

מדריך סיורים

כנס החברה הגיאולוגית
והאגודה הישראלית למשאבי מים

הרי ירושלים | 2020

Field Trip Guides

Israel Geological Society &
Israel Association of Water Resources

Jerusalem | 2020

מדריך סיורים | כנס חג"ו וא"ל | הרי ירושלים 2020



החברה הגיאולוגית הישראלית והאגודה הישראלית למשאבי מים 2020

הרי ירושלים

מדריך סיורים



עורכות: לירן אשכנזי וחן קניגסברג
Editors: Leeron Ashkenazi and Chen Kenigsberg



חג' ואי"ל מודים למוסדות ולגופים הבאים על תמיכתם ותרומתם בשנים

2020 - 2019



חברי ועד החברה הגיאולוגית הישראלית לשנת 2019-2020

עמוס סלמון - נשיא
 סיגל אברמוביץ' - סגנית נשיא
 שרית אשכנזי-פוליבודה - גזברית
 יעל לשנו - חברת ועד
 חן קניגסברג - חברת ועד
 לירן אשכנזי - חברת ועד
 ערן פרוכט - חבר ועד
 קובי חבושה - אחראי אתר אינטרנט

ועדת הביקורת- נורית שטובר-זיסו, רלי ולד ואורי דור
 גל יסעור - מזכירה

חברי ועד האגודה הישראלית למשאבי מים לשנת 2019-2020

עידו נגב- יושב ראש
 תמיר קמאי- סגן יושב ראש
 נעם בר-נוי- גזבר
 רועי שפירא- מזכיר
 סילבי ויטנברג- מזכירה
 אלאנה לוינשטרן טנזר- חברת ועד
 דורון קליסמן- חבר ועד
 אלעזר ראובן- חבר ועד
 עדי לוי- חברת ועד
 ועדת הביקורת- יוסי יחיאלי ואיל שלו

תמונת השער : תצפית מהר איתן לכיוון הר חרת. לירן אשכנזי ומאי לאור
 עריכה גרפית : בת שבע כהן
 לוגו : חנה נצר-כהן

רשימת סיורים

1. א' - הרי יהודה בדגש: תופעות ליתולוגיות המלוות את יצירת הפלטפורמה הקרבונטית בקרטיקון
 איתן שש ויואב אבני 7
 ב' - מערת שורק
- 2.* מירה בר-מטוס ואבנר אילון 30
 יחסי טקטוניקה, אקלים ותהליכי פני שטח בהרי יהודה
Climatic and tectonic controls on landscape evolution in the Judea Range
 Uri Ryb and Ari Matmon 230
3. מיפוי גיאולוגי של הר איתן בעידן דיגיטלי: קצת היסטוריה של התיישבות והרבה גיאולוגיה של
 העתיד 37
4. אמוץ עגנון, ניב דרבסי, יוני ישראלי, דן גולן, גלינה פירשטיין 37
 רצף הסלעים מגיל איאוקן מאוחר עד אוליגוקן בשפלת יהודה – סדימנטים שהובלו מהרי יהודה
 המתרוממים אל אגן הלבנט דרך מערכת תעלות תת-ימיות
- עודד בר, עזרא זילברמן, רני קלבו, חיים בנימיני, אורית חיימס, רימונה סימן-טוב, בנימין בוכבינדר 66
 5. א' - מפעל נשר רמלה - טכנולוגיה וקיימות סביבתית בייצור צמנט.
 חמי גינזבורג, שביט דן, ברוך אלקיים, ולדימיר וולף אברוטס, אורי מור 98
 ב' - אתרים ארכאולוגים ברמלה
- אמיר גורז'לזני 126
 6.* ליתולוגיה ותפוצת הסלעים בנקרופוליס של ירושלים בתקופת בית שני
Lithology and the distribution of Early Roman Era tombs in the Jerusalem's necropolis
 Nurit Shtober-Zisu and Boaz Zissu 201
7. מעמס ועד ימינו: בעקבות רעידות האדמה ההיסטוריות ונזקיהן בעיר העתיקה בירושלים (והפתעות
 ארכיאולוגיה) 151
- מוטי זוהר, עמית ראם 151
 8. אתגרי אספקת המים לירושלים – עבר, הווה ועתיד
- עליזה הר שושנים, עודד לרנר, מיקי אלישע, עמית בראל 159
9. הידרוגיאולוגיה של אקוויפר ירת"ן, סוגיות של אספקת מים, רגולציה וזיהום תעשייתי
 יוסף גוטמן 169

❖ סיורים 2 ו-6 כתובים בשפה האנגלית ומופיעים בסוף החוברת

❖ Field trips 2 and 6 appear on the other side of this guide

סיור מספר 1:

א' - הרי יהודה בדגש: תופעות ליתולוגיות המלוות את יצירת הפלטפורמה הקרבונטית בקרטיקון

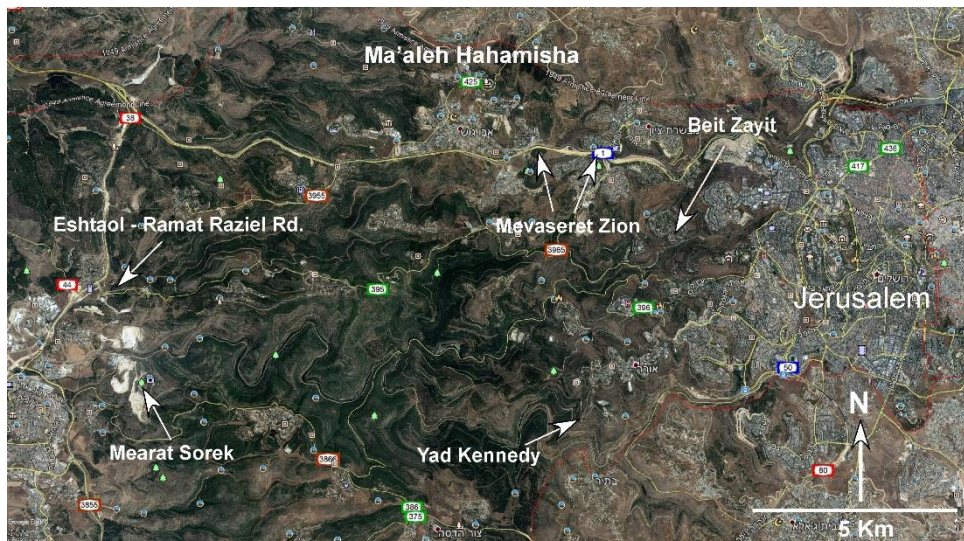
איתן שש¹ ויואב אבני²

1. האוניברסיטה העברית

2. המכון הגיאולוגי לישראל

מבוא

הסיור הנוכחי מתמקד ברובו בחבורת יהודה הקרטיקונית, המכסה שטחים נרחבים בארץ, ומורכבת ממגוון של סלעים קרבונטיים קשים (גיר, דולומיט), המלווים במקומות בליתולוגיות נוספות (קרטון, חוואר, סלעים צורניים). באזור הסיור חבורת יהודה מכילה מספר תופעות יחודיות אשר לחלקן יש השלכות על "בעיית הדולומיט" הכללית, שתוצג בדיון, וחלקן בעלות משמעות מקומית.



איור 1. מפת התמצאות לסיור בהרי יהודה. הסיור יערך באזור שבין העיר ירושלים במזרח והעיר בית שמש במערב (המקור: Google Earth)

STRATIGRAPHY סטרטיגרפיה

References: Shalem, 1925-1927; Picard, 1938; Arkin, Bear, Braun, Starinsky & Schlein, 1964; Hamaoui & Raab, 1965; Horowitz, 1979; Levy, Almogi-Labin & Siman-Tov, 1992.

SYSTEM תקופה	SERIES - STAGE סדרה - דרגה	SYMBOL סימן	THICK. מ' עובי מ'	LITHOLOGY מסלע	LITHOSTRATIGRAPHY ליטוסטרטיגרפיה	
					MAPPING UNITS יחידות מיפוי	GROUP חבורה
QUATERNARY קוורטר	HOLOCENE הולוקן	Al	2+		Alluvium, colluvium, soil אזבזב, קולוויאם, סרטק	
	PLEISTOCENE פלייסטוקן	Qbl	2+		Betlehem Cgl. קונגלמרט בית לחם	
TERTIARY טרצייר	PALEOGENE טריצ'יר	Eocene אאוקן	Emr	2+	Maresha Formation תצורת מרשה	AVEDAT עבדת
					Mafled Zone תצורת עירב	
		MAASTRICHTIAN מאסטרכט	Amzg Kug	10+	Mishash Formation תצורת מישאש	MOUNT SCOPUS הר הצופים
			Kum	90	Upper Member פרט עליון	
		CAMPAIAN קמפן	Kum(u)	0-90	Lower Member 'Double chert' תצורת מנחה	
			Kum(l)	60-100		
		SANTONIAN סנטון	Kun	40-90	Nezer Formation תצורת נצר	JUDEA יהודה
			Kush	20-40	Shvta Formation תצורת שבטה	
		TURONIAN טורון	Ku(a)	25	Weradim Formation (Mizi Ahmar) תצורת ורדיים (מזי אהמר)	
			Ku(w(y)	30	Weradim Formation (Mizi Yahud) תצורת ורדיים (מזי יהוד)	
			Kuks	10-80	Kefar Shaul Formation תצורת כפר שאול	
			Kua	40-90	Aminadav Formation תצורת עמנדב	
		CENOMANIAN קנומן	Kumo	10-20	Maza Formation תצורת מוצא	
			Kubm	45-60	Bet Meir Formation תצורת בית מאיר	
			Klike	20-40	Kesalon Formation תצורת כסלון	
			Kls	120	Soreq Formation תצורת שורק	
		ALBIAN אלביאן	Klgy	70-90	Givat Ye'arim Fm. תצורת גבעת יערים	
			Klk	90	Kefira Formation תצורת כפירה	
			Klq	40	Qatana Formation תצורת קטנה	

איור 2: חתך סטרטיגרפי כללי של התצורות הגיאולוגיות החשופות במרכז הרי יהודה. (המקור: סנה ואבני, 2011).

תחנות הסיור:

יציאה מן המלון ונוסעים למושב בית זית. חוצים את המושב לכיוון דרום ומגיעים אל דרך העפר המובילה אל בית העלמין של המושב. בצד הדרך מגיעים לתחנה 1.

תחנה 1: ביקור בתצורת שורק בשולי הישוב על הדרך היוצאת לבית העלמין. במחשוף זה יש חתך משוכב היטב של סלעי דולומיט בהירים המכיל גיאודות קוורץ, בחילוף עם שכבות חוואר דקות. גבישי הקוורץ בגיאודות מכילים אינקלוזיות של אנהידריט המעידים על ארועים אבפוריטיים במהלך הדולומיטיזציה.



איור 3: חתך בתצורת שורק המציג שכבתיות טובה וגיאודות קוורץ.



איור 4: מבט מקרוב על גיאודות הקוורץ. חלקן מומס ונראה בהם מילוי משני של קלציט.



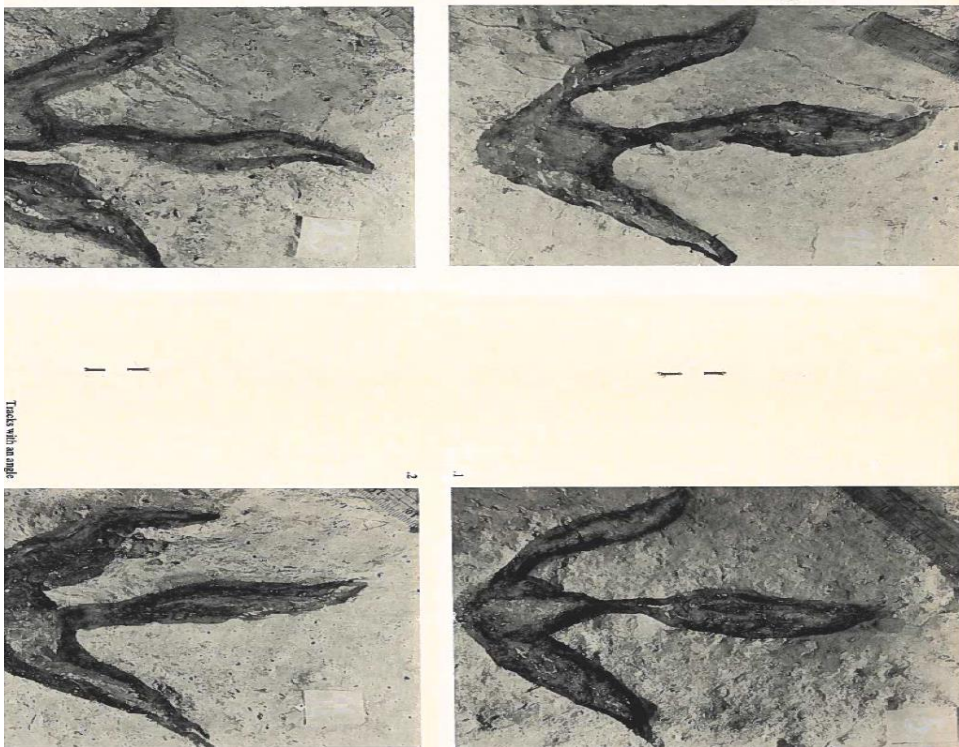
איור 5: מבט מקרוב על גיאודות הקורן. גודל הגיאודות כ- 3-5 ס"מ.

אחרי הביקור בתחנה חוזרים אל מרכז מושב בית זית ובאים אל אתר הדינוזאורים הנמצא מול מזכירות הישוב.

תחנה 2: מרכז מושב בית זית – ביקור באתר הדינוזאורים.



איור 6: שיחזור הניצב בפתח אתר הדינוזאורים במושב בית זית. באתר עצמו מוצגים עקבות דינוזאורים שהוטבעו בשכבות דלומיט של תצורת שורק.



איור 7: עקבות דינוזאורים באורך 18-27 ס"מ שהוטבעו בבוץ הרך של תצורת שורק. אתר הדינוזאורים, מושב בית זית (המקור: Avnimelech, 1966)

נוסעים ממושב בית זית למחלף עין חמד שעל כביש מס' 1. במעגל התנועה פונים לכיוון שכונה י"א של מעוז ציון ובכניסה אל השכונה פונים בכביש ישן ללא מוצא המוביל לכיוון כביש מס' 1. נוסעים בכביש זה כ-450 מ' וחונים בצד הכביש. במרחק של כ-80 מ' לכיוון דרום ובניצב לכביש נמצא חתך מצוקי של תצורת כסלון ובו קוורצוליט.

תחנה 3: תצורת כסלון בין עין חמד וגבעת הקסטל



איור 8: מצוק תצורת כסלון בין עין חמד והקסטל. גובה המצוק כ-5 מ', והוא מורכב בחלקו התחתון מדולומיט מסיבי אפור, ובגגו שכבת הקורצוליט שעוביה כ 50 ס"מ.



איור 9: מאובני גסטרופודים מצוררים בשכבת הקורצוליט של תצורת כסלון.



איור 10: מבט מקרוב על מאובני גסטרופודים בתצורת כסלון, שכבת הקורצוליט.

חוזרים למחלף עין חמד ונוסעים במעלה הכביש אל מבשרת ציון. מחנים את הרכב בחניון קניון מבשרת וחוזרים רגלית אל הגשר שמעל כביש מס' 1. חוצים את הגשר לכיוון דרום מערב אל מרגלות גבעת הקסטל ויורדים במורד ובצמוד לכביש 1 אל מחפורת חצובה החושפת חתך משוכב היטב של תצורת בית מאיר.

תחנה 4: תצורת בית מאיר, מוצא ועמינדב במורדות גבעת הקסטל

בתחנה זו רואים חתך משוכב היטב של תצורת בית מאיר (איור 11). החתך מכיל עדשות צור וכן תופעות של קריעת שכבות סדימנט למינארי הטבוע בתוך מטריקס קרבונטי שעבר ליטיפיקציה מאוחרת יותר (איורים 12 ו-13). המטריקס הקרבונטי מופיע כברקציה סדימנטרית. עדויות הללו חושפות את העדר הביוטורבציה בתצורת בית מאיר.



איור 11: חתך משוכב היטב של תצורת בית מאיר. מורדות גבעת הקסטל לכיוון מערב.



איור 12: עדשות צור בתצורת בית מאיר. תצורת בית מאיר, מורדות הקסטל לכיוון מערב.



איור 13: קרעים של סדימנט למינארי באורך 15-20 ס"מ הטבועים בשכבות ברקציוזיות. תצורת בית מאיר, מורדות הקסטל לכיוון מערב.



איור 14: חתך למינארי בגג תצורת בית מאיר, מורדות גבעת הקסטל לכיוון מערב.



איור 15: חתך חרסיתי בבסיס תצורת מוצא, שהושקעה מעל לתצורת בית מאיר. מורדות גבעת הקסטל לכיוון מערב.



איור 16: שכבות ביניים גיריות בתצורת מוצא המכילות אופקים של מאובני אוסטריאות. מורד גבעת הקסטל, מעט ממערב לגשר הכביש.



איור 17: מחשוף של תצורת עמינדב, המכיל שכבות עבות של דולומיט אפור, גס גביש הנקוב על ידי חללים קארסטיים. המחשוף נמצא בצד הכביש העולה מגשר מבשרת אל מעוז ציון לכיוון דרום.

נוסעים ממבשרת ציון דרך מעוז ציון וצומת סטף אל בית החולים הדסה עין כרם. עולים בכביש אל צומת אורה, ונכנסים מערבה לכיוון יד קנדי. בצד הכביש העולה אל יד קנדי, כ-1200 מ' לפני צומת עמינדב – יד קנדי יורדים לדרך עפר המתפצלת דרומה בעיקול החרף של הכביש ובאים אל מחשוף של תצורת כפר שאול. ממקום זה יש תצפית על מרחב ירושלים ועל נחיתת קמר חברון אל האגן הסינקלינאלי של העיר ירושלים.

תחנה 5: חתך תצורת כפר שאול ותצפית על נחיתת קמר חברון אל אגן ירושלים.



איור 18: חתך של גיר רך, המכיל גיאודות קוורץ. תצורת כפר שאול, מדרום ליד קנדי.



איור 19: תקריב של גיאודת קוורץ בתצורת כפר שאול, מדרום ליד קנדי. אורך הגיאודה כ- 15 ס"מ.



איור 20: תקריב של סטרוקטורה למינרית בקרטון תצורת כפר שאול, המעידה על העדר ביוטורבציה.



איור 21: מבט מעל נחל רפאים אל נחיתת קמר חברון אל האגן הסינקלינאלי של העיר ירושלים הנמצא בין קמר חברון בדרום ובין קמר יהודה בצפון.

חוזרים בכביש שבו באנו אל בית החולים הדסה. בפיצול הכביש שמתחת לבית החולים פונים מערבה לכיוון צור נס הרים – בר גיורא. נוסעים לאורך נחל שורק החושף את תצורת גבעת יערים הבנויה מסלעי דולומיט מסיביים והמונחת מתחת לתצורת שורק בה ביקרנו בתחנה הראשונה בסיור. עולים לצומת בר גיורא ובו פונים ימינה (מערבה) אל נס-הרים ומערת הנטיפים.

תחנה 6: תצפית על הרי יהודה מכביש הגישה אל מערת הנטיפים

בתחנה זו רואים את נחיתת חתך חבורת יהודה באגפו המערבי של קמר יהודה אל קער השפלה. מערת שמשון הבולטת בקו המצוק שממול מצוייה בתצורת ורדים המונחת באזור זה על חתך דק של תצורת כפר שאול. התצורה בנוייה מדולומיט אפור, גס גביש. מעל מצוק המערה מונחת תצורת בינה הגירית הנוחתת בשיפוע תלול לכיוון מערב אל קער השפלה (איורים 21-22)



איור 22: מבט מעל המדרון הדרומי של נחל שורק אל נחיתת קמר יהודה אל קער השפלה. מערת שמשון שפתחה האפל ניבט ממול התפתחה בתוך שכבות מסיביות של תצורת ורדים.



איור 23: מבט מעל רחבת הכניסה של מערת אבשלום אל נחיתת קמר יהודה אל קער השפלה. במחצבה הנראית במרכז התמונה כורים את שכבות הגיר של תצורת בינה ואת חתך תצורות הקירטון והחוואר של תצורות מנוחה וע'רב לצרכי תעשיית המלט.

תחנה 7: ביקור במערת אבשלום (בהדרכת אבנר אילון ומירה בר-מטיוס).

אחרי הביקור במערת הנטיפים נוסעים אל פאתי העיר בית שמש. בצומת הכבישים שמצפון לעיר פונים צפונה אל מחלף שמשון ומול הישוב אשתאול פונים ימינה בכביש העולה אל רמת רזיאל וצובה. עולים בכביש כ- 1000 מ' ומגיעים למחשוף ארוך של גג תצורת בינה ובהמשכו את תצורות מנוחה, מישאש וחלקה התחתון של תצורת ע'רב. פירוט נוסף נמצא בהמשך החוברת תחת הכותרת: "סיור מספר 1: ב'- הרי יהודה בדגש: מערת שורק". עמוד 30.

תחנה 8: גג חבורת יהודה ובסיס חבורת הר הצופים במרד המערבי של קמר יהודה. החתך חושף את גג חבורת יהודה ואת עיקר חבורת הר הצופים במעבר מקמר יהודה אל קער השפלה.



איור 24: מראה מחשוף תצורת בינה החשוף בצד הכביש העולה אל רמת רזיאל וצובה.



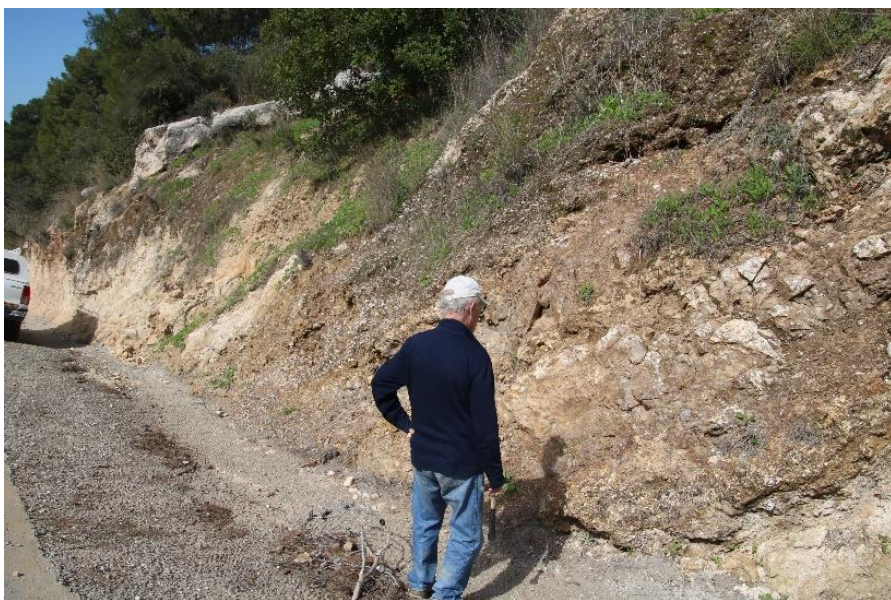
איור 25: תקריב של סלעי הגיר המיקריטי של תצורת בינה. המראה על סטילוליטים סדימנטריים במעבר בין שכבות הגיר המיקריטי. הסטילוליטים מקבילים לשיכוב.



איור 26: חתך של תצורת מנוחה הבנוי מקירטונים חסרי שיכוב המונחים מעל לסלעי הגיר של תצורת בינה. חתך זה מהווה את בסיס חבורת הר הצופים במעבר מקמר יהודה אל קער השפלה.



איור 27: המעבר מסלעי קרסון של תצורת מנוחה אל סלעי הצור הברקואידי והפוספוריט של תצורת מישאש. מורדות קמר יהודה במעבר אל קער השפלה.



איור 28: מבט מקרוב כל סלעי תצורת מישאש הברקואידי. מורד קמר יהודה אל קער השפלה, בצד כביש אשתאול – רמת רזיאל.

דיון

הדיון מוקדש ברובו ל"בעיית הדולומיט", ובסופו יעסוק בנושא מקומי, תצורת מוצא.

בעיית הדולומיט

בעקבות בדיקת היחידות הליתוסטריגרפיות השונות של חבורת יהודה נמצא כי סלעי הדולומיט מכילים ספקטרום של תופעות שונות, אשר ניתן לאפיין באמצעות שתי אסוציאציות שולטות (מרכיבי קצה), כלהלן:

1. דולומיטים משוכבים היטב, במקומות למינריים, בהירים, דקי גביש (עד כדי מספר מיקרומטרים μm). חלק משכבות הדולומיט מכילות גיאודות קוורץ, המאופיינות בנוכחות אינקלוזיות של אנהידריט. דולומיטים אלה שכיחים בתצורות שורק ובית מאיר (איורים 3,4,5,11,12,13,14).

2. דולומיטים אפורים, בעלי שכבתיות עבה עד מסיבית, גסי גביש (עד מספר מאות μm), המופיעים בתצורות כסלון, עמינדב, ורדים. במקומות מסויימים, דולומיטים אלה מלווים בסלעי קוורצוליט, המורכבים ממאובנים שבורים או שלמים, מצוררים סלקטיבית (איורים 8,9,10,17,22).

חלק מהתצפיות הללו מספק הסבר ל"בעיית הדולומיט", והדבר יובהר תוך כדי התייחסות לרקע בסיסי בתרמודינמיקה:

1. בהתבסס על נתוני מסיסות של קלציט ודולומיט, מתקבל כי בתמיסה בה היחס המולרי Mg/Ca הוא בקירוב 1, קלציט ודולומיט נמצאים בשיווי משקל. לפיכך, תמיסת מי ים בה היחס המולרי Mg/Ca הוא בקירוב 5, נמצאת עמוק בשדה היציבות של דולומיט.

2. עם זאת, בתמיסות ימיות נורמליות, דולומיט אינו מופיע בסדימנטים קרבונטיים רצנטיים. לעומת זאת, בסביבות אבפוריטיות (כגון בסבחות של אבו דאבי) נמצא כי דולומיט נוצר באסוציאציה עם גבס ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ואנהידריט (CaSO_4).

תצפית זו ניתן להסבר כלהלן: עם אידוי מי ים בפקטור של 3 ומעלה מתחיל לשקוע גבס (ובהמשך גם אנהידריט). מנקודה זו ואילך יורד הריכוז האבסולוטי של Ca, ואילו ה Mg מתנהג כמרכיב קונסרבטיבי, וריכוזו עולה. בעקבות כך חלה עליה ניכרת ביחס Mg/Ca (שיכול להגיע לכדי 10-15), המלווה בעליה משמעותית בדרגת הרווייה של דולומיט במי החללים הנמצאים במגע עם הסדימנט הקלציטי/ארגוניטי, המלווה ביצירת דולומיט.

3. התנהגות תרמודינמית זו ידועה כ "מחסום אנרגטי", "אנרגיית אקטיבציה" או "יצירת מרכזי גיבוש (nucleation centers) של דולומיט" במקרה הנוכחי, המתקבלת ונמשכת מעבר לרמה גבוהה מסויימת של רוויה ביתר. עם הירידה מתחת למחסום האנרגטי תיפסק יצירת מרכזי גיבוש נוספים, אולם המשך גידולם של גבישי הדולומיט (תוך כדי החלפת הסדימנט הקלציטי/ארגוניטי) מתרחש בכל שדה היציבות שלו, גם מתחת לתחום האבפוריטי.

4. תמיכה חלקית למודל המתואר ניתן לקבל מנוכחות גיאודות קוורץ נושאות אנהידריט בחלק משכבות הדולומיט של תצורות שורק ובית מאיר. עם זאת, גיאודות קוורץ אינן קיימות בכל שכבות הדולומיט, ומוצע בזאת כי הדבר מבטא את המסתם של רוב תרכיזי האנהידריט (ובעיקר הקטנים מהם) לפני (או ללא) החלפתם בקוורץ.

