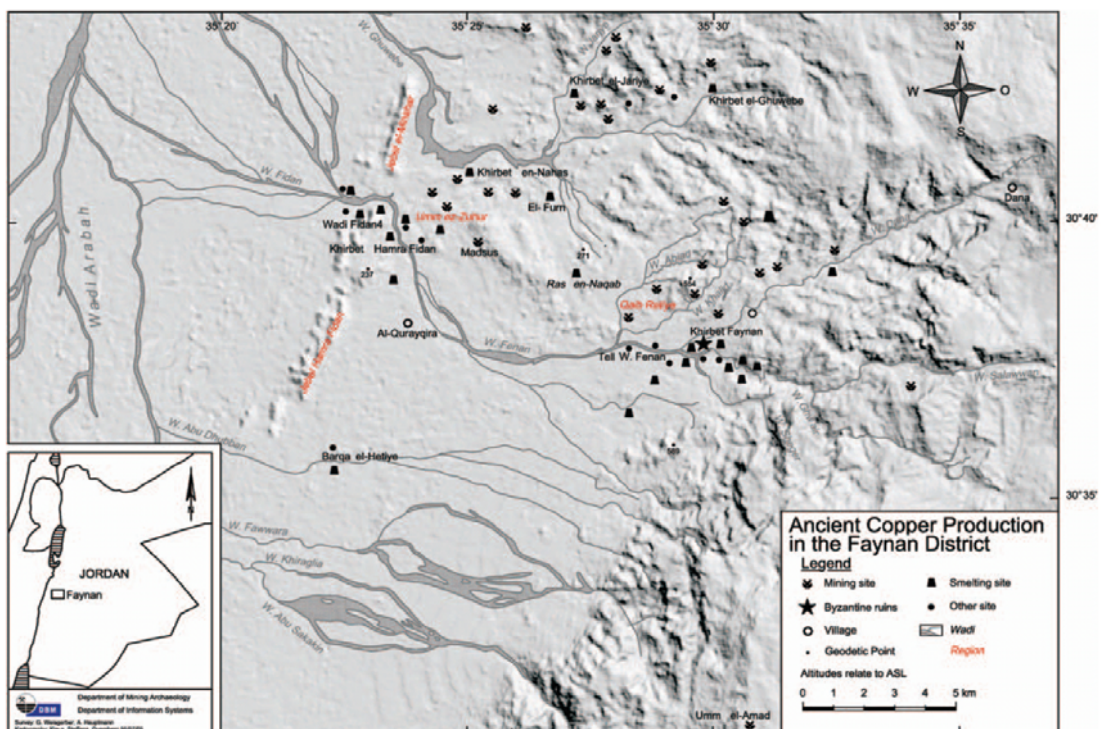
לאחר הבריכה נמשך הנזיק כשבאפיקו עובר פלג מים קבוע. בשונה מקירותיו החשופים של ראש הנזיק, במקטע זה מתכסים הקירות בצמחיה עשירה של "גנים תלויים". מרשימים במיוחד הם דקלים הגדלים מצידו האחד של הנזיק, בגובה קירותיו, ושולחים גזע אל צידו האחר. מיד לאחר אזור הדקלים מתרחב מעט הנזיק, אשר נמשך מנקודה זו כמעוק עמוק וצר. בנקודת התרחבות, סמוך לדקלים, מתחבר אל הנחל משמאל (דרום) ערוצו הדרמטי של ואדי אום-בארכ. בנקודת החיבור ישנו מפל זורם שמעליו נראה נזיק צר. מעיינות רבים פורצים מקירות המעוק ומצטרפים אל פלג מי הנחל, בו נקוות בריכות מים רדודות שנוצרו בחלקן על ידי סכרים מאולתרים. כמה מאות מטרים לאחר התרחבות הנזיק מתחבר אל הנחל ערוץ גדול מימין ובו זורמים מים טובים – ואדי דת'נת. ערוץ זה התחתר לאורך העתק המעמיד מסלע מגמטי כהה אל מול אבני חול כהות. קיר המעוק שבצידו הימני של הנחל, סמוך לחיבור הנחלים, מעוטר בצמחייה עשירה. בנקודה זו עוזב הנחל את תחום אבני החול ונמשך בפיתולים רחבים כשהוא חתור בסלע מגמטי כהה. גדות הנחל תלולת אך אינן מצוקיות ועליהן גדלים פרטים רבים של עצי שיזף ומורינגה רותמית. כ-3 ק"מ לאחר הופעת הסלעים המגמטיים מתרחב מאד אפיק הנחל ונשפך אל בקעת פינן-גררה. בנקודת ההתרחבות ניצב סכר בטון הרוס ששימש בעבר כמתקן לאיסוף מי הנחל. כיום מי הנחל מובילים אל בקעת פינן על ידי צינורות פלסטיק שחורים הפרושים לאורך חלקו התחתון. כ-1.5 ק"מ לאחר התרחבותו, מתחבר הערוץ עם ערוצו הגדול של ואדי דנא. צמד הנחלים נשפכים לערבה בערוץ ענק הנקרא ואדי פידאן. סמוך לחיבור הנחלים מתנשא תל גבוה, הלא הוא תל פונון (פינן) המפורסם.

4. ארץ אשר הרריה נחושת: פינאן (פונן) בירדן

(ארז בן יוסף)

אזור פינאן שבשיפולי צפון הרי אדום (מנגד למושב הצבה) ידוע בעיקר בשל היותו מקור חשוב לנחושת בתקופות הקדומות. כמו בתמנע שבדרום הערבה, גם כאן חשופים סלעים המכילים מינרלי נחושת מהם הופקה המתכת לאורך אלפי שנים. ניצול הנחושת הטבעית השאיר אחריו מאות אתרים ארכיאולוגיים של כרייה והתכה שמהווים את אחת העדויות השמורות והמרשימות ביותר בעולם להתפתחות טכנולוגיות מטלורגיות. בשילוב עם הנוף הפראי ונאות המדבר, אזור פינאן מציע יעד מרתק לביקור, כולל מסלולים רכובים ורגליים.

אזור מרבצי הנחושת והאתרים הנלווים של פינאן משתרע על פני יותר מ- 300 קמ"ר; הוא תחום בצפון באגן ואדי דח'ל, בדרום במוצאו של ואדי פייד לערבה, במערב בערבה עצמה ובמזרח בשיפולים התלולים של הרי אדום (ראה מפה). האזור מבותר בסדרה של העתקים גיאולוגיים המעלים ומורידים חלקים שונים של הקרום ובכך יוצרים פסיפס מרהיב של סלעים מתצורות גיאולוגיות שונות. בחלקו המערבי של אזור פינאן נמצא רכס חמרה-איפדאן, מחשוף סלעי תשתית (הורסט) מוארך בכיוון צפון דרום היוצר הפרדה טבעית בין העמקים הפנימיים והערבה. את הרכס חוצה במרכזו ואדי פידאן, המשכו התחתון של ואדי פינאן (שבעצמו מנקז את הואדיות הגדולים דנא וע'וויר). מוצא ואדי פידאן אל הערבה הוא שער כניסה טבעי לחבל הארץ ממערב, ובהתאם לכך נמצאים שם אתרים חשובים מתקופות שונות, כולל אתרים



איור 12: מפת נקודות מפתח של אתרי נחושת באזור פינאן

החברה הגיאולוגית הישראלית

שנועדו לשלוט על המעבר ולווסת את תנועת העוברים והשבים. במרכז האזור, במפגש הוודיות ע'וויר ודנא, נמצא האתר הגדול ביותר במרחב – תל ח'רבת פינאן. אתר עצום זה, הבנוי שכבות יישוב מתקופות רבות, מזוהה עם פונן המקראית (במדבר לג:מב-מג) ועם פֵאִינו הרומית-ביזנטית. האתר נתן את השם למרחב כולו, ומיקומו המרכזי הופך אותו לנקודת מפתח בטיול באזור.

אזור פינאן נמצא בתחום אקלים מדברי קיצוני, כ-1000 מטרים נמוך יותר מהרצועה האקלימית הנוחה של שולי במת דרום עבר הירדן, ועם כמות משקעים נמוכה ביותר (פחות מ-80 מ"מ גשם בממוצע שנתי). יחד עם זאת, האזור מנוקד בנאות מדבר רבות, כולל המעיינות ע'וויבה, פידאן ובוורדה, והמים הזורמים במוצאו של ואדי ע'וויר הניזונים ממעיינות בכל ימות השנה. תנאים אלו אפשרו יישוב עשיר יחסית בתקופות הקדומות, ואף קיום חקלאות בקנה מידה משתנה לאורך הוודיות. עובדה זו, ביחד עם הקרבה היחסית לעורף חקלאי עשיר, היא כנראה המקור העיקרי לכך שהפעילות האנושית במכרות פינאן הייתה לפחות בסדר גודל יותר עוצמתית ממקבילתה הדרומית בתמנע.

נוסעים וחוקרים ראשונים

הממצא הבולט ביותר בנוף הארכיאולוגי של מרחב פינאן הוא סיגי הנחושת. הסיגים, פסולת תעשיית הנחושת, הם למעשה המינרלים והסלעים המותכים אחרי שמוצתה מהם המתכת ואחרי שהתקררו והתמצקו למעין "סלע מלאכותי" הנראה כבזלת. אלו בולטים מאוד בנוף ומאפשרים לזהות אתרי הפקה קדומים ממרחק רב. עד כדי כך הסיגים נוכחים בשטח, שעל פי הידוע לנו, פינאן הוא האתר הראשון בעולם בו מתוארים סיגים במפות עתיקות: הם מופיעים במפה של בורגניון ד'אנוויל (Bourguignon d'Anville) מ-1732 (שם, בלטינית, *Aeris Fodinae*). המפה מצביעה על כך שהאתר המרכזי תל ח'רבת פינאן היה מוכר לנוסעים שעברו באזור במשך מאות שנים. על אתרים אחרים אנחנו שומעים רק משלהי המאה ה-19. משלחתו של קיצ'נר מהקרן הבריטית לחקירות ארץ ישראל שעברה לאורך השוליים המזרחיים של הערבה ב-1883 בדרכה מעקבה לים המלח, מדווחת לראשונה על אתר הפקת נחושת גדול בצפון האזור. בחינה מדוקדקת של תיאורי המשלחת הראתה שמדובר בגילוי הראשון של ח'רבת אל-ג'אריה, חורבה קסומה החבויה בעמק פנימי, שתתגלה מחדש כעבור כחמישים שנה על ידי הארכיאולוג גליק. בין משלחת הקרן הבריטית לסקרים של גלסון גליק עברו באזור, בין השאר, החוקר הצ'כי אלויס מוסיל (1898) והגרמני פריץ פרנק (1932/3), שתיעדו אתרים רבים וביניהם האתר הענק של ח'רבת אנ-נחאס ("חורבות הנחושת") באגנו של ואדי אל-ע'וויבה. ואולם, על אף תיעוד קפדני של השרידים, לא ניתן היה לאמוד את גיל האתרים עד לעבודתו של גלסון גליק שבחן את החרסים הפזורים בין ערימות הסיגים. גליק שיער שכמו באזור תמנע בדרום הערבה, שיא הפעילות בפינאן היה בימי המלך שלמה, כלומר בתקופת הברזל ב' (המאה ה-10 לפנה"ס). מאז קביעתו זו של גליק בשנות ה-30 של המאה ה-20 שהיוותה את הרקע לייחוס העדות הארכיאולוגית בערבה ל"מכרות המלך שלמה",

החברה הגיאולוגית הישראלית

המחקר עבר תהפוכות רבות מכיוונים רבים: מצד אחד תיארוך האתרים בפניאן השתנה יותר מפעם אחת כמו גם פרשנות הממצא הארכיאולוגי והקשרו החברתי-היסטורי, ומצד שני מחקר ביקורת המקרא העלה ספק לגבי תקפות הגרעין ההיסטורי בתיאורי ימי דוד ושלמה, ואף לגבי עצם קיומם של דמויות אלו בבמת ההיסטוריה.

