מחקרי הנגב, ים המלח והערבה
מרכז מדע ים-המלח והערבה
Dead-Sea & Arava Science Center
Under the Auspices of Ben-Gurion University of the Negev
בחסות אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
Negev, Dead Sea and Arava Studies

מאמר מחקר
Research article

קצב התחתרות נחלים באבני חול באזור מכרות נחושת עתיקים בבקעת תמנע

י׳ שלומי[1], ח׳ גינת[1], ט׳ מרון[2], י׳ הולצר[3]

[1] מרכז מדע ים המלח והערבה
[2] האוניברסיטה הפתוחה
[3] בית הספר מעלה שחרות, יטבתה

[*] פרטי התקשרות: חנן גינת hananginat@adssc.org

ת ק צ י ר

בבקעת תמנע נתגלו שרידים ועדויות להתפתחות הכרייה והפקת הנחושת לכל שלביה, החל מהניסיונות הראשונים של האדם להפיק מתכת מאבני החול הלבנות בתקופה הכלקוליתית (4500–3300 לפנה"ס) ועד להפסקת הפעילות בתקופה הערבית הקדומה בסוף האלף הראשון לסה"נ. בשיא תקופת הכרייה לפני 3,400 ועד 2,900 שנה חצבו הכורים באמצעות אזמלים העשויים מברונזה פירים לעומק עשרות מטרים ומנהרות כרייה. אלפי פירים נחפרו מגג טרסות נחל אל אבני החול של תצורות אמיר ועברונה, בהן אופקי הנחושת. במעלה הערוצים של נחל תמנע החתור באבני חול ובסחף נחלי בבקעת תמנע נחשפים פירים ומנהרות כריית נחושת, מרביתם מהתקופה המצרית, שבהם ניתן להבחין בסימני חציבתם בעזרת אזמלים. כיוון החציבה מראה שהמנהרות נחצבו מפני השטח לכיוון הערוץ ולא כמצופה, מהערוץ לתוך הסלע. פירי כרייה חצויים בצדי הערוצים ועל קרקעיתם מעידים כי נכרו לפני היווצרות הערוצים. המסקנה מתצפיות אלו שבתקופת חציבת הפירים והמנהרות לא היו הערוצים חתורים כפי שהם היום, והכרייה והחציבה נעשו מפני שטח גבוהים יותר. כמות המשקעים השנתית הממוצעת בתמנע היא 20 מ"מ בשנה, ונראה שאקלים דומה שרר במשך שלושת אלפי השנים האחרונות. שיטפונות בעוצמה גבוהה, שתדירותם הממוצעת אחת לשנה, גורמים להתחתרות הערוצים. מאמר זה עוסק בלימוד ובניתוח תהליכים וקביעת הקצב של התחתרות הנחלים בבקעת תמנע בתנאי מדבר צחיח קיצון על סמך עדויות ארכיאולוגיות של מכרות נחושת עתיקים. עבודת שדה כללה את איתור המכרות העתיקים הנחשפים בנחלים שהתחתרו. ניתן לקבוע שעוצמת ההתחתרות המקסימלית מגג טרסות הנחל ועד האפיק הפעיל כיום הגיעה ל-30 מטרים. ממוצע ההתחתרות לאחר כריית הנחושת כפי שנמדד לאורך שלושה נחלים בבקעה הוא 10–13 מטרים. משמעות הדבר שקצב ההתחתרות הממוצע הנו כארבעה מטרים באלף שנה. זהו קצב מהיר מאוד בהשוואה לקצבי התחתרות המוכרים בספרות. הסיבות לכך הן ההתחתרות ביחידות סלע רכות יחסית (סחף נחלי ואבני חול), שיטפונות בעלי עוצמה חזקה במדבר צחיח קיצון וריבוי החללים בתת-הקרקע של המנהרות ושל הפירים.

מילות מפתח:
בקעת תמנע
פירי כריית נחושת
התחתרות נחלים
קצב התחתרות

Pace of degradation in streams within sandstone in a region with copper mines (Timna Valley, southern Israel)

Y. Shlomi[1], H. Ginat[1], T. Meron[2], A. Holtzer[3]

[1] Dead Sea and Arava Center

[2] Open University

[3] Maale Shaharut High School

* Corresponding author: hananginat@adssc.org

A B S T R A C T

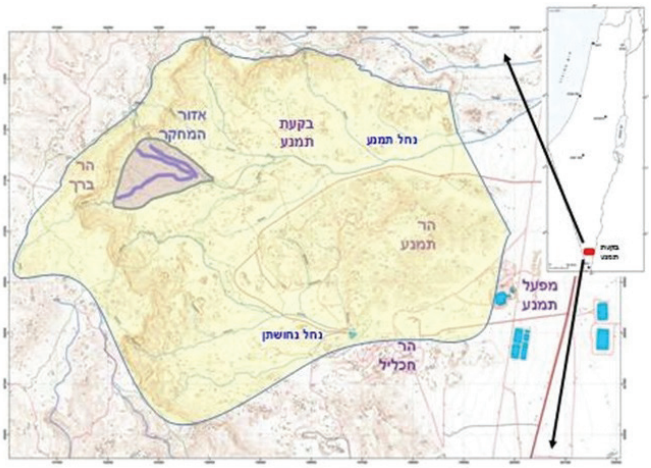
Within the Timna Valley, artefacts and additional evidence of early copper mining were discovered. There are indications of mining through all its stages from man's first attempts to produce metals from the white sandstone in the Chalcolithic period (3300–4500 BC), until production ceased in the Early Islamic period at the end of the first millennium AD. At the height of mining (3400–2900 years ago), miners excavated shafts tens of meters deep as well as tunnels using bronze chisels. Thousands of copper shafts were excavated from a top river terraces into the copper-rich layers of the Amir and Evrona Formations. This article focuses on the analysis of incision processes under hyper-arid conditions and on determining incision rates within Timna Valley based on archaeological evidence from the ancient copper mines. Within the Timna stream, incised in sandstone and fluvial alluvium, the quarried shafts and tunnels exposed are mainly from the Egyptian period. The tunnels exhibit chisel excavation marks that indicate that the excavation progressed from the surface towards the riverbed and not the the opposite direction as initially assumed. Truncated shafts at the sides and bottom of the current riverbed indicate that they were excavated prior to river incision to its current level. Based on these observations we conclude that during the quarrying of the tunnels and shafts the streams were not yet incised and the excavations were carried out from the surface which was at a higher elevation than at present. The current average annual rainfall in Timna is 20 mm per year and most probably similar climatic conditions have prevailed for the past thousands of years. High intensity floods, occurring once a year on average, are responsible for the river's incision. This article presents the findings of field work including locating the ancient quarries exposed in the river beds. It can be inferred that maximum incision in the channels is 30 meters. The average amount of incision along three channales that were measured is 10x13 meters and occurred after the mining activities. This indicates that the average incision rate is approximately four meters per one thousand years. This rate is very high compared to incision rates reported in literature. The reasons for this are the soft bedrock (sandstone and fluvial alluvium), high intensity flooding in the hyper-arid desert and the numerous underground tunnels and shafts.

Keywords:
Timna Valley
Mining shafts copper
River incision
Incision rate

פרק 1: כריית הנחושת בתמנע

1.1. הכרייה של נחושת בבקעת תמנע

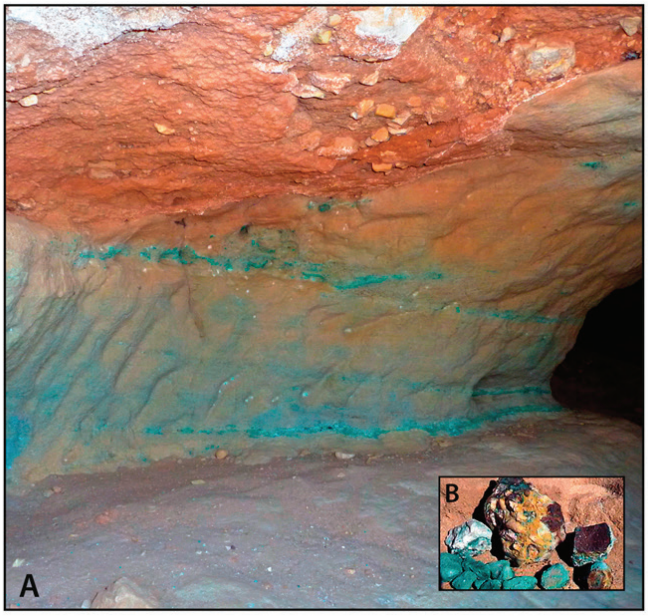
איסוף וכריית הנחושת בבקעת תמנע, המצויה 30 ק"מ מצפון לאילת (איור 1), החל בתקופה הכלקוליתית, לפני כ-6000 שנה (אבנר, 1979; Rothenberg, 1988; Rothenberg and Shaw, 1992). ראשית כריית הנחושת באבני החול הלבנות באיסוף תרכיזים של תרכובות נחושת מפני השטח ובחציבות רדודות בעקבות תרכיזי הנחושת שנחשפו בסלע, ועד לפתיחת חללים רחבים בסלע (איור 2). כלי העבודה הקדומים היו כלי אבן ובהמשך נכנסו לשימוש קרדומים ואזמלים העשויים מברונזה (ברונזה היא תרכובת של נחושת, בדיל ואבץ). במרוצת הזמן התפתחה טכנולוגית הכרייה, ונחצבו פירים שקוטרם כמטר אחד ועומקם ממטרים בודדים ועד עשרות מטרים (איור 3). במקומות רבים היה צורך לחצוב דרך כמה מטרים של סחף נחלי הכולל בעיקר חלוקי גיר. החוצבים באבן החול הלבנה נעזרו במדרגות שקועות או בולטות עד תחתית הפיר. כאשר הגיעו החוצבים לאופקים עשירים בתרכיזי נחושת, החלו בחציבה אופקית לאורך האופקים במנהרות כרייה. אז נחפרו פירים נוספים לאותו מכרה לשם יצירת מעבר של אוויר, חדירת אור והוצאה מהירה ויעילה יותר של החומר שנכרה.