התסריט המוצע ליצירת סלעי הדולומיט השונים בחבורת יהודה הוא:

- סביבה רדודה ושטוחה של פלטפורמה קרבונטית בעלת חילוף מים מוגבל. בתנאים אלו חלו ארועים תכופים של שינויי מליחות, שכללו חריגות לתחום האבפוריטי (גבס/אנהידריט). בעקבות ארועים אלה נוצרו מרכזי גידול של דולומיט, אשר המשיכו את גידולם (תוך כדי המסת הקרבונט המקורי) גם בעקבות ירידת המליחות לתחום התת-אבפוריטי.
- עם ירידת המליחות חלה המסה של המינרלים הסולפטיים, אשר במרבית המקרים נעלמו ללא שריד. במקרים מיוחדים, בתנאים מקומיים של זמינות תמיסות סיליקה

נוצרו תרכיזי קוורץ המחליפים חלקית ומכילים את שרידי האנהידריט, המוכרים כגיאודות קוורץ.

- תכונות סלעי הדולומיט משקפות את משך קיומם של הארועים האבפוריטיים, ואת מידת החריגה לתחום האבפוריטי. ככל שתנאים אלה היו קיצוניים יותר כך צפיפות מרכזי הגיבוש הייתה גבוהה יותר, וגודל גבישי הדולומיט קטן יותר, ולהיפך בתנאים המתונים יותר.

- לתנאי המליחות הייתה גם השלכה על התנאים הבנתוניים, ובעקבות כך גם על שימור הרישום הכימי, המינרלוגי והסטרוקטורלי. כך, בתנאים מתמשכים של מליחות גבוהה בתחום התת-אבפוריטי נמנעה במידה רבה קיומם של יצורים בנתוניים, ובעקבות כך גם פעילות ביוטורבציה. לעומת זאת, במקרים בהם התחום התחתון היה גבוה אך במקצת ממליחות נורמלית הייתה פעילות נבירה אינטנסיבית, ובעקבות כך הרס סטרוקטורות למינריות. בנוסף לכך, תנאים אקולוגיים אלה איפשרו במקומות הצטברות של מאספי מאובנים, ואפילו קיום שוניות כגון בתצורות כסלון ועמינדב.

לסיכום, תהליך הדולומיטיזציה מחייב קיום טווח מליחות היפרסליניות, שהשתרעו בין התחום האבפוריטיות לתת-אבפוריטי, השונות בתחום השליטה של הטווחים השונים. לתובנה זו יש השלכה להבחנה והבנה של האסוציאציות הדולומיטיות שתוארו למעלה, כלהלן: (א) בטווח המליחות הגבוה תנאי יצירת מרכזי הגיבוש הדולומיטיים הגיעו לתחום הגבוה של המליחות, ונמשכו זמן רב יחסית. כתוצאה מכך התקבלה צפיפות גבוהה של מרכזי הגיבוש, ועם סיום הדולומיטיזציה (בתחום התת-אבפוריטי) התקבלה מוזאיקה בעלת גבישים קטנים מאד (עד כדי מספר μm). בנוסף לכך, קיום תנאים עוינים לבעלי חיים בנתוניים מנעה תהליכי נבירה, ואיפשרה שימור סטרוקטורות שכבתיות דקות ולמינציה, כמו גם שימור מקומי של חלק מתרכיזי האנהידריט (שנשמרו בגיאודות הקוורץ). (ב) בטווח המליחות הנמוך יצירת מרכזי הגיבוש (בתחום האבפוריטי) התקיימה זמן קצר יחסית, והתבטאה בצפיפות נמוכה ובגבישים גדולים יחסית (עד כדי מאות μm) של המוזאיקה הדולומיטית. בנוסף לכך, קיום תנאים בנתוניים משופרים (בתחום התת-אבפוריטי) איפשרה

ביוטורבציה מתקדמת, ערבוב תמיסות, והמסה מהירה ומוחלטת של המינרלים האבפוריטיים. בנוסף לכך, במקומות מתקבלים תנאים להתפתחות שוניות ורסק שוניות, אשר צרורם המוקדם (קוורצוליט) מנע את הדלומיטיזציה שלהם (כמו בתצורת כסלון, איורים 8-10).

תצורת מוצא

תצורת מוצא מייצגת שינוי חד ברצף היחידות הדלומיטיות של חבורת יהודה, בהיותה מיוצגת על ידי שכבות גיר עתירות מאובנים בנתוניים, בחילוף עם שכבות חרסיתיות (איורים 15 ו-16). על פניו, שילוב ליתולוגי זה נראה כמבטא תנאים סותרים: תרומה ניכרת של סדימנט קלסטי מחד (כביטוי אפשרי לרגרסיה), ומעבר חד למי ים נורמליים מאידך (שיפור ניכר בחילוף מי הים כתוצאה מהעמקה?). השיקולים למניעת סתירה (לכאורה) זו הם: במהלך הקרטיקון הסביבה הימית הייתה מיוצגת על ידי פלטפורמה נרחבת ושטוחה, אשר, בניגוד לתנאים השולטים כיום, הייתה מאופיינת בחילוף מים מוגבל, וברמת אנרגיה נמוכה מאד. תנאים אלה מתיישבים עם העדויות לקיום מליחויות גבוהות ברמות משתנות מחד, ועם הצטברות מרכיבים קלסטיים דקים מאידך בדלתאות שהתקיימו במעבר הנרחב בין הים ליבשה. עליה דרסטית בקצב ההשתפלות (אשר סיימה את תצורת בית מאיר) גרמה להעמקה יחסית מהירה בעומק המים באזורנו, לשיפור ניכר בחילוף המים ומעבר לתנאי מליחות נורמליים, לעלייה חדה ברמת האנרגיה, ובעקבות כך להעלאה לתרחיף של הסדימנטים החרסיתיים שהצטברו בדלתאות הקודמות, ופיזורם על גבי הפלטפורמה השטוחה. מוצע כי השקעת חרסיות אלה על פני הפלטפורמה לא הייתה אחידה, ובמקומות (ובזמנים) אליהם לא הגיע מטען זה מי הים היו צלולים, ואיפשרו קיום ליצורים בנתוניים. חילוף שכבות חרסיתיות וגיריות בתצורת מוצא הם איפוא ביטוי לשינויים האקראיים בתנאים אלה. עם סיום ארוע ההעמקה, וחזרה לתנאים הקודמים של השתפלות מתונה, חזרו גם התנאים המתאימים לתהליכי הדלומיטיזציה (של תצורת עמינדב, איור 17).

ספרות נבחרת

פלקסר, ע., 1968. המורפוטקטוניקה של ירושלים וסביבותיה. טבע וארץ, כרך י' חוברת ו' אוקטובר-נובמבר.

סנה, ע. ואבני, י., 2011. המפה הגיאולוגית של ישראל, 1:50,000, גיליון ירושלים (II-11) הוצאת המכון הגיאולוגי.

Avnimelech, M., A., 1966. Dinosaur tracks in the Judean Hills. The Israel Academy of Sciences and Humanites Proceedings, Section of Sciences, No. 1.

Sass, E. & Bein, A., 1982. The Cretaceous Carbonate Platform in Israel. Cretaceous Research. 3, 135-144.

Sass, E. & Oppenheim, M. J. 1965. The petrology of some Cenomanian sediments from the Judean Hills, Israel, and the palaeo-environmental break of the Motza Marl. Israel Journal of Earth Sciences 14, 91-107.

סיור מספר 1: ב' - מערת שורק

מירה בר-מטיוס ואבנר אילון
המכון הגיאולוגי לישראל

הקדמה

מערות שבחללן נטיפים המשתלשלים מהתקרה, זקיפים הצומחים מהרצפה ושאר צורות מרהיבות נחשבות בין תופעות הטבע החביבות על מטיילי כל העולם. מערה מרשימה היא מערת הנטיפים (מערת אבשלום, מערת שורק). הנמצאת במורדות המערביים של הרי יהודה בעקבות פיצוץ במחצבת הרטוב ליד בית שמש. מערה זו בהשוואה 1968 ונתגלתה בשנת למערות מפורסמות בעולם נחשבת קטנה אבל מרהיבה ביופיה. המערה הוכרזה כשמורת טבע (שמורת אבשלום) כדי להגן עליה מפני הפיצוצים במהלך עבודות החציבה. עד לגילויה הייתה המערה סגורה, ללא פתח חיצוני לאטמוספירה וגם לאחר פתיחתה למבקרים דואגת רשות הטבע והגנים לשמרה כמערה סגורה, כדי שהתנאים שבה יישארו קרובים במידת האפשר מטר וגובהה המרבי 60 - מטר, רוחבה כ 80 - לתנאים ששררו בה בטרם נפרצה. אורכה כ מטר. מעל תקרתה מצויים כיסי 40 - ל 12 מטר. עובי כיסוי הסלע שמעליה נע בין 12- כ . בזמן גילוי 100% -קרקע ובהם צמחייה ים תיכונית. הלחות היחסית במערה קרובה ל ° - המערה הטמפרטורה הממוצעת היתה כ , ומייצגת את הטמפרטורה הרב שנתית C 20 הממוצעת שעל פני השטח. מאז פתיחת המערה לקהל המבקרים הטמפ' הממוצעת עלתה לכחמצני בה - בעיקר בגלל מערכת התאורה. בעת גילוי המערה היה ריכוז הפחמן הדו C22 ° כפליים מריכוזו באטמוספירה. כיום, בגלל ריבוי המבקרים הריכוז עלה, אבל הוא מווסת 4 באמצעות מכשור מתקדם, כך שהמערה לא תיפגע. המערה נוצרה כנראה לפני כ - מיליון 6 שנה, לפני התרוממות הרי יהודה, כאשר גובה האזור היה קרוב לגובה מפלס מי הים. המערה מיליון שנה. מאז 95 -התפתחה בתוך סלעי דולומיט וגיר (תצורת ורדים) שגילם כ מטר מעל מפלס פני הים. באזור ידועות 400 היווצרות האזור התרומם, וכיום היא נמצאת כ מערות נוספות באותו גובה טופוגרפי כמו מערת שמשון ומערת התאומים .

מאז גילויה בשנת 1968 ופתיחתה לקהל הרחב, מבצע המכון הגיאולוגי מגוון מחקרים בעיקר בנושא אקלים העבר, במקביל לניטור הרכב המים המגיעים למערה, וההרכב המינרלוגי, הכימי והאיזוטופי של הנטיפים והזקיפים השוקעים מהמים המגיעים למערה. ניטור הטמפרטורה והאטמוספירה של המערה נערכים במטרה לשמר את המערה בצורתה הטבעית למרות היותה מוקד תיירותי. המערה מהווה חלון הצצה למתרחש בתת הקרקע ולמעקב אחרי המים הנודדים מפני השטח אל מי התהום. במהלך הסיור נתמקד בתופעות המרהיבות במערה, כיצד ניתן לפענח את אקלים העבר, מה אנחנו למדים מהניטור של מי המערה על השינויים האקלימיים המתרחשים מול עינינו, כיצד ניתן להשתמש במשקעי מערה לשחזור רעידות אדמה ונושאים רבים אחרים.

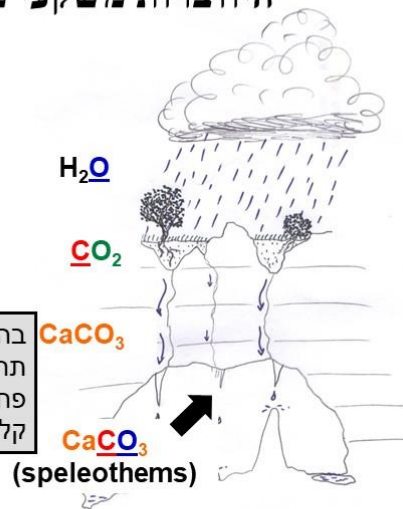
היווצרות משקעי מערה (ספלאוטמים)

אינטראקציה בין מי גשמים לרקבובית שבקרקע גורמת ליצירת מים חומציים

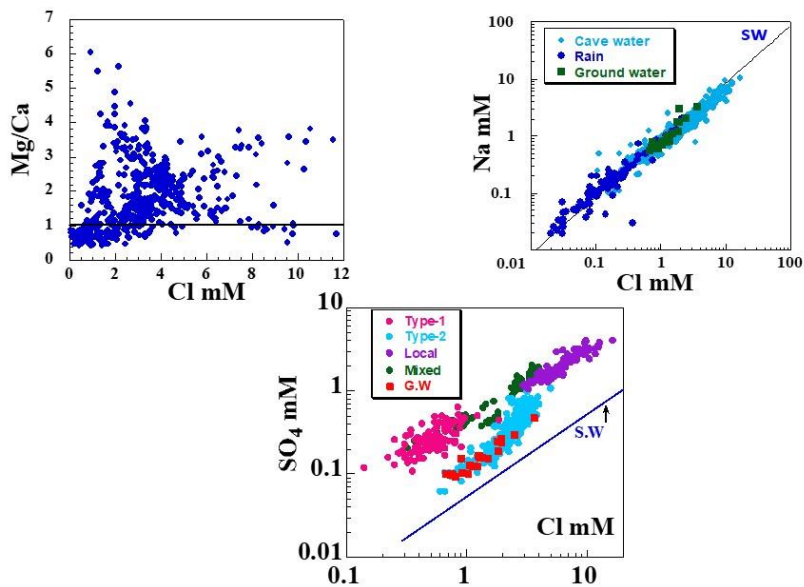
מים חומציים העוברים דרך סדקים וחללים בסלע סופחים יסודות כמו סידן, מגנסיום ועוד, וכן דו-תחמוצת הפחמן מהקרקע



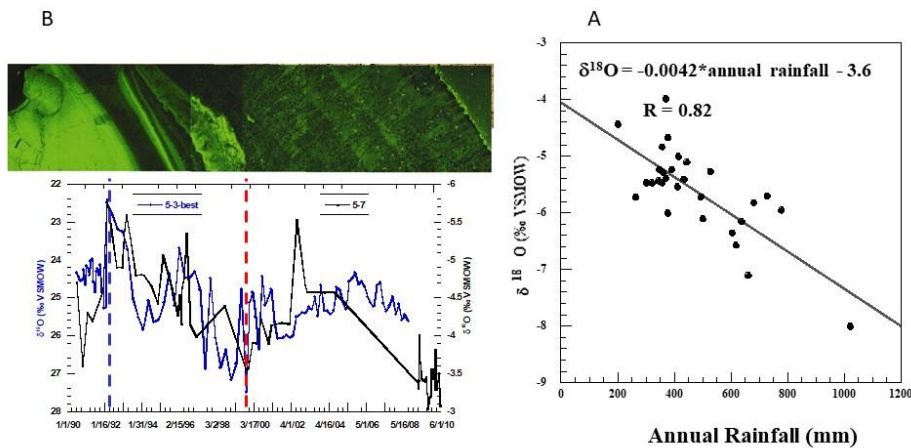
בהגיעם למערה נפלט דו תחמוצת הפחמן ושוקע פחמת הסידן בעיקר המינרל קלציט $(Ca_{1-x}Mg_x)CO_3$



איור 1. ספלאוטמים במערות קרסטיות נוצרים רק בנוכחות מים. מקור המים הוא מי גשמים העוברים דרך חתך של סלעים וקרקות. המים חייבים להכיל ריכוזים גבוהים של דו-תחמוצת הפחמן (גבוהים יותר מאשר בחלל המערה) ולהכיל ריכוזים גבוהים של יסודות כמו סידן ומגנזיום.



איור 2. ההרכב הכימי של מי מערת שורק, יחסי Na – Cl במי הגשמים, מי המערה ומי התהום "חובקים" את הקו המייצג את מי הים (SW). יחסי Mg- Cl סוטים מהרכב מי הים, המגדלים נגזר בעיקר מהאבק הקרבוני. יחסי SO₄-Cl במי הגשמים ומי המערה סוטים מהרכב מי ים. מקור הסולפט בדיהום אנטרופוגני.



איור 3. היחס בין ההרכב האיזוטופי השנתי המשוקלל של החמצן לכמות המשקעים השנתית במהלך 25 השנים האחרונות (A), והיחס בין ההרכב האיזוטופי של מי המערה והמוצק השוקע מהם (B).



חתך בנטיפים וזקיפים מראה מבנה למינרי. טבעת גידול יכולה לייצג עונה, שנה ואפילו עשרות שנים תלוי בקצב הגידול. הגידול ייפסק כשאין מים במערכת.

לשחזור אקלים נדרש:

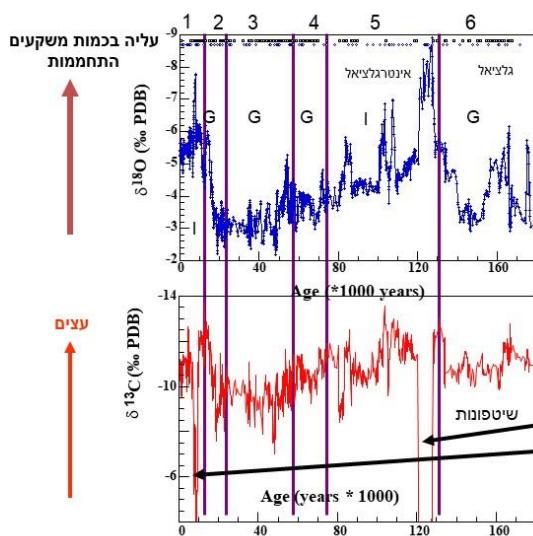
- תיארוך גיל שכבות הגידול (תיארוך רדיומטרי – איזוטופים רדיואקטיביים);

- נתונים מפרמטרים המשמשים כמתעדים של שינויי אקלים (לדוגמא: איזוטופים יציבים של חמצן ופחמן).



איור 4. חתכי רותב ואורך בנטיפ וזקי המראה טבעות גידול ואת נקודות הדיגום לתיארוך ומדידות איזוטופיות

רקורד איזוטופי של חמצן ופחמן



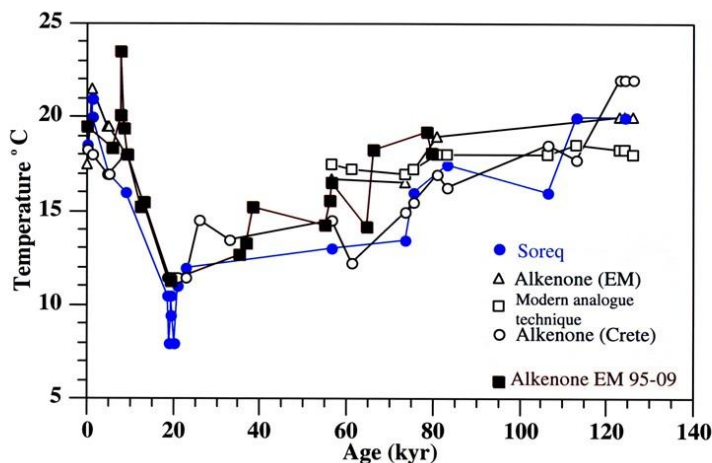
• השקעה רציפה של משקעי מערה;

• מספיק מים הגיעו לתווך הבולתי רווי כדי שיוצרו משקעי מערות;

• השינויים בהרכבים האיזוטופיים של חמצן ופחמן הם ביטוי לשינויי אקלים באזור.



איור 5. 180 אלף שנה של רקורד איזוטופי של חמצן ופחמן המכסה תקופות קרחוניות (G) וביןקרחוניות (I).



איור 6. שינויי טמפרטורות במהלך 140 אלף השנה האחרונות כפי שחושבו במערת שורק על סמך אינקלוזיות נזליות (כחול) במשקעי המערה, ודומים לטמפרטורות המחושבות ברקורד של ים התיכון המזרחי המסתמכים על מתעדים שונים.

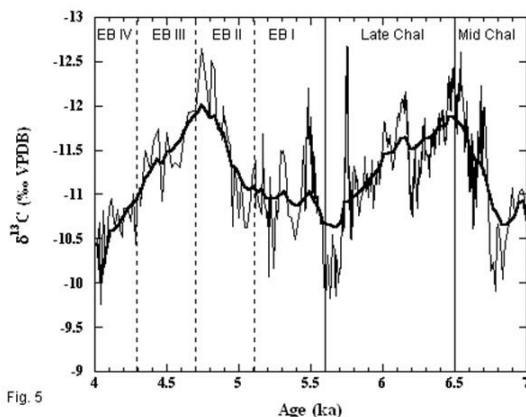
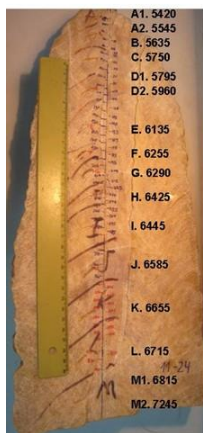


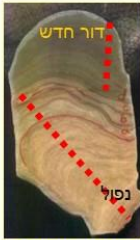
Fig. 5

איור 7. שינויי אקלים ותרבויות לפי הרקורד האיזוטופי של פחמן במשקעי מערת שורק במהלך ההולוקן (התיכון 4000-7000 שנה)

שיחזור רעידות אדמה במערת שורק

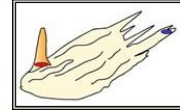
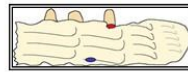
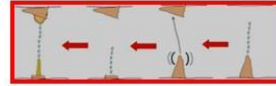


עמוד גדול נפול,
עליו גדלו זקיפים
לאחר נפילתו

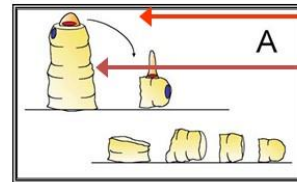


נטיף שבור ודור
"חדש" של גידול

דיאגרמות סכמטיות של משקעי מערה שנפגעו
על ידי רעידות אדמה



זקיף שבור, ודור "חדש" של גידול



אחרי
התמוטטות
לפני התמוטטות

איור 8. שיחזור רעידות אדמה עתיקות באמצעות משקעי מערת שורק (Kagan et al., 2005)

במהלך 185,000 השנים האחרונות הובחנו 39 התמוטטויות, תוארכו 18 רעידות גדולות שגרמו נזק במערה, 12 אלף שנים (בממוצע) בין רעידה גדולה לרעידה גדולה. אירועי רעידות אדמה חשובים התרחשו לפני: 13, 39, 47, 52, 71, 135, 150, 163 ו-5 אלפי שנה.

סיור מספר 2:

יחסי טקטוניקה, אקלים ותהליכי פני שטח בהרי יהודה

Climatic and tectonic controls on landscape evolution in the Judea Range

Uri Ryb and Ari Matmon

Freddy and Nadine Hermann Institute of Earth Sciences, Hebrew University of Jerusalem

This guide appears on the other side of the book, on page 235

כתוב בשפה האנגלית ומופיע בסוף החוברת, בעמוד 230

סיור מספר 3:

מיפוי גיאולוגי של הר איתן בעידן דיגיטלי: קצת היסטוריה של התיישבות והרבה גיאולוגיה של העתיד

אמוץ עגנון¹, יניב דרבסי¹, יוני ישראל¹, דן גולן², גלינה פירשטיין³

1. המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית

2. חוקר עצמאי

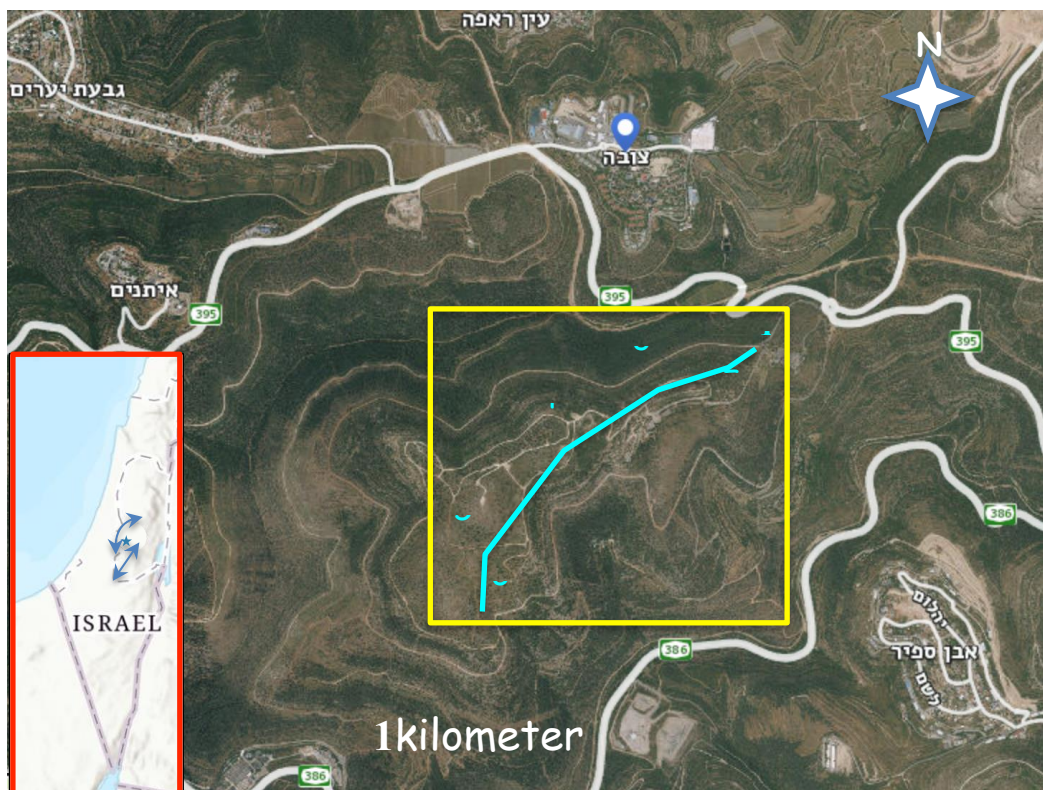
3. המכון הגיאולוגי לישראל

מבוא

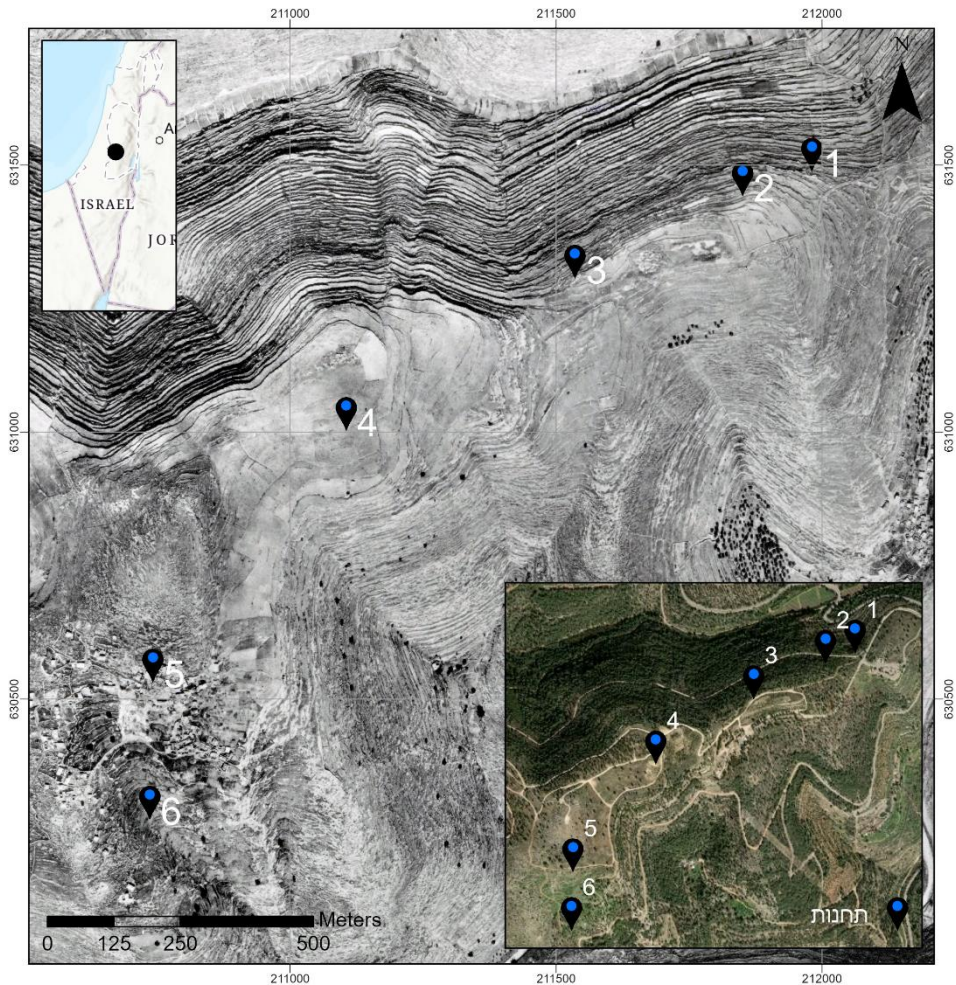
הר-איתן (איור 1) מתנשא לגובה של 788 מעל-פני-הים. הר-איתן הוא אחד ההרים הנישאים ממערב לירושלים סמוך לפארק סטף. ההר מוכר בעיקר הודות לנוף ההיקפי הנשקף מפסגתו, ממנה ניתן לצפות מהים-התיכון במערב עד ירושלים במזרח, ומרמאללה בצפון עד לבית-לחם בדרום. סביב ההר עשרות דונמים של טראסות חקלאיות נטושות, שעל חלקן עצים מניבי פרי עד היום. עקב מיקומו בקרבת ירושלים והנוף הנשקף ממנו, משך אליו הר-איתן חוזים ויזמים רבים שחמדו את ההר להקמת פרויקטים לאומיים ופרטיים, בהם – בסיס צה"ל, שדה תעופה לירושלים, בית-קברות לירושלים, מחצבת חרסית, שכונת וילות, מצעד צה"ל בשנת היובל, המוזיאון הלאומי למערכות ישראל, ויער זיכרון לחללים. ההר מוכר גם בזכות דרך הסובבת אותו שהכשירה הקק"ל, ומשמשת כיום רבבות מטיילים, ספורטאים ורוכבי אופניים.