מחקר מודרני

למעט האנס קינד ותום רייקס שעבדו באזור בשנות ה-60 וה-70, רק החל משנות ה-80 של המאה הקודמת משך אזור פינאן והארכיאולוגיה העשירה שבו קבוצות מחקר גדולות שניהלו מחקרים בעלי אופי מגוון. משלחת של מוזיאון המכרות הגרמני בבוכום (בראשותו של א' אנדראס האופטמאן) הובילה מחקר בן יותר מ-10 שנים בו תועדו באופן שיטתי האתרים הקשורים בתעשיית המתכת הקדומה, כולל המכרות עצמם, והושגו תובנות רבות לגבי רצף ההתפתחות הטכנולוגית מראשית הכרייה באזור ועד התקופה המוסלמית המאוחרת. קבוצות מחקר של המרכז הבריטי לחקר הלבנט הובילו סקרים בתל ח'רבת פינאן וסביבתו, כולל בדיקה שיטתית של מערכת שדות עתיקה בעמק ואדי פינאן וחפירות בדיקה קטנות באתרים באזור. בחמש עשרה השנים האחרונות מתנהל פרויקט של אוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו (בראשותו של תום לוי ומוחמד נג'אר) במרחבים המערבי והצפוני של האזור, תוך דגש על הבנת החברות הקדומות שעסקו בתעשיית הנחושת, הערכת מורכבותן וניתוח תהליכים חברתיים שהובילו לתעשייה מתקדמת או שהונעו מכורך העיסוק בתעשיית המתכת. מחקר זה, שלווה בעבודת מעבדה רחבת היקף לבדיקות טכנולוגיות ולבדיקות תיארוך, הביא לביסוס הכרונולוגיה של אתרי המפתח באזור, כולל אתרי תקופת הברזל שהיו שנויים במחלוקת מאז שנלסון גליק תיארך אותם לימי המלך שלמה. מסתבר שגליק צדק. עשרות רבות של תאריכי פחמן 14 מאתרים רבים הראו כי תקופת השיא של הפקת הנחושת באזור פינאן אכן הייתה בסביבות המאה ה-10 לפנה"ס. יותר ממאה אלף טונות של סיגים שמייצגים ייצור של אלפי טונות נחושת, מתוארכים כיום לתקופת הברזל, ובעיקר למאות 11 – 9 לפנה"ס. תיארוך זה כולל את אתר ההפקה הענק של ח'רבת אנ-נחאס, בו מעל 100 דונם של שרידים ארכיאולוגיים הכוללים מצודה ומבני מנהל מסיביים. ואולם, על אף שהתאריכים מקבילים לימי דוד ושלמה, העדות הארכיאולוגית מצביעה על החברה המקומית כזו שהפעילה את המכרות, וקשר ישיר לירושלים טרם נמצא.

מאות אתרים, אלפי שנות היסטוריה

על אף שכעת ידוע לנו ששיא ההפקה אכן היה בתקופת הברזל, כריית נחושת באזור פינאן התרחשה במשך אלפי שנים. למעשה, עוד לפני שהאדם ידע להפיק מתכת מהסלעים, מרבצי המינרלים נכרו כחומר גלם לתעשיית חרוזים ותכשיטים אחרים פשוט בשל צבעם הירוק/כחול הייחודי. תעשיות חרוזים ירוקים בקנה מידה גדול ידועים לנו מאתרים רבים מהניאולית הקדם קרמי ב', ותעשיות בקנה מידה קטן יותר

החברה הגיאולוגית הישראלית

מוכרים לנו מתקופות קדומות עוד יותר (כולל הנאטופית). מחקרים שונים מראים שמקור חלק גדול מהמינרלים הוא אכן במרבצי הערבה, אבחנה שמתיישבת גם עם מציאותם של יישובים ניאוליתיים גדולים באזור פינאן. אתרי ענק מתקופה זו נמצאים באגן ואדי פינאן (לאורך ואדי ע'וויר – ואדי פינאן – ואדי פידאן), וכוללים אתרים שנחפרו במשך עונות רבות (ואדי ע'וויר 1, תל תיפדאן), ואתרים פחות מוכרים כמו תל פינאן וואדי פידאן 61. מיקום האתרים קשור ככל הנראה במים – גם היום זורמים מים בואדי ע'וויר במשך כל ימות השנה, אבל ככל הנראה תנאי האקלים בניהולית היו נוחים יותר וכמות המים רבה עוד יותר.

התקופה הכלקוליתית (תקופת "הנחושת-אבן", 3,500 – 4,500 לפנה"ס) היא התקופה הראשונה בה ישנה עדות להפקת מתכת, אך ההתכה עצמה לא התרחשה בפינאן. מהמכרות בערבה נלקח הבצר לאתרי היישוב בצפון הנגב ובמקומות נוספים, ושם, בסדנאות של חרשים מומחים, הופקה הנחושת ויוצרו הכלים. מערכת זו הצריכה שינוע של חומר טפל למרחקים ארוכים, ולא הייתה יעילה במיוחד. ואכן, למן התקופה הבאה, תקופת הברונזה, הופקה הנחושת בצמוד למכרות ורק התוצר הסופי של תהליך ההתכה – המטילים – עבר במסחר ליעדיו השונים. תקופת הברונזה הקדומה מתאפיינת בעשרות אתרי כבשנים הממוקמים על ראשי גבעות. כבשנים אלו ניצלו את הרוח לפעולתם, והיו בעלי מבנה מיוחד שניצל את הרוח המערבית החזקה להגברת הטמפרטורה ויצירה יעילה של הפרדת המתכת מהמינרלים, תוך יצירת סיגים. אלו נשפכו על המדרון ונראים למרחוק ככתמים שחורים המנקדים את ראשי הגבעות. בבחינה מקרוב של אתרים אלו, ניתן לזהות את שרידי הכבשנים הבנויים טין צרוף, וגם שרידים רבים של גדילי טין בצורת אצבעות ("lady fingers") שהיו חלק מתשתית הכבשן המקורית.

לאחר הפסקה של כמה מאות שנים במהלך תקופת הברונזה התיכונה והמאוחרת, בהן ככל הנראה קפריסין החזיקה מונופול חזק על המסחר במתכת הנחשקת, חודש ייצור הנחושת במלוא הכוח בתקופת הברזל. החברות המקומיות, ככל הנראה הגרעין הקדום של ממלכת אדום המקראית, ניצלו הזדמנות היסטורית של משבר במסחר הבינלאומי בראשית התקופה, כדי לארגן ייצור מקומי ושיווק של נחושת בקנה מידה גדול. ייצור זה הגיע לשיאו במהלך המאה ה-10, ונפסק לחלוטין בשלהי המאה ה-9 לפנה"ס מסיבות שגם הן קשורות ככל הנראה למערך העל-אזורי של מסחר המתכות. קפריסין, בעידוד האשורים וממלכות צפוניות אחרות, חזרה להיות השחקן העיקרי בייצור ושיווק מתכת זו, שהמשיכה להיות חשובה ביותר גם במהלך תקופת הברזל, ולמעשה לאורך ההיסטוריה כולה.

תעשיית הנחושת בפינאן התחדשה בתקופה הרומית, עם הפקה בקנה מידה גדול במאות הראשונות לספירה המתועדת גם בכתבים היסטוריים. בתקופה זו פינאן היוותה מוקד תעשיית מתכת אימפריאלית, מטאלום (*Metallum*), אליו נשלחו אסירים לעבודות כפייה במכרות ובו הופקה נחושת באופן מאורגן וריכוזי. אתרי ההתכה מתקופה זו מרוכזים בעיקר סביב תל ח'רבת פינאן, ואתרי הכרייה העיקריים

החברה הגיאולוגית הישראלית

מתועדים לא רחוק, באזור קלב ע'טייה (ראה מפה). מספר מכרות ייחודיים המכונים "אום אל-עמאד" תוארכו אף הם לתקופה הרומית. אלו הם מכרות גדולים החצובים בסלע החול כחלל אחד בו הושאר עשרות עמודים לתמיכה בתקרה (ומכאן השם בערבית). המרחק הרב יחסית של מכרות אלו מהתל עצמו, ומיקומם הגיאולוגי/סטרטגרפי, הביאו את החוקר זאב משל להציע כי אלו הם מכרות הזהב המתועדים גם הם בכתביו של אב הכנסייה אובסביוס. אפשרות זו מקבלת תמיכה במחקר גיאולוגי מהשנים האחרונות שמראה נוכחות זהב בתצורת הסלע בה נחצבו המכרות מהסוג המדובר – אמנם כמויות הזהב אינן ברות הפקה בטכנולוגיות העולם העתיק, אבל ייתכן ובמכרות "אום אל-עמאד" היו תרכיזים משמעותיים יותר שכמובן נוצלו עד תום.

על אף שהרצף היישובי באזור פינאן נשמר למן התקופה הרומית ועד לתקופה המודרנית, כולל יישוב גדול מיימדים בתקופה הביזנטית בתל ח'רבת פינאן (עם בית קברות גדול ושלוש כנסיות), נראה שתעשיית נחושת משמעותית מופיעה שוב רק בתקופה האיובית/ממלוכית (המאה ה-13 לספירה). בתקופה זו ישנה הפקת נחושת בקנה מידה גדול באתר החד תקופתי נוקייב אס-סאמר הממוקם בצפון האזור. באתר מבנים במצב השתמרות יוצא דופן, ערימות סיגים גדולות המעידות על טכנולוגיות התכה מתקדמות, וכבשן שנחשף לאחרונה כמעט בשלמותו. ייתכן וחיידוש התעשייה דווקא בתקופה זו ולזמן קצר יחסית קשור לצורך בכלי נחושת ייעודיים במסגרת תעשיית הסוכר שהתבססה בדרום ים המלח ובמקומות נוספים באותו הזמן. מאז התקופה הממלוכית לא חודשה הפקת הנחושת בערבה; למרבה המזל הכרייה המודרנית פסחה לבינתיים על אזור פינאן, שלמעט דרכי עפר שנפרצו לצורכי פרוספקציה בשנות ה-60, נותר בתולי וכמעט ללא פגע.

אתרים מרכזיים

אזור פינאן מציע למבקרים אתרי עניין רבים: אתרי נוף, אתרי עתיקות ואתרים בעלי עניין גיאולוגי מיוחד. כאן מובא תיאור קצר של מקצת מהאתרים כבסיס לתכנון טיול באזור.

תל ח'רבת פינאן

חורבות תל ח'רבת פינאן נראות למרחוק ומהוות ציון נוף בולט בנוף האזור. התל עצמו, המתנשא לגובה עשרות מטרים מעל סביבותיו, נדגם בחפירות מצומצמות שנערכו בשנים האחרונות ועדיין מחכה לחפירה שיטתית. בעוד שפני השטח מכוסים מבנים מהתקופה המוסלמית הקדומה והביזנטית, ישנה עדות ברורה לשכבות משמעותיות מתקופת הברונזה הקדומה, ולפעילות הקשורה בהפקת מתכת מתקופת הברזל. למרגלות התל וממערב נמצאים שרדי מספר כנסיות ביזנטיות שהשתמרו לגובה רב ובצמוד להן (מדרום) בית קברות המתוארך לאותה התקופה (על חלק מהקברים ניתן לראות עדיין חריטות צלבים). מפסגת התל תצפית היקפית יפה על האזור כולו, כולל שרידי המערכת החקלאית הקדומה בוואדי פינאן הכוללת מאות