איור 1: מפת מיקום אזור המחקר

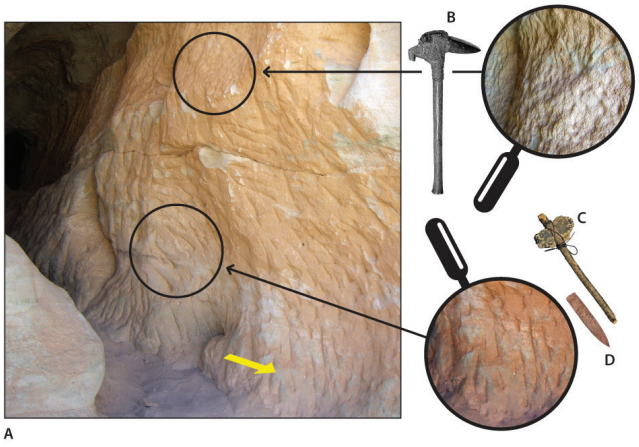
מעקב אחר טכנולוגיית הכרייה מאפשר לזהות בברור שלושה שלבים: שלב קדום: בתקופה הכלקוליתית, בעיקר מן האלף הרביעי לפנה"ס, נחצבו בורות ומנהרות בחללים רחבים בסלע. הכרייה בוצעה בכלי אבן (Rothenberg and Shaw, 1992; Drenka 2003), כלים אלו איבדו את חדותם במהרה ולכן לא השאירו סימני חציבה. שלב שני: בתקופה המצרית הקדומה במאות ה-19–20 לפנה"ס נעשתה כרייה באמצעות גרזיני אבן צור. ביטוי לחציבה זו ניתן לראות בצלקות אופייניות (שקעורויות קהות שקוטרן סנטימטרים אחדים) שהותירו כלי האבן על דופנות המכרות. טכנולוגית הכרייה חייבה פירים שקוטרם יהיה 120–180 ס"מ.

עיקר הכרייה נעשתה בתקופת הברונזה המאוחרת בתמנע (מסוף המאה ה-14 ועד המאה ה-10 לפנה"ס). בשלב השלישי כרו המצרים אלפי פירים שקוטרם 60–80 ס"מ, והחציבה נעשתה על ידי מקבת אבן או ברונזה שבה הקישו על אזמל יצוק מברונזה (רותנברג, 1992, 1995; Ben Yosef et al., 2012). חלק מהפירים היוו "קידוחי ניסיון" במטרה לאתר אופקי ותרכיזי נחושת. כאשר נמצאו תרכיזים, נכרו מנהרות כרייה אופקיות מן הפירים, לעיתים במספר מפלסים. אל מנהרות אלו נפתחו פירים נוספים במטרה לאפשר כניסת אור ואוויר, ולייעל את הוצאת החומר מהמכרות. מנהרות הכרייה האופקיות היו צרות יחסית, עובדה שהגנה עליהן מקריסה. סימני החציבה האופייניים לכלי הברונזה נראים על קירות המכרות בצורת צלקות אלכסוניות וחדות (איור 2). בבקעת תמנע מוכרים לנו פירים המגיעים לעומק של 37 מטרים.



איור 2: מנהרה חפורה באבן החול הלבנה עם עורקי נחושת ובצד שמאל מעליה שכבת קונגלומרט (A). בתמונה הקטנה מימין (B) תרכיזי נחושת (ירקרקים) וברזל (סגולים)

השימוש בכלי ברונזה, שהיא מתכת קשה, אפשר כרייה של פירים ברוחב אדם – 60–80 ס"מ, כך שאפשר היה לטפס בהם בעזרת גומחות חצובות בסלע (מדרגות). לאחר סיום הכרייה נסתמו מרבית הפירים, אם כתוצאה מהתמוטטויות ואם במכוון בידי אדם. בשטח נותרו שקעורויות רדודות מעוגלות בפתח הפירים הסתומים שכונו "הצלחות" (כהן, 1979; Rothenberg, 1988). חומר דק-גרגר המוסע על ידי הרוח ועל ידי המים הניגרים על פני משטחים אלו, שקע והתהדק בשקעורויות במשך הזמן. שקעורויות אלו נראות בשטח בריכוזים צפופים (במרחק של מטרים בודדים ביניהן) ומעידות על צפיפות הכרייה. בעזרת צילומי אויר, התקבלה הערכה של למעלה מ-8,000 "צלחות" (Rothenberg, 1988) (איור 3).



איור 3: שתי שיטות חציבה של כריית הנחושת במנהרת כרייה (A). בחלק העליון של התמונה, בעיגול העליון כרייה בעזרת קרדום עם אבן צור בקצהו (B), התמונה מימין מראה את סימני החציבה. בשלב השני נכנסו לאותן מנהרות והעמיקו אותן בעזרת אזמל ומקבת (C ,D). בעיגול התחתון סימני החציבה בצורת קווים מאורכים ואלכסוניים שמצביעים על כיוון החציבה, החץ הצהוב מצביע על כיוון התקדמות החציבה של המנהרה משמאל לימין

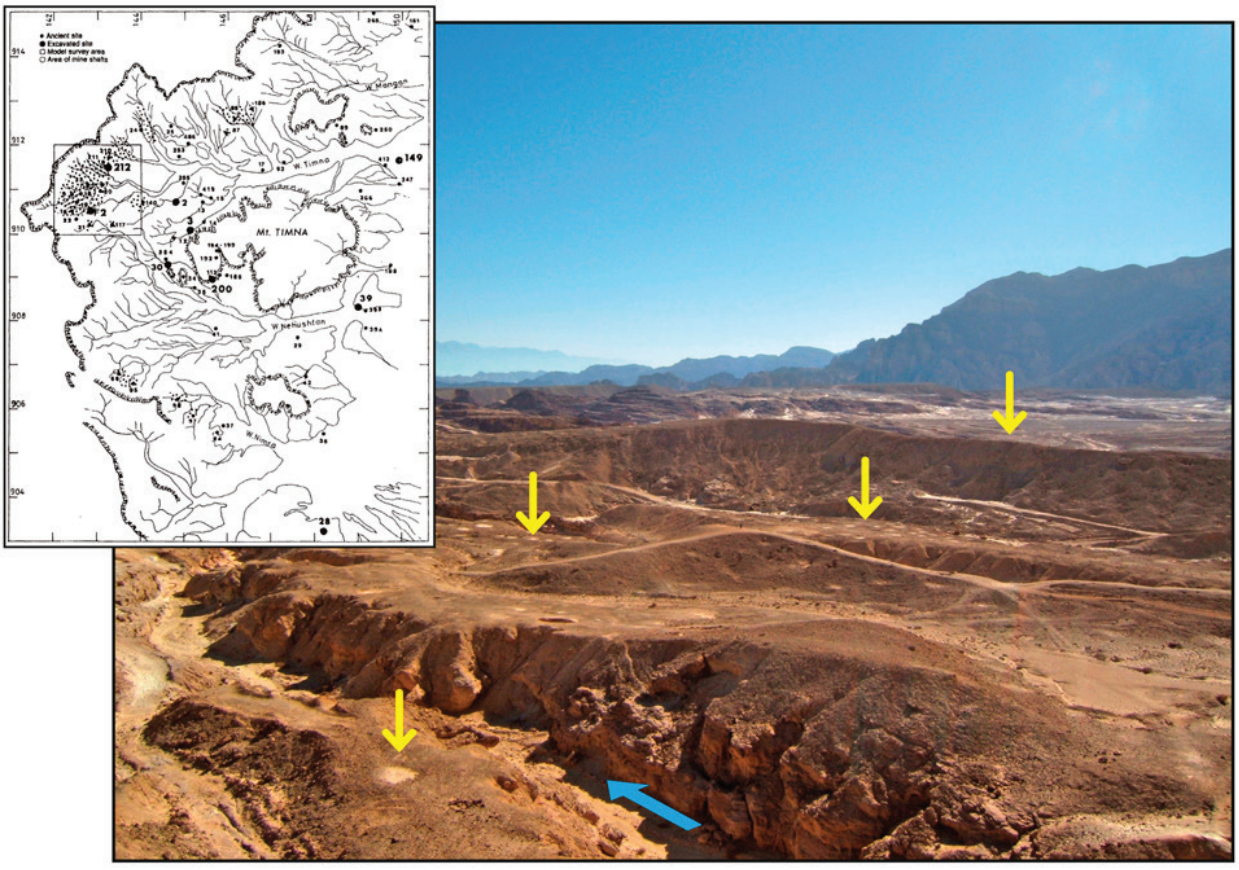
בתקופה המצרית ובמיוחד החל מלפני 3,300 שנה נוצר ביקוש רב לנחושת במצרים, ולכן נשלחו משלחות מצריות לתמנע במטרה לכרות ולהפיק נחושת. במקורות מצריים, בעיקר מימי רעמסס השלישי, מתוארות המשלחות שיצאו להביא נחושת, ככל הנראה מאזור בקעת תמנע, שכונה בפיהם "עתיקה" (Rothenberg, 1988).

1.2. מטרות ושיטות המחקר

בנחלים החתורים באבני חול ובסחף נחלי בבקעת תמנע, נחשפים מכרות נחושת עתיקים מהתקופה הכלקוליתית ומהתקופה המצרית. עדויות שדה באזור הקשתות בבקעת תמנע מעידות שחפירת המכרות נעשתה מגג טרסות הנחל ולא ישירות אל מחשופי אבן החול שבערוצים.