פחות ידועה היא העובדה שבתחומי ההר היו יישובים למן התקופה הכלכלית, דרך התקופה הרומית, ויישוב ערבי במשך מאות השנים האחרונות, עד מחצית המאה הקודמת. הכפר הערבי נקרא ח'רבת אל-לוז (בערבית خربة اللوز). היישוב הישראלי האחרון במקום שקימו היה קצר מועד, הנו כפר מטעים בשם אבטח/לוזים. הכפר הוקם בשנות ה-50 עלידי עולים מתימן שסבלו בו תלאות רבות. השרידים בשטח מועטים, וכן מועטים ביותר הנתונים בתיעוד הגאוגרפי-היסטורי. הספקת המים ליישוב ולחקלאות נסמכה על מי גשם מקומי בלבד, ומעניין להוכיח כיצד השכילו התושבים לאורך הדורות לנצל את המשאבים המצומצמים תוך הסתמכות על הגיאולוגיה.

הר-איתן מופה במסגרת עבודת מוסמך של האוניברסיטה העברית (יצחקי, 1963). המפה עובדה ויצאה לאור כחלק מגליון ירושלים 1:50,000 (Arkin, 1976). בתחילת העשור האחרון עודכן גליון זה (Sneh & Avni, 2011). החוג לגיאולוגיה חזר לאחרונה להר-איתן במסגרת קורס מיפוי במשך שנתיים. זו היתה הזדמנות גם לעדכן את שיטות המחקר, וסיום זה מציג חידושים עיקריים בטכנולוגיה וחידושים גיאולוגיים שנגזרו מהם.



1. מפת מיקום של אזור הסיור עם מסלול הסיור ותחנותיו (כחול-ציאן). במסגרת האדומה: מסומן אזור כוכבית כחולה בין המונקלינות של רמאללה (צפון ומערב) וחברון (דרום מזרח ודרום) במסגרת הצהובה - תיחום של צילומי האוויר באזור 2.



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community, Sources: Esri, Airbus DS, USGS, NGA, NASA, CGIAR, N Robinson, NCEAS, NLS, OS, NMA, Geodatastyrelsen, Rijkswaterstaat, GSA, Geoland, FEMA, Intermap and the GIS user community, Sources: Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

איור 2. מפת מיקום של הסיור, מסלול ותחנות הסיור (ספרות לבנות) על גבי תצלום אוויר מנדטורי מסדרת PS-1 מיושר ומעוגן לרשת ישראל החדשה. שמאל למעלה: מפת אינדקס. ימין למטה - אורתופוטו מודרני. יער קרן קיימת לישראל מסווה את הטרסות החקלאיות, בעיקר במפנה דרומי.

אחד הזרזים לבחירת אזור המיפוי היה המחקר הגיאוגרפי-היסטורי-גיאוכרונולוגי אשר התמקד בהר בשנים האחרונות. גולן וקרק (2009) סקרו את ההיסטוריה החקלאית באזור. בעקבות עבודה זו התפתח מחקר ארכיאולוגי (Gadot et al, 2016) וגיאוכרונולוגי (2018),

(Porat et al). ההיסטוריה ההתיישבותית של ההר מעלה את שאלת מקורות המים, וקשורה מאד לגיאוגרפיה-הידרולוגיה.

בסיוור זה נסקור את התפתחות המחקר ואת הקשרים בין הדיסציפלינות המעורבות.

היסטוריה של ההתיישבות

בשנת 1992 נערך סקר ארכאולוגי מקיף בהר-איתן, בראשותו של ארכאולוג מחוז יהודה מר דני וייס. הסקר הוזמן על-ידי עמותת הר-איתן כהכנה לקראת הקמת "המרכז הלאומי למערכות ישראל", שהקמתו בוטלה בסופו של דבר. במסגרת הסקר נאספו ממצאים וחרסים המעידים שהר-איתן היה מיושב לסירוגין בתקופות הכלכוליתית, הברונזה (התיכונה 2ב), הברזל (ג), ההלניסטית, הרומית, הביזנטית, הערבית קדומה, והערבית (וייס, 1994). בסקר של "הקרן הבריטית לחקר ארץ-ישראל" (Palestine Exploration Fund - PEF) צויין בתמציתיות רבה: "היישוב Khurbet el Loz נמצא במצב של הריסות, מערות הקבורה מיושבות, נישות הסרקופגים שבורות, נמצא מגדל שמירה עתיק ליד שרידי חומות אבן, ואבן ריחיים במדרון ההר." (Conder & Kitchener, 1881, 119) במפת הסקר צוינו Tombs (קברים) צמוד ליישוב.

מספר ניכר של בורות מים חצובים בסלע בהר-איתן, ומאופיינים באבן שפה מעל פתח הבור. בור מים אחד יוצא דופן נקרא בפי המטיילים "בור איתן". אל בור זה נחצבו שש מדרגות, והוא שימש אולי כמקווה טהרה. השימוש במקוואות ביישובים יהודיים החל במאה השנייה לפנה"ס והתפתח לאחר חורבן הבית בתקופת המשנה והתלמוד. חלקם מוקמו ליד מתקנים חקלאיים, בהתאם לדיני הטהרה הנוגעים לעובדים בהכנת שמן ויין (רייך, 1990 334-336). בהר-איתן נמצאו מתקנים חקלאיים ששימשו להכנת שמן ויין. השילוב של מיקום הבור בסמוך למתקנים חקלאיים לייצור שמן ויין, והעובדה החרגה שאל בור זה מובילות שש מדרגות שנחצבו במיוחד, מעלה את השערת המקווה, המקושרת לרוב עם בית שני.

מידע ממיפקדים אזוריים בשלהי התקופה העות'מנית ובתחילת המנדט, כמו תיאורי נוסעים מצירים תמונה של שינויים בריכוזי האוכלוסין, כאשר בחלק מהמקורות ח'רבת אל-לוז לא באה כלל לידי ביטוי, או שאוכלסה ככפר מערות בסמוך להריסות בתים. ניתוח מפת קדסטר

בריטית מ-1933 לעומת תצלום אוויר מ-1945 מתעד הרחבה על ידי שכונה חדשה ממערב לגרעין הכפר הראשוני.

בתחנה 5 נרחיב על ההיסטוריה הישובית בהר-איתן, ונראה כיצד ההידרוגיאולוגיה גייסה על ידי התושבים בתקופות שהאקלים והגיאופוליטיקה איפשרו התיישבות.

שיטות חדישות

בהכנת מפות רקע לקורס מיפוי גיאולוגי השתמשנו ברחפן שריחף בגובה עד 50 מטר. זהו הגובה המכסימלי המותר למפעיל ללא רשיון מיוחד. מודל גובה פוטוגרמטרי מתמונות הרחפן עוגן בעזרת מקלט GPS דיפרנציאלי. המודל איפשר הדמאות תלת ממדיות של מפות ותצלומי אוויר היסטוריים. יתרון עיקרי ניתן לתצלומים משנות ה-40 של המאה העשרים, בטרם הנטיעות הנרחבות וגידול החורש אשר מסתיר את הגיאולוגיה (איור 2). התלמידים נתבקשו להטעין על הטלפונים החכמים ישומנים יעודיים למיפוי, בהם השתמשו במהלך ימי השדה. הקורס העלה צורך בזיהוי מודרני של מסלע ובסיוור נדגים שימוש בxfx נישא לצורך זה.

צילומי רחפן:



איור 3. (א) אחד הרחפנים ששירתו את המיפוי. (ב) תצלום אוויר אנכי לדוגמא. (ג) תבליט מוצלל, מודל גובה פני שטח מצילומי רחפן.

רחפנים מדגם DJI-Phantom (גרסאות 3 ו-4) (איור 3א) הוטסו לצורך כיסוי בצילומים ופוטוגרמטריה. הטסה בגובה שאינו עולה על 50 מ' אינה מחייבת רישוי והיא מאפשרת תמונות בהפרדה גבוהה (20 ס"מ פיקסל, איור 3ב) ופוטוגרמטריה מפורטת (להלן).

עיבוד פוטוגרמטרי: השתמשנו בתוכנת AgiSoftPro אשר מקבלת תמונות ומרכיבה מהן מודל פוטוגרמטרי (איור 3ג).

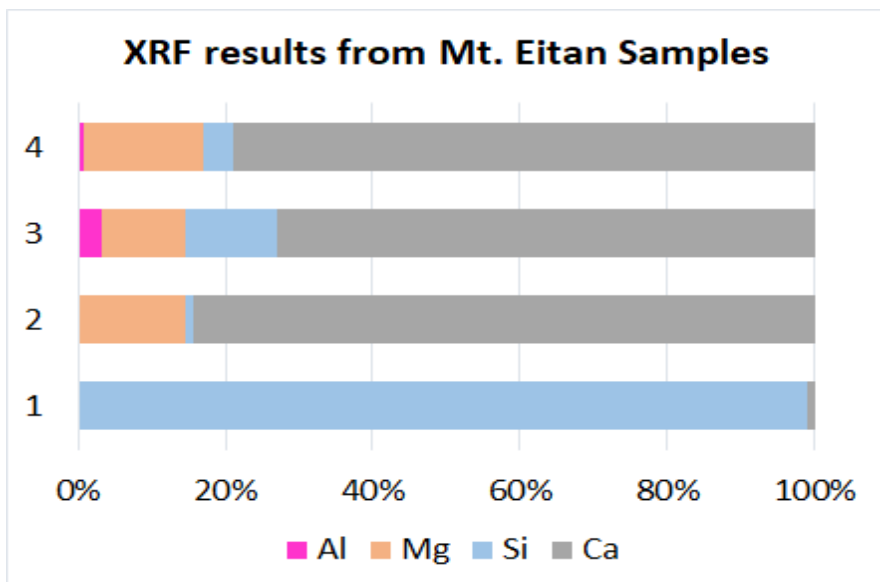
עיגון מדויק: השתמשנו במקלט GPS דיפרנציאלי מתוצרת Javad דגם Triumph LS אשר קולט ערוצי לוויין כולל לווינים יחודיים שמשדרים תיקונים אטמוספריים וכן ערוצי סלולר. המכשיר מאפשר דיוק מוחלט (אופקי) של 5 ס"מ באופן פעולה נוח (real time kinematic) ודיוק של סנטימטר בודד בעיבוד לאחר איסוף נתונים. לצורך מיפוי הר-איתן הסתפקנו בדיוק של 5 ס"מ.

ישומנים לטלפון חכם: (1) ישומן בשם FieldMove מאפשר מגוון של פעולות גיאולוגיות, החל במצפן-מד-שיפוע ("ברנטון"), עבור בניווט ומערכת מידע גיאוגרפית על מפות (אשר הוטענו מראש או נגישות באופן מקוון), וכלה ברישום ישיר של נתונים ל"פנקס שדה" דיגיטלי. הוא גם מאפשר חיבור נוח לתוכנת Move (MdilandValley) לשחזור מבנים וניתוח טקטוני. (2) ישומני גוגל (GoogleEarth ו GoogleMaps) מאפשרים מגוון של פעולות גיאוגרפיות והם זמינים לכל (בינתיים) במגוון פלטפורמות. (3) לאתר "עמוד ענן" יש ישומן אשר יתרונו במומחיות האזורית.

פלאורנות של קרני רנטגן - מכשיר XRF נישא:

מכשיר ה-XRF הנייד משמש לאנליזה כימית של חומרים בשטח. האנליזה נחשבת כמותית למחצה ודורשת כוילים, אך מאפשרת זיהוי של יסודות שלא ניתן לזהותם בשיטות הישנות של גיאולוגיה בשדה. בעזרת שפורפרת רנטגן המכשיר שולח אלומת קרני X לתוך המדגם, ובתגובה אלקטרונים מאורביטלות פנימיות מעוררים ומאפשרים "צניחה" של אלקטרונים מאורביטלות חיצוניות לחור שהתפנה. הפרש האנרגיות בין האורביטלות מכתוב את אורך הגל של הפוטון שמשחרר. בחומרים מוצקים האורביטלות יוצרות רצועות וההפרש בין רמות האנרגיה מתפלג סביב האנרגיה האופיינית לכל יסוד. בעזרת גלאים המכשיר מאתר פליטות אופייניות של יסודות החל ממגנזיום (מספר אטומי 12), ועד רדיום (מספר אטומי 88), ונותן קירוב ליחסים ביניהם. שבירה ועבודה על משטח טרי וחלק יכולה לשפר את דיוק המדידה. בדיקה בשדה של 60 שניות מספקת דיוק של $>3\%$. המדידה איננה הרסנית עבור הדוגמא ויכולה לעזור למצוא מתאם בין יחידות ליתולוגיות (Young et al., 2016).

מכשיר ה-XRF אשר יוצג בסיור החל לשמש לעבודות שדה במרכז ניב במכון למדעי כדור"א אוניברסיטה העברית (Thermo Scientific Niton XL3t and Ultra X-Ray Fluorescence Analyzer). איור 4 מראה תוצאות מדוגמאות שנאספו בהר-איתן עם הבדלים בולטים בתכולת הסיליקון, המגנזיום והסידן. כך למשל, שוניות מצורנות (silicified) מתצורת כסלון שונות במובהק מקרבונטים מהתצורות האחרות בהן תכולת הסיליקון נמוכה. בדוגמא מתצ' מוצא מופיע אלומיניום באחוזים בודדים, ומשקף נוכחות חרסיות. המכשיר גם מאפשר לאפיין דוגמאות בטווחים בין מרכיבי הקצה, והשוואה בין דוגמאות באותו חתך ובין חתכים שונים ככלי סטריגרפי. מעניין למשל כי דגימות קרבונט בתצורות בית מאיר ועמינדב מכילות סיליקה, אשר ריכוזה בתצ' עמינדב גדול פי ארבע מאשר בתצ' בית-מאיר (מה שלא ניתן להבחנה בשיטות שדה).



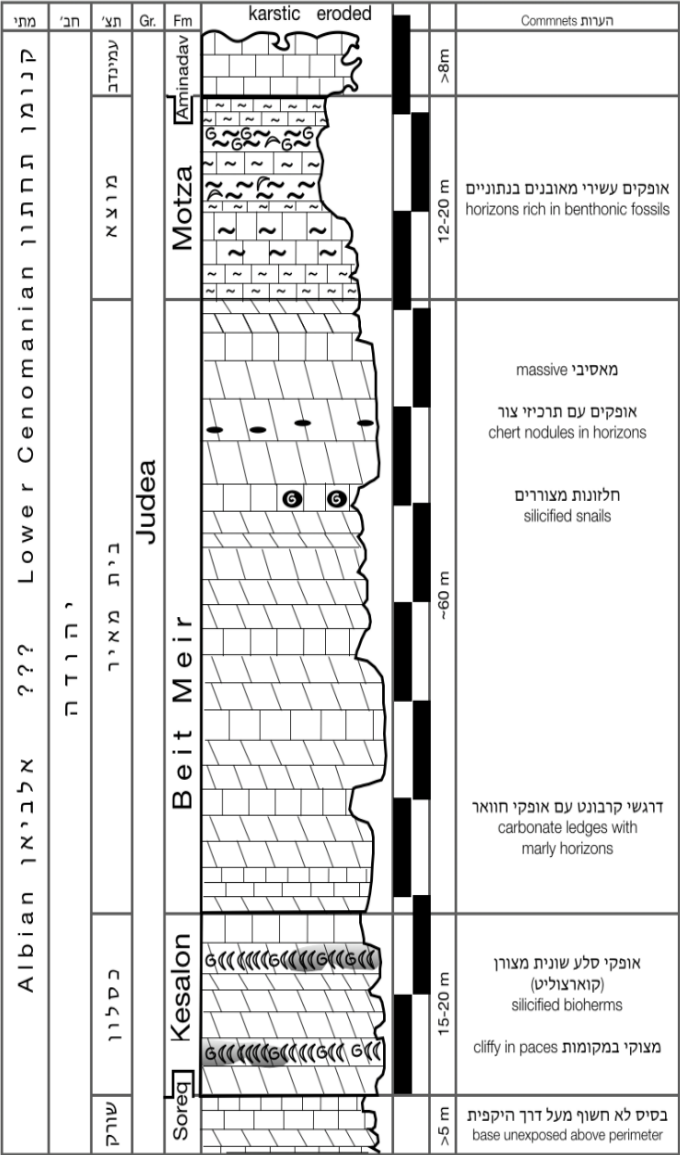
איור 4. אחוזי יסודות עיקריים (משקליים) לפי ספקטרוגרמות XRF עבור סלעים מהר-איתן. כל שורה מתייחסת לדוגמא אקראית מכל אחת מארבעת התצורות העליונות בחתך: כסלון (1) (שונית מצורנת - שם מקומי "קוארצוליט"); בית-מאיר (2); מוצא (3); עמינדב (4).

סטריגרפיה

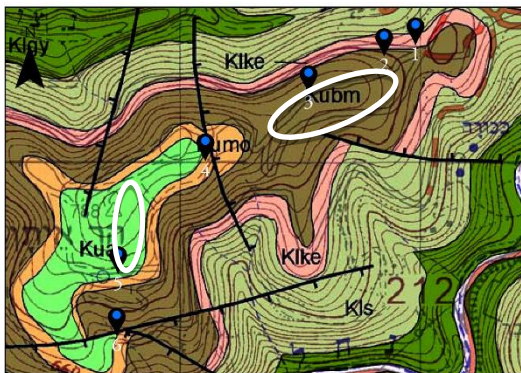
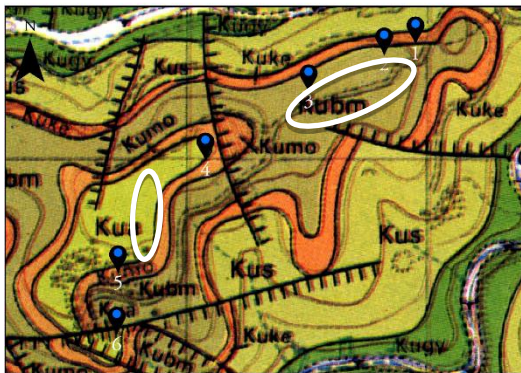
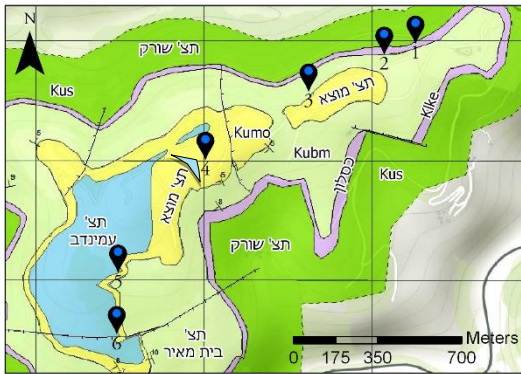
בהר-איתן נחשפת חבורת יהודה, עם התצורות שורק, כסלון, בית-מאיר, מוצא ועמינדב (איור 5). המגעים מקיפים את הכיפה הטופוגרפית, מה שמשקף את הנטיה הנמוכה. להלן סקירה קצרה של התצורות כפי שהן מוצגות אצל Arkin (1987) בשינויים המתחייבים ממצאי המיפוי. החלק התחתון של החתך מורכב משלוש תצורות קרבונטיות מעיקרן: שורק, כסלון ובית מאיר. בין שלוש התצורות, התחתונה (שורק) והעליונה (בית מאיר) נשלטות על ידי דרגשי גיר ודולומיט (חצי מטר עד מטר עוביים) מופרדים על ידי שכבות חואריות דקות; התצורה האמצעית (כסלון) מצוקית ומצטיינת בהופעה של סלעי שוניות מצורנים (silicified reef rocks) שזכו לשם המקומי "קוארצוליט" (Sass and Bein, 1982). החלק העליון של החתך נחלק לתצורת מוצא הנשלטת על ידי חואר עשיר מאובנים וגיר חרסיתי ומעליה תצורת עמינדב הבנויה גיר ודולומיט מאסיביים.

ככלל החתך בהר-איתן עשיר יותר בגיר לעומת חתכים קרבונטיים מהרי ירושלים כפי שתוארו בספרות. עוד ראוי לציון אופק חלזונות מצוררים בתצ' בית מאיר, ואופק של קימוטים אינטרה-פורמציונליים בתצ' מוצא.

המפה הגיאולוגית שנוצרה על ידי תלמידי החוג לגיאולוגיה במכון למדעי כדור הארץ מראה מספר עדכונים לגרסאות המיפוי הרשמיות (איור 6).

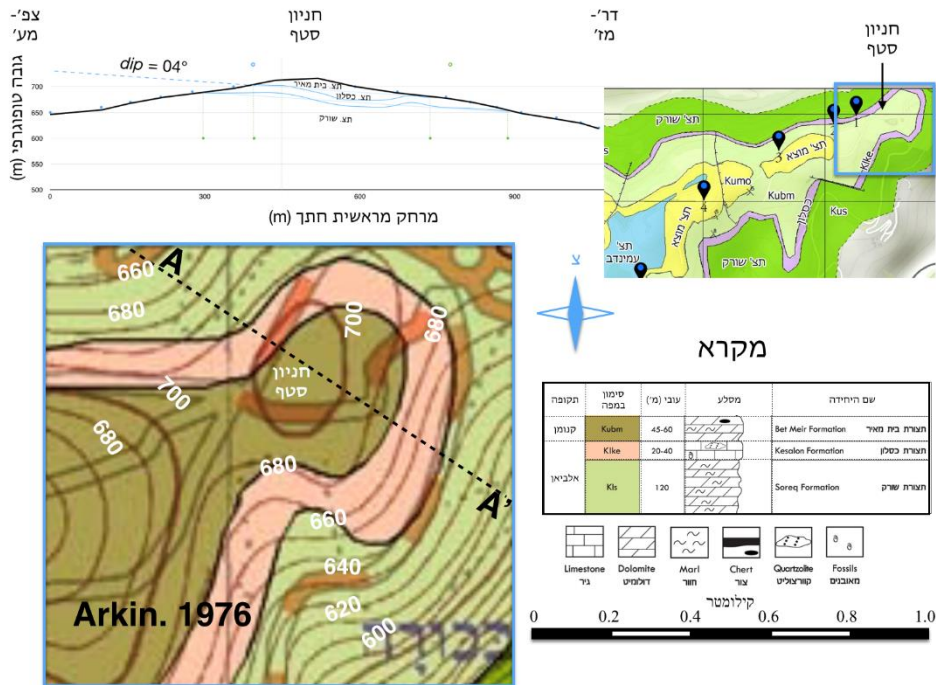


איור 5.
חתך עמודי מוכלל של טור
הסלעים הנחשף בהר-איתן
(מעל לדרך ההיקפית - 8"
ק"מ"). עוביים מבוססים על
מדידות סטודנטים בקורס
מיפוי במפנה הדרומי של
ההר.



איור 6.

גרסאות שונות של מיפוי הר-איתן.
למעלה - מיפוי מפורט (קב"מ
1:10,000) של קורס מיפוי בחוג
לגיאולוגיה, 2018. הגרסאות הקודמות
פורסמו בקב"מ 1:50,000 (המכון
הגיאולוגי).
באמצע - Arkin 1976.
למטה - Sneh and Avni 2011. המיפוי
המפורט הבחין בשני מחשופים נרחבים
של תצ' מוצא (אליפסות לבנות במפות
האזוריות): בכתף הצפון מזרחית
הנשלטת על ידי מחשופי תצ' מוצא
(ככל הנראה שרדו הסרה הודות לכיסוי
קלקריט). כמו כן דרום מזרח הכפר,
מדרום מערב לתחנה 4 ומצפון מזרח
לתחנה 5 מגלה מחשופי תצ' מוצא אשר
דורגו על ידי טרסות חקלאיות.

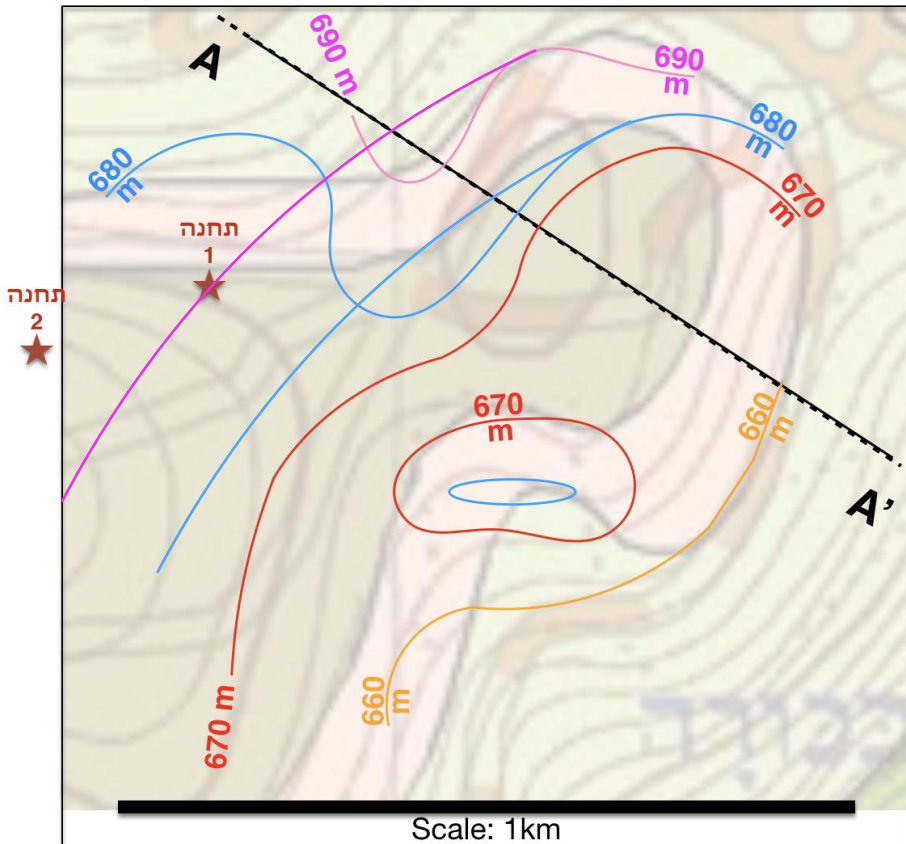


איור 7. המבנה בצפון מזרח ההר (כתף חניון סטף, מפת מיקום למעלה-ימין) מדגים את הנטיה האזורית דרומה עם קמטים משניים באורך גל של מאות מטר. החתך (למעלה-שמאל) נמדד לפי מפת Arkin (1976) (תחתית האיור) אשר באזור זה תואמת את מפת Sneh and Avni (2011) ובקירוב גם את ממצאי קורס המיפוי. הקמטים המשניים, הנדרשים לפי המפה הסטרוקטורלית (איור 8), עשויים לנבוע מאי דיוקים הנגזרים מקנה המידה הגס של המפה (1:50,000).