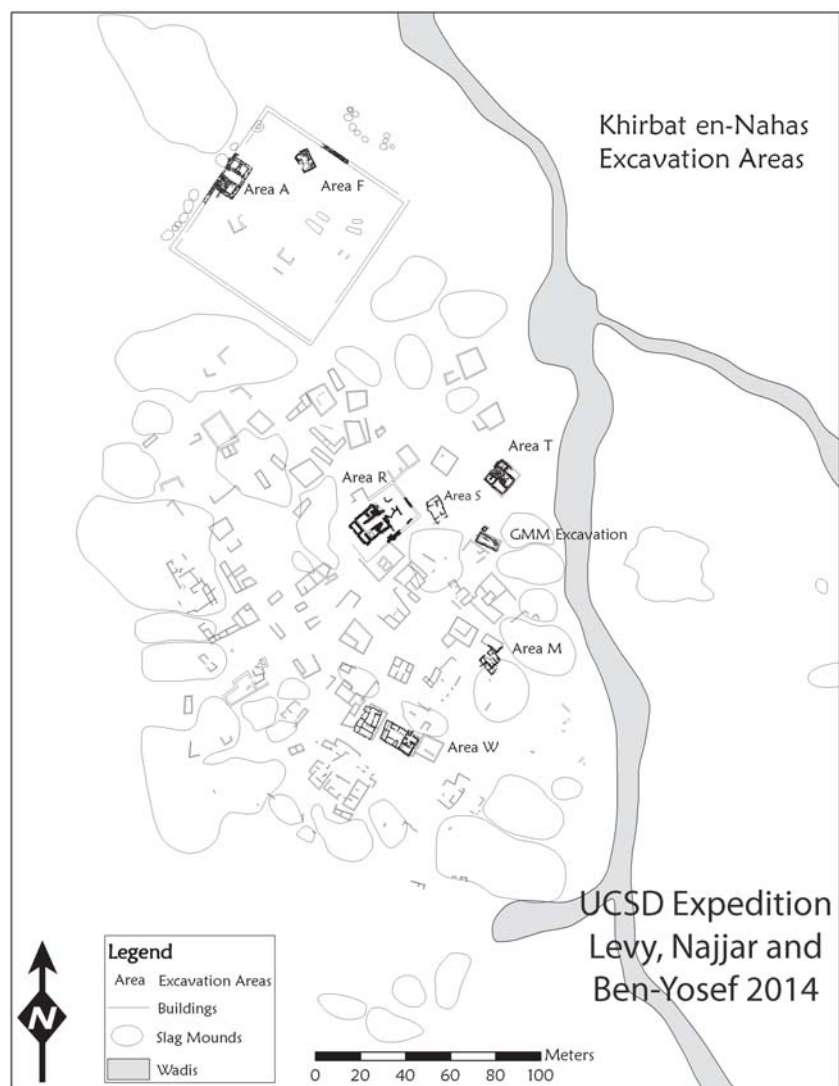
החברה הגיאולוגית הישראלית

קירות סימון חלקה, סכרים קטנים וגלי סיקול; ממצאים הראו שיש לתארך את תחילתה של המערכת החקלאית באזור, המעידה על קיומה של חקלאות שלחין משגשגת, לפחות לתקופת הברונזה הקדומה. בצמוד לתל ישנם אתרים קטנים מתקופות שונות היוצרים פסיפס ארכיאולוגי-היסטורי מרתק: על השלוחה ממזרח ובמפנה הצופה אל ואדי ע'וויר ישנם אתרי התכה קטנים מתקופת הברונזה הקדומה, כולל סיגים וכבשנים מופעלי רוח שניתן עדיין לראות באתרם. בשלוחה ליד ולמרגלות התל נמצאים מספר אתרי התכה מתקופת הברזל ומהתקופה הרומית, הניכרים בסיגים הגדולים מאוד שמאפיינים את הטכנולוגיות המתקדמות בהן השתמשו בתקופות אלו. מצידו השני של ואדי ע'וויר ניתן לראות את שרידי מוביל המים (האקוודוקט) העתיק שהגיע ממעלה הואדי אל בריכת איגום גדולת מימדים שנחפרה, שופצה ושוחזרה לפני מספר שנים. האקוודוקט עבר בגשר מעל ואדי שג'ר שאת בסיסו ניתן עדיין לראות בשטח. לאורך חלקו האחרון של האקוודוקט נמצאים מספר אתרי התכה מתקופות שונות, הבולטים בנוף בשל הסיגים השחורים הנראים למרחוק.

נראה שהתל וסביבותיו היו מרכז פעילות חשוב במשך תקופות רבות, ורק חפירה עתידית לעומק שכבות התל תוכל להבהיר את התמונה הכרונולוגית/היסטורית. ככל הנראה כאן היה מיקומה של פונן המוזכרת במקרא, וגם של פֶאִינֹו המתוארת אצל אב הכנסייה אובסביוס. האחרון מתאר את האתר כמקום אליו נשלחו פושעים וראשוני הנוצרים לעבוד במכרות כעונש שלמעשה משמעותו הייתה גזר דין מוות. מאוחר יותר הפך האתר ככל הנראה למקום עליה לרגל והנצחה למרטירים שקיפוחו חייהם כאן על מזבח הנצרות. בביקור באתר ניתן לדמיין כיצד כילו האסירים את חייהם בעבודות פרך בסביבה הקשה, באזור נידח בשולי האימפריה, בעבודה בכבשני המתכת ובמכרות הרבים שמסביב.

ח'רבת אנ-נחאס

ח'רבת אנ-נחאס ("חורבות הנחושת") הוא אתר הפקת הנחושת הגדול ביותר המוכר לנו מתקופת הברזל במזרח הקדום. הוא משתרע על פני כ-100 דונם בגדתו הדרומית של ואדי ע'וויבה, וכולל עשרות אלפי טונות של סיגים הפזורים בין מבני אבן מסיביים וביניהם מצודה גדולה (73 X 73 מ') עם שער ארבעה תאים. האתר תועד על ידי חוקרים רבים, ובשנים האחרונות היה במוקד פרויקט חפירות רב מימדים של אוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו (2002, 2006, 2009), בניהולם של פרופ' תום לוי וד"ר מוחמד נג'אר). החפירות הראו כי האתר היה פעיל משלהי תקופת הברונזה המאוחרת (המאה ה-13 לפנה"ס) ועד למחצית השנייה של המאה ה-9 לפנה"ס, כאשר שיא ההפקה היה ככל הנראה במאות 10-9 לפנה"ס. התארוך, המבוסס על עשרות דוגמאות פחמן 14, הוסיף נדבך חשוב ולא ידוע עד כה על קורותיה של ממלכת אדום בראשית דרכה. חוקרי האתר סבורים שסביב המכרות ומפעל הפקת הנחושת הגדול התפתח הגרעין הקדום של ממלכה זו, וכי העדות הארכיאולוגית מלמדת על חברה נוודית/נוודית למחצה שהייתה היררכית, ריכוזית ומורכבת, ובעלת נוכחות משמעותית במרחב. הממצאים, ובפרט הכרונולוגיה החדשה



איור 12: אתרים ארכיאולוגיים בחירבת נחאס

של האתר, השיבו לחזית הבמה את הדיון בדבר "מכרות המלך שלמה" – כלומר, הרעיון שהציע בזמנו גליון גליק, כי ההכנסות מהמכרות הן אחד המקורות לעושרו הרב של המלך שלמה, שמלך על פי המסורת המקראית במהלך המאה ה-10 לפנה"ס. ואולם, על אף שהתאריכים החדשים מצביעים על פעילות הפקה אינטנסיבית בתקופה המתאימה, טרם נמצא קשר ישיר לירושלים בעדות הארכיאולוגית מהערבה, ויש לציין שגם בתיעוד המקראי אין אזכור מפורש של כריית נחושת תחת שלטון שלמה (או כל מלך אחר). עם זאת, לא ניתן קשר עקיף לירושלים, כגון הסכם הכפפה והעלאת מס (שייתכן ונאכף באמצעות נציבים, השווה שמואל ב' ח':14). במצב כזה ירושלים הייתה נהנית מפרי המכרות באופן שיהיה בלתי נראה לארכיאולוגיה הקונבנציונלית, ולא נצפה למצוא עדות מירושלים בערבה.

בין אם היה קשר לירושלים ובין אם לאו, למבקר בח'רבת אנ-נחאס צפויה חוויה מרתקת והתרשמות מהעוצמה הארגונית האדירה שמבטאים השרידים במקום. אזורי החפירה השונים מייצגים פעילויות שונות

החברה הגיאולוגית הישראלית

באתר: שטח A הוא בית השער של מצודה, ששימש ככזה עד למחצית השנייה של המאה ה-10 אז נסגר והפך בית מלאכה לעיבוד מתכות שתפקד אל תוך המאה ה-9 לפנה"ס (וזה מקור שרידי האפר על הספסלים המקוריים של השער); שטח F הוא בית מלאכה מורכב לזיקוק ויציקת מטילי נחושת בטכנולוגיות מתקדמות – הוא נמצא בחצר המצודה הגדולה, אם כי תפקד אחרי שזו יצאה משימוש כמתקן צבאי במהלך סוף המאה ה-10 והמאה ה-9 לפנה"ס; שטחים T ו-R הם מבנים מסיביים שהיו לפחות בעלי שתי קומות ושמשו כמבני אדמיניסטרציה ושלטון במהלך המאה ה-10; שטח W הוא מבנה מעניין שתפקודו אינו ברור די צרכו: ייתכן והיה מרכז לפעילות פולחנית שנעשתה במקביל לפעילות הפקת הנחושת; שטח S הוא בית מלאכה שעיקרו מהמאה ה-9 לפנה"ס ובו גם עובדו עיבוד משני סיגים ששימשו אף הם בתהליכי הייצור השונים (כולל כשברים בתוך החומר שבנה את הכבשנים); ושטח M, שבו חתך עמוק החודר את כל שכבות האתר, מראש ערימת סיגים ועד לקרקע בתולה נטולת חומר ארכיאולוגי – החתך גובהו יותר מ-6 מטרים ובו נחשפות שכבות על גבי שכבות של פסולת תעשייתית המייצגות כ-400 שנים של פעילות הפקת נחושת באתר. על מנת לחשוף את כל החתך היה על החופרים להסיר חלק ממבנה גדול מהמאה ה-9 לפנה"ס שרוב חדריו עדיין נראים בשטח, ולהעמיק עוד מספר מטרים של הצטברות חומר תעשייתי מהמאות 10 – 12 לפנה"ס. חתיכות פחם קטנות מהשכבה העמוקה ביותר הראו תאריכים קדומים אף יותר, המייצגים את ראשית הפעילות בפינאן במהלך תקופת הברונזה המאוחרת, אחרי הפסקה של מאות שנים של כריית נחושת באזור פינאן במהלך האלף השני לפנה"ס.

ההגעה לח'רבת אנ-נחאס מהכפר גריגרה אפשרית ברכב שטח בלבד, דרך ואדי פידאן – ואדי ע'וויבה, או ברגל. הנסיעה לוקחת כארבעים דקות ועוברת דרך האתר רוג'ום חמרה איפדאן שהיה מגדל שמירה על הכניסה לאזור פינאן והמעבר הנוח בין אגני הוואדיות בתקופת הברזל.

ואדי פידאן 40

האתר הוא בית קברות ענק ובו כ-3000 קברים, כעשירית מתוכם נחפרו בחפירות הצלה של משלחת אוניברסיטת קליפורניה, סן דייגו בראשותם של פרופ' תום ולוי וד"ר מוחמד נג'אר (לאור תוכניות להקמת סכר באזור שטרם יצאו לפועל). הקברים ממוקמים בשפך ואדי פידאן אל הערבה, במקום מרכזי ששימש ככניסה המערבית לאזורי המכרות במשך אלפי שנים. הקברים שנחשפו נבנו בהשקעה מרובה וכוללים דיפון בלוחות אבן, מצבות אבן (חלקן אנתרופומורפיות) ולעתים מספר תאי קבורה משוכבים. תארוך רדיומטרי של גרעינים מרימונים שנחשפו בשלמותם במספר קברים הצביע על המאה ה-10 לפנה"ס. בכך בית הקברות מתקשר לתקופת שיא הפקת הנחושת באזור פינאן בתקופת הברזל, ומצביע על רכיב נוודי בחברה שחיה בזמן זה בערבה. חוקרי האתר הציעו לראות בחברה זו את שבטי השאסו המתוארים בכתבים מצריים, ולקשר אותם לגרעין הקדום של האדומים שמאוחר יותר יתיישבו בישובי קבע גם

החברה הגיאולוגית הישראלית

ברמת עבר הירדן. למרבה הצער החפירות משכו את תשומת ליבם של שודדי עתיקות וחלק מהקברים נחפר חפירות שוד שהותירו קברים מופרעים ועצמות אדם הפזורות במרחב.