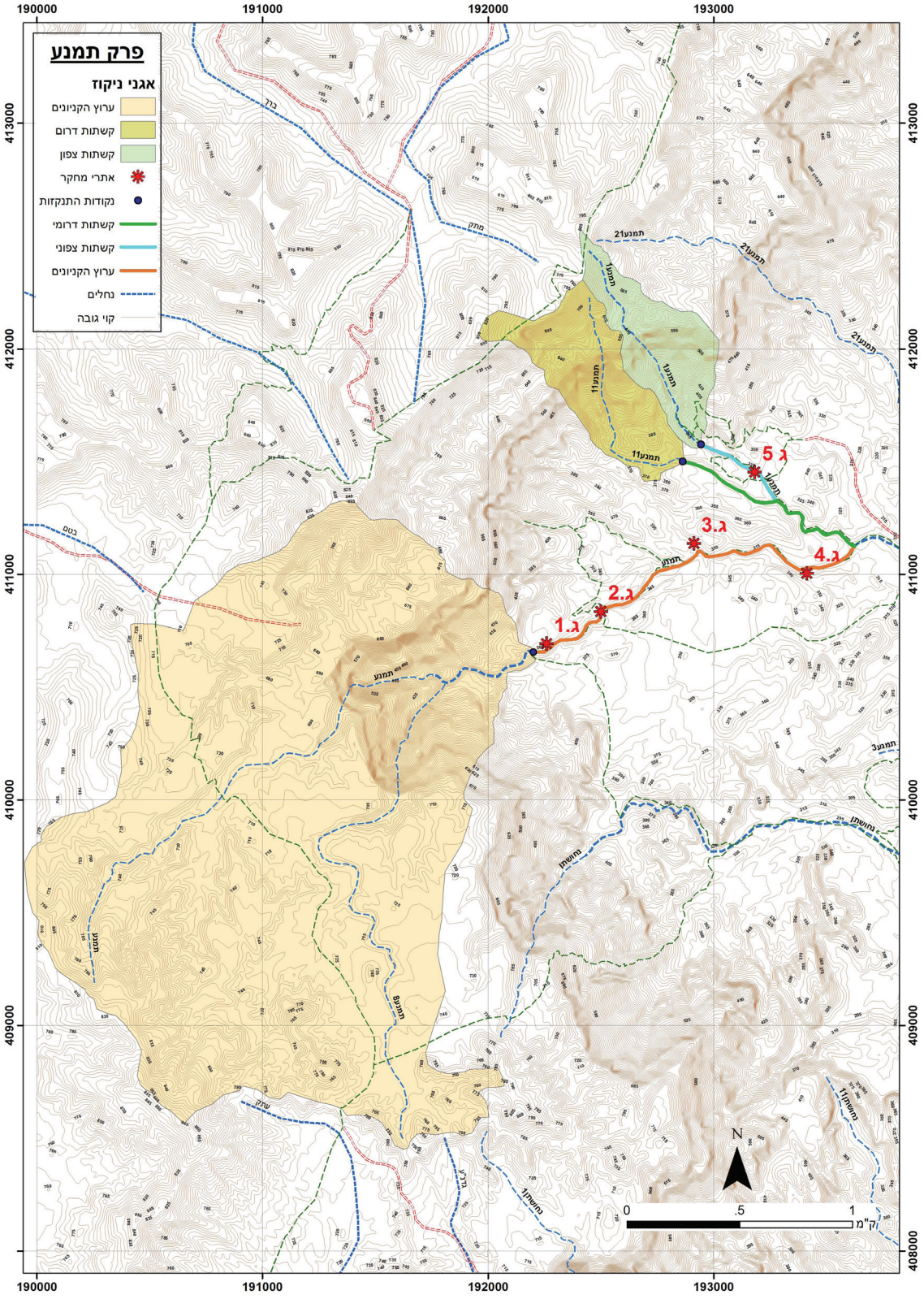
כיום חשופים לאורך ערוצי הנחלים הפעילים ובסמוך למצוקי תמנע פירים ומערות כרייה. נחלים בתקופה זו זרמו כנראה במפלס הנמוך אך במעט ביחס למפלס טרסות הנחל שעליהם הצלחות, ולא זרמו כערוצים בתוך אבני החול, החשופות היום. כלומר הכרייה התבצעה עוד לפני עיקר התחתרות הנחלים בבקעה. הצלחות המצויות על גבי טרסות הנחל הן ראשי הפירים ומהם התבצעה הכרייה. הפירים ומערות הכרייה החשופים כיום לצד הנחלים היו אז בתת-הקרקע, והתחתרות נחלים המאוחרת לכרייה היא שהביאה לחשיפת הפירים והמערות. במרבית המקרים ניתן לקבוע את גילם של המכרות העתיקים על פי טכנולוגיית הכרייה. מטרת עבודה זו הייתה לקבוע את קצב ההתחתרות של נחלים באבן חול בבקעת תמנע באזור המכרות העתיקים. עיקר ההתחתרות התרחשה בתנאי אקלים של מדבר צחיח קיצון לאחר תום כריית הנחושת באבני החול הלבנות, במהלך 3,000 השנים האחרונות.

שיטות המחקר: המחקר התבצע באזור המערבי של בקעת תמנע בשטח שגודלו 7.2 קמ"ר. באזור זה קיימים פירים ומחילות רבים לצד הערוצים החתורים. לשם עבודה מפורטת נבחרו שלושה ערוצים למרגלות המצוק ובאזור דרומית לאתר הקשתות (איורים 4, 5), שבהם אותרו פירים ומחילות כרייה החשופות לצד הערוצים הפעילים.



איור 4: משטחי צלחות במפלסים שונים. החצים הצהובים מסמנים צלחות במיקומים שונים, החץ הכחול מסמן את כיוון הזרימה בערוץ החתור. בצד שמאל מיקום האזורים שבהם מופיעות הצלחות במערב הבקעה למרגלות המצוקים (מתוך רותנברג, 1967)

סקרי שטח בוצעו בעזרת GPS ידני ומדידות באמצעות סרט מידה שאתם בוצעו חתכי אורך ורוחב מדויקים על מנת לקבוע את רוחבם ואת עומקם של הערוצים. כמו כן נאספו עדויות לגבי הכלים שבהם התבצעה החציבה על פי סימני החציבה במערות – על פי זה נקבע זמן החציבה. על פי הממצאים נקבעה עוצמת ההתחתרות של הנחלים מאז כריית הנחושת, וחושב קצב התחתרות הנחלים באזור המחקר. כמו כן נבדקה עוצמת ההתחתרות בערוצים שבהם אין חשיפת פירים ומנהרות, על מנת לבחון השפעתם על עוצמת ההתחתרות.



איור 5: מפה שמראה את שלושת ערוצי המחקר החתורים – ערוץ הקניונים הדרומי וערוצי הקשתות הצפוני והדרומי. במפה מסומן מיקומם של אתרים בעלי עניין מיוחד: פיר החלון (ג.1), פיר החבל (ג.2), הפיר התלוי (ג.3), המערה הרומית (ג.4), המערה בערוץ הקשתות הצפוני (ג.5).

פרק 2: מבואות

2.1. הרעיון המרכזי

בספרות קיימת התייחסות מועטה בלבד לקצבי התחתרות של נחלים החתורים בסלעים במדבר צחיח קיצון. ווהל ועמיתיו (Wohl et al., 1994) מסכמים במאמרם את קצבי ההתחתרות בנחלים במדבר צחיח וצחיח למחצה ובסוגי סלע שונים. קצב ההתחתרות לרוב בין 0.09 ל-0.3 מטר באלף שנה בסלעים מגמתיים וסלעי משקע. מספר גבוה במיוחד מוזכר באזור צחיח בנחל צין בקצב של 0.45–1.3 מטרים באלף שנה (Yair et al., 1982) בהתחתרות נחלים מסדר ראשון–שלישי בסלעי חוואר. מעבר לכך לא נמצאו בספרות מאמרים העוסקים בנושא זה. חשיפת פירי כרייה לצד הערוצים הפעילים שגילם ידוע על פי עדויות ארכיאולוגיות, מאפשרת להעריך את קצב ההתחתרות של הנחלים באבני חול במדבר צחיח קיצון (שלומי וחובריו, 2011).

מעט מאוד מאמרים מתייחסים בספרות לקביעת קצב התחתרות הנחלים בתמנע על סמך העדויות הארכיאולוגיות. כהן (1979) מציין את התחתרות האפיקים לאחר כריית הפירים ואת ההשפעה האפשרית של מחילות הכרייה על קצב ההתחתרות. כהן גם מזכיר את אבן החול הפרירה כגורם משמעותי להתחתרות המהירה, ואולם אינו מחשב את קצב ההתחתרות בתקופה שבין כריית המחילות ועד היום. הורוביץ מציין אף הוא את נושא ההתחתרות של הנחלים באזור המכרות, אך מבלי לקבוע עוצמה וקצב של ההתחתרות (רותנברג, 1967). מרון (2012) עוסקת בצורה מפורטת בהשפעת המחילות הכרויות על ההתחתרות, ומסקנתה שעיקר ההתחתרות נגרמת כתוצאה מתהליכים טבעיים, ותרומת המחילות להתחתרות המהירה כנראה אינה משמעותית.

חשוב לציין, שיש להביא בחשבון שבתוך אבני החול יש גם מנהרות ופירי כרייה מעשה ידי אדם, ואולם בהחלט ניתן לקבל הערכה כללית של קצבי ההתחתרות על סמך תצפיות השדה בבקעת תמנע.

2.2. רקע גיאוגרפי

בקעת תמנע מצויה בשוליים המערביים של הערבה הדרומית, ושטח הבקעה כ-60 קמ"ר. קשת מצוקים הנמצאת מצפונה ממערבה ומדרומה, משווה לה צורת פרסה פתוחה כלפי מזרח. הבקעה מנוקזת על ידי נחלים שזורמים מזרחה אל הערבה: הנחלים נחושתן, תמנע, ססגון ונמרה. במרכז הבקעה מתנשא הר תמנע לגובה של 453 מטרים מעל פני הים. הצמחייה בבקעת תמנע אופיינית למדבר צחיח קיצון, ומאופיינת בתפזורת של עצי שיטה ושיחים נמוכים בערוצים הפעילים בלבד.