מבנה

הר-איתן מצוי קילומטרים ספורים מצפון מזרח לחוטם הצפוני של אנטיקלינת חברון וממזרח לחלקה הדרומי של מונקלינת רמאללה (איור 1) (Reches et al., 1981). נטיית השכבות מתונה (איור 7,8) והעתקים מראים זריקות של מטרים ספורים. הנטיה האזורית כלפי דרום בשיעור של עד 10° אחראית על מיקום הכפר במגע הנטוי בין התצורות מוצא לעמינדב, בהיות העליונה אקויפר עונתי שעון, והתחתונה אקויטארד לתוכו נחפרו בורות מים לרוב.

היעור הנרחב משנות ה-60, בעיקר על החלק התחתון של החתך, מציב אתגרים במיפוי העתקים, ולכן תצלומי אויר ישנים שימושיים מאד גם לצורך זה (איור 2).



איור 8. מפה סטרוקטורלית של כתף חניון סטף בצפון מזרח הר-איתן (מיקום באיור 7). דאטום: גג תצורת שורק. המיפוי הגיאולוגי באזור זה לא השתנה מאז שנות ה-60. המבנה נקבע על ידי חיתוכי קווי הגובה במגעים בק"מ 1:50,000. הנטיית נמוכות ולאור המיפוי נוכחים קמטים מקומיים באורכי גל של מאות מטר ומשרעות של עד 20 מטר. מיקום מדויק של המגעים על מודל הגובה המדויק עשוי לבטל חלק מהקמטים לכאורה כמו השקע באזור תחנה 1 של הסיור (כוכב אדום). בסיור נראה שמדע שורק/כסלון עובר בין תחנות 1 ו-2, ויתכן שהשקע ארטיפקט של המיפוי (העיגול של דרכי העפר מכניס שגיאה אופקית של מטרים ספורים בלבד) קווי הגובה המבניים המקווקווים מבוססים על התיקון של המפה הגיאולוגית.

הידרוגיאולוגיה

הר-איתן עשיר בנביעות עונתיות ומפעלי מים שגיליהם משתרעים מהתקופה הרומית ועד ימי המנדט הבריטי. המעינות לרוב נובעים מהמגע שבין אקוויפר עמינדב לבין תצורת מוצא

האקוויטרדית (איור 6). ישנם גם מעיינות הנשענים על המגע התחתון בין תצורת מוצא לתצורת בית מאיר ואף מעיינות הנשענים על שכבות חוואריות בתצורת שורק (Arkin, 1987 ; Peleg and Gvirtzman 2010). במקומות רבים בהר כיסוי קלקריט ("נארי") בעובי 0.5-2 מ'. לתוכו ולתוך התצורות עמינדב, בית מאיר ושורק נחפרו עשרות בורות מים רדודים, המאופיינים באבן שפה מעל פתח הבור, רובם מטויחים וללא קשר הידראולי לאקוויפר (Arkin, 1987). בסקר מקיף בהר, אותרו 40 בורות מים חצובים בסלע או מעיינות. כמחציתם מכילים מים ובאחרים סימנים למים בדופן הבור בגבהים שונים (Golan 2004-2020). איכות המים טובה לחקלאות ואף לשתייה (Arkin, 1987).

תארוך טרסות חקלאיות בשיטת ה-OSL

שיטת התיארוך (OSL) optically stimulated luminescence מבוססת על דווימטריה של קרינה סביבתית טבעית. מינרלים מסויימים (כגון קוורץ) יכולים לצבור סיגנל לאורך זמן כתוצאה מקרינה הסביבתית. אלקטרונים מעוררים נלכדים בפגמים בשריג המינרל, ועם חלוף הזמן חלקם חוזר למצב היסוד בתהליך דעיכה. בחשיפה לאור שמש האלקטרונים הנותרים חוזרים למצב היסוד תוך שחרור פוטונים ואלה מהווים את סיגנל הלומינסנציה. השיטה מתארכת את זמן החשיפה האחרון של גרגרי הקוורץ לאור שמש (Aitken et al., 1985; Wintle and Adamiec, 2017).

העניין בגיל של טרסות חקלאיות, מרכיב מרכזי בנוף של הרי יהודה, הביא חוקרים לתיארוך בשיטת OSL. הפרדיגמה המקובלת קובעת שחקלאות בהתקופה המקראית הביאה לטירוס המאסיבי של האזור (Gibson, 2001). במדרונות הטבעיים הקרקע נמצאת בעיקר בכיסים וסדקים בעוד רוב פני השטח הם סלע חשוף. הטרסות נבנו על מנת למנוע סחיפה של הקרקעות המצומצמות במדרון ואלה מגדילות בצורה ניכרת את הקרקע הזמינה לחקלאות. על מנת לתארך את זמן בניית הטרסות בהר-איתן באמצעות ה-OSL, נכרו 12 בורות ב-5 אזורים שונים ברחבי ההר. בתחנה 6 נציג את אחד הבורות עם החתך העבה ביותר.

הישובים החקלאיים

הר-איתן מטורס ברובו ומתאפיין בריבוי בורות ומעינות שעונים (Peleg & Gvirtzman, 2010) על גבי תצורת מוצא ועל גבי תצורת שורק. בסקר מקיף בהר אותרו 40 מקורות מים כמחציתם מכילים מים ובאחרים יש סימני מים בגבהים שונים בדופן הבור

(Golan 2004-2020). בסקר ארכיאולוגי (ויס 1994) נמצאו חרסים מהתקופה הכלכוליתית עד העותמאנית. במחקר תיארוך טרסות באמצעות OSL עלו תאריכים מהתקופה הרומית עד אמצע המאה העשרים (Gadot et al., 2016). מחקרים אלה מעידים על רצף התיישבותי חקלאי בהר.

ראויים להתייחסות שני הישובים חקלאיים האחרונים שהתקיימו בהר-איתן, הכפר הערבי ח'רבת אל-לזו שניטש ב-1948 וניסיון ההתיישבות האחרון של עולים מתימן שניטש בשנת 1952 (גולן וקרק 2009). בסיוור נתוודע לשניהם.

תחנות הסיוור

המסלול מתחיל בכניסה לדרך ההיקפית ("8 קילומטר") אשר ממערב לחניון סטף.

תחנה 1: הדגמת משמעויות של מיפוי בקנה מידה מפורט

איורים 7 ו-8 מראים את המבנה של כתף חניון סטף, אשר בפאתיה המערביים נמצאת תחנה 1. לפי המפות הגיאולוגיות בקנ"מ 1:50:000 התחנה נמצאת על מחשוף תצורת כסלון או בית מאיר, ותחנה 2 על תצורת בית מאיר. התחנות עוגנו למפות במכשיר GPS בדיוק גבוה והבדיקה הגיאולוגית מראה שהמגע בין התצורות שורק וכסלון עובר בין התחנות. תיקון כזה עשוי להרים את הדאטום של המפה הסטרוקטורלית בכ-15 מטר (עובי תצורת כסלון, איור 5). בכך יעלם השקע (קווי גובה מקווקוים).

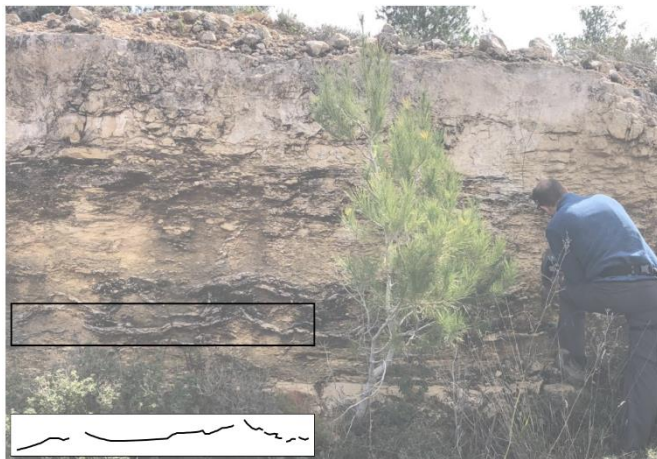
תחנה 2: מחשוף תצורת כסלון

מעל הדרך ההיקפית מופיעים שני מצוקים (כ-2 מטר גובה כל אחד), עם סלעי שונות מצורנים ("קוארצוליט" ; Sass and Bein, 1984). מחשופים מסוג זה נפוצים ברחבי ההר, אף כי שינוי פאצייאס לטרלי קוטע את הרציפות במקומות.

כאן נדגים שימוש במכשיר XRF ידני.

תחנה 3: כתף תצ' מוצא

הכתף הטופוגרפית כאן מופתה בעבר כתצ' בית-מאיר. יתכן שכיסוי הקלקריט גרם לשגיאה כאן. החלק התחתון של תצ' מוצא עשוי גיר חרסיתי מאסיבי אשר לעיתים יוצר מצוקים. מבתר של דרך עפר חושף קמטים תוך-תצורתיים. שכבות גיר בעובי של עד 5 ס"מ מקומטות וקרועות בתווך חרסיתי (איור 9).

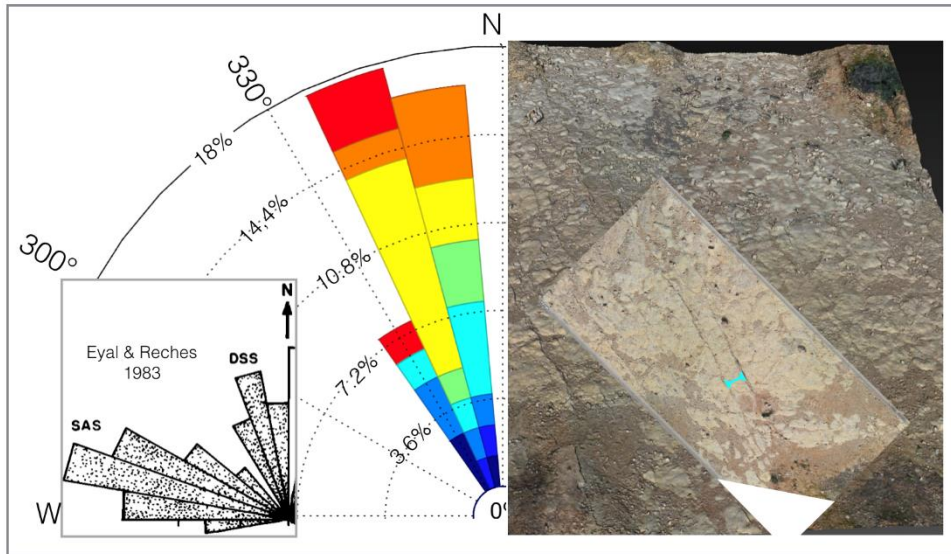


איור 9. מבני דפורמציה של סדימנט רך בכתף תצ' מוצא (תחנה 3). המסגרת הלבנה משמאל למטה מראה שירטוט של השיכבה התחתונה בסדרה של שכבות קרועות ומקומטות (במסגרת השחורה שמעל).

תחנה 4: "אמפיתיאטרון".

משטח שנחצב בתצורת מוצא כהכנה לאירועי היובל. שפע של מאובנים בנתוניים אופייניים (בעיקר אקסוגירות, קיפודים נמצאו בקירבת מקום). המשטח מראה סידוק טקטוני צפוף, ככל הנראה סדקי פתיחה (Mode I). איור 10 א מציג מודל פוטוגרמטרי על בסיס ריצוף תמונת רחפן מעוגנת, המאפשר מדידות של כיווני הסדקים. תוצאות המדידה והניתוח בתוכנת ממ"ג מוצגות ליד (איור 10 ב) יחד עם סיכום מערכות מאמצים מרחבי של Eyal and Reches (1983). התוצאה - סביב 160° - 340° מצביעה על כיוון מאמץ הלחיצה הראשי, ומתאימה למערכת מאמצי הבקע. מערכת זאת נוטה להופיע באזור הבקע, והיא שונה במובהק ממערכת הקשת הסורית.

במגע בין תצורת מוצא לעמינדב הסמוך לתחנה נובע מעיין עם ניקבה ובריקה. לא נמצאו סימנים לשימוש במקור מים זה במאות השנים האחרונות.



איור 10. (א) מודל גובה של משטח תת אופקי מרחפן עם הצללה שמדגישה סידוק פתיחה (תת אנכי). (ב) תוצאות ניתוח כיוון-אורך-שכיחות. הכיוון הדומיננטי, סביב 160° - 340° תואם את מאמץ הלחיצה המירבי במערכת מאמצי בקע ים במלח (Dead Sea Stress) לפי עבודת Eyal and Reches (1983) על סמך מזוסטרוקטורות במרחב (בעיקר באזור הבקע). המרחק בין שני סדקים בולטים (טורקזי) - 40 ס"מ. המלבן האלכסוני במרכז מציע הפרדה גבוהה יותר.

תחנה 5: ח'רבת לוז / כפר לוזים (אבטח)

בסקר ה-PEF שנערך בשנות ה-70 של המאה ה-19, צויין שהיישוב נמצא במצב של הריסות והתושבים מתגוררים במערות. מערות אלה אותרו בשטח שמדרום לגרעין הבנוי של הכפר. במפות מתקופת המנדט הבריטי משורטט מתווה הכפר המהווה את הגרעין הבנוי הראשוני. מתווה זה נשמר במפות לאורך זמן. תצלום אוויר בריטי משנת 1945 מראה את גרעין הכפר (המופיע גם במפה מ-1933) ובינוי חדש נרחב על השלוחה המערבית. חלידי ציין שהכפר נהנה בשנות ה-40 של המאה ה-20 מתנופת פיתוח, שכללה בינוי חדש בשלוחה המערבית (Khalidi, 1992). גם דו"ח המודיעין של הש"י (שירות הידיעות של ההגנה), משנת 1943 ציין: "חל פיתוח גדול בחמש השנים האחרונות" (ארכיון ההגנה, 1). בסקר של גולן וקרק

(2009) נמצאו הבדלים ניכרים בסגנון הבנייה ובחומרים ששימשו לבנייה בין החלק הישן לחדש של הכפר. בגרעין הישן של הכפר קיימת בנייה צפופה ומגובבת. הבונים השתמשו באבני בנייה עם סיתות פשוט בלבד, וקשתות משקופים מעץ. לעומת זאת, באגף המערבי החדש הופיעו רצפות ביטון, אבנים מסותתות היטב, וקורות ברזל למשקופי הדלתות. הבתים נבנו במרחק זה מזה, מרחק שאיפשר להקיף את הבית בבוסתן קטן וכן מקום לבור מים, שנחצב לרוב בשלב שקדם לבנייה.

כלכלת הכפר

תיאור כלכלת הכפר מתייחס לעשור האחרון לקיומו לפני שחדל להתקיים. הנתונים מוצגים מדו"ח מודיעין של הש"י משנת 1943, הסקר הבריטי משנת 1945, ראיונות שנערכו עם פליטים מתושבי הכפר, וכן על המפות הבריטיות בהן מופיע פירוט של סוגי הגידולים. עיקר עיסוקם של תושבי הכפר היה בחקלאות; השטח החקלאי סביב הכפר נאמד בכ-2,000 דונם של שטחים מעובדים. נהוג להרכיב עצי משמש על-גבי כנה של עץ השקד, ואכן נמצאו באתר שמונה עצי משמש המורכבים על שקד, שמניבים פרי עד היום. יש לציין כי גם שרידי הגפנים והתאנים ממשיכים להניב פרי עד היום, למרות שלא טופלו מזה 60 שנה. מספר משפחות עסקו ברעיית צאן (500 כבשים/עזים ו-100 ראשי בקר). עדר העזים הגדול ביותר בכפר השתייך למשפחת איברהים צאלח. בעין אלי-קוף, למרגלות הכפר (1.5 ק"מ מדרום מערב לכפר סמוך לערוץ נחל שורק), נהגו לרחוץ את הכבשים בבריכת אבן חצובה לפני הגז (ראיון, מוראד, 2004). המעיין שהיה נסתר מהעין תחת עפר וסבך, ונעלם מהמפות החדשות, אותר בשנת 2004, הבריכות נוקו ושופצו (גולן, 2004). לפי דברי עארף אסמאעיל, אחד מאנשי הכפר בעבר, בכפר גרו מספר בעלי מקצוע מיומנים שעסקו בחציבת אבן לבנייה, סיתות, ובניית בתים, ושמעם יצא למרחוק. לצורך שיווק האבן והתוצרת החקלאית, השתמשו בגמלים שהיו בבעלותו של אבו-סלאח, ועם התרחבות הכפר נרכשה משאית שהייתה בבעלותו של אחמד נימר (ראיון, אסמאעיל, 2006).

מערכת המיסוי בתקופה העות'מאנית

בארכיון בית-הדין השרעי בירושלים (סג'ל, 1668), קיים רישום של משפט שבעיקרו נסב על שאלת ירושה. בשולי המשפט התקיים דיון משני ברצח בכפר ח'רבת אל-לז, כרקע למאבקי הירושה על רכוש הנרצח. הסיפור מובא בפרטי פרטים מרתקים בתרגום לעברית של רישומי משפט זה (זאבי, 1997, 114). הסיפור מלמד על מערכת המיסוי של הכפרים החקלאיים בכלל, ועל מיסוי של הכפר בפרט, בתקופה העות'מאנית. הנרצח זכה בזכיון לגביית מסים מהתושבים החקלאים כאות על שירותו הצבאי בשליחות הסולטן. פשרה שהושגה בין יורשים חוקיים, האחד שמונה על ידי הסולטן באיסטנבול והשני על ידי המושל בדמשק, מרמזת על מאזן הכוחות בין האימפריה לפרובינציה.

בתיעוד מס של הכפר משנת 1531 מצויין שהכפר מוגדר כמזרעה, כלומר כפר זמני של חקלאים המגיעים למקום בעונות החקלאיות. התיעוד ההיסטורי תואם את ממצאי התיארוך בשיטת OSL ברחבי הר-איתן: הטרוסות הנראות היטב בשטח היום התפתחו ברובן במהלך התקופה העות'מאנית בארץ ישראל (1517-1917), חלקן על בסיס טרוסות קדומות יותר.

סופו של כפר

יחסי תושבי ח'רבת אל-לז עם שכניהם היהודים נעו בין שני קצוות: מצד אחד יחסי מסחר ואף הצעה להסכם שלום, ומצד שני השתתפות בפעילות לוחמנית כנגד הבריטים והיהודים. צעירים מהכפר השתתפו במאורעות 1936-39.

בתאריך 11.5.1948, זמן קצר לפני שהכפר ח'רבת אל-לז חדל להתקיים, פנו כמה מתושבי הכפרים: "ח'רבת אל-לז, סטף, צובא ואום אל-מיס אל תושבי אבו גוש ובקשום שיתווכו ביניהם לבין אנשי ההגנה, בדבר משא ומתן של שלום. אנשי אבו גוש השיבו כי אין הדבר אפשרי כיוון שהם עצמם כמו אסירים בידי ההגנה" (ארכיון ההגנה, 2). עבד אלפתאח חסן עטא אללה המכונה אבוראזי, מתושבי הכפר המתגורר היום במחנה הפליטים קלנדיה, סיפר שהבעל היהודי של מפעל השיש הסמוך לקסטל הבטיח לעמיתו מח'רבת אל-לז שלא יאונה להם כל רע אם יישארו בכפרם (ראיון, אבוראזי, 2008). נשאלת השאלה מדוע עזבו תושבי ח'רבת אל-לז את הכפר כאיש אחד בלילה שבין 12 ו-13 ליולי 1948, למרות שלא נורתה

ולו ירייה אחת אל עבר הכפר. כדי לענות על שאלה זו, יש מקום לבחון מה היה המידע שעמד לרשות התושבים ומה היו הלכי הרוח ערב העזיבה.

בשלושת החודשים שלפני נטישת הכפר התרחשו ארועים שהביאו לדה־מורליזציה וחשש מוחשי לחיי תושביו הערבים. התפשטות הידיעה ביום 8.4.1948 על מותו של המפקד העליון של הכוחות הערביים באזור ירושלים, עבד אל־קדר אל־חסייני, הכתה בתדהמה את הלוחמים. תושב ח'רבת אל־לז, ג'אבר חסאן, המכונה אבו־טביח, שהיה ממנהיגי הלוחמים בכפר, היה עם עבד אל־קאדר אל־חסייני בשעה שזה נהרג בקסטל (ראיון, אבו־ראזי, 2008). למחרת, ביום 9.4.1948, נפוצו בכפר סיפורי זוועה על הרג התושבים הערביים של הכפר דיר יאסין. ותושבי כפרים סמוכים החלו לנטוש: "כן, היינו עדיין בכפר כשקרה הטבח בדיר יאסין. אנשי עין כארם נטשו את כפרם ואנחנו עוד היינו בבתנו. האנשים פחדו כאשר שמעו על דיר יאסין. אנשים בסביבה ברחו קודם שתקפו אותם. באנשים אחזה בהלה". (אע'באריה, 2008, 25). ביום 11.5.1948 נדחתה בקשתם של תושבי הכפר לנהל מו"מ לשלום עם ההגנה (ארכיון ההגנה, 2). ב־14.5.1948 הכריז דוד בן־גוריון על הקמת המדינה היהודית. מבצע "דני" שנערך בתאריכים 9-19.7.1948 החל בכיבוש רמלה לוד, הביא לנהירה של אלפי פליטים מזרחה. בדוח מודיעין יומי מיום 14.7.48 נכתב: "תנועת פליטים בכביש רמאללה לטרון... מכוניות מלאות לרמאללה" (ארכיון צה"ל, 1) הקש ששבר את גב התושבים היה המשך מבצע "דני" להרחבת פרוזדור ירושלים, העשן שהיתמר מהכפר הסמוך צובא נראה בבירור מפסגת הר־איתן. בדו"ח מודיעין מיום 14.7.48 שמסכם את האירועים באזור צוין כי: "110 בתים פוצצו על־ידי חבלנינו בסובא 2... סירים סירו אמש (13.7.48) בשטח בין לסטף.... סטף ריקה" (ארכיון צה"ל, 1). בלילה שבין 12 ל־13 ליולי 1948 קמו כל תושבי הכפר יחד עם שכניהם מהכפר סטף, ונדדו לרכסים שממזרח, תחילה לכפר ראס אבו־עמאר ומשם נפוצו לכפרים הערביים אל־עזריה, וקלנדיה, וכן ליריחו, אירביד, עמאן, ולמקומות נוספים בעבר־הירדן.

קשה להבחין כיום בכך שבמקום זה עמד כפר, כיוון שכל הבתים שוטחו. הכפר ח'רבת אל־לז נהרס בשלבים לאורך שנים. תחילת ההרס החל מיד עם עזיבת התושבים. התושבים שהתמקמו על הרכסים מסביב מספרים שראו כיצד היהודים מפוצצים את בתיהם בפאתי

הכפר. בצילום משנת 1950 ניכר שחלק מהבתים עדיין עמדו על תילם שנתיים לאחר 1948 (איור 11). בעדות שמסר אמנון מגן, שהיה טרקטוריסט של קיבוץ צובא בשנות ה-50, הוא מסר שלבניית הרפת בקיבוץ צובא נדרשו קורות ברזל. הוא נשלח לאסוף את קורות הברזל ששימשו כמשקופים בבתי ח'רבת אל-לז. מגן מסר כי יצא מהכפר הנטוש עם עגלה עמוסה לגובה רב, ובסיבוב בעלייה לצובא החליקו חלק מהם מהטרקטור (ראיון, מגן 2008). יחידות שונות של צבא ההגנה לישראל אשר התאמנו לאורך שנים בסביבת הסטף וח'רבת אל-לז, תרמו את חלקן להרס הכפר הערבי. ההרס הושלם במסגרת מבצע לשיטוח שרידי הכפרים, מבצע שהחל מעט לפני מלחמת ששת הימים והואץ מיד לאחריה (שי, 2002).



איור 11. בתי האגף המערבי של הכפר ח'רבת אל-לז כפי שצולמו בשנת 1950.
מקור: מעובד מתוך - צילום 1012569 הארכיון הציוני 2, צלם אפרם אילני.

"לזוזים" כפר מטעים ישראלי שנעלם

באחת המערות בהר־איתן נמצא אוסף של חפצי בית, בהם כלי בישול, נעליים אופנתיות, קופסאות שימורים, סלי נצרים וכלי עבודה. החפצים אינם אופייניים לחפצי בית בכפר ערבי. על-פי מאפיינים סגנוניים הם תוארכו לראשית שנות המדינה. מגוון כלי הבית מעיד על כך שהיו שייכים למשפחות שחיו במקום במשך זמן מה. נשאלת השאלה כיצד הגיעו חפצים אלה למערה, ומה ניתן ללמוד מהם על התישבות אפשרית במקום? פרט לחפצים במערה לא נמצא במקום שריד ליישוב כלשהו מראשית שנות המדינה.

עם הגעת גלי העלייה היהודיים הגדולים למדינת ישראל בראשית שנות ה-50, חיפשו הגורמים המיישבים בעבורם מקומות יישוב ומקורות פרנסה תוך פרק זמן קצר. הכפרים

הערביים הנטושים ששכנו ליד מקורות מים, ומטעיהם עדיין הניבו פרי, היוו יעד מועדף. במפת תכנון ההתיישבות שכנראה הוכנה על-ידי מחלקת ההתיישבות של הסוכנות, מסומנות נקודות בהן תוכנן לקום יישוב. הנקודות שתוכננו לקום במהלך שנת 1950 סומנו בצבע על-גבי צילום שמש של מפה בריטית. נקודות יישוב קיימות שתוכנן לעבות אותם, סומנו בצבע שונה. במקום בו הייתה מסומנת במפה הבריטית ח'רבת אל-לוז סומנה נקודת יישוב מתוכננת בשם אבטח. שם היישוב שונה בהמשך ל"לוזים", שמשמר את השם הערבי ח'רבת אל-לוז. מחלקת ההתיישבות של הסוכנות קיטלגה את היישובים לסוגים שונים, וכפר זה סווג ככפר מטעים. כוונת המיישבים הייתה שהמתיישבים החדשים ישקמו את המטעים שעדיין הניבו ויתפרנסו מהם.



איור 12.