ח'רבת אל-ע'וויבה ואתרי ראס אל-מיה

בעומק ואדי ע'וויבה שוכנת נאת המדבר הקטנה של עין אל-ע'וויבה ("מעין החורשה הקטנה"). במקום מעט מים הזורמים כל השנה וצמחייה סבוכה של אשלים והרדופים. מקור המים משמש כיום להשקיית כרם זיתים קטן המעובד על ידי משפחה משבט המנעג'ה, ונראה שהיה מוקד חשוב לפעילות אנושית בכמה תקופות בעבר, ובפרט בתקופת הברזל ובתקופה הנבטית. על שתי גדות הנחל באזור המעין משתרעת ח'רבת אל-ע'וויבה הכוללת מספר שרידים ארכיטקטוניים ופיזור נרחב של סיגי נחושת קטנים. חפירות בדיקה שנערכו באתר בשנת 2009 על ידי משלחת אונ' קליפורניה, סן דייגו חשפו מבנה נבטי קטן בגדה הצפונית, ונראה שרוב שרידי המבנים הבולטים על פני השטח שייכים לתקופה זו. לעומת זאת, הסיגים שייכים לתקופת הברזל, ותיארוך רדיומטרי (כמו גם הקרמיקה) הראה שהם משלב קדום בתקופה זו (מאות 11-12 לפנה"ס, ואולי אף קודם). סקר מקיף שנערך באזור בשנת 2007 על ידי אותה משלחת הראה עושר גדול מאוד של אתרים ארכיאולוגיים במרחב שסביב המעין. באזור המכונה בפי המקומיים "ראס אל-מיה" (ראש המים/המעין) היה מהלך מתוכנן וכושל להפקת נחושת על ידי האדומים בתקופת הברזל המאוחרת (מאות 6-7 לפנה"ס), שמתבטא בעשרות אתרים מתקופה זו, הכוללים בין השאר שתי מצודות ודרך בנויה ועתיקה המקשרת בין האזור לבין בירת האדומים – בצרה. המצודות מצויות על מדף סלע של תצורת בורג' הכהה, גבוה מעל אפיק הנחל (ובגדתו הצפונית). מיקומן קשור למכרות נחושת המצויים בסמוך לכל אחת מהן, ומצביע על כך שהיה צורך בהגנה על פעילות הכרייה; בעוד שהמצודה המערבית הושלמה וככל הנראה תפקדה זמן מה, בניית המצודה המזרחית הופסקה לפתע תוך כדי הבנייה, ככל הנראה בשל התערערות הביטחון באזור. למרות עדות למאמצי כרייה ניכרים, כולל פירים ומתקנים להעלאת הבצר, נראה שהמפעל לא הגיע לכדי הפקת מתכת מוצלחת – אין באזור אף אתר התכה (כלומר, אתר עם סיגים) המתוארך לתקופת הברזל המאוחרת. הביטחון המעורער באזור שהפך בתקופה זו לספר הממלכה לא אפשר מערכת ייצור רחבת היקף; זו מחייבת תנאי שלום לאורך זמן על מנת להתקיים.

רכב שטח יכול להגיע מכיוון ח'רבת אנ-נחאס במעלה ואדי ע'וויבה עד לעין אל-ע'וויבה. הביקור במעלה הוואדי ובשאר אתרי האזור, כולל המצודות, המכרות ושרידי האתרים הפזורים ביניהם הוא ברגל בלבד.

ח'רבת ג'ארייה ומכרות ג'בל ג'ארייה

חורבה קסומה זו ממוקמת בעמק פנימי במעלה ואדי אל-ג'ארייה. זהו אתר התכת נחושת מראשית תקופת הברזל שננטש במחצית השנייה של המאה ה-10 לפנה"ס ככל הנראה בעקבות המסע הצבאי של פרעה שישק לאזור. באתר שרידי עשרות מבנים וערימות סיגים הממוקמים משני צידי ואדי ג'ארייה. ערימת

החברה הגיאולוגית הישראלית

סיגים וכמה מבנים נחפרו על ידי משלחת אונ' קליפורניה סן דייגו במטרה להבין את הארגון החברתי שעמד בבסיס מפעל הפקת הנחושת ואת טכנולוגיות ההתכה השונות. במקביל נערך סקר במעלה הוואדי שתיעד עשרות מכרות הכרויים במגע בין תצורות אום עשרין ותצורת בורג', במטרה להגיע אל מינרלי הנחושת הנמצאים בחלקה העליון של תצורת בורג'. ניתן לבקר בחלק זה של הוואדי בהליכה נוחה מאוד מהחורבה (שאליה ניתן להגיע ברכב שטח מכיוון ואדי ע'ויבה), ואף ניתן להמשיך הלאה בנקב קדום המטפס לאוכף בראש הוואדי וממשיך צפונה לעין ג'לילה וואדי דח'ל.

בסקר דרכים עתיקות שנערך בשנת 2007 על ידי משלחת אונ' קליפורניה, סן דייגו, התגלה באקראי שדה מכרות אדיר מימדים באגפו הצפוני של ג'בל ג'אריה. מאות "צלחות" – בורות כרייה פתוחים שהתמלאו בסחף – זוהו כשרידי פעילות כרייה בשל הדמיון הרב לתופעה דומה שתועדה בתמנע על ידי משלחת הערבה של פרופ' בנו רותנברג. את התופעה ניתן לראות בעיקר בתצפית מגבוה (הבורות נראים בקלות גם בתצלומי לוויין), ואכן היא זוהתה לראשונה מתצפית על העמק מאחת הגבעות באזור. הנוסעים בדרך העפר העוברת בין הבורות יתקשו להבחין שהם נמצאים למעשה במרכזו של אזור כרייה עתיק – שכל הנראה היה מקור מרכזי לעפרה גם לח'רבת אל-ג'אריה וגם לח'רבת אנ-נחאס הסמוכה.

אתרים פרהיסטוריים בפתח ואדי פידאן

בשפך ואדי פידאן לערבה נמצאים מספר אתרים פרהיסטוריים (או "פרוטוהיסטוריים" – אם תרצה להגדיר גם מונח זה בסוף הספר) חשובים שחלקם נחפרו ותועדו בצורה שיטתית. בין אתרים אלו ראוי לציין שלושה: ואדי פידאן 4, אתר ההתכה הקדום ביותר באזור פינאן המתוארך לתקופת הברונזה הקדומה א'; ואדי פידאן 61, אתר אדיר מימדים מהתקופה הניאוליתית; וואדי פידאן 1 (או תל תיפדאן), כפר שמור היטב מהתקופה הניאוליתית הקדם קרמית. בביקור באתרים ניתן לראות את ריבועי החפירות ושרידים ארכיטקטוניים מרשימים מהתקופות השונות.

ח'רבת חמרה איפדאן ועין פידאן

על גבעת שולחן מבודדת מעל גדתו הדרומית של ואדי פידאן נמצאת ח'רבת חמרה איפדאן, אתר הפקת הנחושת הגדול ביותר מתקופת הברונזה הקדומה בדרום הלבנט. בחפירות משלחת אונ' קליפורניה, סן דייגו באתר נחשפו בתי מלאכה משוכללים לעיבוד משני של נחושת: המתכת שהופקה באתרים סמוכים על ראשי גבעות הובאה למקום ועברה זיקוק ויציקה למטילים. שברי תבניות ששימשו ליציקת מטילים נמצאו בכמויות גדולות בחלקיו השונים של האתר, כמו גם כמה מטילי נחושת שהשתמרו, ביחד עם אוסף קרמי גדול, כתוצאה מחורבן האתר ברעידת אדמה. בתי המלאכה היו מאורגנים בתוכנית מסודרת של סמטאות וחדרים שקירותיהם היו בנויים בעיקרם מלבני בוך. ניתוח החרסים ותארוך רדיומטרי מצביעים

החברה הגיאולוגית הישראלית

על תקופת פעילות ארוכה למדי במהלך המחצית השנייה של האלף השלישי לפנה"ס (ברונזה קדומה ג'-ד').

בחלקה המזרחי של ח'רבת חמרה איפדאן נמצאת ערימת סיגים שחורים, שרידי התכת נחושת מתקופת הברזל (מאות 10-11 לפנה"ס). בדומה לח'רבת ע'וויבה וח'רבת ג'אריה, התכת נחושת באתר הופסקה במהלך המחצית השנייה של המאה ה-10, ככל הנראה כתוצאה מהמסע הצבאי של פרעה שישיק (השושלת ה-22) לאזור. עדות תומכת באפשרות זו התגלתה באופן מפתיע בעת סיור משלחת אונ' קליפורניה באתר, כאשר אחד הסטודנטים מצא חרפונית נדירה ביותר ועליה אזכור שמו של פרעה זה (היחידה שהתגלתה בדרום הלבנט עד כה). יש לציין שהמצרים לא כיוונו להפסקת ייצור הנחושת באזור – מוצר זה היה מצרך חשוב ביותר במצרים בעת ההיא, ונראה כי המצרים דאגו להתייעלות מערכת הפקת הנחושת ולכך שהתוצר אכן יעשה את דרכו למצרים. כחלק מהליך ההתייעלות, שלב התכת הנחושת התרכז במספר מצומצם יותר של אתרים ונעשה שימוש בטכנולוגיות חדשות שהפיקו כמות גדולה יותר של נחושת בכל מחזור הפקה. ה"רפורמה" בתהליכי הייצור שהוצגה בחלק האחרון של המאה ה-10 לפנה"ס כללה את השימוש הראשון המוכר לנו בגמל כבהמת משא במרחבי הערבה (עד אז נעשה שימוש בפרידות וחמורים).

בסמוך ומצפון לערימת הסיגים באתר נמצא מבנה מלבני מאוחר, ככל הנראה ח'אן דרכים או/ו מצדית מהתקופה הרומית. חשיבותו במיקום האסטרטגי, לאורך ואדי פידאן ובעמדת שליטה על נאת המדבר החשובה של עין פידאן. נאת מדבר זו היא הסיבה למיקום מרכז הפקת הנחושת במקום בתקופות הקדומות יותר (ברזל וברונזה קדומה). המעיין עצמו מפכה כל השנה כקילומטר וקצת במעלה הואדי. אל המעיין מגיעה דרך עפר מהכפר גריגרה, וניתן לנסוע ברכב שטח דרכו ובמורד הנחל דרך צמחייה עשירה ובריכות שכשוך קטנות. דרך מקבילה עוברת על הגדה הדרומית של ואדי פידאן, איתה ניתן להגיע ישירות לח'רבת חמרה איפדאן, מרחק נסיעה קצרה (כ-10 דקות) מהכפר.

מכרות ואדי ח'אלד ואזורים סמוכים

באזור ואדי ח'אלד נחשפו עשרות מכרות קדומים שמספרים את היסטוריית כריית הנחושת באזור פינאן. עפרת הנחושת מופיעה באזור בשתי תצורות גיאולוגיות שונות, שנכרו בתקופות שונות: תצורת בורג' (מכונה גם DLS) ותצורת אום עשרין (MBS). מקור הנחושת ברוב התקופות היה בתצורת בורג', שם היא מרוכזת בשכבה העליונה ביותר של התצורה (ביחידה המקבילה לפרט ססגון של תצורת תמנע בדרום הערבה). התצורה, המורכבת מדולומיט קשה וכהה ופצלים אפורים, בולטת בנוף וניתנת לזיהוי מרחוק. בתקופת הברונזה הקדומה נכרו מכרות אופקיים אל תוך השכבה נושאת הבצר, והחל מתקופת הברזל כריית הנחושת מתצורה זו נעשתה בעיקר דרך פירים שנחפרו מחלקה התחתון של תצורת אום

החברה הגיאולוגית הישראלית

עשרין, המורכבת מאבן מאבן חול חומה-בהירה הנוחה באופן יחסי לחציבה. הפירים נכרו לעומקים משתנים בהתאם לעומק תצורת בורג' מתחת לפני השטח, וחלקם מגיעים לעשרות מטרים (הפיר העמוק ביותר שתועד בראש ואדי ח'אלד מגיע לעומק של יותר מ-70 מטרים!). ניתן לזהות אותם בקלות בנוף: בפתח הפירים נעשתה עבודת הפרדה ראשונית של מינרלי הנחושת מהסלע המארח, ושרידי החומר הטפל, דלומיט ופצלים כהים, בולטים על רקע המדרונות הבהירים ומאפשרים זיהוי של הפירים ממרחק רב. ואדי ח'אלד וואדי אביאד המקבל אליו מצפון מנוקדים בעשרות פתחי פירים כאלו, בחלקם ניתן להבחין בסימני שפשוף חבלים ובמתקני-עזר להצבת כננות. במקרים רבים מדובר בפירים המופיעים בזוגות, אחד לירידת הכורים והשני להעלאת הבצר. באזור שבין שני הוואדיות נמצאים מדרונות אזור קאלב ראטייה, בהם עשרות מכרות בתוך היחידה נושאת הבצר של תצורת אום עשרין. הבצר כאן מופיע בעורקים (בדומה למינרליזציה בתצורות אמיר/עברונה באזור תמנע), שהכתיבו את צורת הכרייה בגלריות אופקיות ופירים רדודים. כרייה בתצורה זו התקיימה בעיקר בשחר המטלורגיה באזור, בכלקולית, עם שלב כרייה משמעותי נוסף בתקופה הרומית.

אל אזור המכרות ניתן להגיע בדרך עפר קצרה מתל ח'רבת פינאן. הדרך מגיעה לחלקו התחתון של ואדי ח'אלד וממשיכה לאזור קלב רטייה, ומשם ניתן להמשיך ברגל במעלה ואדי ח'אלד או בואדי אביאד. המכרה המרשים ביותר בואדי ח'אלד נמצא בחלקו התחתון ובגדה הצפונית: זהו מכרה בעל פיר כפול מתקופת הברזל שהופעל מחדש בתקופה הרומית תוך כריית פיר נוסף, שלישי.