כבר באלף החמישי לפנה"ס הגיע האדם לתמנע בחיפושיו אחר עפרות הנחושת. בקעת תמנע הפכה למרכז כרייה והפקת נחושת בתקופות שונות החל מהתקופה הכלקוליתית ובעיקר בתקופת הברונזה המאוחרת ועד התקופה המוסלמית לפני כ-1,400 שנה. בני האדם ששהו בבקעה הותירו אחריהם עדויות ארכיאולוגיות רבות שמעידות על התפתחות חברתית, דתית וטכנולוגית (רותנברג, 1995).

החל מאמצע שנות החמישים של המאה ה-20 החלו בכריית נחושת ביחידת סלע של דולומיט חולי. הכרייה הופסקה ב-1980 עקב הירידה המשמעותית במחירי הנחושת בעולם. בשנים האחרונות עלתה מחדש אפשרות כריית הנחושת, וזיכיון הכרייה וההפקה ניתן לחברה המקסיקנית אהמסה.

פארק תמנע שייך למועצה אזורית חבל אילות ולקרן קיימת לישראל, ובפארק מבקרים מדי שנה 130,000 איש. מוקדי התיירות לביקור המטיילים בפארק כוללים מגוון רחב של יחידות סלע ותופעות גיאולוגיות, תבניות נוף יחודיות (כגון עמודי שלמה והפטרייה) ואתרי כרייה והפקה של נחושת מראשיתה (רותנברג 1995; גינת והולצר, 1999).

2.3. רקע אקלימי והידרולוגי

חלקו הדרומי של בקע ים המלח מהערבה ועד אילת, כולל בקעת תמנע, מאופיין כיום כמדבר צחיח קיצון. תיאור מפורט של האקלים והמשקעים בערבה ובראש מפרץ אילת נעשה על ידי אשבל (1951), שמואלי וגרדוס (1979), גינת (1993) ואחרים. כמות המשקעים הממוצעת של מעל ל-60 שנות מדידה באילת (החל משנת 1951) היא 25 מ"מ. אירועי הגשם עשויים להתפתח בחודשים ספטמבר ועד מאי, ושכיחותם הגדולה ביותר בחודשים דצמבר–מרץ.

תדירות אירועי הגשם בבקעת תמנע נמוכה ולא סדירה, ותאי הגשם הקטנים יוצרים ממטרים מקומיים לרוב, המאופיינים בשונות רבה ביותר בזמן ובמרחב. בין השנים קיימת שונות רבה מאוד בכמויות המשקעים השנתיות, עד חריגה של מעל 75% בשנה מהממוצע הרב-שנתי. עיקר המשקעים שגורמים לשיטפונות נגרמים על ידי אפיקי ים סוף פעילים (Kahana et al., 2004; Tsvieli and Zangvil, 2005). אחת לכמה שנים קיימים אירועי גשם בעלי עוצמה חריגה, שלעיתים גורמים להתחתרות משמעותית בנחלים, דוגמת האירוע של ה-8.5.2014 (גינת ושלמון, 2014).

אמית וחובריה (Amit et al., 2006), גינת וחובריו (Ginat et al., 2009) ואנזל וחובריו (Enzel et al., 2012) מציינים על פי ניתוח של תוואי הנחלים ושל קרקעות הרג המפותחות באזור, שהאקלים במהלך אלפי השנים האחרונות היה אף הוא צחיח קיצון ודומה להיום. לפיכך סביר שאופי השיטפונות לאורך 3,000 השנים האחרונות היה דומה לאופיים הנוכחי.

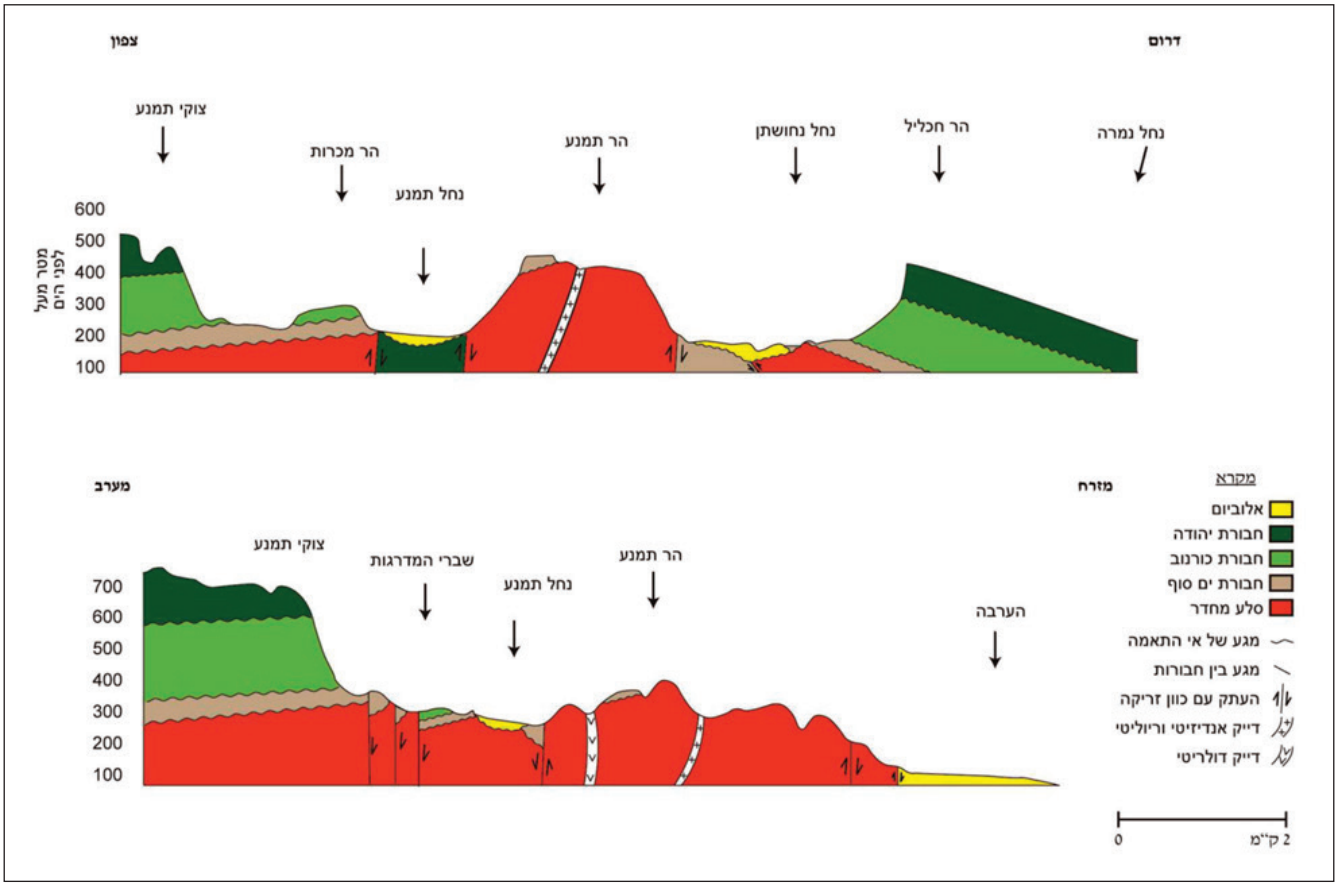
את בקעת תמנע מנקזים נחלים מזרחה אל בקע הערבה ואל בסיס הסחיפה במלחת יטבתה (איור 1). יובליהם של הנחלים מתחילים מפסגות המצוקים ממערב לבקעה באזור הר ברך והר עתק בגובה של 800 מטרים. הנחלים זורמים בכיוון צפון מזרח אל בסיס הסחיפה שגובהו כ-70 מטרים מעל פני הים.

עוצמות הגשם החזקות בחלק מאירועי הגשם בערבה, עם המדרונות התלולים לרוב, הריקים מצומח והקרקעות ששיעור החלחול בהן קטן, יוצרים תנאים מתאימים להיווצרות שיטפונות. באפיקים קטנים מופיעה זרימה כבר לאחר מילימטרים בודדים של גשם. הזרימה מתנקזת לאפיקים גדולים יותר, וחלק מהגאויות נעלמות עקב חלחול המים באלוביום שעומקו לרוב כמה עשרות מטרים באפיקים מסדר שלישי ורביעי. זרימה רציפה בערוצים ועד לבסיס הסחיפה במלחת יטבתה מתאפשרת רק אחת לכמה שנים, כשכמות הגשם ועוצמתו גבוהות דיין. אירועי זרימה קיצוניים בעבר מוכרים בנגב ובשולי הערבה על פי עדויות לזרימה בגובה של מטרים אחדים מעל האפיק הפעיל (Greenbaum et al., 2001). תדירות השיטפונות בנחלים תמנע ונחושתן בממוצע היא אחת לשנה, אולם אפשרי שהזמן בין שני אירועי שיטפון עוקבים יהיה

שעות או שנים אחדות (שיק, 1991; גרינבאום וחובריו, 2003; Ginat et al., 2010).

2.4. רקע גיאולוגי

בקעת תמנע, המצויה בשולי בקע ים המלח, מכילה בתוכה את רוב יחידות הסלע שקיימות בדרום ישראל, ובכך משמשת מעין "חלון גיאולוגי" (בייט וחובריו, 1999; בייט וקלבו, 2014). את יחידות הנוף בבקעת תמנע ניתן לחלק לארבע קבוצות עיקריות (איור 6). הראשונה והעתיקה ביותר היא יחידת הסלעים המגמתיים, שהייתה חלק מהמסיב הערבי-נובי. יחידה זו, החשופה בהר תמנע במרכז הבקעה, מורכבת בעיקרה מסלעים פלוטונים אדומים כגון גרניט וסיאניט, וכן יש בה דייקים רבים בעיקר בהרכב של ריאוליט ואנדזיט.