למעלה מימין - ילדי בית
ספר במבנה ביישוב
אבטח/לוזים חנוכה 1950,
ברקע קשת הבית הערבי בו
שוכנו

מקור: ארכיון קק"ל 1
תמונה 267/041 פריט
40090 צולמה על ידי
וורנר בראון

למעלה משמאל - משפחה
באוהל, ביישוב אבטח/לוזים
חנוכה 1950



מקור: ארכיון קק"ל 2
תמונה 745/304 פריט
14651 צולמה על ידי
וורנר בראון

למטה - אוהלים ופחונים של
היישוב אבטח/לוזים וברקע
בתי הכפר הערבי ח'רבת
אל-לוז, 1950

מקור: הארכיון הציוני,
תמונה 1012569 צלם
אפרם אילני

במסמך של הסוכנות לאג"מ מבצעים מיום 7 לאפריל 1950 נכתב: "הננו ממציאים לך בזה את תוכנית העליות על הקרקע עד סוף חודש אפריל המסתכמת ב-50 יישובים..." (ארכיון צה"ל 3), היקף גדול למדינה צעירה בעלת אמצעים מוגבלים. הצבא שהיה בתהליך שיקום ובנייה לאחר מלחמת 1948, נדרש לעסוק גם בשאלות הביטחון של המתיישבים החדשים. במאי 1950 ציין קצין הגנה מרחבית של פיקוד מרכז את ח'רבת אל-לזו בנ"צ 1605/1305 במסמך שכלל את רשימת היישובים שהוקמו במשך חודש מאי. (ארכיון צה"ל 3). היישוב הוגדר ברמת סיווג א1 שהיא רמת הסיווג הגבוהה ביותר: "היישובים הבאים יסווגו כישובים סוג א'. יישוב השייך לחבל קדמי והינו מתחם מוגן. יישוב החולש על פתח של ציר התקדמות משוער של האויב...". לצורך הקצאת משאבים סווגו יישובי סוג א' לחמש רמות, וח'רבת אל-לזו סווגה ברמה 1 הגבוהה ביותר: "כוח אדם ירותק עד גבול פלוגה.... קשר חימוש וציוד... ביצורים בעדיפות א'" (ארכיון צה"ל 2).

הצבא לא הסתפק בשאלות ביטחון. החורף של שנת 1950, השנה בה ירד "השלג הגדול", היה קשה במיוחד. בדף הפתיחה למבצע "מעברות", שנערך בנובמבר 1950, כתב הרמטכ"ל יגאל ידין: "עם ראשית הגשמים הולכת ורבה החרדה לגורלם של העולים היושבים במעברות. שיכונם, מצב בריאותם ומצב האספקה למקומותיהם, מעוררים דאגה ואף גורמים לנפילת רוחם של העולים. כל אלה טעונים תיקון מיידי. הממשלה החליטה להטיל על צ.ה.ל. להטות שכם למשימה הגדולה הזאת... תפקיד נוסף זה שאנו מקבלים אותו באהבה, מטיל על כלנו עומס רב. אנו עסוקים עתה במלוא המרץ בשכלול הצבא לאור מסקנות התמרון.... אני יודע שהעומס הוא גדול אולם בהיותי משוכנע יחד אתכם שאין תפקיד נעלה, יותר חשוב... אני מאמין שנעמוד בבצורה כראוי וכיאות לצבא ההגנה לישראל". במסמכי עבודה מפורטים לגבי העולים החדשים היושבים בח'רבת אל-לזו נכתב: "מצב הילדים בגיל בי"ס בעיקר היונקים והילדים בגיל הגן יהיה קשה במיוחד באהלים, לכן יש לרכז את... ילדי חרבת אל-לזו בחדרים שיתוקנו בכפר... תיקון 30 חדרים בכפר למטרה זו יעלה כ-1500 ל"י, כ-50 לירות לחדר" (ארכיון צה"ל 4). בהמשך מפרט אותו דו"ח בעיות הנוגעות למים, קשר, חימום והסקה, ביגוד ונעליים:

(1) מים. "...ח'רבת אל-לוז יש לערוך בדיקת הבורות שנמצאים בשימוש ולחטא אותם יסודית. כמו-כן יש לבצע נקוי 10 בורות במעלה ההר על מנת לאפשר אגירת מים בחורף ושימוש בהם באמצעות צינורות...".

(2) קשר: "אין קשר טלפוני או קשר ברכב... את ח'רבת אל-לוז יש לקשר למרכזיית ביה"ס החטיבתי בסטף...".

(3) חימום והסקה: "לבוא בדברים עם מחלקת היעור במשרד החקלאות על מנת לאפשר איסוף העצים שנגזמו ביצר שער הגיא ולחלקם...".

(4) ביגוד ונעליים. "מצב... מבחינת הלבשה והנעלה גרוע. 25 נקודות הלבשה ו-18 נקודות הנעלה שנתנו להם אינה יכולה לספק את הצרכים בשום פנים." הכוונה כאן לחלוקת הנקודות בתקופת הצנע. ברשימת הציוד שהצבא נדרש לספק לתושבי ח'רבת אל-לוז כתוב בין היתר "...מעילים עליונים 140, גרביים 300 זוגות... נעליים לכל תושבי המעברה" (ארכיון צה"ל 4) האיזכור בדו"ח של "נעליים לכל תושבי המעברה", מתקשר כנראה לאוסף הנעליים שכולל נעלי גברות ילדים ומבוגרים שנמצאו במערת החפצים, וכנראה שלא נמצא להם דורש בקרב המתיישבים החדשים.

באמצע אוקטובר 1950 ביקר יוסף ויץ ביחד עם שני נציגים נוספים של הקק"ל, באתרים בסביבות ירושלים: ג'ורה (לימים אורה), וולג'ה, וסטף. תיאורו הולם אף את המצב בח'רבת אל-לוז הסמוכה: "ראיתי את העבודות שלנו ואת ההכנות להתיישבות. לעת-עתה יושבים בשני המקומות הראשונים באהלים, ואיך יהיה בחורף? לאלוהים פתרונים! ואין סימן של חקלאות, וכל אלה נחשבים אצל המחלקה להתיישבות כנקודות שהתיישבו בשנת תש"י! חוששני לתוצאות קשות. אבל הסביבה יפה בנכסי החקלאות שיצרו הערבים. מידרגים, מידרגים, תרבות גבוהה! אצלנו אדמה זו מתבזבזת" (ויץ, 1965).

סופו של כפר המטעים

עם התגברות הקשיים ורצון התושבים לעזוב, הוחלט במחלקת ההתיישבות של הסוכנות לסגור את היישוב ולהעביר את יושביו ליישוב חדש שהוקם למרגלות הר-איתן, מהעבר השני של נחל שורק, באתר בשם קטרה שבו היו חורבות. ליישוב החדש ניתן השם אבן ספיר. אך בין ההחלטה להעבירם לבין העברתם בפועל, חלף זמן. כתב על כך רענן ויץ לקק"ל ביום

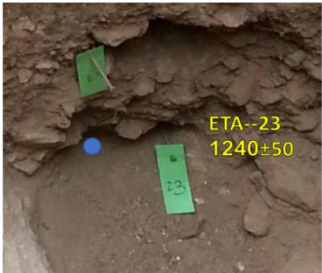
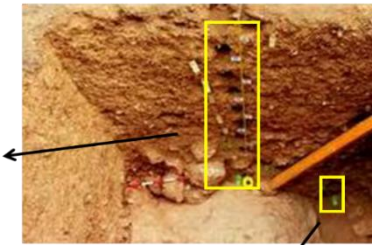
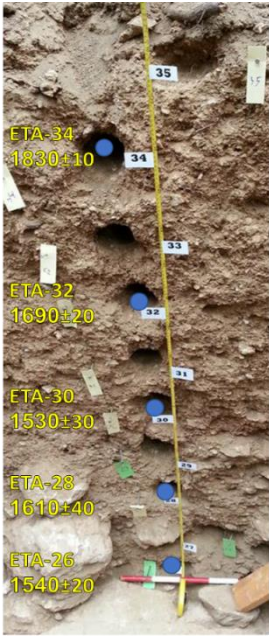
22.9.1950: "הופתעתי מאוד לשמוע, כי מיד עם קבלת ההחלטה להעברת האנשים מחרבת אלילוז לקטרה, נחפזת והודעת לאנשים בחרבת אלילוז על הפסקת העבודה, בטרם סדרנו את העברתם לקטרה. באופן כזה נשארו האנשים תלויים בין שמים וארץ ללא עבודה. אבקשך על כן, לתקן מיד את המעוות ולא לעשות להבא מעשים כגון אלה..." (הארכיון הציוני 1).

תחנה 6. שוחה למחקר סטריגרפי-גיאוכרונולוגי של הטרסות

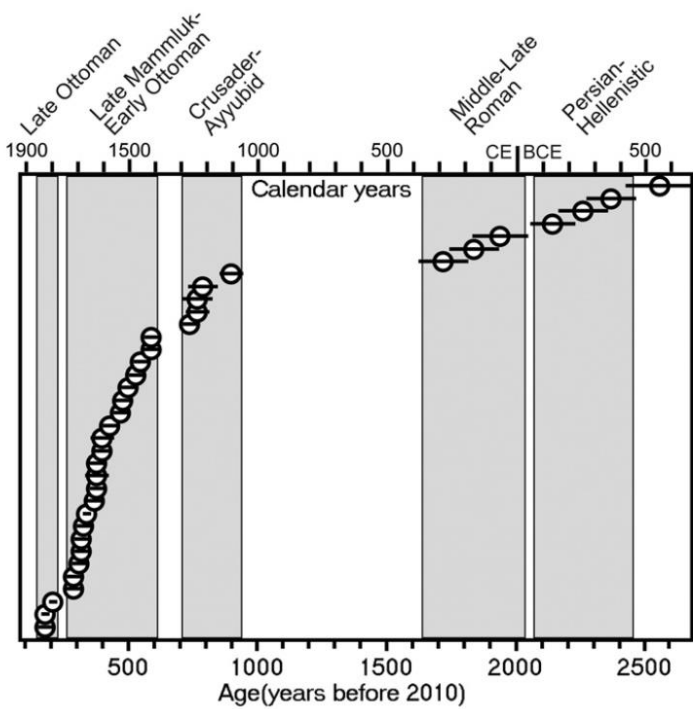
שוחה B1 חפורה במילוי הטרסה מגיעה לעומק של 2.5 מטרים עד לתצורת עמינדב ומכילה קרקע אנתרופוגנית בלבד ללא שרידים של קרקע טבעית (איור 13). הממצא הארכיאולוגי בשוחה כולל שפע חרסים מהתקופה הרומית-ביזנטית, קוביות פסיפס וכן מטבעות רומים (Gadot et al., 2016). גילי ה-OSL כולם צעירים מ-800 שנים כאשר מרבית הגילים הם מה-500 השנים האחרונות (תקופה עות'מאנית ואילך). התיארוך הנומרי מראה את המגבלה בשימוש בממצאים הארכיאולוגיים להערכת גיל הטרסות. נראה שהחרסים, הפסיפס, והמטבעות נסחפו בערוץ מהחלקים העליונים של ההר בהם ניתן למצוא עדות להתיישבות במהלך תקופות אלה.

באזורים הנוספים בהר מילוי הטרסות תוארך בעיקר לתקופה העות'מנית (1517-1917). בחלק מהבורות מספר דוגמאות תוארכו גם לתקופות ההליניסטית (333 עד 70 לפנה"ס), הרומית (70 לפנה"ס עד מאה רביעית לספירה) והאיסלמית המאוחרת (1187-1517). מה שמעיד על שלבים מוקדמים יותר של השימוש בטרסות. שרידים של קרקע קדומה מגיל 4-9 אלפי שנים נמצאו רק בסדקים וחללים קרסטיים בסלע האם.

עיבוד משולב של כל המדידות של דוגמאות ה-OSL מוצא עדיות לעיבוד חקלאי בתקופות ההליניסטית, הרומית והאיסלמית גם בטרסות שלא מראות גילים מתקופות אלה (Porat et al., 2018).



איור 13: שוחה B1
קיר צפוני. מסומנים
מיקומי הדוגמאות
וגילי ה-OSL (שנים
קלנדריות).



איור 14: גילי ה-
OSL של
הדוגמאות מהטרסות
מהר-איתן (ללא
גילי הקרקע קדומה;
מתוך Gadot et al., 2016).

ספרות

גולן, ד., קרק, ר., 2009. מחקר מיקרו-גאוגרפי-היסטורי על יישובים חקלאיים בהר-איתן; בתוך: אשל, י., עורך, מחקרי יהודה ושומרון, י"ח, תשס"ט, אריאל, עמ' 271-291.

וייס ד', 1994; "הר-איתן - סקר", חדשות ארכאולוגיות, ק"א, 90-91.

ויץ, י., 1965; יומני ואגרות לבנים, כרך ד', התנחלות עם (1949 – 1956), הוצאת מסדה, רמת-גן, עמ' 108.

זאבי ד', 1997; המאה העות'מאנית, הוצאת יד בן צבי ירושלים והוצאת הספרים של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

רייך ר', 1990; מקוואות טהרה יהודיים בימי הבית השני ובתקופת המשנה והתלמוד, חיבור לשם קבלת תואר דוקטור של האוניברסיטה העברית, עמ' 334-336.

Aitken, M.J., 1998. An Introduction to Optical Dating. Oxford University Press, Oxford.

Arkin, Y., 1976. Jerusalem and vicinity geological map 1: 50000: Geol. Surv. Isr.

Conder C.R., Kitchener H.H., 1881; The Survey of Western Palestine, vol. 3, Published by the Committee of the Palestine Exploration Fund, London.

Gadot, Y., Davidovich, U., Avni, G., Avni, Y., Piasetzky, M., Faershtein, G., Golan, D., Porat, N., 2016. The formation of a Mediterranean terraced landscape: Mount Eitan, Judean Highlands, Israel. Journal of Archaeological Science: Reports 6, 397-417.

Gibson, S., 2001. Agricultural terraces and settlement expansion in the highlands of Early Iron Age Palestine: is there a Correlation between the two? In: Mazar, A. (Ed.), Studies in the Archaeology of the Iron Age in Israel and Jordan. Sheffield University Press, Sheffield, pp. 113–146.

Khalidi W. (ed.), 1992; *All That Remains*, Published by the Institute for Palestine Studies, Washington D.C.

Peleg, N., Gvirtzman, H. (2010). Groundwater flow modeling of two-levels perched karstic leaking aquifers as a tool for estimating recharge and hydraulic parameters. *Journal of hydrology*, 388(1), 13-27.

Porat, N., Davidovich, U., Avni, Y., Avni, G., Gadot, Y., 2018. Using OSL measurements to decipher soil history in archaeological terraces, Judean Highlands, Israel. *Land Degradation & Development*, 29, 643-650.

Reches, Z.E., Hoexter, D.F. and Hirsch, F., 1981. The structure of a monocline in the Syrian Arc system, Middle East-Surface and subsurface analysis. *Journal of Petroleum Geology*, 3(4), pp.413-426.

Sass, E. and Bein, A., 1982. The Cretaceous carbonate platform in Israel. *Cretaceous Research*, 3(1-2), pp.135-144.

Sneh, A. and Avni, Y., 2011. Sheet 11-II: Jerusalem. 1: 50,000 Geological maps.

Wintle, A.G., Adamiec, G., 2017. Optically stimulated luminescence signals from quartz: a review. *Radiation Measurements* 98, 10–33.

Young, K.E., Evans, C.A., Hodges, K.V., Bleacher, J.E. and Graff, T.G., 2016. A review of the handheld X-ray fluorescence spectrometer as a tool for field geologic investigations on Earth and in planetary surface exploration. *Applied Geochemistry*, 72, pp.77-87.

קישורי מרשתת

הר-איתן – תחקירים:

har-eitan.blogspot.com

ה'רבת אל-לז:

palestineremembered.com/Jerusalem/al-Lawz,-Khirbat/index.html

מחקר OSL בהר-איתן:

sites.google.com/site/oslhareitan

Golan D., 2004-2020 Har Eitan GIS survey on Google maps:

<https://tinyurl.com/tzwz247> <https://tinyurl.com/tzwz247>

ארכיונים

ארכיון בית הדין השרעי בירושלים

סג'ל ירושלים, 1668;

כרך 168 עמ' 534, ב5 ג'מאדא אל-אאח'רה 10/1079 (מקביל לנובמבר 1668), בתוך: זאבי, 1997, 114.

ארכיון ההגנה

- א. דוחות מודיעין של הש"י (שירות ידיעות של ההגנה), תיקי הכפרים, ח'רבת אל-לז.
- ב. ידיעות טנא, מיום 11.5.1948

ארכיון צה"ל

1. 1045-1970-417
2. 814-1952-87
3. 756-1961-130
4. 111-1952-85

ארכיון קק"ל

1. תמונה **d267-041** פריט 40090, צלם ורנר בראון, חנוכה, נובמבר 1950.
2. תמונה **d745-304** פריט 14651, צלם ורנר בראון, חנוכה, נובמבר 1950.

הארכיון הציוני

1. מסמך בתוך תיק KKLS 18228.
2. תמונה: **HG/101-2569**, צלם אפרם אילני, תצלום הכפר לוזים, 1950.

ראיונות

אסמאעיל ע', 2006;

ראיון עם עארף אסמאעיל באירביד ירדן, מוסרט במקור בערבית, תרגום לעברית על-ידי אילנה קצבמן. נמצא באתר: <http://har-eitan.blogspot.com/2007/07/2.html> אבו ראזי 2008;

ראיון תוך כדי סיור בח'רבת אל-לז עם תושב לשעבר של הכפר ח'רבת אל-לז המתגורר כיום במחנה קלנדיה, עבד אלפתח חסן עטא אללה המכונה אבו ראזי, ביום 6.7.08, בהשתתפות דן גולן.

מגן א', 2008;

ראיון עם אמנון מגן, מוויטיקי קיבוץ צובא, ביום 21.2.08, בהשתתפות אמנון שיפמן, ודן גולן.

תצלום אוויר

תצ"א בריטית, סקר פלסטינה 1945 Palestine Syrvey; 5097 680 PS 20 27.1.45 F12 / TOPO 15000 באוסף האוניברסיטה העברית.

סיור מס' 4:

רצף הסלעים מגיל איאוקן מאוחר עד אוליגוקן בשפלת יהודה – סדימנטים שהובלו מהרי יהודה המתרוממים אל אגן הלבנט דרך מערכת תעלות תת-ימיות

עודד בר¹, עזרא זילברמן¹, רני קלבו¹, חיים בנימיני², אורית חיימס¹, רימונה סימן-
טוב¹, בנימין בוכבינדר¹

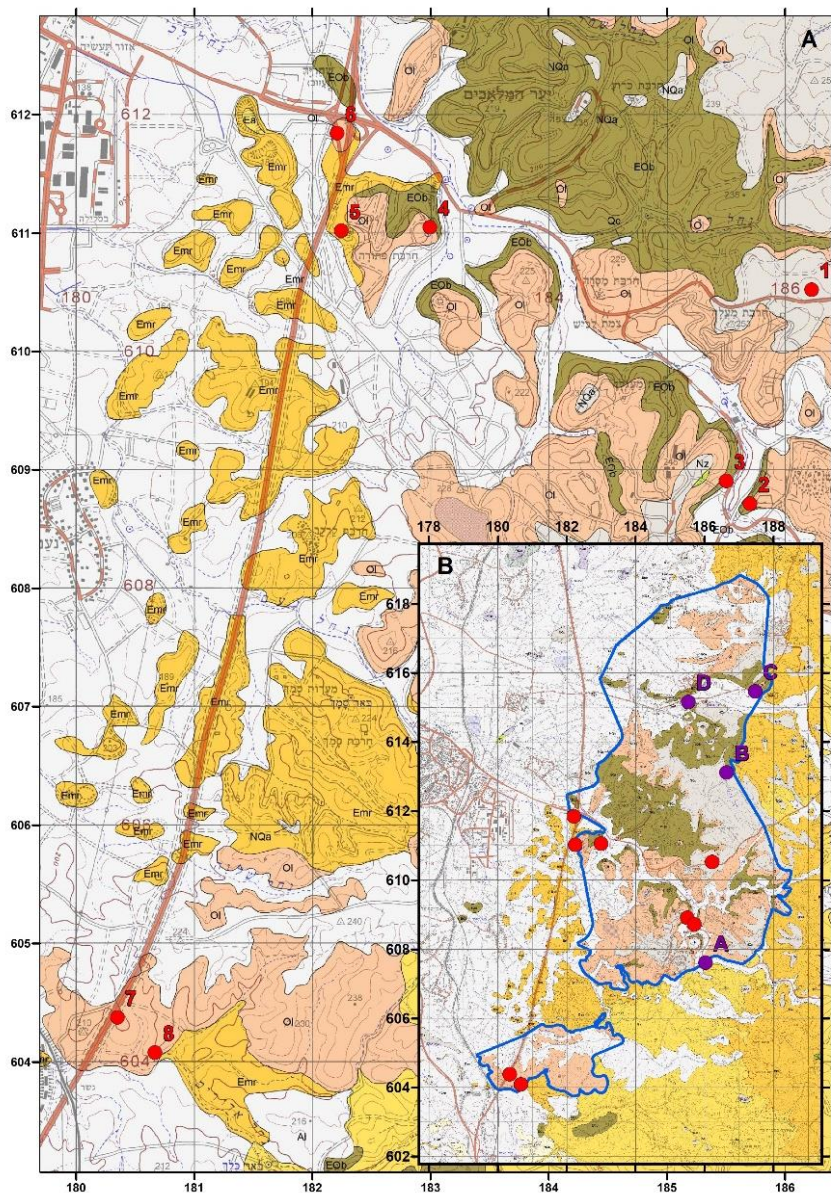
1. המכון הגיאולוגי לישראל

2. המחלקה לגיאולוגיה ומדעי הסביבה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

מבוא

במהלך האיאוקן מאוחר – אוליגוקן התרחשו בלבנט ובישראל שינויים טקטוניים וגיאומורפולוגיים נרחבים. לאחר כ-80 מ"ש שבמהלכו מרחב זה היה מוצף בים הוא התחיל להתרומם, תוך כדי הרדדת הים באזורים הגבוהים סטרוקטורלית, שחלקם אף בצבצו מעל פני הים (לדוגמה, Bar et al., 2016; Avni, 2012). במקביל, נוצרו בשולי הלבנט מדרגות סטרוקטורליות בולטות (Bar et al., 2013, 2016). אירועים אלו הובילו להובלת סדימנטים מהאזורים הרדודים שבמזרח אל האגן העמוק שממערב, תוך כדי התחתרות קניונים במדרגות הבולטות שנוצרו (Bar et al., ;Buchbinder et al., 2005; Druckman et al., 1995). הסלעים הימיים שהורבדו בתקופה זו הוסרו לאחר מכן מרוב שטח ישראל ע"י גידוד ימי וארוזיה יבשתית, אך משארים שלהם נותרו במספר מקומות, כגון בדרום רמת הגולן (מיכלסון, 1972; Michelson and Lipson-Benitah, 1986), רמות מנשה (Arad, 1965; Buchbinder et al., 2005), רמלה (Blake, 1928; Cox, 1934), מזרח (Buchbinder, 1969), שפלת יהודה (Drooger, 1986; Avnimelech, 1936), מישור החוף הדרומי (גוליק, 1959), אופקים (Buchbinder, 1975), קציעות (Bentor and Vroman, 1961), רכס עשת (סקל, 1967), וגם בעבר הירדן (Wetzel and Bender, 1974; Morton, 1959). תפוצת משארים אלו מעידה על ההשתרעות הנרחבת

של הים במשך האיאווקן עליון – אוליגוקן (Buchbinder et al., 2005, and references)
(therein).



תרשים 1: מפת מיקום של תחנות הסיור (נקודות אדומות) וקידוחים (נקודות סגולות): A- לכיש 1; B-
כלנית 1; C- נחושה 1א'; D- גלאון 4) על רקע מפה גיאולוגית (סנה, 2008).

רוב המחשופים מתקופת האיאוקן המאוחר והאוליגוקן בישראל מצומצמים בשטחם, פרט לאזור לכיש ונחל אדוריים, בו הם מתפרסים על פני שטח שגודלו כ-15X7 קמ"ר. הסיוור הנוכחי מתמקד במרחב ייחודי זה, בו סלעים אלו בונים את פני השטח של השפלה הנמוכה מזרחה לקריית-גת, בין קיבוץ גלאון בצפון לנחל אדוריים בדרום (גרייצר, 1959; **Buchbinder, 1969**; סנה, 2008). ברוב האזור התפתח כיסוי של קלקריט צעיר (נארי) על פני סלעים אלו ולכן החתך נחשף בעיקר בגדות עמקי הנחלים הראשיים, במחצבות עתיקות וחדשות, בבורות פעמון שקרסו ובמחשופי כבישים. חלק ממחשופים אלו תוארו בעבודות קודמות ותוארכו בעבר על יד חוקרי המכון הגיאולוגי.

בדיקה ותיארוך של סלעים שנחשפו במחשופים חדשים בשולי כביש 6 הובילה לבחינה מחודשת של המחשופים שתוארו בעבר ושל הידע שהיה קיים עד היום על החתך האוליגוקני (גרייצר, 1959; **Buchbinder, 1969**; **Buchbinder et al., 2005**; תיארוכים מיקרו-פליאונטולוגיים שנעשו לאורך השנים במכון הגיאולוגי). בחינה מחודשת זו הסתייעה בתובנות רבות שהתפתחו ב-50 השנים האחרונות לגבי תהליכי הסעה והרבדה ימיים. נמצא שרוב הסלעים במרחב זה משקפים חתך אלוכטוני שעבר הסעה בדרכים שונות ומגוונות, בתוך ובשולי מערכת תעלות תת-ימיות, ולכן הסלעים הבונים אותו כלולים בקבוצה המכונה **(MTD) mass transport deposits**.

הסיוור יציג מחשופים של **mass transport deposits** מגיל איאוקן מאוחר ואוליגוקן במרחב לכיש ואדוריים, ואת מערכת התעלות התת-ימיות שבתוכם הובלו ושקעו הסדימנטים, וידון בהשלכות שיש למערכת זו על ההבנה של הפליאוגיאוגרפיה והטקטוניקה באותו זמן. לסיוור זה ישנן מספר מטרות:

1. הכרת הסלעים מגיל איאוקן מאוחר – אוליגוקן באזור לכיש ואדוריים וסגנון השקעתם.
2. הכרת פצייאסים ייחודיים של **MTD** בישראל, הכוללים מרכיבים של ים רדוד המתערבבים בסדימנטים של ים עמוק, שנעו בסגנונות הסעה שונים.

3. הכרת תופעות של הובלת סדימנטים במערכת תעלות רחבה, ממקור אספקת הסדימנטים אל האגן העמוק (source to sink).
4. שחזור הפלאוגיאוגרפיה של מבנה מדרון היבשה האוליגוקני והרמפה הקרבונטית שבראשו על ידי הכרת הסלעים שהורבדו בראש הרי יהודה במהלך האוליגוקן.
5. הצגת היחסים המורפולוגיים שבין הרי יהודה, השפלה, הקניונים התת-ימיים במערב מישור החוף ושולי האגן העמוק, והקשר ביניהם לתנועות הטקטוניות שהתרחשו באותו זמן.
6. הכרת סלעים העשויים לשקף סלעי מאגר מגיל אוליגוקן על מדף היבשה ובאגן הלבנט.

1.2 פליאוגיאוגרפיה וטקטוניקה

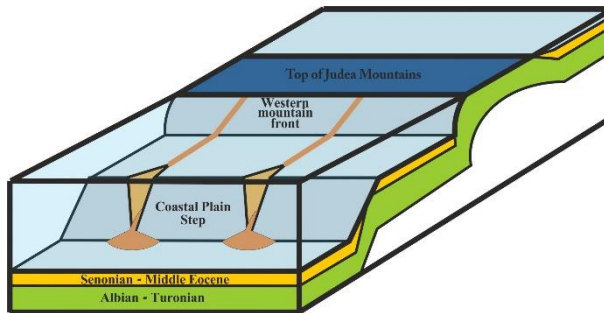
במשך האיאוקן התחתון והתיכון הרי יהודה היו מכוסים בים עמוק (Bar et al., 2013), כפי שמעידות גלישות שהובלו מכיוון הרי יהודה במזרח אל השפלה, שאינן מכילות אצות, פורמיניפרים בנתוניים גדולים או מרכיבים אנרגטיים המציינים ים רדוד (Buchbinder et al., 1988). עדות נוספת לכך הוא מחשוף של סלעים פלגיים מגיל איאוקן מוקדם שנמצא ממזרח לירושלים (Lewy et al., 1995). סדימנטים ימיים מאוחרים לאיאוקן התיכון אינם מצויים על גבי הפלטפורמה הערבית, מעיראק בצפון ועד תימן בדרום, והם מופיעים רק בשוליה (Beydoun, 1991; Alsharhan and Narin, 1997; Ziegler, 2001). היעדרות הסדימנטים מוסברת בהתרוממות הפלטפורמה הערבית (Gvirtzman et al., 2008; בר, 2009; Avni et al., 2012; Bar et al., 2013). במהלך האיאוקן מאוחר עד האוליגוקן המוקדם בשיעור של 250-700 מ' (Bar et al., 2016).