ברקה אל-חטייה

האתר מבודד יחסית ונמצא בחלק הדרומי של אזור פינאן, בין דיונות החול של מזרח הערבה ולא רחוק מאזור עיינות בוורדה – אזור מי תהום גבוהים המעובד בחלקו בידי הבדווים המקומיים. באתר בולטת גבעה גירנית המתנשאת מעל סביבותיה ומכוסה בכתם סיגים שחור – אתר התכה מתקופת הברונזה הקדומה (ב'-ג') ובו שרידים של כבשני נחושת מופעלי רוח. הטיפוס לגבעה נוח ומראשה נשקף נוף יפה על המרחב כולו. בסמוך ומצפון לגבעה נמצאים שרידים ארכיטקטוניים שנחפרו על ידי וולקמר פריץ וראסל אדמס. הם כוללים מספר קירות של מבנים מתקופת הברונזה הקדומה ובסיס של מבנה גדול מימדים מתקופת הברזל (תוארך למאה ה-9 לפנה"ס). ניתן להגיע לאתר ברכב שטח מקצה אזור השדות החקלאיים של הכפר גרייגרה.

מכרות מדסוס ו"עפיפון"

מכרות מדסוס הם בורות כרייה פתוחים במרכז אזור פינאן שככל הנראה שייכים לשלב הקדום של פעילות הפקת הנחושת באזור. בגבול אזור הכרייה נמצא מתקן עגול שפורש ככבשן כלקולית, אולי

החברה הגיאולוגית הישראלית

הקדום מסוגו בעולם (אם כי פרשנות זו שנויה במחלוקת). בין בורות הכרייה מפוזרות אבני כתישה בכמויות רבות; אלו שמשו להשבחת הבצר אחרי שנאסף.

בין אזור הבורות לאוכף הסמוך (אליו מגיעה דרך עפר) נמצא מתקן צייד קדום מסוג המכונה "עפיפון". המתקן בנוי משני קירות נמוכים אשר כל אחד מהם נמשך לאורך כמה מאות מטרים עד חיבורם בואדין שבתחתית האוכף. בנקודת החיבור יש מבנה פתוח בו נלכדו בעלי החיים, ככל הנראה צבאים, שהוברחו והוכוונו למקום על ידי הקירות. זהו מבנה העפיפון היחיד הידוע כיום מאזור צפון הערבה, ולמעט דרך העפר החוצה את זרועו הדרומית מצב השימור שלו מצוין.

נוקייב אס-סאמר

אתר התכת נחושת שמור היטב באגן ואדי ע'וויבה ובו שרידי מבנים, ערימות סיגים גדולות ומתקנים שונים. זהו אתר הפקת הנחושת המאוחר ביותר בערבה, המתוארך באמצעות קרמיקה ומטבעות לתקופה האיובית/ממלוכית (מאה ה-13 לפנה"ס). מצב השימור של האתר מרשים וערימות סיגי ההזרמה הגדולים מעידות על תעשייה משגשגת, אם כי קצרת זמן, שעשתה שימוש בטכנולוגיות התכה מתקדמות ביותר. ייתכן וחיידוש ההפקה דווקא בתקופה זו קשור למפעלי הסוכר בצפון הערבה שהצריכו כלי נחושת כחלק מתהליך ייצור הסוכר בתקופה זו.

ראס אנ-נקב

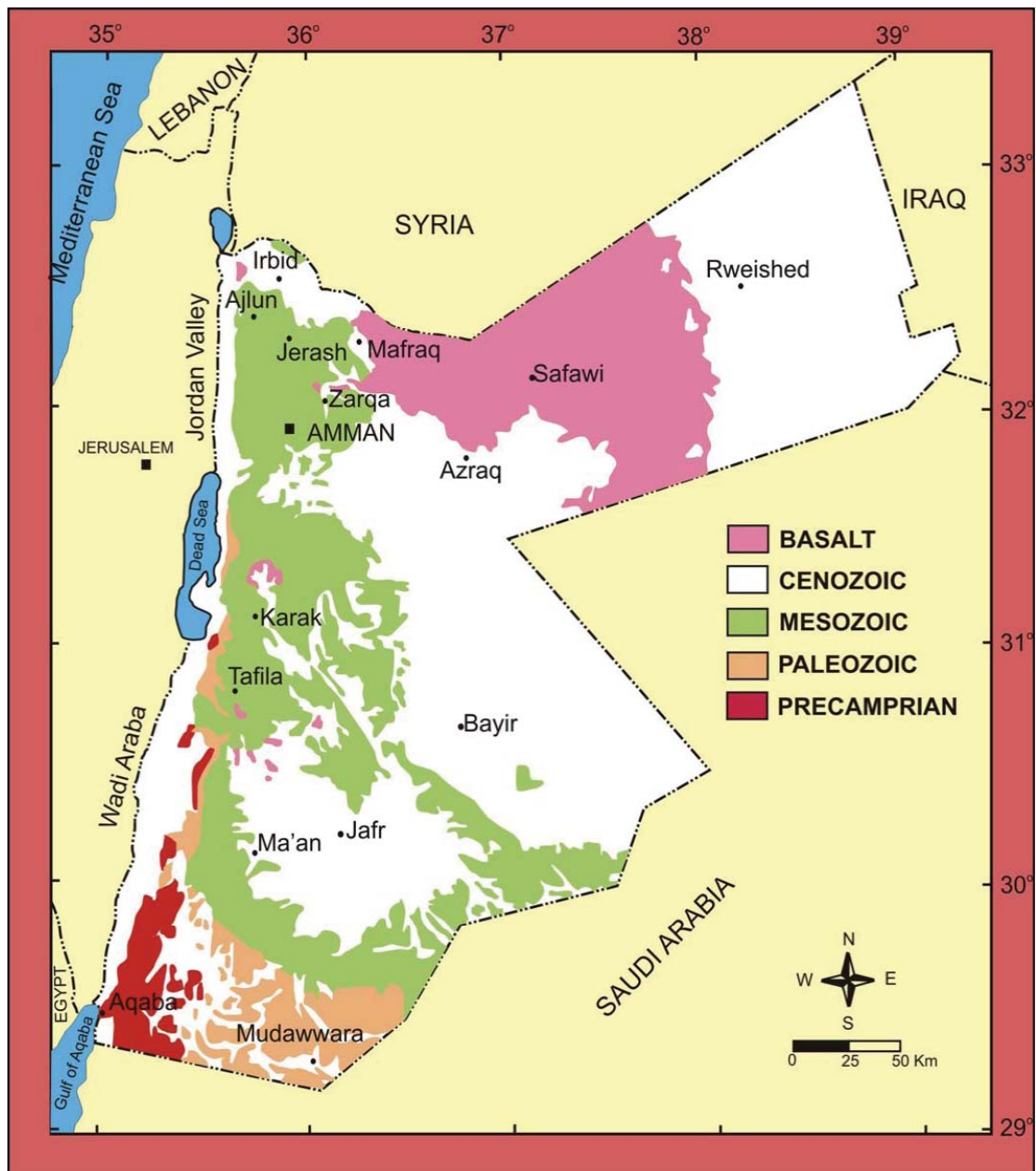
אתר הפקה קדום בראש המעלה המקשר בין אגן ואדי ע'וויבה לאגן ואדי פינאן. דרך העפר הנמצאת בנתיב המעלה הקדום אינה עבירה לכלי רכב – ניתן להגיע לאתר ברכב שטח מכיוון תל ח'רבת פינאן, אך ניתן לרדת לוואדי אל ע'וויבה רק ברגל. במקום תצפית מעולה על עמקי הואדיות, על תל ח'רבת פינאן ועל הערבה. באתר עדות לפעילות התכה אנטנסיבית מתקופת הברזל שנמצא על גבי אתר מתקופת הברונזה הקדומה. נראה שבתקופה המאוחרת התיכו מחדש סיגים קדומים שהכילו כמות גדולה של נחושת שאריתית שהיה ניתן לנצל בטכנולוגיות המתקדמות יותר.

ואדי ע'וויר 1, ואדי פינאן 16

במוצא ואדי ע'וויר אל הבקעה, לפני מפגשו עם ואדי דנא, נמצאים שני אתרים ניאוליתיים גדולים שנחפרו על ידי מספר משלחות שונות. בביקור בהם ניתן להתרשם מהמבנה המורכב של הכפרים ומההשתמרות הטובה של קירות המבנים, הסמטאות ומתקני אחסון וחקלאות שונים.

5. הגיאולוגיה באזור פינאן

(מיכאל בייט)



איור 13: מפה גיאולוגית מוכללת של ירדן (NRA-Natural Resource Authority, המכון הירדני המקביל למכון הגיאולוגי ולמכון הגיאופיסי בישראל).

באזור שלוש מפות גיאולוגיות ירדניות בקנה מידה 1:50,000 אשר הוצאו לאור ע"י NRA. המפה הגיאולוגית של ג'בל חמרה פאדאן (Rabba', 1991) בצפון, המפה הגיאולוגית אש-שאובאק (1988 Barjous, במזרח והמפה הגיאולוגית של פטרה וואדי אל לחיאנה (Barjous, 1995) בדרום. לכל מפה צמודים חתכי רוחב, מקרא, חתך עמודי ודברי הסבר.

החברה הגיאולוגית הישראלית

בטבלה 1 מוצגת קורלציה מוכללת של היחידות בין בקעת תמנע והר עמרם לבין היחידות הסדימנטריות והמגנטיות המוצגות במפות הירדניות. במסגרת פרויקט הממומן ע"י המשרד לשיתוף פעולה אזורי נעשה ניסיון לאמוד בצורה מדויקת את התזוזה האופקית השמאלית בערבה לאורך בקע ים המלח (איור 14). המדידה התבססה על קורלציה של הדייק הדולריטי מהקמברים המוקדם (Beyth et al., 1994b); חדר. אימתנו ההנחה מעבודות קודמות כי סך כל התנועה מצטברת לאורך שני העתקים עיקריים (Segev, 1984; Kesten et al., 2008) העתק הערבה או העתק ים המלח המערבי מבין השניים והעתק פינן או אל-קואיארה המזרחי. אימתנו בסבירות גבוהה כי המשכו של הדייק הדולריטי אשר מופה בהר עמרם הוא בג'בל סומר אל טייבה בו הוא חדור בסלע ריוליטי השייך לוולקנים של איימיר הקורלטיביים לריוליט עמרם. ולפיכך התזוזה האופקית המצטברת לאורך העתק הערבה היא 85 ק"מ. חיזוקים למדידה זו ניתנה באומדן של המרחק בין הקומפלקס המטמורפי של אבו-באראקה בירדן, הממוקם בין שני ההעתקים, לקומפלקס המטמורפי שמופה באזור אילת (Jarrar et al., 2013). בהנחה כי המשכו המזרחי של הר תמנע הוא בג'בל חנה, מזרחית להעתק פינן, הרי שהתזוזה על העתק פינן, המזרחי מבין שני ההעתקים, היא 24 ק"מ. סלעי המסד בג'בל חנה הם בעיקר הגרניט פורפיר החדור ע"י עשרות דייקים ריוליטיים, אנדזיטיים ומורכבים בכוון כללי צפון. בג'בל חנה מופה דייק דולריטי בכוון כללי מערב-מזרח. סך כל התנועה האופקית היא 109 ק"מ. לא מצאנו בג'בל חנה את ה"תא המגמטי" אשר מופה בהר תמנע (Beyth et al., 1994a). ג'בל חנה בדומה להר תמנע יוצר מעין מבנה כיפתי המוקף בסלעי תצורות סליב בבסיס, בורג' ואום שירין כאשר השכבות נטויות אל מחוץ למבנה בדומה להר תמנע. אחד השחזורים ששימשו להערכת הזריקה האופקית בעבר היה כי המשכו של העתק ואדי דנה באזור פינן שכוונו דרום מערב הוא בהעתק התמד באזור באר אורה מערבית לבקע ים המלח (Bartov, 1994). המרחק מהעתק ואדי דנה צפונה לג'בל חנה תואם את המרחק מהעתק התמד צפונה להר תמנע והוא ביו 8 ל-9 ק"מ. באזור ג'בל חנה-פינן מופו אתרי כריה ועיבוד נחושת עתיקים בקנה מידה גדול, ובשיא פעילותם בין המאה ה-11 למאה ה-9 לפני הספירה כחירבת נחס ופינן, (Ben-Yosef and Levy, 2014).

במהלך הסיור נראה את מרבית האתרים שהוזכרו בדברי ההסבר.