איור 6: שני חתכים גיאולוגיים שמראים את יחידות הסלע העיקריות בבקעת תמנע. העליון חתך מצפון לדרום והתחתון חתך מזרח-מערב מההר אל הערבה.
באיור חמש יחידות סלע שונות. הצבע הכתום מייצג את הסלעים המגמתיים, הצבע החום את אבן החול הקדומה, הצבע הירוק-בהיר את אבן החול הנובית, הצבע הירוק-כהה את סלעי המשקע הימיים, והצבע הצהוב את הסחף הנחלי (מתוך בייט, 2014)

היחידה השנייה היא אבן החול הנובית, שבנויה מאבני חול דקות וגסות-גרגר, המכילות בעיקר גרגרי קוורץ מעוגלים ומעט חלוקים. נחלים רחבי ידיים הובילו סחף, כנראה מכיוון דרום מזרח, והשקיעו את חלקו בדרכם לבסיס הסחיפה. יחידה זו, שעובייה הכולל כ-450 מטרים, כוללת אבני חול שהושקעו לפני 500–520 מיליון שנה וכן לפני 100–150 מיליון שנה, והן נחשפות כיום בבקעה ובחלק התחתון של מצוקי תמנע.

היחידה השלישית בנויה מסלעי משקע ימיים. ים תטיס הציף את אזור הבקעה בתקופה שבין 100 ל-40 מיליון שנה. בים שקעו בעיקר סלעי גיר עשירים מאוד במאובנים, וכן סלעי דולומיט, חוואר, חרסית, קירטון, פוספוריט וצור. במהלך ההצפה הושקעו סלעי משקע ימיים בעובי כולל של 800 מטרים. יחידה זו חשופה כיום בחלק העליון של מצוקי תמנע ובשולי הבקעה.

יחידת הנוף הרביעית היא יחידה שעיקרה אלוביאלי, והיא כוללת קונגלומרטים שהושקעו בתוך הבקעה בנחלים שזרמו במהלך שלושת מיליון השנים האחרונות לכיוון הערבה. המשקעים האלוביאלים הם בעיקר חלוקי גיר תת-מזוותים עד תת-מעוגלים, והם נחשפים בטרסות נחל בשולי האפיקים הפעילים. בתמנע ארבעה סוגים שונים של טרסות נחל שניתן לזהות על פי גובהן היחסי מעל האפיקים הפעילים (גרוסמן, 1982; Ginat et al., 2009). לצד מצוקי תמנע מצויות דיונות חול שנוצרו כתוצאה מחשיפה, בליה והצטברות של אבני חול נוביות הנחשפות למרגלות המצוקים. חשיפת יחידות סלע אלו התאפשרה בזכות פעילות של שבירה בשולי בקע ים המלח והערבה. הסלעים שנחשפו, התבלו ונסחפו בנחלים אל בסיס הסחיפה במלחת יטבתה.

בתמנע קיימים מינרלים בעלי חשיבות כלכלית רבה כגון נחושת ומנגן, ולפיכך הייתה בה פעילות של כרייה בתקופות שונות לאורך ההיסטוריה. מחקרים גיאולוגיים מצאו שהמאסף המינרולוגי המיוחד של בקעת תמנע נוצר בארבעה שלבים. בשלב הראשון נוצרו המינרלים הסולפידיים של הנחושת כחלק מסוף הפעילות המגמתית בתקופת

הפרהקמבריום (לפני כ-600 מיליון שנה). השלב השני היה מלווה בהתגבשות סלע דולומיט מועשר בנחושת ובמנגן בתוך לגונות של האוקיינוס הקמברי (לפני כ-540 מיליון שנה). בשלב זה נוצרו מינרלי המנגן המעושרים באורניום בתוך שכבות ועדשות בתוך סלע הדולומיט. השלב השלישי של הצטברות מינרלי הנחושת בבסיס תצורת עברונה ויצירת תרכיזי מנגן דלי-אורניום היה באמצעות תמלחות מים חמות שליוו את הפעילות הגעשית של הקרטיקון התחתון (לפני כ-100 מיליון שנה). השלב הרביעי והאחרון היה גם הוא באמצעות תמלחות מים חמות שנוצרו לאורך בקע ים המלח בשלישון וגרמו להמסת הדולומיט החולי בתצורת תמנע. עיקר ההמסה היה לאורך העתקים "צעירים", ובכך גרמה להעשרה בנחושת, במנגן ובאורניום לאורך העתקים של שולי הבקע (Beyth et al., 2013).

2.5. רקע גיאומורפולוגי

מצוקי תמנע בנויים בחלקם התחתון מאבני חול לרוב פרירות ועליהן סלעי משקעי ימיים, בעיקר סלעי גיר קשים. בבסיס המצוק נחשפות אבי החול הלבנות של יחידות הסלע אמיר ועברונה, ובהן גם תרכיזי הנחושת. תהליכי בליה וסחיפה גורמים לנסיגת מצוקים ולהתחתרות נחלים בסמוך לבסיס המצוקים.

חומרי בליה, בעיקר של סלעי גיר מהחלק העליון של המצוק, הצטברו בקרקעית הבקעה למרגלות המצוקים. ירידה הדרגתית של בסיס הסחיפה של הנחלים תמנע ונחושתן יצרה מפלסי סחיפה והשקעה של קונגלומרטים המצויים כיום בגובה של מטרים בודדים ועד כ-60 מטרים מעל האפיקים הפעילים.

עיקר הסחף כולל סלעי גיר שמקורם מהחלק העליון של המצוק. אבני החול שנסחפו התפוררו, ולפיכך האחוז היחסי שלהן בסחף קטן בהרבה מהאחוז שלהן בשטח אגן הניקוז. הטרסות הגבוהות ביותר הן גם העתיקות ביותר, והושקעו כנראה במהלך תקופת הפליסטוקן התיכון והעליון במרכז הבקעה (Ginat et al., 2009). במעלה אגן הניקוז ובסמוך למצוקים גובה הטרסות ביחס לאפיקים הפעילים גדול יותר מאשר במורד הנחלים.

התחתרות הנחלים מתרחשת בעת אירועי זרימה שיטפוניים. קצב ההתחתרות מוכתב על ידי סוג הסלע, עוצמת הזרימה, משך הזרימה וכמות הסחף וסוג הסחף המובל בשיטפון (גרוסמן וגרסון, 1985; גינת 1995).

בכל מהלך תקופת ההולוקן היה האקלים צחיח קיצון, אם כי כמות המשקעים הייתה כנראה מעט גבוהה יותר (Horowitz, 1992; Avner, 1998 , Amit et al., 2006). בתקופות שבהן היו יותר משקעים היו יותר חומרי בליה זמינים על המדרונות, ולכן באפיקים בערבה התרחשה בעיקר השקעה (Grossman et al., 1987; Ginat et al., 2009). בתקופות שבהן כמות המשקעים נמוכה יותר, חלה ירידה משמעותית בקצב הבליה במצוקים, ולפיכך כמות החומרים הזמינים לסחיפה במדרונות פחתה. עוצמת הגשם בחלק מאירועי הגשם כנראה גבוהה יותר והשיטפונות חזקים יותר. לפיכך משטר הזרימה בנחלים בתחילת ההולוקן משתנה ממשטר של השקעה למשטר התחתרות (גרוסמן, 1982; Gerson et al., 1982; Ginat et al., 2009).

פרק 3: ממצאים

אזור המחקר כלל סקר מפורט במערב בקעת תמנע בשלושה ערוצים מסדר שלישי ורביעי המצוי באגן הניקוז של נחל תמנע במעלה הנחל (איור 4). הערוצים חתורים באבן החול הלבנה של תצורות עברונה ואמיר ובאבן החול הוורודה של תצורת שחורת. לצד הערוצים, בחלק העליון שלהם, אלוביום בעובי של 3–10 מטרים, ובו חלוקי גיר, דולומיט, צור ואבני חול מבורזלות עם מטריקס חולי. אלו למעשה טרסות נחל קדומות ובגגן ה"צלחות" – פתחי הפירים של כריית הנחושת הקדומים. קוטר הצלחות עד שני מטרים ומרביתן סתומות בחומר דק.

בסקר מפורט לצד הערוצים הפעילים נמצאו 27 פירים אנכיים שבהם סימני חציבה שנחצבו בידי אדם. כמו כן על קירות הערוצים נמצאו 37 מנהרות אופקיות שרק חלקן סתומות בסחף (ראו טבלאות בנספח).

עיקר ההתחתרות בנחלים היא בחלקם העליון, הקרוב לאזור המצוק, והיא מגיעה עד כדי 30 מטרים בין גג הטרסה לערוץ הפעיל (טבלה 1). ההתחתרות הולכת וקטנה במורד הנחלים ומגיעה עד כדי ארבעה מטרים. השיפוע הממוצע של האפיק הוא 4%, והוא אינו אחיד.

באתרים הממוקמים בנקודות מערביות יחסית, כלומר במעלה הערוצים, בכיוון המצוקים, האפיקים צרים יותר וקניוניים. במורד אותם ערוצים הנחלים רחבים יותר ולרוב אינם קניוניים. לצד הערוצים נחשפים פירי כרייה ומערות כרייה החצובים בסלע.

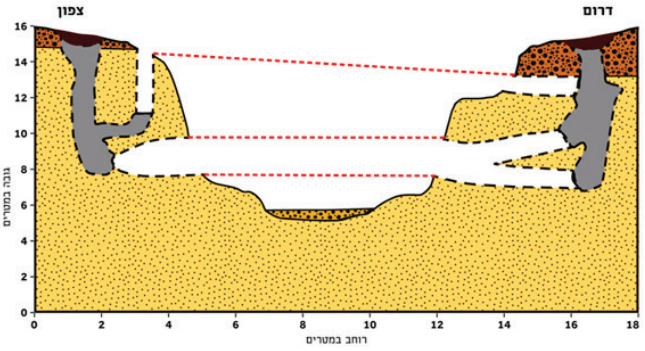
המערות בגובה האפיק הפעיל, מטרים בודדים מעליו ולעיתים גם מתחתיו. במרבית המנהרות ניתן להבחין בסימני חציבה של אזמל ברונזה. על פי סימני החציבה הללו ניתן לקבוע שהיא נעשתה בתקופה המצרית, כלומר 3,400–2,900 שנה לפני זמננו. סימני חציבה באזמלים מעידים על כיוון החציבה שהוא מתוך המערה כלפי חוץ אל הנחל (איור 3). משמעות הדבר שבתקופת הכרייה היה האזור שבו חתור כיום הנחל אזור סלעי, ולא ניתן היה להגיע למערות מתוך הנחל. הכורים השתמשו באזמלים ובפטישים כדי להגיע לשכבות העשירות בנחושת. ההתחתרות המאוחרת היא שגרמה לחשיפת מערות הכרייה והפירים לצד הערוצים הפעילים. הפירים והמנהרות לעיתים נחשפים והם חתוכים משני צדי הערוץ, ובהחלט אפשרי שהם שייכים לאותה מערכת חציבה.