כתוצאה מהארוזיה של המרחב שהתרומם ונחשף התפתח על פני חלקה המערבי של הפלטפורמה הערבית משטח גידוע תת-אופקי (Alsharhan; Leblicher et al., 1960). (Burke and Gunnell, 2008; and Narin, 1997) שכונה בשם "הפלטו הערבי" (Bar et al., 2016), וידוע בשוליים הצפון מערביים שלו בשם "הפנפליין האוליגוקני" או "משטח הגידוע העליון" (Picard, 1951; Quennell, 1958; Garfunkel and Horowitz, 1958).

1966; אבני, 1989; זילברמן, 1989; בר, 2009; **Avni et al., 2012**; **Zilberman and Calvo, 2013**; ולד, 2016). רוב העבודות שעסקו במשטח הגידוע העליון הניחו שיצירתו התרחשה בתנאים יבשתיים. עם זאת, קיומם של מחשופים ימיים מגיל אוליגוקן מוקדם בדרום מערב רמת הגולן (מיכלסון, 1972; **Michelson and Lipson-Benitah, 1986**; **Buchbinder et al., 2005**), שמיקומם המקורי, לפני ההסטה ע"י טרנספורם ים-המלח, היו ממזרח לירושלים, הביאו לדעות מעט שונות בנוגע לפלאוגיאוגרפיה של מרכז ישראל במהלך האוליגוקן המוקדם. זילברמן (1989 ומקורות שם) וזילברמן וחובריו (1993) העלו אפשרות שקו החוף היה ממוקם מזרחה למיקומה של שדרת ההר במרכז הארץ. בדומה לכך, **Buchbinder et al. (2005)** התווה קו חוף משוער שנמשך מדרום מערב לצפון מזרח לאורך השוליים הצפוניים של הנגב, כשמרכז ישראל הייתה לדעתו עדיין מוצפת בים. לעומת זאת, בר (2009) העריך ששדרת ההר של מרכז ישראל היוותה אי מאורך שבראשו משטח ארוזיבי שנוצר עקב תהליכי גידוד ימי, ואולי גם על ידי מערכות פלוביאליות מקומיות, כשבינו לבין הפלטפורמה הערבית שנחשפה ממזרח הפרידה לשון ימית. ארוזיה של הרי יהודה באותו זמן כתוצאה מהרדדת הים עשויה להיות קשורה בהופעת סדימנטים קלסטים הכוללים מרכיבים מחבורת יהודה, שיתכן שנגזרו מהרי יהודה והורבדו על גבי קרקעית קניונים במערב מישור החוף בתוך סדימנטים שגילם הוא איאוקן מאוחר (**P15-P17**) ותחילת אוליגוקן (**P18**) (**Druckman et al., 1995**; **Buchbinder et al., 2005**).

במקביל להתרוממות הפלטפורמה הערבית במהלך האיאוקן המאוחר – תחילת האוליגוקן, התרחשה פאזה התקצרות טקטונית שיצרה את המבנה המדורג של שולי היבשה של מרכז ישראל, המפריד בין הפלטפורמה הערבית לאגן הלבנט, באמצעות הדגשה טקטונית והחרפת המבנה של מדרגות סטרוקטורליות שכיוונם הכללי לצפון-צפון-מזרח (**Gvirtzman et al., 2008**; בר, 2009; **Bar et al., 2013**). המדרגה המזרחית ביותר שהודגשה היא האגף המערבי של הרי יהודה, שהחל להתפתח כבר במהלך הקרטיקון המאוחר, אך כשני שליש מהמבנה הנוכחי שלו נוצרו בסוף האיאוקן עד תחילת האוליגוקן (בר, 2009; **Bar et al., 2013**). המדרגה האמצעית היא מדרגת מישור החוף, שנוצרה לראשונה בקרטיקון כמדרון

יבשה עתיק, אך הודגשה בשיעור של כ-1,000 מ' בסוף האיאוקן. מדרגה זאת נקברה ע"י סדימנטציה מאסיבית בסוף הפליוקן (גבירצמן, 1970; Gvirtzman et al., 2008; בר, 2009; Bar et al., 2013). המדרגה המערבית היא מדרגת הגזירה של שולי היבשה של הלבנט, שתוחמת את אגן הלבנט ממזרח וקבורה כיום בקירוב למרגלות מדרון היבשה הנוכחי (Gvirtzman et al., 2008).



תרשים 2: פלאוגיאוגרפיה של מרכז ישראל באוליגוקן (מעובד אחרי בר, 2009).

למרגלות הרי יהודה, באזור השפלה, שרר באותו זמן ים עמוק בו שקעו חווארים המי-פלגיים אוטוכטוניים (Buchbinder et al., 2005; בר, 2009). הסדימנטים שהובלו משולי הפלטפורמה הערבית מערבה, אל אגן הלבנט, התחתרו ממערב לשפלה ויצרו קניונים בעומק של 1,000 מ' ומעלה במדרגה המודגשת של מישור החוף (גבירצמן, 1970; Druckman et al., 1995; Buchbinder et al., 2005; בר, 2009; Bar et al., 2013). גיל התחתרות הקניונים היה איאוקן מאוחר עד תחילת האוליגוקן, וזאת מאחר שקלסטים מגיל אוליגוקן מוקדם נמצאו על גבי הקרקעית של קניון אפיק (Druckman et al., 1995). קניון אשדוד (Buchbinder et al., 2005) וקניון אל-עריש (Politi and Croker, 1978; בר, 2009). על גבי קרקעית חלק מהקניונים הורבדו גם קלסטים מגיל איאוקן מאוחר (בר, 2009) המצביעים על סיום פאזת התחתרות זו ותחילת מילוי הקניון עוד במהלך האיאוקן המאוחר. קניונים נוספים התחתרו באותו זמן גם באזור בת-ים, וכנראה גם בסמיכות למיבטח וגברעם (בר, 2009). באמצע האוליגוקן חלה ירידה במפלס הים, שיתכן שלוותה בהתרוממות

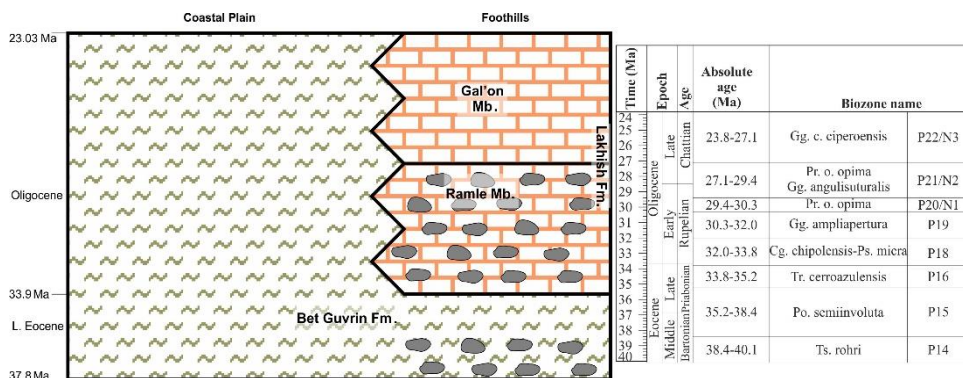
קלה, שגרמה להובלת **mass transport deposits** שהצטברו בקניון אשדוד, והמכונים "הקלסטים של אשדוד" (Buchbinder et al., 2005).

לא נמצאו סדימנטים מגיל מיוקן מוקדם המאוחרים ל-biozone N5 בכל מרחב השפלה ומישור החוף (בר, 2009). בתקופה זאת חלה התרוממות נוספת של המרחב בשיעור של כ-500 מ' שהביאה את מפלס הים לגובה השפלה (בגין וזילברמן, 1997; בר, 2009; Bar et al., 2016). הצפות שהתרחשו בתחילת המיוקן התיכון, במיוקן המאוחר ובתחילת הפליוקן הובילו לגידוד ויצירה של משטחי השפלה הגבוהה והשפלה הנמוכה שעליהם הורבדו גירים המשתייכים לתצורות צקלג, פטיש ופלשת בהתאמה (Sneh and Buchbinder, 1984; זילברמן, 1989; Buchbinder et al., 1993; Bar et al., 2016; 2009; בר, 1997). התרוממות נוספת בסוף הפליוקן – תחילת הפלייסטוקן הרימה את השפלה והיטתה אותה קלות מערבה, וגרמה לנסיגת הים אל ממערב לשפלה (זילברמן, 1989; בר, 2009; Bar et al., 2016).

1.3 סטרטיגרפיה וליתולוגיה לפי עבודות קודמות

הסלעים מגיל איאוקן מאוחר – אוליגוקן באזור לכיש תוארו באופן כללי במספר עבודות מהמחצית הראשונה של המאה העשרים (Blake, 1928; Cox, 1934; Avnimelech, 1936; Picard and Solomonica, 1936). סלעים אלו נחקרו באופן מפורט לראשונה ע"י גרייצר (1959), שמיפה את חלקו הדרומי של האזור, וחילק את החתך הכולל סלעי חוואר, גיר, קירטון וקונגלומרט ל-5 יחידות בעזרת תיארוך של מקרו- ומיקרופאונה. החלוקה הליתוסטרטיגרפית המקובלת של החתך לתצורת בית גוברין ותצורת לכיש נקבעה ע"י Gvirtzman and Reiss (1965), שתיארו את תצורת בית גוברין בשפלה לאיאוקן מאוחר עד אוליגוקן מוקדם (כלפי מערב טווח הגיל עולה עד למיוקן התיכון) ואת תצורת לכיש לאוליגוקן. Buchbinder (1969) מיפה את חלקו הצפוני של אזור לכיש לפי חלוקה זו אך חילק את תצורת לכיש לפרט רמלה ופרט גלאון. סנה (2008) עיבד וערך מפה גיאולוגית של האזור בקנ"מ 1:50,000 באמצעות קומפילציה של המפות של גרייצר (1959) ו-Buchbinder (1969).

Buchbinder et al. (2005) תיארו מחשוף בעובי של 26 מ' מצפון מערב לתל לכיש וקבעו את גילו לפי פורמיניפרים פלנקטוניים ל-**biozone P21** (חלק תחתון של אוליגוקן מאוחר). חלקו התחתון, שאותו הם שייכו לפרט רמלה, בנוי מחלוקים ובולדרים של קירטון מגיל איאוקן, קלקארניט המורכב מפורמיניפרים בנתוניים (אופרקולינות ולפידוציקלינות), וחלוקים של חרסית ירוקה שעברו מעוות, משובצים במטריקס חווארי. מעל חתך זה מונחים טורבידיטים וחואר המי-פלגי, ומעליהם חתך בעובי של כ-12 מ' עם מופע של שכבות גלושות, בולדרים של קירטון וקלקארניט דק-גרגר. חלקו העליון של המחשוף, שאותו הם שייכו לפרט גלאון, מורכב מחתך של קלקארניט צפוף עם פורמיניפרים בנתוניים (אופרקולינות ולפידוציקלינות) בעובי של כ-10 מ'.



תרשים 3: משמאל - החלוקה הליטוסטריגרפית של חתך הסלעים באזור לכיש. מימין - חלוקה כרונוסטריגרפית וביוסטריגרפית של האיאוקן המאוחר - אוליגוקן (אחרי בר, 2009).

תחנות הסיוור

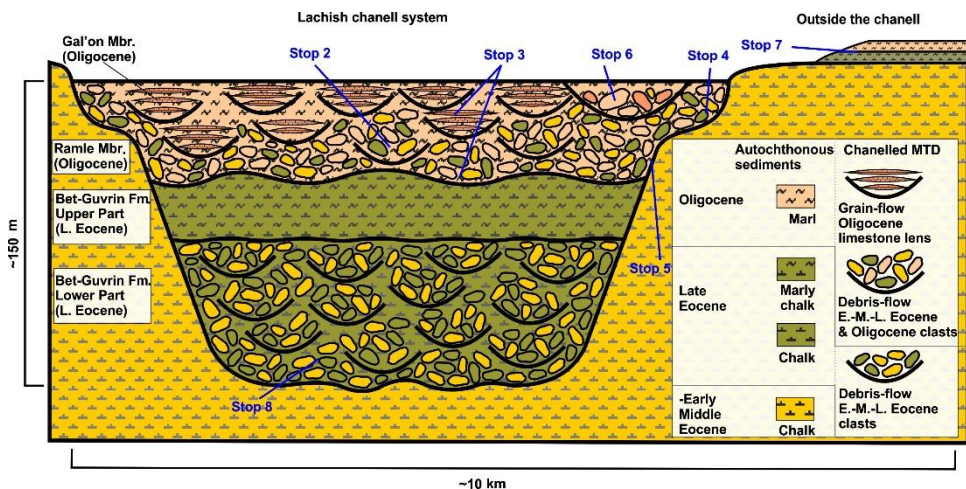
תחנה 1: תצפית מרחבית

מהתצפית מבחינים על קו האופק במזרח בהרי יהודה והאגף המערבי שלהם. למרגלותיו ממערב נראית הרמה הגבעית המתונה של השפלה הנטויה קלות מערבה. השפלה מחולקת לשניים: השפלה הגבוהה, המשתרעת במזרח כרצועה למרגלות הרי יהודה; והשפלה הנמוכה ממערב לה, המשתרעת עד מישור החוף, כשביניהן מפרידה מדרגה מורפולוגית תלולה בגובה של כ-80 מ'. השפלה הגבוהה והנמוכה נוצרו לראשונה ע"י אירועי גידוד ימי בזמן הצפות

שהתרחשו במיוקן התיכון. לאחר מכן הוצפה וגודדה השפלה הנמוכה במיוקן המאוחר ובפליוקן. מערבה לשפלה הנמוכה משתרע מישור החוף.

ראש הרי יהודה היווה באוליגוקן את הקצה הצפון מערבי של הפלטו הערבי. המעבר המורפולוגי מראש הרי יהודה אל אגן הלבנט, כ-3 ק"מ נמוך יותר, התפתח באוליגוקן תוך הדגשה של שלוש מדרגות סטרוקטורליות: 1. האגף המערבי של הרי יהודה במזרח; 2. מדרגת מישור החוף; 3. רצועת הגזירה של שולי היבשה של הלבנט במערב. בין שתי המדרגות המזרחיות מפרידה השפלה, ובין שתי המדרגות המערביות מפריד אזור הקבור כיום מתחת למדף היבשה. מבנה זה יצר מעין מדרון יבשתי גבוה ומדרג הבנוי מסדרה של מדרגות מורפולוגיות המופרדות ע"י רצועות צרות של אזורים עם מורפולוגיה מתונה.

בסיוור נתמקד בתנועת סדימנטים מתקופת האיאווקן המאוחר והאוליגוקן שהורבדו על גבי השפלה, בין המדרגה המזרחית למרכזית. סדימנטים אלו נגזרו מהרי יהודה, חצו את בלוק השפלה במערכת תעלות, והתנקזו דרך קניון שהתחתר במדרגת מישור החוף, בדרכם אל אגן הלבנט. תנועת הסדימנטים הייתה תת-ימית, כשמפלס הים בסוף האוליגוקן היה בקירוב בראש הרי יהודה, ואזור השפלה היה תחת ים בעומק של 400-600 מ'.



תרשים 4: יחידות הסלע ויחסי השדה באזור הסיוור. המספרים מתייחסים לתחנות הסיוור.

תחנה 2: מחצבת לכיש מורח

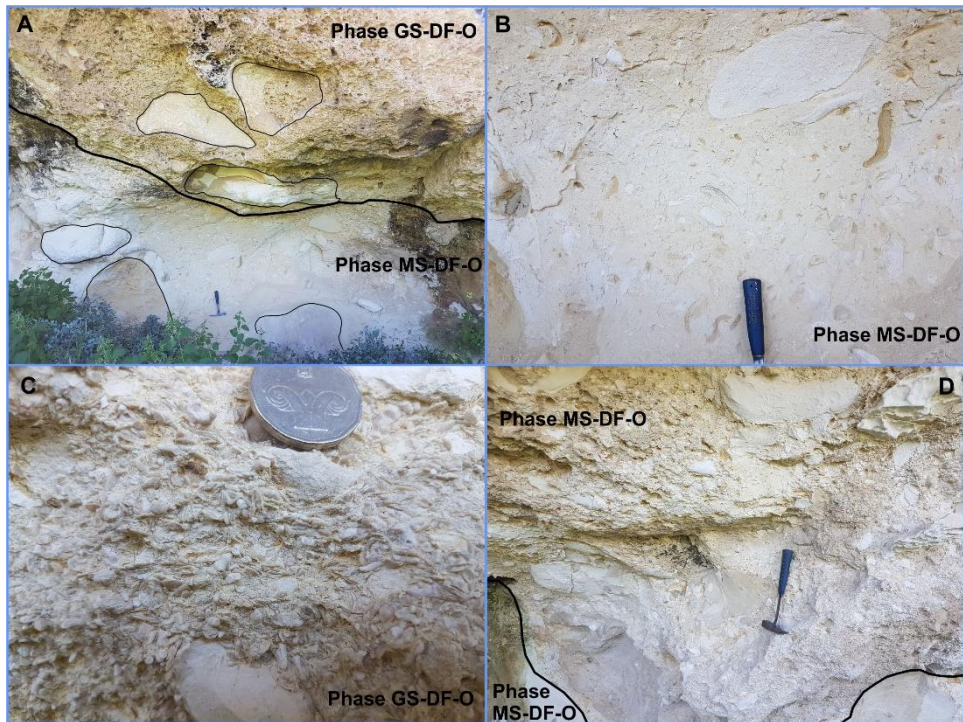
במחצבה קטנה ממזרח למושב לכיש, ובגבעה קטנה במדרון שמעליה, ממזרח למחצבה, נחשף חלקו התחתון של החתך מגיל אוליגוקן במרחב לכיש, הבנוי מ-**debris-flow** תת-ימי.

1. במחצית התחתונה של החתך במחצבה חשופה יחידה של **mud-supported debris-flow** מגיל אוליגוקן (**MS-DF-O**). יחידה זו נחשפת בבסיס רוב המחשופים הגדולים של הסלעים האוליגוקניים באזור לכיש, והיא בעלת מאפיינים ומאסך ייחודי הניתנים לזיהוי במחשופים השונים. עובי היחידה במחצבה הוא כ-2 מ' והיא בנויה מבלוקים מעוגלים של קירטון לבן, שגודלם משתנה מס"מ בודדים עד למספר מטרים. כמו כן היא מכילה חלוקי גיר מזוותים, בגודל של עד 1 מ', לרוב בצבע אפור, בהרכב קלקארניטי, עם מעט גלאוקוניט, שיכוב פנימי, מעט פורמינפרים בנתונים, ונבירות מקוריות. היחידה הינה תמוכת המטריקס הייחודי שבתוכו צפים הבלוקים, המורכב לרוב מחוואר המי-פלגי בצבע לבנבן, צהבהב או ירקרק, עם גלאוקוניט, קלסטים קטנים של קירטון, פורמינפרים בנתונים גדולים (בעיקר לפידוציקלינות) ומעט שרידי רכיכות (בעיקר פקטנידים) וקיפודי-ים. מאפיין בולט נוסף ביחידה הוא חלוקים של חוואר ירקרק שעברו דפורמציה. בתוך היחידה ניתן לזהות יחסי גידוע פנימיים וכן תופעות של התנזלות (ליקוויפקציה) וזרימת מטריקס מסביב לבלוקים.

במחצבה עצמה היחידה לא תוארכה. במחשופים האחרים שלה, הגיל של המטריקס ושל חלוקי החוואר ביחידה נע לרוב בין אוליגוקן מוקדם עד תחילת אוליגוקן מאוחר (**biozones P18-P21**). יחידה זו תואמת את מחשוף האוליגוקני שתואר ברמלה (**Cox, Blake, 1928**). יחידה זו תואמה גם על ידי (**Drooger, 1986; Avnimelech, 1936; 1934**), ליחידה מספר 9 מגיל אוליגוקן של גרייצר (1959), לפרט רמלה של **Buchbinder (1969)**, וליחידת ה-**debris flow** של **Buchbinder et al. (2005)**. בסיס היחידה אינו חשוף במחצבה. במקומות אחרים באזור הוא מונח באי התאמה ארוזיבית על חתך קירטוני מגיל איאוקן תיכון או חתך קירטוני-חווארי מגיל איאוקן מאוחר.

יחידה זו היא אלוכטונית. החוואר ההמי-פלגי ששקע בים עמוק, וכן הבלוקים הקירטוניים, מהווים את עיקר המסה של היחידה, ואילו המרכיבים הגיריים מהווים חלק קטן ממנה. מקורו

של החוואר הוא כנראה מהמרחב הקרוב, בתוך האגן, ואילו הבלוקים הקירטוניים נגזרו ממדרון היבשה שמעל (יתכן שחלק נגזרו מחבורת עבדת ששקעה שם באיאוקן המוקדם-תיכון, עוד לפני ההדגשה הסטרוקטורלית של המדרון). הביוקלסטים הצטברו במקור על גבי רמפה קרבונית חיצונית בראש הרי יהודה.



תרשים 5: תמונות מחשופים בתחנה 2. A- המגע בין היחידה התחתונה והעליונה במחצבה. B- היחידה התחתונה. C- היחידה העליונה. D- התנזלות של היחידה העליונה לתוך היחידה התחתונה.

2. במחצית העליונה של החתך במחצבה חשופה יחידה מורכבת מאירועי **grain-supported debris-flow** מגיל אוליגוקן (GS-DB-O): יחידה זו חשופה כנראה גם במחצבת שחריה בסמוך למחלף קרית-גת. היא בנויה מגופי ברקציה תמוכת גרגר המורכבת מקלסטים בגודל משתנה. הבלוקים הגדולים הם בגודל של עשרות ס"מ, רובם בהרכב קירטוני ומיעוטם בהרכב גירי, ונוטים להיות מעוגלים. הקלסטים הקטנים בנויים בעיקר מביוקלסטים וממעט שברי גיר, מזוותים יותר ושחוקים. במקומות שונים קיימים כיסים של חוואר ירקרק

שבתוכו צפים ביוקלסטים, הדומים לחוואר ביחידה שמתחת. היחידה מכילה פורמיניפרים בנתוניים גדולים (אופרקולינות ולפידוציקלנות), וכן שברי צדפות או רפאים שלהן. הקלסטים אינם ממויינים ולא ניתן להבחין בסטרוקטורות סדימנטריות פנימיות. המגע של יחידה זו עם היחידה שמתחתיה הינו גלי, ובמקום אחד היא נדחקה בתהליך התנזלות עמוק למטה אל תוך היחידה שמתחתיה. חלקה העליון של יחידה זו מלוכד ע"י קרום קלקריט צעיר (נארי).

יחידה זו היא אלוכטונית. ההבדל העיקרי בינה לבין היחידה שמתחתיה הוא באספקה גדולה של מרכיבים ביוקלסטים, שהחליפו כמעט לחלוטין את החוואר בבניית המטריקס של היחידה, אך שאר המאפיינים של היחידות דומים. מקור ביוקלסטים אלו היה ברמפה הקרבונטית החיצונית שבראש המדרון האוליגוקני.

3. בקצה השמאלי (מזרחי) של המחצבה, בראש החתך, חשופה יחידה בעובי של כחצי מטר, המשתרעת לאורך מספר מטרים, שבנויה מ-4-5 מחזורים טורבידיטיים המופרדים ע"י שכבות חוואר דקות. יחידה זו זהה ליחידת ה-**turbidites** של **Buchbinder et al. (2005)**. על גבי גג החתך היחידה גלושים גושי סלע קטנים, חוואריים, מבורזלים מעט, המכילים פקטינידים. לא ברור מהי זיקתם לחתך המונח מעל היחידה הטורבידיטית.

4. יחידה זו נמצאת מעל המחצבה, בגבעה קטנה ממזרח לה, כשבינה לבין החתך שבמחצבה מפריד חתך של כ-2 מ' שאינו חשוף. היחידה בנויה ממספר טיפוסי סלעים. עיקר החתך בנוי מחוואר קשה וקלקארניט אפורים, המכילים ביוקלסטים, פורמיניפרים בנתוניים גדולים, שברי צדפות וקיפודים, גלאוקוניט חלוקי חוואר ירוק שעברו דפורמציה ומאופיינים בסטרוקטורות זרימה המודגשות ע"י צבעים אדמדמים של תחמוצות ברזל, וכן חלוק קירטון ומחשוף חוואר רך. בתוך יחידה זאת נמצא בלוק אלוכטוני בגודל מספר מטרים של קלקארניט קשה, ממוין, עשיר בגלאוקוניט ומכיל מעט ביוקלסטים ומאובנים. ככלל, נראה שיחידה זו זהה ליחידת ה-**MS-DF-O** הבונה את בסיס המחצבה שמתחת, ומבטאת ירידה בכמות הביוקלסטים וחזרה לפציאס של ה-**MS-DF-O**. הרום הנוכחי של גג החתך הוא 230 מ'.

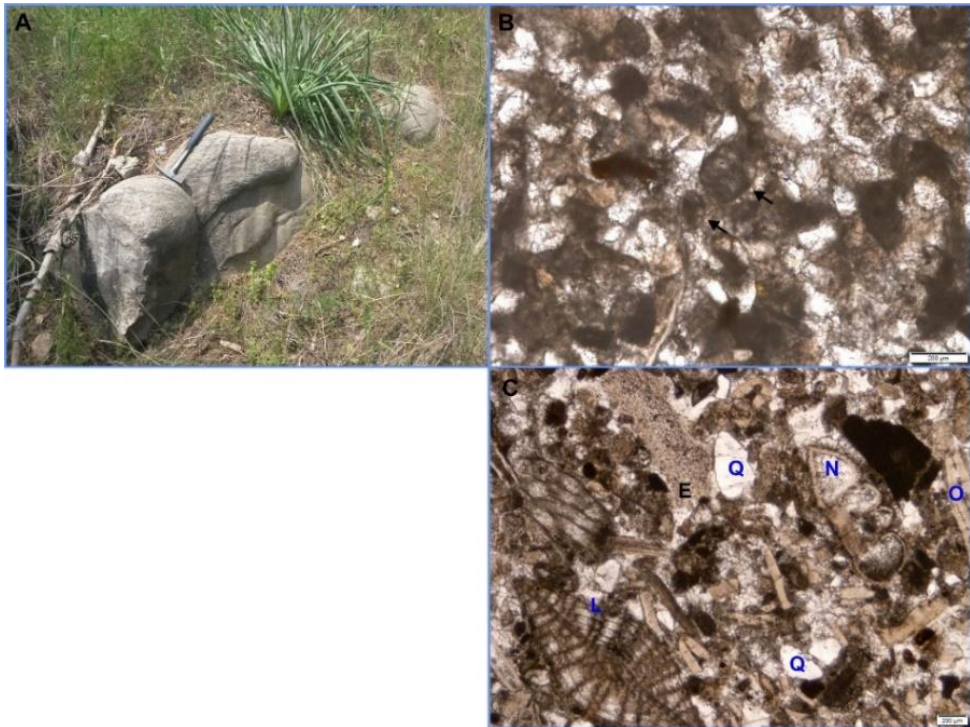
תחנה 3: מחצבת לכיש מערב

במדרון הצפוני שמעל למחצבה קטנה מצפון למושב לכיש נחשף חתך מגיל איאוקן מאוחר – אוליגוקן שתואר ע"י **Buchbinder et al. (2005)**. בבסיס המחצבה נחשף קירטון חווארי מגיל איאוקן מאוחר (**biozone P15**). חתך זה זהה ליחידה מספר 8 מגיל אוליגוקן של גרייצר (1959), ולחלק העליון של תצורת בית גוברין של **Buchbinder (1969)**. מעליו, באי התאמה ארוזיבית, מונח החתך שתואר במחצבת לכיש מזרח, כ-300 מ' לדרום מזרח. מרום של כ-220 מ' ועד לרום של כ-250 מ', כמעט עד לראש המדרון שמצפון למחצבה, חשוף חלקו העליון של החתך האוליגוקני. הוא כולל 6-7 שכבות גיר שעוביין לרוב 1-3 מ'. מעל ומתחת לאחת משכבות הגיר בבסיס המדרון נחשף חתך חווארי, ומוערך שגם המדרונות שבין שכבות הגיר האחרות מסתירים מתחתם חתכים חווארים המפרידים בין השכבות. ההשתרעות הלטריאלית של השכבות היא לרוב למרחקים של מספר מטרים עד עשרות מטרים בלבד.