Accurate displacement along the Arava segment of Dead Sea Transform-preliminary results

Beyth, M.⁽¹⁾, Ginat, H.⁽²⁾, Hijazi, H.⁽³⁾, Al Khraisha, S.⁽³⁾

1. Geological Survey of Israel, 30 Malkhe Israel, Jerusalem, 95501, Israel
2. The Dead Sea and the Arava Science Center, Kibbutz Qetura M.P Hevel Eilat 8840, Israel
3. Green Sahara, P.O. Box 142905 Amman 11814, Jordan

The sinistral displacement along the Dead Sea Transform (Quennel, 1958; Freund et al., 1970; Garfunkel, 1981; Eyal et al., 1981) south to the Dead Sea Basin was previously attributed to the Arava or Dead Sea Fault and the Feinan or al Quwayra Fault (Segev, 1984 and references therein). This was based on the similarity between the Timna and the Feinan copper mines, the Themed and Dana faults, and the onlap of the Shehoret and the Umm Ishrin formations southward on the Amram Rhyolite and Ahyamir Volcanic. We suggest a much more accurate measurement of 85 km along the Arava fault based on the Early Cambrian (532 Ma) dolerite dykes previously mapped in Mount Timna and Mount Amram (Beyth et al., 1995; Beyth and Heimann, 1999; Baer et al., 1994) and recently discovered in Jabal Sumr al Tayyiba in southern Jordan. In Tayyiba the only dyke intruding the pink rhyolite flows of the Ahyamir Volcanic is a dolerite dyke around 20 m thick striking east-west. This dyke is most probably correlative with the Mount Amram dolerite dyke. To confirm these preliminary results additional field work, 40Ar/39Ar age determinations and chemical analyses of the dolerite dykes of Jabal Sumr al Tayyiba and Jabal Hanna are needed.

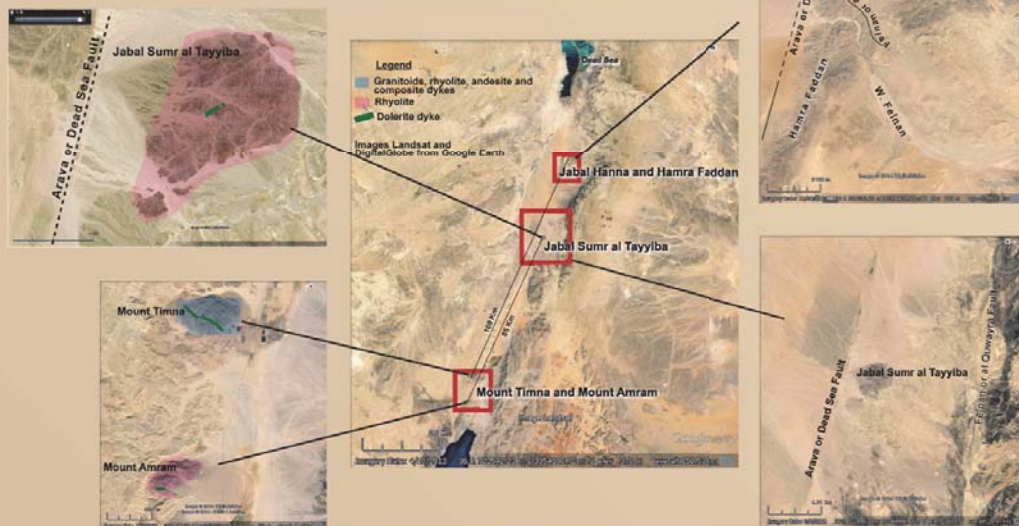
Detailed 1:50,000 geological maps of the Jordanian side (Rabb'a 1994; Barjous, 1995), on the Israeli side (Beyth et al., 1999; Beyth et al., 2012) and Google Earth images were used in this study.



Schematic configuration of the tectonic plates in the middle east



Reconstruction of the Dead Sea Transform (Segev, 1984)



The rhyolite of Jabal Sumr Al Tayyiba



Flow texture in the al Tayyiba rhyolite



The only dyke intruding the Jabal Sumr Al Tayyiba rhyolite is the dolerite dyke around 20 m thick striking east-west.



28.9.2012 07:38 Dolerite dyke 132 Ma, striking E-W, al Tayyiba

References

- Barjous, M. O. 1995, Petra & Wadi Al Lahyana, geological map, 3050I & 3050IV sheets, scale 1:50,000; Natural Resources Authority, Hashemite Kingdom of Jcrdan.
- Baer, G., Beyth, M. and Rechess, Z., 1994, Dike emplaced into fractured basement, Timna Igneous Complex, Israel. *J. Geophys. Res.*, 99:24039-24050.
- Beyth, M., Stern, R., Altherr, R., Peltz, S. and Heimann, A. 1994. Petrochemistry of Dolerite Dykes from Mt. Timna, Southern Israel: Implications for Plate Tectonic Setting. *GSI Current Research*: 9:24-26.
- Beyth, M. and Heimann, A., 1999. The youngest igneous event in the crystalline basement of the Arabian-Nubian Shield, Timna igneous complex: *Isr. J. Earth Sci.*: 48:113-120.
- Beyth, M., Segev, A. and Bartov Y. 1999. The Geological Map of Be'er Ora. 1:50,000 Sheet 25-IV. *Geol. Surv. Isr.*
- Beyth, M., Eyal, Y. and Garfunkel, Z. 2012. The Geology of the Eilat Sheet, Explanatory Notes: *Geol. Surv. Isr. Report GSI/22/2011*, updated March 2013, 13 pp.
- Eyal, M., Eyal, Y., Bartov, Y. and Steinitz, G., 1981. The tectonic development of the western margin of the Gulf of Eilat (Aqaba) rift. *Tectonophysics* 80:39-66.
- Freund, R., Garfunkel, Z., Zak, I., Goldberg, M., Weissbrod, T. and B. Derin, 1970. A shear along the Dead Sea Rift. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*. 267:107-130.
- Garfunkel, Z. 1981. Internal Structure of the Dead Sea Leaky Transform (Rift) in Relation to Plate Kinematics. *Tectonophysics*, 80: 81-108
- Quennel, A. M., 1958. The structural and geomorphic evolution of the Dead Sea Rift. *Quater. J. Geol. Soc.* 114:1-24.
- Rabb'a, 1994, The geology of the Al Qurayqira (Jabal Hamra Faddan), map sheet No. 3051 II: Natural Resources Authority, Ministry of Energy and Mineral Resources, The Hashemite Kingdom of Jordan; *Bulletin* 28, 60 pp.
- Segev, A., 1984, Lithostratigraphy and Paleogeography of the Marine Cambrian Sequence in Southern Israel and Southern Jordan. *Isr. J. Earth Sci.* 33:26-33.

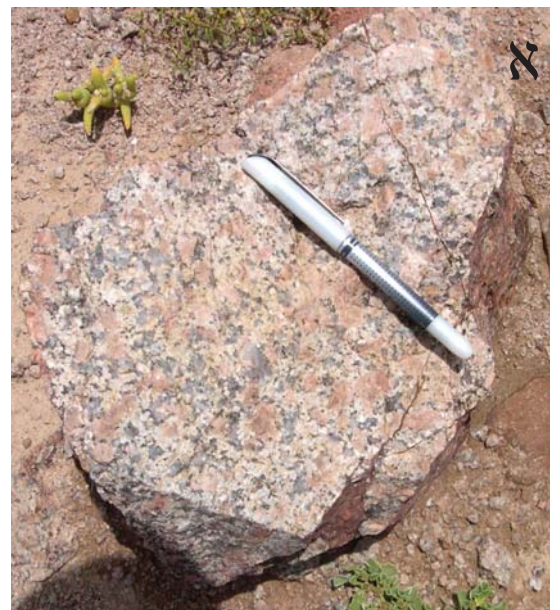
Acknowledgment

This project was supported by the Ministry of Regional Cooperation. Amir Sagy for constructive comments and Rani Calvo for supporting the Google Earth work. Design by Nili Almog and GSI Publishing Department

איור 14: מדידה מדויקת של התזווה האופקית לאורך שבר הערבה ושבר פינן בסגמנט הערבה של בקע ים המלח בהתבסס על הדייק הדולריטי מגיל 532 מ.ש. וסלעי המסד הניאופורטרוזואיים בהר עמרם ובהר תמנע בשוליים המערביים וג'בל סומר אל טייבה וג'בל חנה בשוללים המזרחיים (עבודה משותפת עם עמיתים מירדן). הפוסטר הוצג בכנס החברה הגיאולוגית (2014).

החברה הגיאולוגית הישראלית

קומפלקס מגמטי בירדן	שוליים מזרחיים (ירדן)	שוליים מערביים (ישראל)	גיל
	חבורת אג'לון	חבורת יהודה	קנומן-קוניאק
	חבורת כורנוב	חבורת כורנוב	קרתיקון תחתון
	תצורת אום אשרין אבו קושיבה	תצורת שחורת ונטפים הפרט הלבן בת. שחורת	קמבריום
	תצורת בורג'	תצורת תמנע	קמבריום
	תצורת סליב	תצורת עמודי שלמה	קמבריום
	פנהפליין	פנהפליין	קמבריום מוקדם
קומפלקס הערבה	דייק דולריטי	דייק דולריטי	532 מ.ש.
	הוולקנים של אימיר	ריוליט עמרם	
	דייקים ריוליטיים, אנדזיטיים ומורכבים.	דייקים ריוליטיים, אנדזיטיים ומורכבים.	580 מ.ש. ~
	קונגלומרט סרמוג'	קונגלומרט אילת ורודד	590 מ.ש. ~
	גרניט פינן	אלקלי גרניט תמנע וגרניט עמרם	610 מ.ש.
קומפלקס עקבה	גרניט פורפיר אורף	גרניט פורפיר תמנע	625 מ.ש.





איור 6

- א. גרניט פורפיר ג'בל חנה.
- ב. גרניט פורפיר חדור בדייקים ריוליטיים ואנדזיטיים בכוון צפון בג'בל חנה.
- ג. תצורות סליב ובורג' חדורות בדייק בזלתי מגיל של 7 (?).מ.ש., ג'בל חנה. הרכס הבהיר ברקע חבורת אג'לון.
- ד. דייק דולריטי צפונה לחירבת נחס חדור בגרניט פורפיר ומעליו תצורות סליב ובורוג'.
- ה. תצורות סליב, בורג' ואום אישרין בפינן.
- ו. קונגלומרט אקוילנטי לתצורת ערבה, ואדי פאדאן.
- ז. משקעים אגמיים פליסטוקניים מעל גרניט פינן ברכס חמרת פאדאן.

משקעים של מים מתוקים וקונגלומרט פליוקני באזור חמרת פידאן

(חנן גינת)