על פי ממצאי השדה ניתן לקבוע גם את רוחבם של הערוצים שהתחתרו מאז התקופה המצרית. הרוחב אינו אחיד. יש מקומות שבהם הערוצים קניוניים, ובמקומות אחרים הם רחבים יותר (טבלה 1). הרוחב הממוצע בערוץ הקניונים הוא 23 מטרים, ורוחבם של ערוצי הקשתות הצפוני והדרומי 7 ו-9 מטרים בהתאם.

בכל הערוצים ניתן לקבוע בוודאות שחציבת הפירים החלה מהאזור שבו יש טרסת נחל מעל האפיק. בתצלומים המצורפים להלן ניתן לראות עדויות לאתרים בעלי עניין מיוחד:

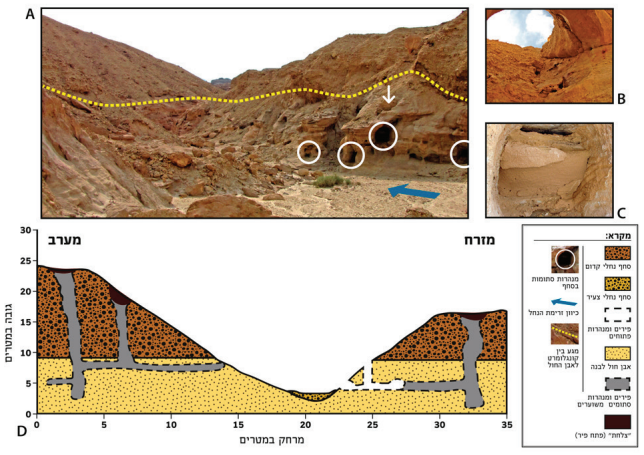
אתר המערה בערוץ הקשתות הצפוני (איורים 3 ו-7, מסומן כ-ג.5 במפה באיור 5).





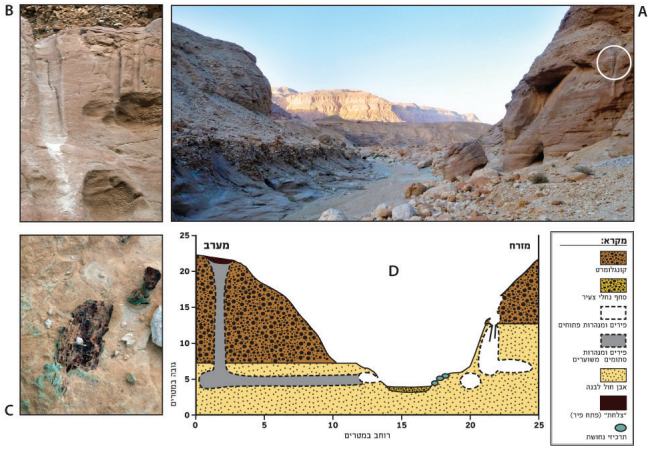
איור 7: למעלה תמונה שמראה את הערוץ החתור של קשתות הצפון בנקודה של איור 3. בחלק התחתון חתך רוחב גיאולוגי וניסיון לשחזר את הסביבה לפני התחתרות הערוץ (על פי שלומי וחובריו, 2011) מסומן כ-ג.3 במפה באיור 5.

אתר "הפיר התלוי " ובו פיר תלוי באויר מעל הערוץ וחמש מנהרות אופקיות סתומות כולן על ידי סחף נחלי החשופות לאורך הערוץ (איור 8).



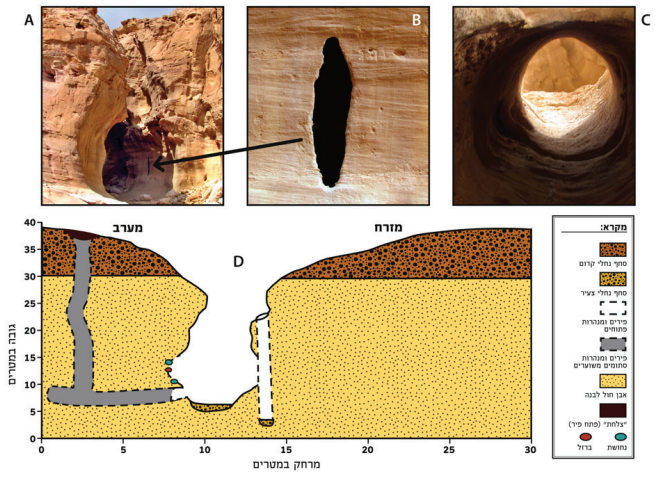
איור 8: תמונה של אזור "הפיר התלוי" (A), נמצא כארבעה מטרים מעל הערוץ מסומן בחץ לבן (B). סביבו מנהרות אופקיות סתומות בסחף נחלי צעיר מסומנות בעיגולים לבנים (C). הקו הצהוב הוא קו המגע בין אבן החול לקונגלומרט שמעליו. החץ הכחול מסמן את כיוון הזרימה של הערוץ החתור. בתחתית התמונה חתך גיאולוגי של המקום (D)

"פיר החבל" – אתר כרייה החשוף ארבעה מטרים מעל האפיק ועליו עדות של שיוף או חתיכה שבוצעה על ידי חבל ששימש לסחיבת מטען כבד מפנים המכרה (איור 9, מסומן כ-ג.2 במפה באיור 5).



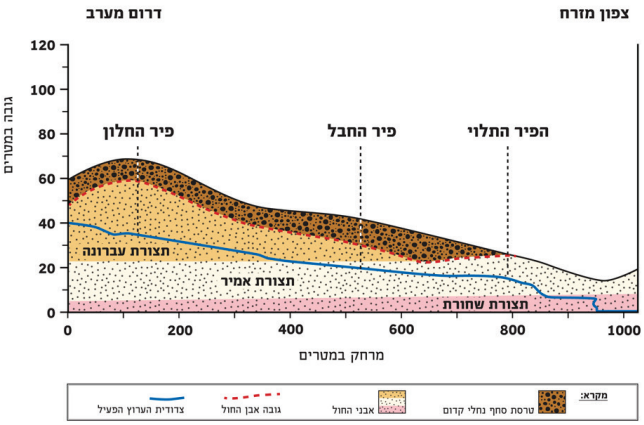
איור 9: אזור פיר החבל (A). בימין התמונה למטה מנהרה אופקית סתומה בסחף. בתוך העיגול הלבן סימני השפשוף של החבלים בקיר פיר החבל כאשר התמונה משמאל למעלה מגדילה את המקום (B). תרכיזי הנחושת והברזל בתמונה (C) נראים כעיגולים כחולים בחתך הרוחב הגיאולוגי (D)

"פיר החלון" – התחתרות הערוץ בעוצמה של 30 מטרים גרמה לחשיפת פיר בקיר הקניון שנוצר (איור 10, מסומן כ-ג.1 במפה באיור 5).



איור 10: אזור "פיר החלון". משמאל למעלה הקניון בו חתור הפיר (A). במרכז חלון הפיר החתור מקרוב (B). מימין למעלה מבט מתוך החלון אל הפיר החצוב (C). בחלק התחתון חתך גאולוגי של אזור "פיר החלון" (D)

הממצאים מראים על התחתרות גדולה במעלה הנחל שמתמתנת במורד, שאותה מציינים גם הולצר ושלומי (2010) (איור 11). על פי ממצאי עבודת השדה שהוצגו להלן (טבלה 1), ניתן לקבוע בערוץ הקניונים עוצמת התחתרות מקסימלית של 30 מטרים וממוצעת של 12 מטרים. התחתרות זו התרחשה לאחר כריית הנחושת, ולכן ניתן לקבוע שקצב ההתחתרות הממוצע היה קרוב לארבעה מטרים באלף שנה. בערוץ הקשתות הדרומי מידת ההתחתרות המקסימלית הייתה 27 מטרים והממוצעת הייתה כ-10 מטרים. בערוץ הקשתות הצפוני מידת התחתרות המקסימלית 25 מטרים והממוצעת כ-13 מטרים.



איור 11: פרופיל האורך של ערוץ הקניונים לעומת פרופיל האורך של הטרסה בצד הערוץ. באיור מופיעות גם אבני החול והסחף הנחלי בהן היתה התחתרות וכן השכבות אליהן הגיעו הפירים בשלושת אתרי המפתח (החבל, החלון והתלוי)

על מנת לבחון את השפעת החללים שהיו בתת-הקרקע על קצב ההתחתרות נבדקה עוצמת ההתחתרות בנחלים מסדר שני ושלישי הסמוכים לאזור המחקר, ובהם המסלע דומה אך ללא פירים ומנהרות כרייה. נמצא שעוצמת ההתחתרות בנחלים אלו קטנה בחצי ואף פחות מכך בהשוואה לנחלים שבהם הפירים. כמו כן באזור שנבדק ישנה התחתרות משמעותית של ערוצים בטרסת הנחל הגבוהה רק במקומות ספורים.