השכבות בנויות לרוב מקלקארניט אפור, דק גרגר (קטן מ-100 מיקרון), תמוך גרגר וממין היטב המכיל גרגרי קוורץ בי-מודליים (100-60 מיקרון ו-200 מיקרון). הגרגרים הקרבונטים הקטנים וכן גרגרי הקוורץ הגדולים מעוגלים מאוד ואילו גרגרי הקוורץ הקטנים מזויתים. באמצע המדרון מופיעה שכבה המכונה "הגיר המפוסל", עם בלייה קונכיאלית והופעה אופיינית וייחודית דמוית חצאי כדורים. שכבה זו מופיעה גם מספר מאות מטרים לצפון מזרח.

ככלל, הסלעים בחלקו התחתון של המדרון מורכבים מפורמיניפרים בנתוניים קטנים, גרגרים שחוקים שעברו מיקריטיזציה, אוסטרקודים ולוחות של קיפודי-ים. חלק מהחללים שבין הגרגרים מכילים פורמינפרים קטנים שחיו בתוך החללים. הגרגרים מלוכדים בצמנט מיקריטי, שאינו אופייני לים רדוד, וצמנט בלוקי שמילא את החללים עד איטומם לאחר הקבורה. אין מישורי שכוב בולטים. בחלקו העליון של החתך האוליגוקני מופיעים פורמינפרים בנתוניים גדולים, בעיקר הטרוסטיגנה וכן מעט מיליאולידיים שבורים, כשכמותם עולה במעלה החתך. כמו כן, כמות גרגרי הקוורץ הגדולים גדלה במעלה החתך, והם יוצרים

לעיתים למינות דקות. בראש החתך האוליגוקני בתחנה מופיעה שכבה של גיר חום, המכיל הרבה פורמינפרים בנתונים גדולים – הטרוסטגינה, לפידוציקלינה, אופרקולינה ועוד מינים נוספים, אצות אדומיות, וכן ליתוקלסטים. הסלע מכיל גם מעט פורמינפרים פלנקטוניים. בראש המדרון נמצא גיר ביוקלסטי מגיל מיוקן של התצורות צקלג או פטיש.



תרשים 6: תחנה 3. A- הגיר המפוסל. B- שקף של הגיר המפוסל; פורמינפרים קטנים ושחוקים מסומנים בחיצים. C- שקף של גג החתך האוליגוקני בתחנה: O-אופרקולינה, L-לפידוציקלינה, N-נאורוטליה, E-לוח של קיפוד ים, Q-גרורי קוורץ.

חתך משוכב זה זהה ליחידה מספר 10 מגיל אוליגוקן של גרייצר (1959) ולפרט גלאון של Buchbinder (1969) ו-Buchbinder et al. (2005).

השכבות ביחידה זאת נוצרו מגרורים אלוכטוניים שהצטברו בתהליך של **grainflow** ועברו ליתפיקציה במיקומו של החתך. העלייה בכמות הפורמינפרים הבנתונים הגדולים ואצות כלפי ראש החתך מצביעה על כך שסביבת המחיה שממנה נגזרו הגרורים התרדדה וכמות

האור על קרקעית הים עלתה ואפשרה שגשוג של צמחייה ופאונה בנתונית עשירה. הגרגרים עברו הקשייה לסלע (ליתפיקציה) בים העמוק שלמרגלות המדרון, ובמיקום זה, או בדרכם למטה, אף קלטו לעיתים מעט פורמינפרים פלנקטוניים. אירועי אספקת הגרגרים לבסיס המדרון התרחשו בפאזות נפרדות, שביניהן שקע סדימנט אוטוכטוני של קרקעית האגן, שיצר שכבות ביניים של חוואר בין שכבות הגיר.

אין עדויות חותכות לכך שהובלת הגרגרים הייתה בתוך תעלות, אך ההשתרעות המצומצמת שלהם וההשתנות הלטרלית של החתך מצביעים על אפשרות כזו. במקרה כזה, יתכן שהם התחתרו ביחידת ה-**debris-flow** של חלקו התחתון של החתך האוליגוקני. מאידך, דגם של חילופין בין שכבות **grainflow** אלוכטוני וחואר אוטוכטוני עשוי להתאים דווקא להשתרעות של אונות לאחר יציאת זרם ה-**grainflow** מתחומי התעלה.

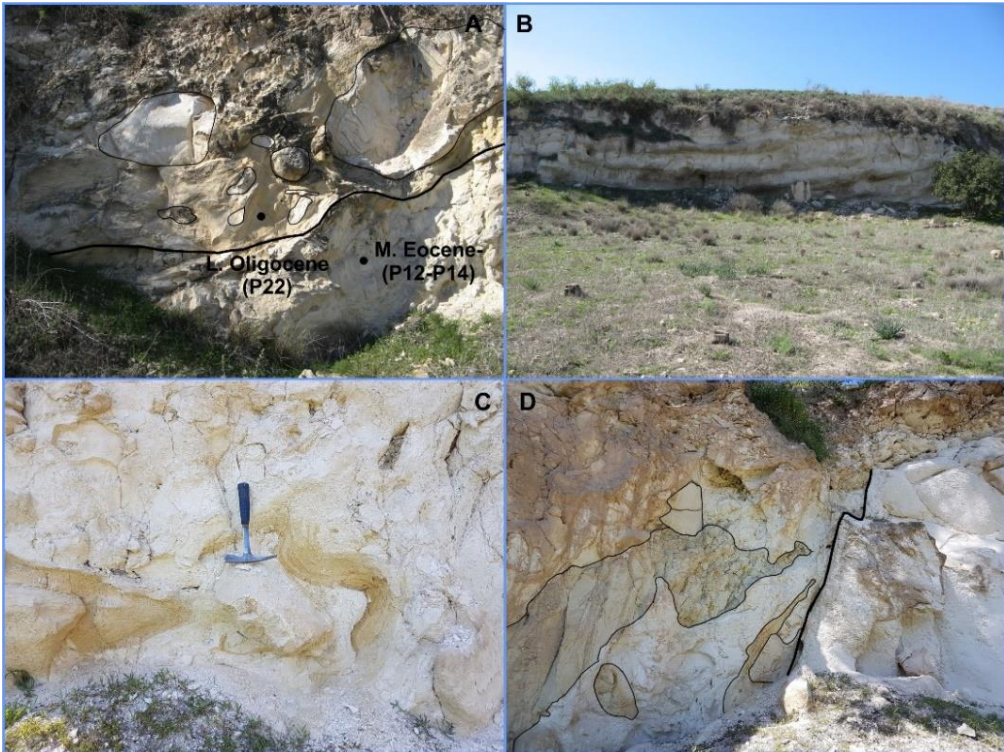
תחנה 4: מחצבת פתורה מזרח

בתחנה נחשפים יחסי השדה בין חלקו התחתון של החתך האוליגוקני לבין הסלעים שעליהם הוא מונח.

בקצה הימני (הצפוני) של המחצבה נחשפת יחידת ה-**MS-DF-O**, הנמצאת גם בחלק התחתון של מחצבת לכיש מזרח, המרוחקת כ-4 ק"מ לדרום מזרח. המחשוף בנוי מבלוקים קירטוניים הצפים בתוך חואר צהבהב עם סטרוקטורות זרימה. גיל החואר הינו אוליגוקן מאוחר (**biozone P22**). החתך האוליגוקני הורבד בתוך תעלה החתורה בתוך סלעים קירטוניים שגילם איאוקן תיכון (**biozones P12-P14**). החתך הקירטוני האיאוקני עצמו גזור אף הוא בשולי התעלה. תעלות ויחסי גידוע בבסיס החתך האוליגוקני ניצפו במקומות נוספים במרחב ואת חלקם נראה בהמשך הסיום.

ברובה של המחצבה חשוף בלוק קירטוני אלוכטוני ענק בעובי של מספר מטרים ובאורך של מספר עשרות מטרים, היוצר מבנה סינפורמי רחב שצירו נטוי בכיוון כללי למערב. הבלוק בנוי ממחזורים של שכבות קשות שביניהם חתך רך יותר. השכבות הקשות בנויות מקירטון קשה, שלא עבר גזירה, ושאינו מכיל פורמינפרים בנתוניים, דבר המצביע על עקת חמצן על הקרקעית. הפאונה של הקירטון הרך שבין השכבות כוללת פורמינפרים בנתוניים קטנים של

קרקעית ים רגיל. גיל הפאונה צעיר מהאיאוקן התיכון. מקור הגלישה היה ממזרח, ככל הנראה ממרחק לא גדול, ולכן נשמר מבנהו המקורי, עומק קרקעית האגן שבו שקע החתך (לפני הגלישה) היה בגבול ה-OCD (oxygen consumption depth).



תרשים 7: A- התעלה בתחנה 4; B- הסינפורם הגלוי בתחנה 4; C- תופעות התנזלות בתחנה 5; D- דופן התעלה בתחנה 5, המפרידה בין חתך של חבורת עבדת מצד ימין לחתך של debris-flow מצד שמאל.

יחידות ה-debris-flow האוליגוקניות שקעו בתוך מערכת גדולה ומסועפת של תעלות תת-ימיות (confined debris-flow). מערכת התעלות פרוסה לרוחב כל מרחב לכיש, על פני רצועה ברוחב של כ-7 ק"מ בכיוון – מזרח מערב, בעיקר באזור שמדרום לכביש קרית-גת – בית-גוברין.

התעלה בתחנה נמצאת ברום של כ-200 מ', גבוה בכ-40 מ' ביחס לחתך זהה במחצבת שחריה הנמצאת קילומטר אחד צפונה. החתך בתחנה יכול לבטא שלבים מוקדמים וגבוהים של התחתרות ה-**debris-flow** האוליגוקני. לחילופין, החתך בתחנה יכול לבטא שלב מאוחר שבו מרחב התעלות התמלא בסדימנטים, וחומר המובל לאחר מכן התפרס לשוליים, והתחתר שם. אפשרות זו נתמכת בכך שבבסיס מערכת התעלות העמוקות שקע חתך קדום יותר, מגיל איאוקן מאוחר.

תחנה 5: מחצבת פתורה מערב

במחצבה נחשף חתך ה-**debris-flow** החשוף במחצבת לכיש מזרח, בפציאס של ה-**MS-DF-O**. באופן חריג, יש במחצבה גם בלוקים גדולים של חוואר ירקרק קשה, וכן בלוק קירטון גדול באורך של כ-5 מ'. כמו כן, במחצבה מפותחות באופן בולט תופעות של הנזלה ושל זרימת חוואר מסביב לבלוקים.

בצפון המחצבה קיים מגע חד בין יחידת ה-**debris-flow** ממערב לבין חתך קירטוני של חבורת עבדת ממזרח. המגע נטוי בשיעור של כ-70° וכיוונו הוא בטווח של 345°-360°. מגע זה מייצג את דופן התעלה בה זרם ה-**debris-flow** לצפון-צפון-מערב עד צפון, אל תעלת אשדוד. כיוון זרימה זה מתחייב גם מאחר שממערב לתחנה, וכן מדרום מערב לה, קיימים מחשופים גבוהים ורצופים של חבורת עבדת, ולכן מערכת התעלות לא הייתה יכולה להתנקז לכיוון זה.

תחנה 6: מחלף קריית-גת

התחנה נמצאת ביציאה מהמחלף אל כביש 6 לכיוון דרום. לאורך שני צדדי הכביש (המזרחי והמערבי), וכן במפנים הדרומי והצפוני של המחלף, חשופים חתכים של **debris-flow**. המחשופים נחקרו ותוארכו, ועדיין הקורלציה ביניהם אינה פשוטה, והצמחייה המתפשטת על פניהם עם הזמן אינה מקלה עליה. בסיוור נתמקד בצד המזרחי של היציאה הדרומית.

1. בבסיס החתך נמצאת יחידת ה-**debris-flow** הדומה לפציאס של ה-**MS-DF-O** במחצבת לכיש מזרח. עם זאת, בשונה מהיחידה התחתונה במחצבת לכיש מזרח, כאן נמצאו בלוקים של גיר גלאוקוניטי הדומה ליחידה הרביעית (שמעל מחצבת לכיש מזרח). לכן, יתכן

שיחידה זאת מבטאת פאזה מאוחרת יותר בתוך ה-**MS-DF-O**. גיל החוואר בקצה הצפוני של המחשוף הוא סוף האוליגוקן המוקדם עד תחילת האוליגוקן המאוחר (**biozones P20-P21**). היחידה תחומה כלפי מעלה במשטח גידוע גלי, הנטוי באופן כללי בצורה מתונה לכיוון צפון.

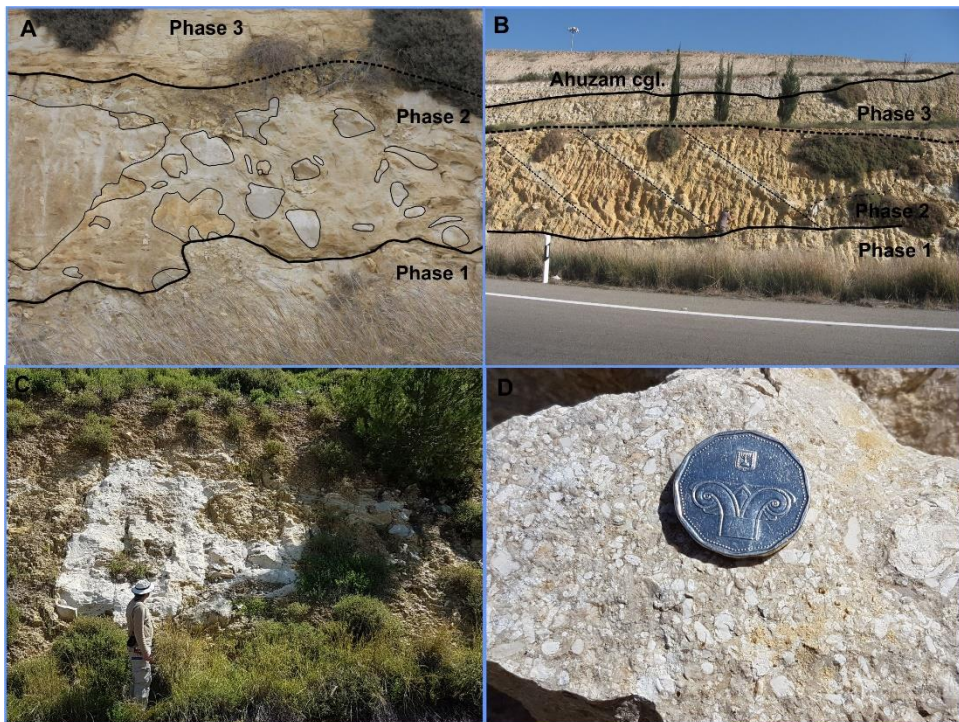
2. מעל מישור הגידוע מונחת יחידה נוספת מטיפוס **debris-flow**. המטריקס של יחידה זו הוא חוואר צהבהב – ירקרק, בדומה ליחידה שמתחתיה, והיא מכילה גם בלוקים קירטוניים וגיריים באותם גדלים. ההבדל מהפציאס המוכר של ה-**MS-DF-O** הוא בגודל המרבי של הבלוקים ובהרכבם. היחידה מכילה בלוקים ענקיים. הבלוק הגדול ביותר הוא באורך של כ-10 מ' ובגובה של כ-4 מ', הבנוי מחוואר עם שלשה דרגשים של קירטון חווארי הנטויים דרומה, בניגוד לנטייה הכללית של משטח הגידוע. בלוקים ענקיים אחרים הם של גיר לבן, ובשוליים ואף במרכז של חלק מהם יש שקעים וחורים שלתוכם נדחס חוואר המקיף אותם. על גבי אחד מהשקעים הממולאים האלו נמצא מאובן בודד של גריפאה שאולי נגזר מחבורת יהודה (אין וודאות שהוא אכן **in-situ**). בשונה משאר היחידות במרחב, נראה באופן ברור שהבלוקים הענקיים נעו ממיקומם המקורי כסלעים מוצקים ולא כגרגרים.

שוני נוסף של יחידה זו ביחס ליחידה שמתחתיה וגם ביחס לשאר היחידות במרחב הוא בריכוז גדול וחרגי של פאונה המאפיינת רמפה קרבונטית, הכוללת פורמיניפרים בנתוניים גדולים ואצות אדומות. בבלוקים השונים מופיעים מאספים של פאונה המבטאים מרחבים שונים על גבי הרמפה הקרבונטית. בלוקים אלו, שגלשו מראש המדרון, מצביעים על שתי מגמות התפתחות של הרמפה שהתקיימה בראש הרי יהודה, המבטאות הרדדה של הרמפה ביחס ליחידות ה-**debris-flow** האחרות במרחב. מגמה אחת היא התבגרות של הרמפה והתמיינות למרחבים עם סביבות מחייה שונות. מגמה שנייה היא הקשייה לסלע בשלבים מוקדמים, זמן קצר לאחר הצטברות הסדימנט (**early lithification**), המאפיינת גם היא ים רדוד. יחידה זו טרם אותרה במחשופים אחרים הבונים את בסיס החתך האוליגוקני במרחב.

3. היחידה השנייה תחומה בגגה במשטח גידוע נוסף, הנטוי באופן כללי בצורה מתונה לצפון. ככלל, היחידה השלישית שמעל מכילה מרכיבים של **debris-flow**, אבל מאופיינת בנוכחות

רבה של חוואר, בעיקר בצפון, כשחלקו משוכב. בקצהו הצפוני, קרוב למחלף, גיל החוואר הוא סוף האוליגוקן המאוחר (**biozone P22**). כ-200 מ' דרומה לאורך כביש 6, בצידו המזרחי, מזוהה קצה תעלה שבתוכו שקעו חווארים משוכבים עם אופקי גיר. יתכן שזהו הקצה הדרומי של יחידה זו, שסתמה את התעלה.

4. בקצה הצפוני של החתך, בסמוך למחלף, מונח חתך חווארי מיוקני באי התאמה ארוזיבית וזוויתית ניכרת על החתך האוליגוקני, וגודע אותו כשהוא נטוי צפונה. יתכן שזוהי תעלה מיוקנית שהתחתרה בתוך החתך האוליגוקני, לאורך התוואי הקדום של מערכת התעלות האוליגוקניות. הערכה זו נתמכת בקיומו של חתך מיוקני שמגיע עד לעומק עשרות מטרים שנמצא בקידוחים מצפון למחלף. בראש החתך במחלף, מונח באי התאמה ארוזיבית קונגלומרט המשתייך ככל הנראה לתצורת אחוזם הפליוקנית.



תרשים 8: מחשופים בתחנה 6. A- היחידות בתחנה; B- הבלוק המורכב מיחידות נטויות; C- בלוק המורכב בעיקר מגיר אצות אדומיות (שצבען לבן); D- גיר האצות – מבט מקרוב.

כיוון ההגעה של היחידות התחתונות במחלף לא היה יכול להיות ישירות ממזרח, שכן מדרום מזרח וממזרח קיים מסלע של חבורת עבדת (שבראשו נמצא מחשוף האיאוקן תיכון במחצבת פתורה מזרח). כיוון הזרימה היה כפי הנראה מדרום עד דרום מזרח ולכן הנטייה צפונה של החתך מייצגת ככל הנראה פרופיל לאורך התעלה, המקביל בקרוב לכיוון הזרימה. הקושי בקורלציה בין הצדדים המזרחי והמערבי של היציאה הדרומית מהמחלף לכביש 6 מבטא את השונות הלטרלית המהירה שקיימת לרוחב תעלה גדולה בה נעים זרמים של סדימנטים. לכן יתכן שהצד המערבי, המכיל חווארים מגיל אוליגוקן מוקדם (**biozones P18-P19**) מייצג הרבדה קדומה בתוך התעלה, שבתוכה התחתרו מאוחר יותר זרימות ה-**debris-flow** של הצד המזרחי, שגילם כנראה אמצע אוליגוקן (**biozones P20-P21**).

תחנה 7: מפגש נחל אדורים וכביש 6

מצפון למפגש נחל אדוריים עם כביש 6, בצידו המזרחי של הכביש, חשופה תעלה רחבה. התעלה התחתרה בתוך חתך של חבורת עבדת החשוף מצפון וממערב לתעלה. חלקה השמאלי (צפוני) של התעלה מכיל חתך משוכב וגזור מעט, הנטוי דרומה. בסיסו בנוי מגירים משוכבים ומרוסקים שגילם איאוקן תיכון או מאוחר. מעליו מונח באי-התאמה זוויתית חתך חווארי צהבהב ורך, שהגיל בבסיסו הוא בטווח שבין איאוקן מאוחר עד אוליגוקן (**biozones P16-P18**) ובגגו סוף אוליגוקן מוקדם (כנראה **biozone P20**). מעליהם מונחת שכבה עבה של חוואר צהוב קשה, שהגיל בבסיסה הוא תחילת האוליגוקן המאוחר (**biozone P21**). בצידה הימני (דרומי) של התעלה, מופיע **debris-flow** עם תכולת חוואר גבוהה שגילו בטווח של איאוקן מאוחר עד אוליגוקן מוקדם (**biozones P17-P20**), ומעליו שכבת קירטון עבה מגיל איאוקן תיכון. צידה הימני של התעלה מבטא כנראה גלישות מאוחרות שהתחתרו בחלק השמאלי של התעלה.



תרשים 9: החתך בחלקה השמאלי (צפוני) של התעלה בתחנה 7 והגילים המקורבים שלו.

למרות שהחתך בשמאל התעלה גזור מעט, ולכן לא ניתן לשלול אפשרות שחסרים חלקים ממנו, הוא משוכב בצורה מסודרת ונראה שהוא מבטא חתך שלם, רובו המי-פלגי, ללא debris-flow, שגלש כבלוק אחד. אם כך, זהו בלוק אלוכטוני הבנוי מחתך רציף שהצטבר החל מהאיאוקן מאוחר עד סוף האוליגוקן על הרכס שמפריד בין מרחב אדוריים ולכיש, מחוץ לטווח ההשפעה של התעלות, וגלש מאוחר יותר דרומה אל מקומו הנוכחי. עוביו הדק של החתך מייצג ככל הנראה את עובי רצף הסדימנטים שהצטברו על גבי רכסים תת ימיים המפרידים בין התעלות ה-debris-flow. אם אכן כך, זהו מחשוף ייחודי המייצג סדימנטים שהצטברו במרחבים שבין התעלות למרגלות הרי יהודה, והוסרו כמעט כליל ע"י הגידוד שיצר את השפלה.

תחנה 8: נחל אדוריים, ממזרח לכביש 6

בתחנה זו נחשף debris-flow עבה הבנוי מקלסטים ובלוקים קירטוניים לבנים, הצפים בתוך מטריקס קירטוני לבנבן עד צהבהב, שגילו איאוקן מאוחר (MS-DF-LE). בניגוד ליחידה הדומה של ה-MS-DF-O בבסיס החתך האוליגוקני, שצבעה הכללי הוא צהבהב-ירקרק והיא מכילה מרכיבים מגוונים, צבעה הכללי של יחידה זו בבסיס החתך מגיל האיאוקן המאוחר הוא לבנבן ומכיל בלוקים קירטוניים לבנים בלבד. מחשופים נוספים של חתך זה נמצאים מזרחה יותר ותוארכו בעבר ל-P15-P18 biozone. נראה שגם הבלוקים הקירטונים הם מגיל איאוקן מאוחר או שנגזרו מחבורת עבדת. כל המחשופים לאורך נחל אדוריים מתוארכים

לאיאוקן המאוחר, והם מופרדים מהחתך האוליגוקני של לכיש ע"י רכס הבנוי מסלעי חבורת עבדת. לכן נראה שמרחב נחל אדורים מבטא תעלה רחבה מגיל איאוקן מאוחר.



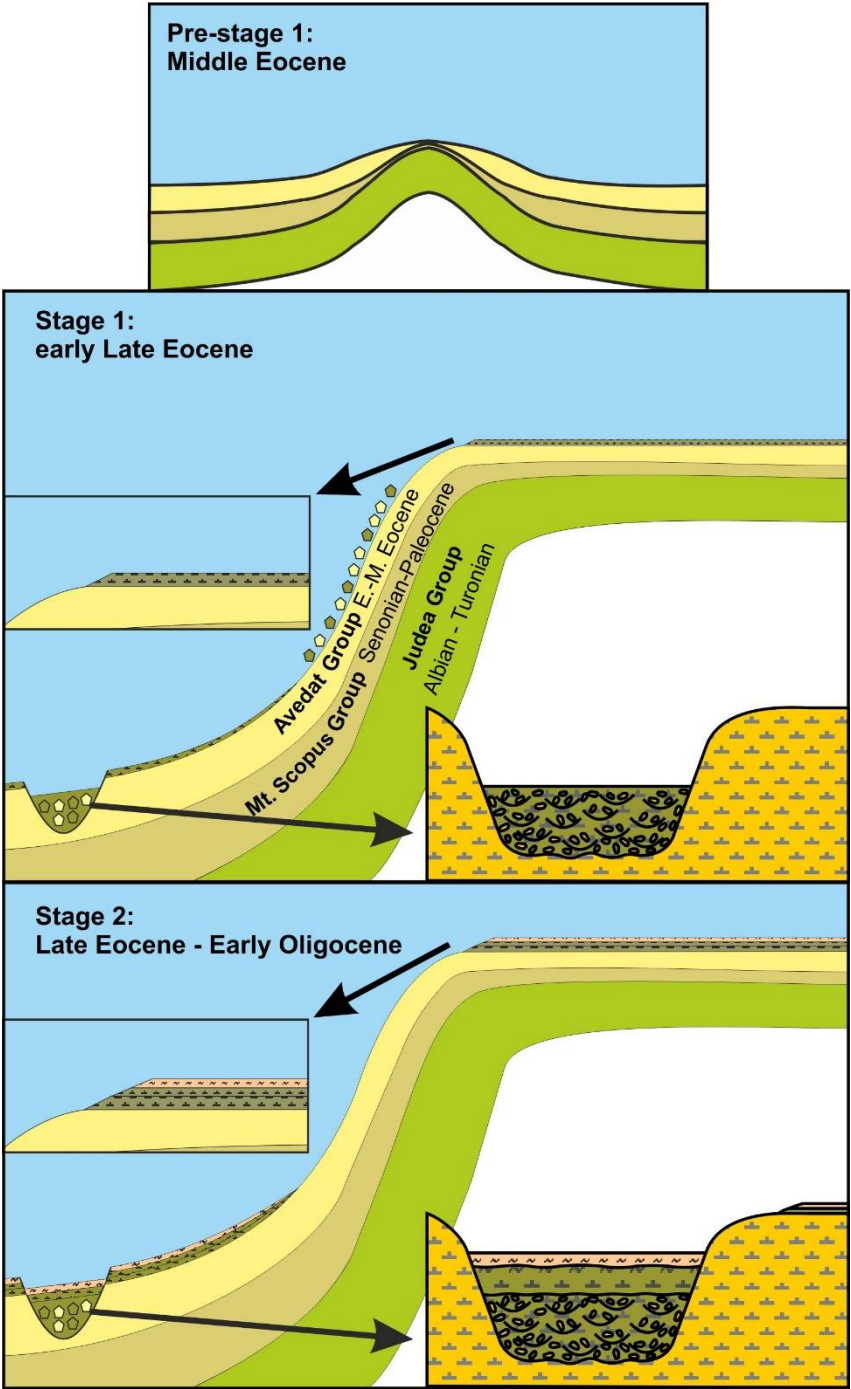
תרשים 10: מחשוף מגיל איאוקן מאוחר בתחנה 8.