א. משקעים של מים מתוקים מגיל פליסטוקן עליון

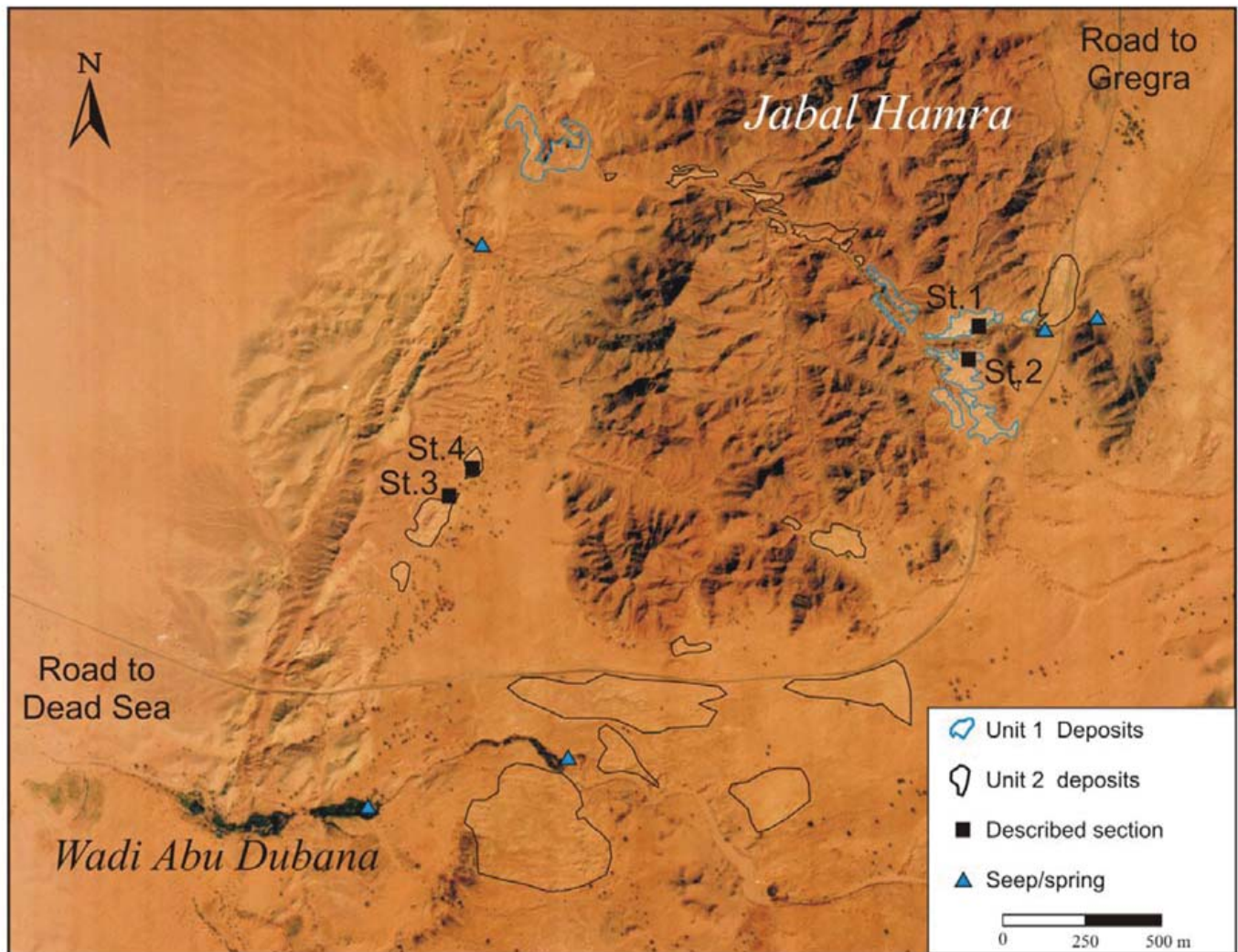
לצדו המזרחי ועל גבי הרכס המגמטי של חמרת פידאן מצויים סלעי משקע יבשתיים בהירים. סלעים אלו כוללים סלעי גיר דטריטי, חרסית, חוואר וטרורטין. עובי החתך 15-20 מטר בחתך נמצאו מספר מלנופסיס, מלנואידיים, כרופיטה, וכן האוסטרקודים, *Cyprideis torosa*, *Candona neglecta*, *Ilyocypris sp.* ו- *Pseudocandona sp.* (Shdaifat, 2015). השכבות הנמוכות תוארכו לכ-32,000-39,000 שנה ע"י Rech et al (2009). לפיכך ניתן לקבוע את גיל המשקעים כפליסטוקן עליון (Ginat et al., in Preperation).

על פי סוגי הסלעים והפאונה שנמצאה בחתך ניתן לקבוע שההשקעה היתה בגוף של מים ברקיים או מתוקים. סביבת ההשקעה היתה של wetland שבו מים זרמו על פני השטח. קיומו של גוף מים מתוקים התאפשר כנראה בתקופה בה האקלים היה לח יותר בהשוואה לאקלים הנוכחי. גובה המשקעים 48-79 מטר מעל פני הים. בעבר תוארו ע"י Rabba (1994) כמשקעי תצורת ליסן. אופי הסדימנטים, מיקום הגיאוגרפי בשולי הערבה, וגובה המוחלט מעיד שמדובר בהשקעה בגוף מים שהתקיים בשולי הערבה וגבוהה הרבה יותר מההשקעה, שהתקיימה בו זמנית בימת הלשון. כיום מצוי לצד סלעי הגיר הלבנים מעיין של מים מתוקים שהוא עדות שגם היום מצויים באזור מי תהום רדודים.

ב. משקעים יבשתיים לצד נחל פידאן

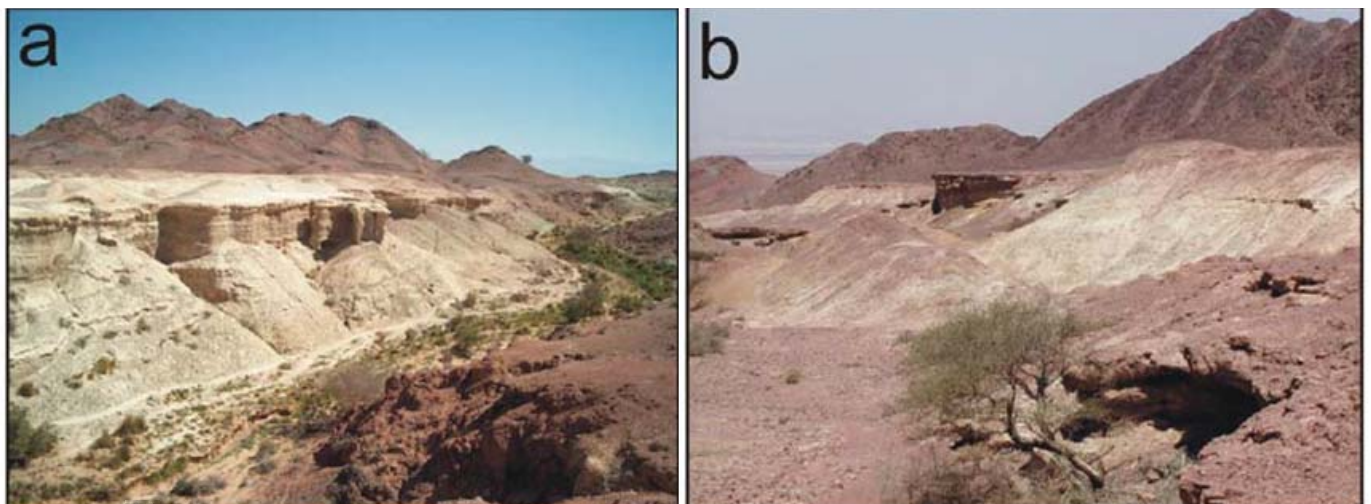
על גבי טרסות נחל גבוהות לצד הערוץ הפעיל של נחל פידאן מצוי קונגלומרט. הוא מכיל חלוקים ממגוון רחב מאוד של סלעים מגמטים, אבני חול וסלעי משקע ימיים. מאסף החלוקים בקונגלומרט דומה למאסף המצוי בערוץ הנחל הנוכחי. הקונגלומרט מלוכד מאוד וגודל החלוקים המקסימלי מגיע עד מטר. על פי גבוהו היחסי, עד כ-50 מטר מעל האפיק הפעיל, ומאפייני הקונגלומרט מוצע שקונגלומרט זה הושקע בו-זמנית לתצורת ערבה שמכסה שטחים רחבים ממערב לערבה. התחרות הנחל בין סלעי הקונגלומרט נגרמה ע"י ירידה משמעותית בבסיס הסחיפה בערבה הצפונית.

בין הבתים הצפון מערביים של הכפר ורכס חמרת פידאן והקונגלומרט העתיק נחשפים סלעים ירוקים של חוואר, דירטריטי וחרסית אדומה. יתכן שסלעים אלו הושקעו בסביבה של wetland שהתקיים באזור



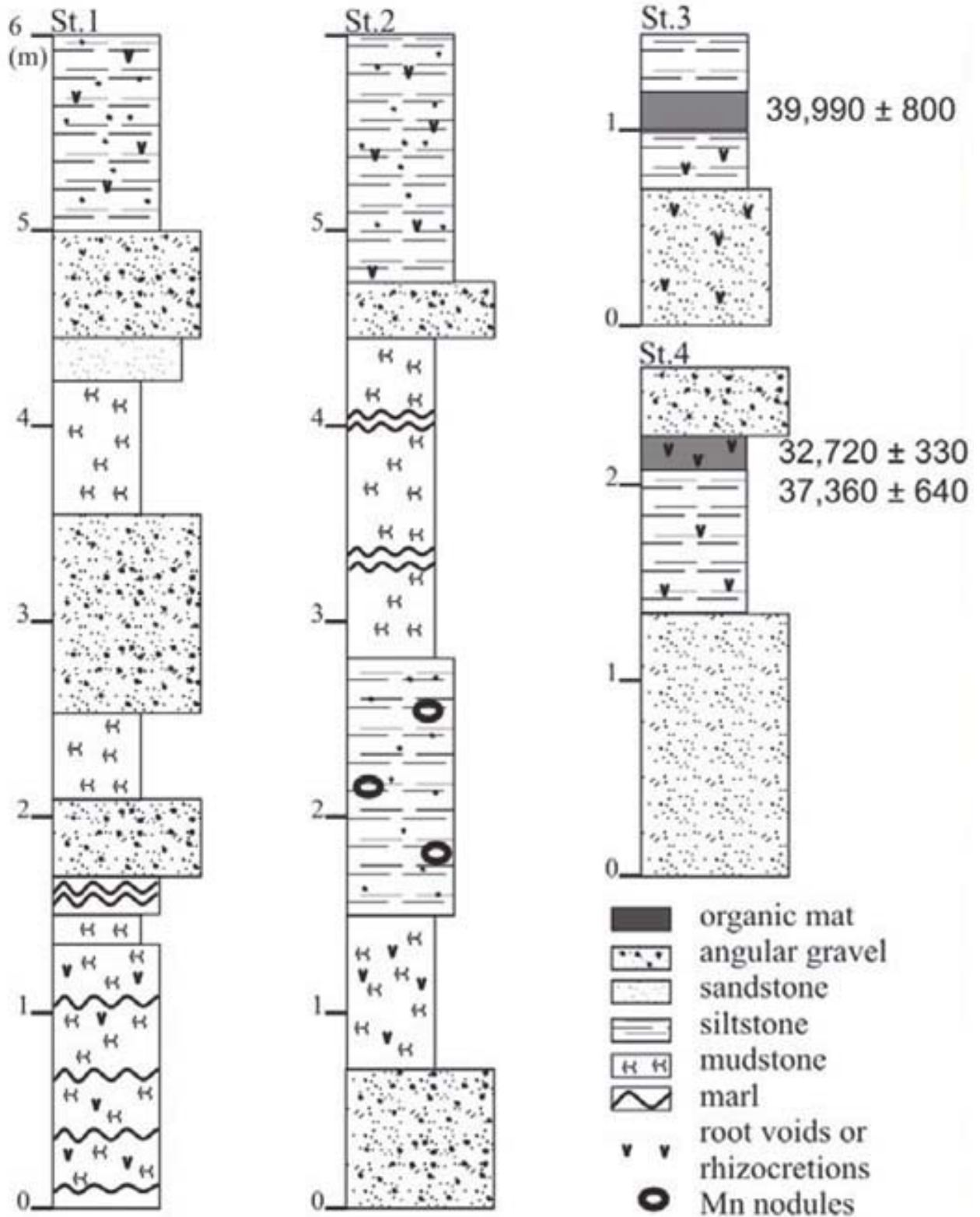
במקביל ואולי קצת אחרי השקעת הקונגלומרט. כלומר על פי יחסי השדה ניתן להעריך שגילם פליסטוקן מוקדם או אולי תיכון. גוף המים התקיים כנראה בבקעה שבה מצוי כיום הכפר גרגרי. משקעים אלו שונים

איור 14: מפת משקעים של גופי מים מתוקים בשולי חמרת פידאן (Rech et al., 2009)



החברה הגיאולוגית הישראלית

בהופעתם מהמשקעים הבהירים יותר בחלק הדרומי של חמרת פידאן. פענוח הגיל וסביבת ההשקעה של משקעים אלו מחייבים עבודת מחקר נוספת.