פרק 4: דיון

מאמר זה עוסק בקביעת העוצמה והקצב של התחתרות הנחלים באבני חול במדבר צחיח קיצון. המחקר נעשה בבקעת תמנע באזור שבו נחצבו פירים ומנהרות לכרייה של נחושת, מרביתם מהתקופה המצרית וגילם 3,400–2,900 שנה לפני זמננו. במנהרות הכרייה החשופות כיום באפיקים נראים סימני סיתות המעידים שהנחלים טרם היו פעילים בצורתם הנוכחית. גיל חציבת הפירים והמנהרות נקבע בהתאם לטכנולוגית הכרייה כפי שמופיעה בדופנותיהם. לפיכך הפירים החתורים ומנהרות הכרייה שנמצאו ונמדדו במחקר זה מאפשרים לנו לחשב את העוצמה ואת הקצב של התחתרות הנחלים באבני החול הלבנות בערוצים על פי עומקם.

חפירת המכרות הייתה כאמור מטרסות נחל שבהן חומר אלוביאלי שכיסה את אבני החול. ייתכן שבתקופה זו זרמו נחלים מתונים ורדודים, ואבני החול הלבנות שבהן תרכיזי הנחושת לא היו חשופות ברוב המקומות אלא קבורות מתחת לכיסוי אלוביאלי. כריית הפירים והמנהרות החלה מראשי הטרסות שבהן חומר אלוביאלי בעובי כמה מטרים הכולל בעיקר חלוקי גיר. הפירים נחצבו כלפי מטה, וכאשר הגיעו הכורים לאופקי הנחושת בתצורות אמיר ועברונה כרו מנהרות כרייה אופקיות. על פי עדויות השדה לא ניתן לקבוע בוודאות את מידת ההתחתרות הראשונית של הערוצים לפני הכרייה או תוך כדי הכרייה בחתך האלוביאלי שהיווה בתקופה זו את עיקר פני השטח.

ההתחתרות באבן החול שבאפיקים המתוארים בעבודה החלה כאמור לפני כ-2,900 שנה כאשר ננטשו מערכות הכרייה, והיא נמשכת כנראה עד היום. הפרש הגובה בנחלים בין גג הטרסות שבו מצויים הפירים לבין גובה הערוץ הנוכחי נע בין 27–30 מטרים במעלה הערוץ ל 4–6 מטרים בחלק מן המורד (טבלה 1). מתוך הנחה שבתקופה המצרית כבר היו ערוצים רחבים ורדודים מאוד, ניתן לקבוע עוצמת התחתרות ממוצעת לאורך ערוצים אלו בין 10 ל-13 מטרים ובתקופה של 2,900 שנה. קצב ההתחתרות שנמצא במחקר זה מהיר מאוד בהשוואה למוכר מהספרות (Wohl et al., 1994; Yair et al., 1982). כמו כן לא נמצאו בספרות עבודות קודמות המציגות את קצב התחתרות הנחלים באזורים שבהם היו מכרות קדומים בתת-הקרקע.

את הקצב המהיר ניתן להסביר כך:

א. **שיטפונות** בעלי עוצמת זרימות חזקה המוכרים היום במדבר צחיח קיצון והיו כנראה לאורך 2,900 השנים האחרונות כאשר האקלים היה דומה לאקלים הנוכחי. שיטפונות כאלו מכילים כמות גדולה של חומר דק-גרגר (חול וחרסיות) שהופכות את הזרם לצמיג יותר, בעל כושר הסעה גבוה של החלוקים הזמינים להסעה וגם עם יכולת אברזיה גבוהה.

ב. **החומר האלוביאלי** הבונה את טרסות הנחל אינו מלוכד היטב ומתפורר מהר יחסית. ההתחתרות של הנחלים בסחף של עצמם מוכרת במרבית הנחלים הזורמים לכיוון הערבה.

ג. אבני החול של תצורות אמיר ועברונה **פריות, רכות** וקלות לשחיקה יותר משכבות אבן החול שמתחתן.

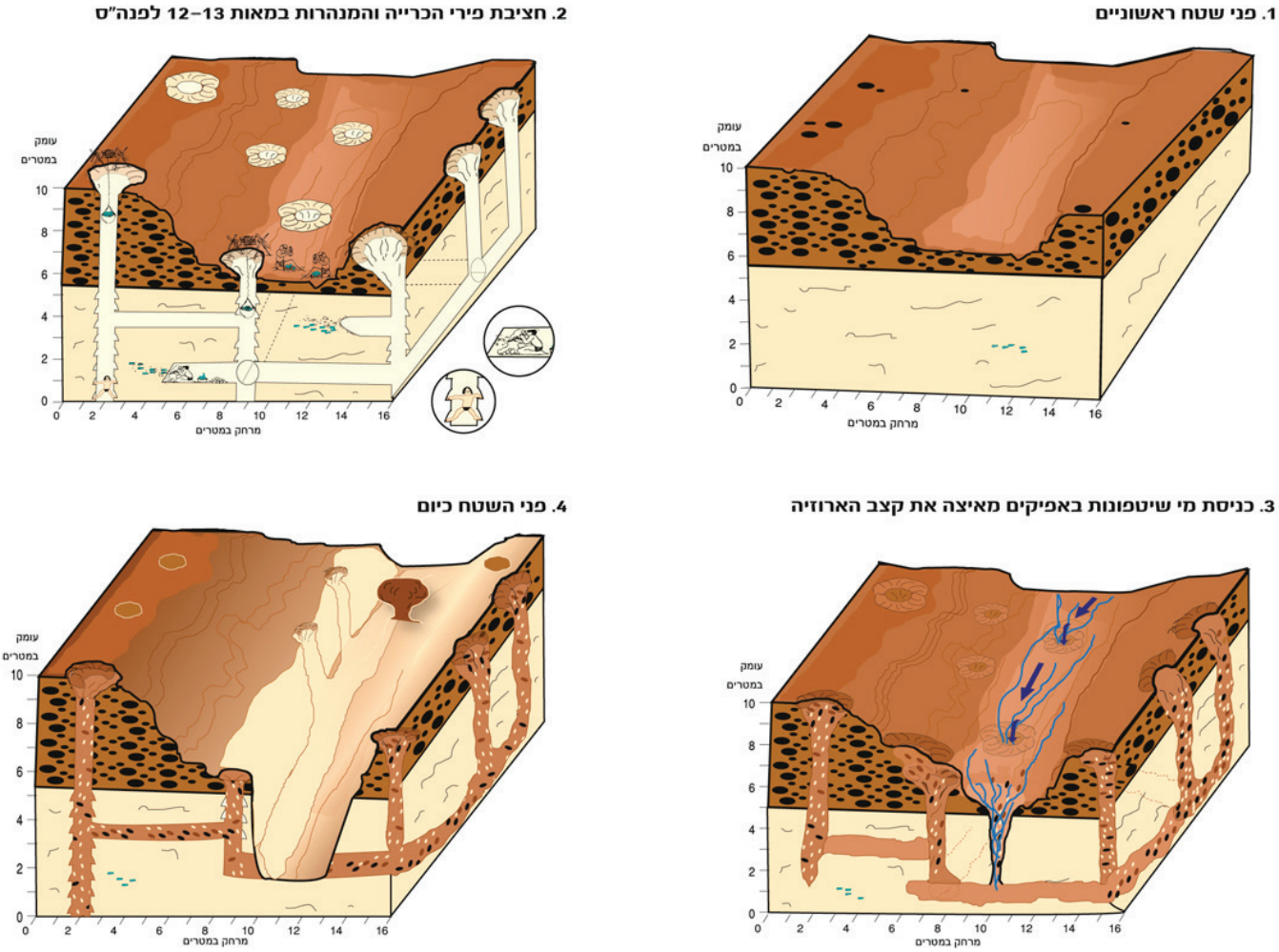
ד. בסלעי תצורות אמיר ועברונה **פירים ומנהרות כרייה**. אלו חללים בתוך הסלע שהגבירו באופן משמעותי את קצב ההתחתרות. המים זרמו אל תוך המכרות, שהם הנקודות הנמוכות ביותר. בתוך המנהרות פעלה שחיקת המים והסחף שהביאו עמם על רצפת המכרה, דופנותיו ותקרתו, לעומת שחיקה בערוץ רגיל שבו העוצמה מופעלת אך ורק על הקרקעית ועל הדפנות הנמוכים. נוסף לכך עצם נוכחותם של המכרות משכה את הזרימה לאותם מקומות שבהם קיימים כיום אפיקים, והמים נמשכו למקומות הנמוכים ביותר.

בשלושת ערוצי המחקר נמצאו שרידים של פירים ושל מנהרות בתחתית הערוצים החתורים. ההתחתרות התרחשה כתוצאה מחציבתם, ותצפית זו מחזקת את הטענה שקצב ההתחתרות המהיר קשור בכך שבתת-הקרקע היו כבר פירים ומנהרות שנחפרו במהלך הכרייה.

לא נמצא במחקר זה קשר בין עוצמת ההתחתרות לבין גודל אגני הניקוז של הערוצים שנמדדו. כמו כן לא ניתן לקבוע במחקר זה את מספר השטפונות ואם ההתחתרות נעשתה באירועי שיא גדולים או במספר רב של שיטפונות בעוצמה בינונית.

פרק 5: מסקנות

על פי ממצאי עבודת השדה, קצב ההתחתרות המקסימלי במעלה הערוץ הוא 27–30 מטרים, ואילו המינימלי במורד הוא כ-4–6 מטרים. ההתחתרות הממוצעת של אבני החול בנחלים היא 10–13 מטרים. התחתרות זו התרחשה בעיקרה לאחר סיום כריית הנחושת ונמשכת עד היום. לפיכך קצב ההתחתרות המשוער הוא בסביבות 3–4 מטרים באלף שנה באזור שבו היו מכרות נחושת עתיקים. על פי הממצאים בשטח ניתן לקבוע את שלבי התפתחות הנוף באזור המחקר (איור 12):



איור 12: שלבי התפתחות הנוף באזור המחקר: (1) משמאל למעלה מצב ראשוני לפני כריית הפירים והמנהרות, (2) מימין למעלה המקום לאחר כריית הפירים והמנהרות במאה ה-13–12 לפני הספירה, (3) כניסת מי שטפונות לפירים ולמנהרות האיצה את קצב החתירה, (4) הערוץ החתור היום

שלב א: האפיקים רדודים ורחבים ובהם סחף נחלי בעיקר של חלוקי גיר ואבני חול שמקורם במצוקי תמנע. בשלב זה אבני החול הלבנות קבורות תחת סחף אלוביאלי ואינן חשופות.

שלב ב: פעילות של כריית נחושת בעיקר בתקופה המצרית לפני 3,400–2,900 שנה, שבמהלכה נחפרו פירים ומנהרות כרייה. שפיכת החומר התפל מסביב פתחי הפירים יצרה סוללה שמנעה כניסת מי שיטפונות בזמן העבודה במכרה. במהלך תקופה זו נסתמו מרבית הפירים כנראה לאחר שהסתיימה פעילות הכרייה.

שלב ג: כניסת מי שיטפונות גרמה לחשיפת הפירים ומנהרות הכרייה ולהתחתרות הנחלים באזור. קצב החתירה הממוצע היה קרוב לארבעה מטרים באלף שנה. קצב גבוה זה מוסבר על ידי סלעי תשתית רכים הן בטרסות הנחל והן אבני חול שמתחתן, שיטפונות חזקים וכן נוכחות של חללי הפירים והמנהרות בתת-הקרקע. עיקר ההתחתרות בחלקים העליונים של הערוצים.

שלב ד: השלב הנוכחי. המשך התחתרות הנחלים עד כדי חשיפת הפירים והמנהרות למצבם הנוכחי. חלק מהמנהרות נסתמו בסחף.

לקידום המשך המחקר וביסוסו המדעי יכולים לתרום בדיקות OSL של הסחף הפלוביאטילי ששקע במנהרות ומחקר ארכיאולוגי מפורט שיקבע במדויק את גיל חציבת הפירים והמנהרות.

תודות

תחילתו של מחקר זה בעבודת גמר בהיקף חמש יחידות לימוד שנכתבה בידי יובל הולצר, תלמיד כיתה י"ב בבית הספר מעלה שחרות. ברצוננו להודות למר רחמים שם טוב ממרכז מדע ים המלח והערבה על עזרתו במדידת פרופיל הנחלים ומידת ההתחתרות הנוכחית. כמו כן ברצוננו להודות לסטודיו יוטבתה עבור העזרה בהכנה הגרפית של חלק מהסרטוטים.

מקורות

אבנר, ע', 1979. בקעת תמנע. בתוך: א' נגב (עורך), מדריך ישראל הר הנגב וחבל אילות. הוצאת כתר ומשרד הבטחון. ירושלים.

אשבל, ד', 1951. אקלים ארץ ישראל לאזוריה. המחלקה למטאורולוגיה של האוניברסיטה העברית. ירושלים.

בייט, מ', שגב, ע', ברטוב, י', 1999. המפה הגיאולוגית של אזור באר אורה. הוצאת המכון הגיאולוגי.

בייט, מ', קלבו, ר', 2014. בקעת תמנע כפרק גיאולוגי. הוצאת המכון הגיאולוגי. 09/2014/GSI. 66 עמודים.

גינת, ח', 1993. אקלימה של אילת, עיצוב הנוף באזור אילת. בתוך: כהן, מ', שילר, א' (עורכים), אילת – אדם, ים ומדבר, סיפורו של ישוב. הוצאת ספרים אריאל. ירושלים. עמ' 17–45.

גינת, ח', 1995. הגיאומורפולוגיה של אזור אילת. בתוך: יוליוס, אילת והערבה. הוצאת החברה לחקירת ארץ ישראל ועתיקותיה בשיתוף עם רשות העתיקות. עמ' 303–310.

גינת, ח', הולצר, א', 1999. פארק תמנע – מדבר, אדם ונוף. הוצאת פארק תמנע.

גינת, ח', שלמון, ב', 2014. המלקוש בערבה הדרומית ובנגב הדרומי בחודש מאי 2014. מחקרי הנגב ים המלח והערבה 6 (3), 1–4.

גרוסמן, ש', 1982. משקעי נחלים באזורים צחיחים קיצוניים – עדות לשינויי סובב (בקעת תמנע, נגב דרומי, ישראל). עבודה לתואר מוסמך. האוניברסיטה העברית בירושלים.

גרוסמן, ש', גרסון, ר', 1990. משקעים פלוביאליים ומורפולוגיה של מפלסים אלוביאליים כאינדיקטורים לשינויי סובב ברביעון בדרום הנגב, ישראל. בתוך ווטרמן וקליאוט (עורכים), אופקים בגיאוגרפיה. אוניברסיטת חיפה, , עמ' 27–38.

גרינבאום, נ', 2003. השלכות גיאומורפולוגיות ויישומים הידרולוגיים של ניסויי חידור מדרוניים בסובב צחיח קיצון. אופקים בגיאוגרפיה 57–58, 44–69.

הולצר, י', שלומי, י', 2010. קצב התחתרות נחלים באבן חול באקלים מדבר צחיח קיצון על פי עדויות ארכיאולוגיות. עבודת גמר בית הספר מעלה שחרות, מרכז מדע ים המלח והערבה.

כהן, ע', 1979. בורות תמנע – עדות לשינויים גיאומורפולוגיים באפיק. עבודה סמינריונית בהנחיית מיכה קליין. אוניברסיטת תל אביב.

מרון, ט', 2012. השפעת מכרות הנחושת העתיקים על התחתרות נחלים ונסיגת מצוקים בבקעת תמנע. עבודה סמינריונית בהנחיית חנן גינת. האוניברסיטה הפתוחה.

רותנברג, ב', 1967. צפונות נגב, ארכיאולוגיה בנגב ובערבה. הוצאת מסדה. גבעתיים-רמת גן.

רותנברג, ב', 1992. תמנע. בתוך: שטרן (עורך). האנציקלופדיה החדשה לחפירות ארכיאולוגיות בארץ ישראל. ההוצאה לאור כרטא. ירושלים. עמ' 1587–1599.

רותנברג, ב', 1995. מחקרי תמנע 1990–1995, בתוך: אבירם, י' (עורך), אילת והערבה מדריך הערבה מאילת ומעציון גבר. הוצאת החברה לחקירות ארץ ישראל ועתיקותיה בשיתוף עם רשות העתיקות. ירושלים. עמ' 1–45.

שיק, א', 1991. שיטפונות בסובב צחיח – קיצון: היבטים הידרולוגיים. אופקים לגיאוגרפיה 31, 227–243.

שלומי, י', הולצר, י', גינת, ח', 2011. קצבי התחתרות במכרות עתיקים באבן החול בתמנע. מצגת בכנס החברה הגיאולוגית מצפה רמון.

שמואלי, א', גרדוס, י', 1979. אקלים הנגב והידרולוגיה של הנגב: בארץ הנגב. הוצאת משרד הבטחון.

Amit, R., Enzel, Y., Sharon D., 2006. Permanent quaternary hyperaridity in the Negev, Israel, resulting from regional tectonic blocking Mediterranean frontal system. Geology 2, 509–512.

Avner, U., 1998. Settlement, agriculture, and paleoclimate in Uvda Valley, southern Negev desert, 6th–3rd Millennia B.C. In: Issar, A., Brown, N., (Eds.), Water, environment and society in times of climate change. pp. 147–202.

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

Beyth, M., Segev, A., Ginat, H., 2013. Stratigraphy and structure of the Timna Valley and adjacent ancient mining areas. The geological survey of Isael. Report GSI/15/2013.

Drenka, A., 2003. New excavations in the Chalcolithic Mine T of Timna. Preliminary report of the excavations March-May 2001. IAMS 23: 21-26.

Enzel, Y., Amit, R., Grodek, T., Ayalon, A., Lekach, J., Porat, N., Beiman, P., 2012. Late Quaternary weathering, erosion, and deposition in Nahal Yael, Israel: An "impact of climatic change on an arid watershed"?: Geological Society of America Bulletin 124, 705–722.

Ginat, H., Beyth, M., Crouvi O., 2009. Geomorphic evidence for young activity around Har Timna. Israel Journal of Earth Sciences 57, 17.

Ginat, H., Shlomi, Y., Batarseh, S., Vogel, J., 2010. Reduction in precipitation levels in the Arava Valley (Southern Israel and Jordan), 1949–2009. Journal of the Dead Sea and the Arava Science Center 7.

Graf, W., 1988. Fluvial processes in dryland rivers. New York.

Greenbaum, N., Enzel, E., Schick, A.P., 2001. Magnitude and frequency of paleofloods and historical floods in the Arava basin, Negev Desert, Israel. Israel Journal of Earth Sciences 50, 159–186.

Grossman, S., Gerson, R., 1987. Fluviatile deposits and morphology of alluvial surfaces as indicators of Quaternary environmental changes in the southern Negev, Israel. Desert Sediments; Ancient and Modern. Israel Geological Society. Special publication 35, 17–29.

Horowitz, A., 1992. Palynology of arid lands. Acdemic press. Elsevier, 546.

Wohl, E., Grodek, T., 1994. Copy bed steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel. Geomorphology 9, 117–126.

Greenbaum, N., Schick, A.P., 1994. Controls on bedrocks channel incision along Nahal Paran. Earth surface processes and landforms 19 (1), 1–13.

Yair, A., Goldberg, P., Brimer, B., 1982. Long term denudation rates in the Zin-Havarim badlands, northern Negev, Israel. In: Bryan, R., (Ed.), Timescales in geomorphology. Wiley. Chichester, 317–331.

Kahana, R., Ziv, B., Dayan, U., Enzel, Y., 2004, Atmospheric predictors from major floods in the Negev Desert, Israel. International Journal of Climatology 24, 1137–1147.

Rothenberg, B., 1988. The Egyptian mining temple at Timna. The Institute for Archaeo-Metallurgical Studies, University College London, 317 pp.

Rothenbterd, B,. Shaw, C.T., 1992. The ancient copper mines of the western Arabah. Researches in the Araba 3, London.

Tsvieli, Y., Zangvil, A., 2005. Synoptic climatological analysis of 'Wet' and 'Dry' Red Sea troughts over Israel. International Journal of Climatology 25, 1997–2015.