בבליוגרפיה

- אבני י.**, 1998, פליאוגיאוגרפיה וטקטוניקה בנגב המרכזי ובשולי בקע ים המלח בסוף הנאוגן והרביעון. דו"ח מכון גיאולוגי GSI/24/98
- גינת ח., אייל י., ברטוב י. זילברמן ע.**, 1994, מיפוי שברים צעירים במניפות הסחף בעיר אילת. דו"ח התקדמות טכני, המכון הגיאולוגי, TR-GSI/14/94.
- גינת ח.**, 1997, הפליאוגיאוגרפיה ושלבי התפתחות הנוף באגני הנחלים חיון וציחור. דו"ח מכון גיאולוגי GSI/19/97
- גינת ח.**, 2000, גיאומורפולוגיה ועיצוב הנוף מאז הנאוגן. פרק בספר: "אל קניוני מואב ואדום של רווק ושמידע. טבע הדברים. עמ' 30-38
- גרפונקל צ.**, 1970, הטקטוניקה של השוליים המערביים של הערבה הדרומית. עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 204 עמודים.
- לזר ב., שטיין מ., שקד י. ועגנון א.**, 2010, ריפים מאובנים של אלמוגים באילת ובעקבה – ארכיבים פליאו-אוקיאנוגרפיים ופליאו-הדרולוגים של מפרץ עקבה ברביעון העליון. מדריך לסיור בכנס אילות של החברה הגיאולוגית עמ' 69-77.
- לסמן נ., לנגוצקי י.**, 1961, סקר גיאולוגי לברור אפשרויות עבודות עפר: תכנון הרחבת נמל אילת. המכון הגיאולוגי, ירושלים, דו"ח MP-109/61
- קלבו, ר.**, 2000, סטרטיגרפיה ופטרולוגיה של תצורת חצבה בערבה ובנגב: השלכות לגבי התפתחות אגני ההשקעה והמורפוטקטוניקה של בקע ים המלח. עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית בירושלים; המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI/22/02
- רבקין א., גינת ח., אבני י.**, 2014, גיאולוגיה והתפתחות הנוף בערבה הצפונית. מחקרי נגב, ים המלח והערבה. 6 עמ' 43-58
- Abbas M., 2014**, Investigation and Reconstruction the Paleoclimate of Quaternary Sediments near the Gulf of Aqaba, Southern Jordan. MSc. Thesis, Al al-Bayt University, 118p.
- Al-Rifaiy, I.A and Cherif, O.H**, 1988, The fossil coral reefs of Al-Aqaba, Jordan. Facies, 18:219–230.
- Al-Shdaifat I. A., 2015**, A Geological and Paleoenvironmental Study of the Pleistocene Deposits in Hamra Faddan Area – Jordan. MSc. Thesis, Al al-Bayt University, 128p.
- Alsharhan, A.S. and Nairn, A.E.M.** 1997, Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East: Amsterdam, Elsevier, 811 pp.
- Avigad, D., Gvirtzman, Z.**, 2009, Late Neoproterozoic rise and fall of the northern Arabian-Nubian Shield: The role of lithospheric mantle delamination and subsequent thermal subsidence. Tectonophysics 477, 217-228
- Avni Y., Segev A., Ginat H.**, 2012, Oligocene regional denudation of the northern Afar dome: Pre- and syn-breakup stages of the Afro-Arabian plate. Geological Society of America Bulletin, November/December 2012. 1871-1897.
- Barjous, M. O.**, 1988, Ash Shawbak, geological map, 3151 III sheet, scale 1:50,000: Natural Resources Authority, Hashemite Kingdom of Jordan.

- Barjous, M. O.**, 1995, Petra & Wadi Al Lahyana, geological map, 3050I & 3050IV sheets, scale 1:50,000: Natural Resources Authority, Hashemite Kingdom of Jordan.
- Bartov, Y., Steinitz, G., Eyal, M. and Eyal, Y.**, 1980, Sinistral movement along the Gulf of Aqaba-its age and relation to the opening of the Red Sea. *Nature* 265:220-222.
- Bartov, Y.**, 1994, The geology of the Arava: explanatory notes to the geological map. *Geol. Surv. Isr.* 4 (in Hebrew).
- Be'eri-Shlevin, Y.**, 2008, The origin and evolution of Neoproterozoic magmatism in the northern Arabian-Nubian Shield (Sinai Peninsula, Egypt and southern Israel): evidence from stable and radiogenic isotope record. Unpublished Ph.D. thesis, Ben-Gurion University, Israel. 134 pp.
- Ben-Avraham, Z.**, 1985, Structural framework of the Gulf of Elat (Aqaba) – northern Red Sea, *J. Geophys. Res.*, 90, 703-726.
- Ben-Avraham Z., Lazar M., Garfunkel Z., Reshef M, Ginzburg A., Rotstein Y., Frieslander U., Bartov Y., H. Shulman H.** 2012, Structural styles along the Dead Sea Fault. *Phanerozoic Passive Margins, Cratonic Basins and Global Tectonic Maps*. V. 2 pp. 617-633.
- Ben-Yosef and Levy**, 2014, A 'Small Town' discovery twice: A forgotten report of major H. H. Kitchener. *Palestine Exploration Quarterly* 146,3:179-184.
- Bender, F.**, 1974, *Geology of Jordan*. Borntraeger. Berlin p. 196
- Bentor Y.K.**, 1985, The crustal evolution of the Arabo–Nubian massif with special reference to the Sinai Peninsula. *Precambrian Research* 28: 1–74
- Beyth, M.**, 1987, The Precambrian magmatic rocks of Timna Valley, southern Israel. *Precamb. Res.* 36:21-38.
- Beyth, M. and Peltz, S.**, 1992, Petrology and Major-element Geochemistry of the Dykes at Har Timna, southern Israel: *Isr. Geol. Surv. Rep.*, GSI/13/92 39 pp..
- Beyth, M., Stern, R., J., Altherr, R. and Kroener, A.**, 1994a, The Late Precambrian Timna Igneous Complex, Southern Israel: Evidence for Comagmatic Type Sanukitoid Monzodiorite and Alkali Granite Magma: *Lithos*, 31:103-124.
- Beyth, M., Stern, R., Altherr, R., Peltz, S. and Heimann, A.**, 1994b, Petrochemistry of Dolerite Dykes from Mt. Timna, Southern Israel: Implications for Plate Tectonic Setting: *GSI Current Research*: 9:24-26.
- Beyth, M. and Reischmann, T.**, 1997, The age of the Quartzmonzodiorite, the Youngest Plutonic Intrusion in the Timna Igneous Complex: *Isr. J. Earth Sci.*, 45:223-226.
- Beyth, M. and Heimann, A.**, 1999a, The youngest igneous event in the crystalline basement of the Arabian-Nubian Shield, Timna igneous complex: *Isr. J. Earth Sci.*: 48:113-120.
- Beyth, M., Segev A. and Bartov Y.**, 1999b, The Geological Map of Be'er Ora, 1:50,000 Sheet 25-IV *Geol. Surv. Isr.*

- Beyth, M., Eyal, Y. and Garfunkel, Z.,** 2012, The Geology of the Elat Sheet, Explanatory Notes: Geol. Surv. Isr. Report GSI/22/2011, updated March 2013, pp. 13
- El-Asmar, M.,** 1997, Quaternary isotope stratigraphy and paleoclimate of coral reef terraces, Gulf of Aqaba, South Sinai, Egypt, *Quaternary Science Reviews*, 16, 911–924.
- Eyal, M., Eyal, Y., Bartov, Y. and Steinitz, G.,** 1981, The tectonic development of the western margin of the Gulf of Elat (Aqaba) rift. *Tectonophysics* 80:39-66.
- Eyal, Y. and Eyal, M.,** 2015, Nature of slip transfer between strike-slip faults: The Eastern Sinai (Egypt) shear zone, *Dead Sea Transform. J. Structural Geol.* 76:52-60.
- Feinstein, S., Eyal, M., Kohn, B. P., Steckler, M. S., Ibrahim, K. M., Moh'd, B. K., & Tian, Y.,** 2013. Uplift and denudation history of the eastern Dead Sea rift flank, SW Jordan: Evidence from apatite fission track thermochronometry. *Tectonics*, 32(5), 1513-1528.
- Freund, R., Garfunkel, Z., Zak, I., Goldberg, M., Weissbrod, T. and B. Derin,** 1970, A shear along the Dead Sea Rift. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A.* 267:107-130.
- Garfunkel, Z.** 1999, History and paleogeography during the Pan-African orogen to stable platform transition: reappraisal of the evidence from Elat area and the northern Arabian-Nubian Shield. *Israel Journal Earth Sciences* 48, 135-57.
- Ginat H., Opitz S., Ababneh L., Al-Saqarat B., Lazar M. and Mischke S.,** In preparation, Pliocene-Pleistocene water-bodies and associated deposits in southern Israel and southern Jordan: a review.
- Garfunkel, Z.,** 1981, Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics: *Tectonophysics*, v. 80, p. 81–108
- Garfunkel, Z., Zak, I., Freund, R.,** 1981, Active faulting in the Dead Sea rift. *Tectonophysics* v. 80, p. 1-26.
- Hartman G., Niemi T.M., Tibor G., Ben-Avraham z., Al-Zoubi A., Makovsky Y., Akawwi A, Abueladas a., , and Al-Ruzouq r.** 2014, Quaternary tectonic evolution of the Northern Gulf of Elat/Aqaba along the Dead Sea Transform. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* V. 119 pp. 9183-9205.
- Jarrar, G.,** 2001, The youngest Neoproterozoic mafic dyke suite in the Arabian Shield: mildly alkaline dolerite from south Jordan-their geochemistry and petrogenesis. *Geol. Mag.* 138:309-323.
- Jarrar G., Stern R.J., Saffarini G., Al-Zubi H.,** 2003, Late- and post-orogenic Neoproterozoic intrusions of Jordan: implications for crustal growth in the northernmost segment of the East African Orogen. *Precambrian Research* 123, 295–319
- Jarrar G., Theye T., Yaseen N. Whitehouse M., Pease V., Passchier C.,** 2013, Geochemistry and P-T-t evolution of the Abu-Barqa Metamorphic Suite, SW Jordan, and implications for the tectonics of the northern Arabian-Nubian Shield. *Precambrian Research* 239: 56-78.

- Kesten, D., Weber, M., Haberland, Ch., Jassen, Ch., Agnon, A., Bartov, Y., Rabba, I., The DESERT Group.,** 2008, Combined satellite and seismic images to analyse the shallow structure of the Dead Sea Transform near the DESERT transect. *Int. J. Earth Sci.* 97:153-169.
- Klitzsch, E.,** 1981, Lower Palaeozoic rocks of Lybia, Egypt and Sudan, in C.H., H., ed., Lower Palaeozoic rocks of the Middle East, eastern and southern Africa and Antarctica, Wiley, 131-63.
- Meckee, E.D.** 1962. Origin of the Nubian and similar sandstones: *Geologische Rundschau* 52, 551-87.
- Mushkin, A., Navon, O., Halicz, L., Hartmann, G. and Stein, M.,** 2003, The Petrogenesis of A-type Magmas from the Amram Massif, southern Israel. *J. Petrol.* 44:815-832.
- Powell, J.H., Moh'd, B.K.,** 2011, Evolution of Cretaceous to Eocene alluvial and carbonate platform sequences in central and south Jordan. *GeoArabia*, 2011, v. 16, no. 4, p. 29-82.
- Rabba',** 1991, Al Qurayqira (Jabal Hamra Faddan), Geological map sheet No. 3051 II, scale 1:50,000: Natural Resources Authority, Ministry of Energy and Mineral Resources, The Hashemite Kingdom of Jordan: Bulletin 28, 60 pp.
- Rabba',** 1994, The geology of the Al Qurayqira (Jabal Hamra Faddan), map sheet No. 3051 II: Natural Resources Authority, Ministry of Energy and Mineral Resources, The Hashemite Kingdom of Jordan: Bulletin 28, 60 pp.
- Rech, J.A., Winer, E., Al Kuisi, M., Yasin, Y., and Coinman, N.,** 2009. Predicting the response of hydrologic systems in Jordan to future climate change. Final Report NGS CRE Grant, 8056-06.
- Sade A., Hall J.K., Tibor G., Niemi T.M., Ben-Avraham Z., Al-Zoubi A., Hartman G., Akawwi E., Abueladas A.-R., Amit, G.,** 2008, The multinational bathymetric survey: Northern Gulf of 'Aqaba/Elat Poster. *Israel Journal of Earth Sciences*, 57: 139–144.
- Sade, A. R., Hall, J. K., Tibor, G., Neimi, T. M., Ben Avraham, Z., Al-Zoubi, A., Hertman, G., Akawwi, E., Alueladas, A. and Amit, G.,** 2009, 3-D Images of the Multibeam Bathymetry of the Northern Gulf of Aqaba-Elat. Published by: Geological Survey of Israel, Tel Aviv University, Al-Balka Applied University, University of Missouri-Kansas City, Survey of Israel.
- Segev, A.,** 1984, Lithostratigraphy and Paleogeography of the Marine Cambrian Sequence in Southern Israel and Southern Jordan. *Isr. J. Earth Sci.* 33:26-33.
- Shaked Y.,** 2002, Neotectonics and Eustasy at the Gulf of Elat-Aqaba. Evidence from coral deposits and submarine morphology. Ph.D thesis, The Hebrew University of Jerusalem, 103 pp.
- Yaseen N., Pease V., Jarrar G., Whitehouse M.,** 2013, U–Pb detrital zircon provenance of the Saramuj Conglomerate, Jordan, and implications for the Neoproterozoic evolution of the Red Sea region. *Precambrian Research*, 239: 6-23.

החברה הגיאולוגית הישראלית



Israel Geological Society

מדריך סיור דרום ירדן החברה הגיאולוגית הישראלית

אוקטובר 2015