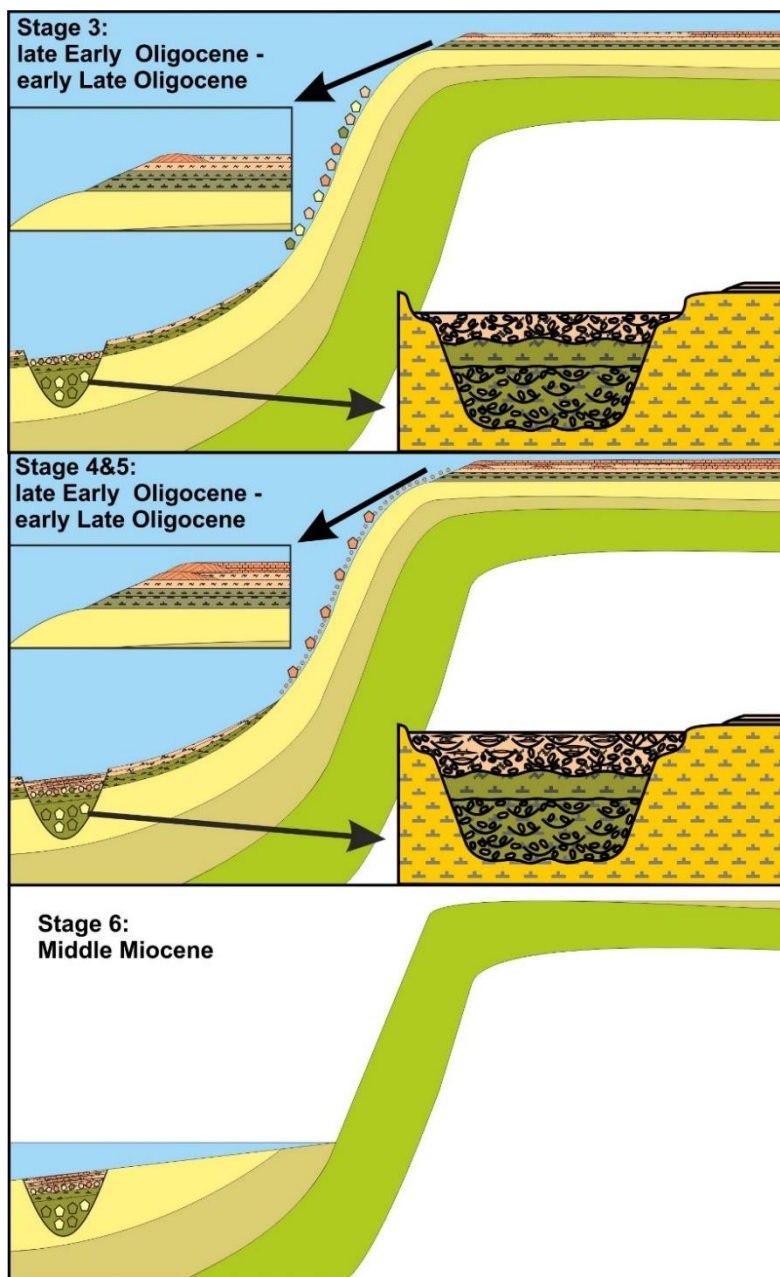
החתך הנחשף בתחנה ממלא כנראה גם את בסיס מערכת התעלות במרחב לכיש, שהתחתרה כבר באיאוקן המאוחר. החתך מגיל זה אמנם אינו חשוף שם, אך הוא נחדר ע"י קידוחי מים עד לעומקים של עשרות מטרים מתחת לפני השטח. שלושה קידוחים אף ממוקמים בשולי מערכת התעלות, בצמוד למסלע של חבורת עבדת שבתוכו התחתרו: קידוח לכיש 1 בדרום המרחב חדר את בסיס החתך מגיל איאוקן מאוחר בעומק 46 מ', קידוח כלנית 1 במזרח בעומק 69 מ', וקידוח נחושה 1 א' בצפון מזרח בעומק של 117 מ'. קידוח גלאון 4 בצפון חדר את בסיס התעלה בעומק 61 מ'. יצוין שהחתך מגיל איאוקן מאוחר בחלק מהקידוחים האלו מכיל חול קוורץ.

סינתזה – הבטים פלאוגיאוגרפיים של מערכת ההובלה מגיל איאוקן מאוחר – אוליגוקן

כפי שהראו **Buchbinder et al. (2005)**, הסדימנטים מגיל איאוקן מאוחר – אוליגוקן באזור לכיש היוו חלק ממערכת ההסעה שהובילה קלסטים אל האגן העמוק דרך קניון אשדוד. כיוון מערכת התעלות, לצפון-צפון מערב, אכן מוביל אל קניון אשדוד ונראה שמערכת התעלות היוותה את אחד היובלים התת-ימיים הראשיים של הקניון. הסדימנטים הובלו מהרי יהודה על פני מדרון היבשה המדורג של מערב ישראל והצטברו באזור השפלה, שהיווה אגן הביניים, בדרום דרך קניון אשדוד אל אגן הלבנט. הכרת ההרכב, יחסי השדה ותנאי ההרבדה של החתך באזור לכיש חשובים להבנת החתכים ששקעו במורד תוואי ההובלה – בתוך קניון אשדוד, בתחתית מדף היבשה ובשולי אגן הלבנט. לחתכים עמוקים אלו יש פוטנציאל לצבירת הידרוקרבונים ולהוות סלעי מאגר, ובייחוד לאלו הבנויים מטורבדיטים ו-**grain-flow**, וניתן ללמוד על אופיים של חתכים אלו דרך החתכים החשופים בלכיש.

לצורך הבנה כוללת של מערכות הסעת הסדימנטים שפעלו במרחב, סוגי הסלעים ששקעו לאורכן והפליאוגיאוגרפיה שהם מבטאים, יש להתייחס למכלול התופעות המבטאות תהליך שמתחיל ביצירת הסדימנטים במיקומם המקורי, דרך ההובלה שלהם במנגנונים שונים ועד להשקעתם באגן (**source to sink**). הסדימנטים שהובלו מהרי יהודה והצטברו באגן הביניים של השפלה מבטאים את ההתפתחות הטקטונית והפליאוגיאוגרפית של הרי יהודה ומשליכים על סוגי הסלעים שאנו צפויים למצוא מתחת למדף היבשה ובאגן הלבנט.





תרשים 11: שלבי ההתפתחות הפלאוגיאוגרפיים והסדימנטריים של הרי יהודה והשפלה באיאוקן מאוחר – אוליגוקן. שלבי ההתפתחות בתרשים מתאימים לשלבי ההתפתחות המתוארים להלן. מקרא ליחידות הסלע מגיל איאוקן מאוחר - אוליגוקן מופיע בתרשים 4.

שפלת יהודה – סדימנטציה באגן ביניים:

ניתן לזהות מספר שלבים עיקריים בהתפתחות מערכות ההובלה בשפלה והסדימנטים שהצטברו לאורכם באיאוקן מאוחר עד האוליגוקן:

1. בתחילת האיאווקן המאוחר התרחשה התחתרות עמוקה של תעלות בלכיש ובאדוריים. ההתחתרות התבצעה ע"י זרמים של **debris-flow** שנעו מהרי יהודה אל אגן הלבנט במערב וחלקם הורבד בתוך תעלות. התעלה באדוריים הייתה צנועה בהיקפה, אך בלכיש התפתחה כנראה מערכת מסועפת של תעלות ברוחב של כ-7 ק"מ ובאורך של כ-12 ק"מ שזרמה מדרום לצפון-צפון-מערב. מערכת התעלות התחתרה עד לעומק של כ-100 מ' מתחת לפני השטח הנוכחיים. ההתחתרות והובלת הסדימנטים התרחשה בפרק זמן לא ארוך בתחילת **P15** **biozone** שמשכו כ-3 מיליון שנה.

2. ההתחתרות והובלת הסדימנטים פסקה לאחר זמן קצר, בתחילת האיאווקן העליון. במשך יתרת תקופת האיאווקן המאוחר (**P15-P17 biozones**) הורבדו קירטון וקירטון חווארי לבנבנים בכל המרחב, בעומק מים גדול, על גבול עומק ה-**OCD**. בתחילת האוליגוקן אופי הסדימנטציה השתנה מעט וכנראה שקצב ההרבדה ירד, ובכל המרחב החל לשקוע חוואר צהבהב ירקרק המכיל ריכוז גבוה של גלאוקוניט.

3. בסוף האוליגוקן המוקדם ותחילת האוליגוקן המאוחר, לפני 23.8-29.4 מ"ש (**biozones P20-P21**), התחדשה זרימת ה-**debris-flows** מהרי יהודה אל האגן לאורך תוואי מערכת התעלות שבאזור לכיש, אך כנראה שלא באדוריים. ההתחתרות הזרמים הסירה את ראש החתך מגיל אוליגוקן מוקדם. ההתחתרות לא הייתה עמוקה, והגיעה עד לגובה של 100 מ' מעל בסיס התעלות מגיל איאווקן מאוחר (בקירוב פני השטח הנוכחיים). ה-**debris-flows** הורכבו מביוקלסטים שהגיעו מהרי יהודה והתערבבו עם קירטון איאווקני שנסחף בדרך וכן עם החוואר האוליגוקני שהמשיך לשקוע במרחב. לאחר המילוי והסתימה של מערכת התעלות נדדה זרימת הסדימנטים אל שוליה ואף מעבר להם וגרמה להתחתרות תעלות חדשות בגבהים של כ-40 מ' מעל בסיס התעלות האוליגוקניות.

4. בשלב מסוים, עדיין במהלך אותו פרק זמן או מעט אחריו, החלו פאזות זרימה מוגברת ומרוכזת של **grain-flow deposits** שהכילו מרכיבים כמעט אך ורק ממעלה הרי יהודה והורבדו כשכבות גיר בין שכבות החוואר שהמשיכו לשקוע באגן. ההשתרעות המרחבית המוגבלת וההשתנות הלטרלית המהירה של הגירים עשויה להצביע על כך שגם ה--**grain flow** נעו בתוך תעלות רדודות או שהורבדו ב-**lobes** במוצאי התעלות. עם זאת, יתכן שההובלה לא הייתה מצומצמת לתוואי המוגדר של מערכת התעלות הגדולה של לכיש, אלא התפרסה בכל המרחב.

5. פאזות זרימה של **debris-flows** בתוך תעלות במרחב לכיש באוליגוקן המאוחר הובילו גם גירים קשים עם פאונה רדודה שנגזרו מהרי יהודה. במקביל, התרחש מדי פעם כשל של חלקי חתך מקרקעית האגן, שגלשו מעט מערבה על פני מרחקים קצרים כשהם גודעים את ראש החתך. מחוץ למערכת התעלות המשיך כנראה להצטבר חתך חווארי.

6. לאחר תחילת המיוקן התחתון (**biozones N5-mid N8**) פסקה הסדימנטציה (היאטוס) בכל המרחב. החל מתחילת המיוקן התיכון (**mid biozone N8**) החל תהליך גידוד ימי של אזור השפלה, שהסיר את כל החתך מגיל איאוקן מאוחר עד אוליגוקן, פרט לזה שנשמר בתוך התעלות העמוקות.

הרי יהודה – מקור הסדימנטים:

בחינת הליתולוגיה של סדימנטים שהובלו מהרי יהודה והצטברו בשפלה ושל סדר הצטברותם, מאפשרת שחזור של התפתחות הפליאוגיאוגרפיה וסביבות ההשקעה שהתקיימו במקביל בראש הרי יהודה. מגוון סלעי הגיר בלכיש מאפשר שחזור של הרמפה הקרבונטית שהתפתחה בראש הרי יהודה ושל הסדימנטים שהצטברו עליה והוסרו כתוצאה מארוזיה מאוחרת. מספור השלבים להלן תואמים לשלבי התפתחות מערכות ההובלה וההרבדה בשפלה, שתוארו לעיל.

1. הובלת **debris-flows** מהרי יהודה בתחילת האיאוקן המאוחר אינה מבטאת הרדדה משמעותית של ראש הרי יהודה, מאחר שבחומר המובל אין כלל מרכיבים של ים רדוד, ומאחר שלאחר מכן פאזת הובלה זו נפסקת. נראה שההובלה קצרת הזמן הזו מבטאת אירוע

טקטוני שקימט והדגיש את האגף המערבי לכלל מדרון יבשה תלול. סדימנטים רכים של חבורת עבדת שהצטברו במקור על המדרון המתון כשלו עם הפיכתו למדרון תלול ובלוקים שגלשו במורד התערבבו עם הסדימנט הימי באגן. הדגשה סטרוקטורלית קצרת טווח של האגף המערבי של הרי יהודה זוהתה גם בעבודות קודמות על סמך שיקולים גיאומורפולוגיים. אירוע זה בא במקביל להדגשה קצרת טווח של מדרון היבשה במישור החוף באותו זמן, שלוותה בהתחתרות עמוקה של מספר קניונים לרוחבה. אספקת חול קוורץ מבטאת כנראה הובלה ארוכה בזרמים תת-ימיים ממחשופים יבשתיים מרוחקים המכילים חולות.

2. הפסקת הובלת ה-**debris-flows** ומעבר לשקיעת חתך חווארי רציף בכל המרחב עד אמצע האוליגוקן מבטאת הפסקה או האטה משמעותית בקימוט של האגף המערבי של הרי יהודה. עם זאת, בשלב הבא, באמצע האוליגוקן, התחילו לגלוש מרכיבים של ים רדוד מראש הרי יהודה. לפיכך, למרות הפסקת הקימוט, בין האיזוקן המאוחר (אמצע **biozone P15**) ועד לסוף האוליגוקן המוקדם (תחילת **biozone P21**) התרחשה התרוממות מתמשכת של הרי יהודה, ולמעשה של כל המרחב. למרות ההתרוממות המתמשכת, במהלך תקופה זו ראש הרי יהודה נשאר עדיין מתחת לים עמוק.

3. בסוף האוליגוקן המוקדם ותחילת האוליגוקן המאוחר (**biozones P21-P22**) התחילה פאזה חדשה של **debris-flows** שמקורה בהרי יהודה. פאזה זו נגרמה עקב ההתרוממות המתמשכת של הרי יהודה שהובילה להרדדה משמעותית של הים, כשל בראש מדרון היבשה, וגזירה של בלוקים קירטוניים מחתכים מגיל איזוקן ואוליגוקן מוקדם. בלוקים אלה גלשו מערבה, כשהם מתערבבים עם החוואר באגן ליצירת **debris-flows** שחתרו תעלות ושקעו בתוכם. ה-**debris-flows** כללו רק מעט מרכיבים גיריים שהפאונה בהם מתאימה לסביבת השקעה של רמפה קרבונטית חיצונית עמוקה.

4. בסוף אותו פרק זמן החלה אספקה מוגברת של פורמיניפרים בנתוניים קטנים המבטאת עדיין תנאים של רמפה חיצונית. עם המשך ההתרוממות החלה להתבסס בהדרגה בראש הרי יהודה רמפה קרבונטית רדודה, שבאה לידי ביטוי באספקה של פורמיניפרים בנתוניים גדולים

מגוונים ואצות. ההרדדה של כל המרחב אפשרה גם לחול קוורץ להגיע דרך מערכות פלוביאליות מרוחקות מדרום, אל הים הרדוד שנוצר בראש הרי יהודה.

5. במהלך האוליגוקן המאוחר התחילה אספקה של שברים של סלעי גיר, המכילים פאונה מסביבות השקעה מגוונות שנגזרו מהרמפה הקרבונטית בראש הרי יהודה. הפאונה המגוונת מבטאת התבגרות והתמיינות הרמפה כתוצאה מהרדדת ניכרת של הים, וגם הקשיית הסדימנטים שברמפה לסלע זמן קצר לאחר הצטברות הסדימנט (**early lithification**) מצריכה אף היא ים רדוד מאוד. יתכן ששלב הרדדה זה מבטא תחילת גידוד ימי של הרי יהודה ויצירת משטח גידוע בראשם.

6. במיוקן המוקדם השתרר במרחב היאטוס של סדימנטציה כתוצאה מהמשך ההתרוממות והחשיפה הדרגתית של מדרון היבשה מעל פני הים. כשהתרוממות זו נפסקה הים גידד את השפלה הנמוכה ויצר בראשה משטח עליו הורבדו בים רדוד סלעים גיריים של תצורת צקלג. אלו כנראה הגירים האוטוכטוניים הראשונים מאז חבורת יהודה ששקעו בשפלה, באותו מקום שבו חיו בעלי החיים הבונים אותם, ללא הובלה משמעותית.

מקורות

אבני, י., 1989. הגיאולוגיה, הפלאוגיאוגרפיה והתפתחות הנוף של מערב קמר רמון ו"הר הנגב הגבוה". עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים; 1991, המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI, 160/6/91 עמ'.

בגין, ז.ב., זילברמן, ע., 1997. השלבים והקצב של התפתחות התבליט בארץ ישראל. המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI, 63/24/97 עמ'.

בר, ע., 2009. עיצוב שולי היבשת של מרכז ישראל מהאיאוקן העליון ואילך – טקטוניקה, מורפולוגיה וסטרטיגרפיה. עבודת דוקטור, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר-שבע, 207 עמ'.

גבירצמן, ג., 1970. חבורת סקיה (איאוקן מאוחר עד פלייסטוקן מוקדם) במישור החוף והשפלה, ישראל. המכון הגיאולוגי, דו"ח OD, 180/5/67.

גוליק, א., 1959. הגיאולוגיה של אזור צקלג. עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

גרייצר, י., 1959. גיאולוגיה של אזור לכיש. עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

- ולד, ר., 2016. פענוח התפתחותו הטקטונית של הגליל התחתון מהגידוע האוליגוקני ועד למעוות המיוקני-פליוקני באמצעות מידע גיאולוגי וגיאופיסי מתת-הקרע. עבודת דוקטור, אוניברסיטת חיפה.
- זילברמן, ע., 1989. התפתחות הנוף בנגב המרכזי, הצפוני והצפון מערבי בנאוגן ובקוורטר. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים; 1991, המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI, /45/90 164 עמ'.
- זילברמן, ע., רודד, ר., בוכבינדר, ב., 1993. החתך היבשתי והימי מגיל נאוגן ופלייסטוקן בבקעת ערד-ערוער – מפתח להבנת הקניון הקדום והמורפולוגיה הנוכחית בבקעת באר שבע. החברה הגיאולוגית, הכנס השנתי, ערד, מדריך סיורים גיאולוגיים, עמ' 113-132.
- מיכלסון, ח., 1972. ההידרוגיאולוגיה של דרום רמת הגולן. תה"ל, דו"ח HR/72/037, 80 עמ'.
- סנה, ע., 2008. מפה גיאולוגית של ישראל, 1:50,000, גיליון 1-25, קרית גת. המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- סקל, ע., 1967. הגאולוגיה של רכס מנוחה. עבודת גמר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- Alsharhan, A.S., Nairn, A.E.M., 1997. Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East. Elsevier (843 pp).
- Arad, A., 1965. Geological outline of the Ramot Menashe region (northern Israel). Isr. J. Earth Sci., 14:18-32.
- 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. Geol. Soc. Am. Bull. 124, 1871–1897.
- Avnimelech, M. 1936. Etudes geologiques dans la region de la Shephelah en Palestine. Trav. Lab. Geol. Univ. Grenoble 20, 144 pp.
- Bar, O., Gvirtzman, Z., Feinstein, S., Zilberman, E., 2013. Accelerated subsidence and sedimentation in the Levant Basin during the Late Tertiary and concurrent uplift of the Arabian platform: Tectonic versus counteracting sedimentary loading effects. Tectonics, 32: 1–16.
- Bar, O., Zilberman, E., Feinstein, S., Calvo, R., Gvirtzman, Z., 2016. The uplift history of the Arabian Plateau as inferred from geomorphologic analysis of its northwestern edge. Tectonophysics, 671:9-23.
- Bender, F. 1974. Geology of Jordan. Gebriider Borntraeger, Berlin, 196 pp.
- Bentor, Y., and Vroman, A., 1961. The geological Map of the Negev, 1:100.000, sheet 17 – Nizzana. Isr. Geol. Surv.
- Beydoun, Z. R., 1991. Arabian Plate hydrocarbon geology and potential – a plate tectonic approach. Am. Assoc. Petrol. Geol., Studies in Geology, 33, 77 p.

- Blake, G.S. 1928. Geology and water resources of Palestine and Tran-Jordan. Palestine Government Printing Press, Jerusalem. pp. 1-51.
- Buchbinder, B., 1969. Geological map of Hashephela region, Israel, 1:20,000, with explanatory notes. Isr. Geol. Surv., Rep. OD/1/68 and Inst. Pet. Res. Geophys. Rep. 1030, 13 pp., maps.
- Buchbinder, B., 1975. Lithogenesis of Miocene reef limestones in Israel, with particular references to the significance of the red algae. Isr. Geol. Surv. Rep. OD/3/75.
- Buchbinder, B., Zilberman, E., 1997. Sequence stratigraphy of Miocene-Pliocene carbonate-siliciclastic shelf deposits in the eastern Mediterranean margin (Israel): effects of eustasy and tectonics. *Sedim. Geol.*, 112:7-32.
- Buchbinder, B., Calvo, R., Siman-Tov, R., 2005. The Oligocene in Israel: A marine realm with intermittent denudation accompanied by mass-flow deposition. *Isr. J. Earth Sci.*, 54:63-85.
- Buchbinder, B., Benjamini, C., Mimran, Y., Gvirtzman, G., 1988. Mass transport in Eocene pelagic chalk on the northwestern edge of the Arabian platform, Shefela area, Israel. *Sedimentology*, 35:257-274.
- Buchbinder, B., Martinotti, G.M., Siman-Tov, R., Zilberman, E., 1993. Temporal and Spatial relationships in Miocene reef carbonates in Israel. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 101:97-116.
- Burke, K., Gunnell, Y., 2008. The African erosion surface, a continental-scale synthesis of geomorphology, tectonics, and environmental change over the past 180 million years. *Geol. Soc. Am. Mem.* 201, 1–66.
- Cox, L.R. 1934. On the occurrence of marine Oligocene in Palestine. *Geol. Mag.* 71: 337-355.
- Drooger, C. W. 1986. Microfossils from the Oligocene of Ramla, Israel. *Isr. J. Earth Sci.* 35: 197-206.
- Druckman, Y., Buchbinder, B., Martinotti, G.M., Siman-Tov, R., Aharon, P., 1995. The buried Afiq Canyon (eastern Mediterranean, Israel): a case study of a Tertiary submarine canyon exposed in Late Messinian times. *Mar. Geol.*, 123:167-185.
- Garfunkel, Z., Horowitz, A., 1966. The Upper Tertiary and Quaternary morphology of the Negev. *Isr. J. Earth Sci.* 15, 101–117.
- Gvirtzman, G., Reiss, Z., 1965. Stratigraphic nomenclature in the Coastal Plain and Hashephela regions. *Isr. Geol. Surv., Rep. OD/1/65*, 14 p.

- Gvirtzman, Z., Zilberman, E., Folkman, Y., 2008. Reactivation of the Levant passive margin during the late Tertiary and formation of the Jaffa Basin offshore central Israel. *J. Geol. Soc. Lon.*, 165:563-578
- Lewy, Z., Almogi-Labin, A., Siman-Tov, R., 1995. The paleoecological significance of Upper Masstrichtian and Lower Eocene rocks recently discovered in Jerusalem, Israel. *Isr. J. Earth Sci.*, 44:25-32.
- Lebkicher, R., Rentz, G., Steineke, M., 1960. *Aramco Handbook*. Arabian American Oil Company.
- Michelson, C., Lipson-Benitah, S., 1986. The litho and biostratigraphy of the southern Golan Heights. *Isr. J. Earth Sci.*, 35:221-240.
- Picard, L., 1951. Geomorphogeny of Israel, part 1 — the Negev. *Bull. Res. Council. Isr.* 1 (1-2), 1-32.
- Picard, L., Solomonica, P., 1936. On the geology of the Gaza – Beersheba district. *J. Palest. Orient. Soc.*, 16:180-223. Also in *Bull. Geol. Dept. Hebrew Univ. Jerusalem*, Vol. 1, no. 2, 44 p.
- Politi, M., Croker, P.F., 1978. A reassessment of the El-Arish Neogene channel (Haruvit) prospect. *O.E.L., Rep.* 78/23.
- Quennell, A.M., 1958. The structural and geomorphic evolution of the Dead Sea Rift. *Q. J. Geol. Soc. Lond.* 114, 1-24.
- Sneh, A., Buchbinder, B., 1984. Miocene to Pleistocene surfaces and their associated sediments in the Shefela region, Israel. *Isr. Geol. Surv., Current Res.*, 1983-1984:60-64.
- Wetzel, R., Morton, M. 1959. Contribution a la geologie de la Transjordanie. *Notes Mem. Moyen-Orient* 7: 95-191.
- Ziegler, M.A., 2001. Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences. *GeoArabia*, 6(3):445-504.
- Zilberman, E., Calvo, R., 2013. Remnants of Miocene fluvial sediments in the Negev Desert, Israel, and the Jordanian Plateau, evidence for an extensive subsiding basin in the northwestern margins of the Arabian plate. *J. Afr. Earth Sci.* 82, 33-53.

סיור מספר 5:

א' - מפעל נשר רמלה - טכנולוגיה וקיימות סביבתית בייצור צמנט.

חמי גינזבורג¹, שביט דן¹, ברוך אלקיים¹, ולדימיר וולף אברוטיס², אורי מור¹

1. נשר מפעלי מלט ישראלים בע"מ
2. המכון לארכיאולוגיה ע"ש זינמן, אוניברסיטת חיפה

מבוא - חב' נשר

כרוניקה של החברה; מייסודה להיום

מתוך המלט ויוצריו (נשר, 2002): בספרו 'אלטנוילנד' שיצא לאור באוקטובר 1902 חזה הרצל את הקמתו של בית חרושת למלט כאחד המרכיבים החשובים בפיתוחה של ארץ ישראל. עוד קבע הרצל שהמפעל החדש יוקם בחיפה, שלה צפה עתיד מזהיר כנמל בינלאומי ומרכז מסחרי, לימים ייאמר שהיה זה מיטב חזונו של 'חוזה מדינת היהודים'. בספר המלט ויוצריו מתוארת ההוצאה לפועל של חזון של הרצל, ואחרים בעקבותיו, כסיפור מרתק המשלב חזון, יזמות, דבקות במטרה, ערמוניות, גבורה, עיקשות, מקצועיות ועוד, כשבסופו, ב-18 באוקטובר 1925, הופעל כבשן המלט הראשון של נשר, אשר נבנה על קרקעות כפר יג'ור, מדרום לחיפה.

החברה שבנתה את המפעל נקראה 'חברת מלט פורטלנד 'נשר' בע"מ. היא נרשמה בלונדון באוגוסט 1922 ובראשה הועמד כיו"ר מיכאל פולק שהיה הרוח החיה ביסודו של המפעל. הישוב 'נשר' עצמו הוקם כשכונה לעובדי נשר בדצמבר 1948, ונקרא על שם המפעל. מיכאל פולק ניווט את ספינת נשר הצעירה במים הסוערים של טרום המדינה בשני העשורים הראשונים לחייה, ובנובמבר 1945 בעקבות הזדקנותו, העדר יורשים, בעיות ניהול ושבתית עובדים גדולה, נמכרה חברת מלט פורטלנד 'נשר' ל'סולל בונה' ול'החברה המרכזית' - חברה פרטית של מספר סיטונאים בחומרי בניין.

המפעל הבא של נשר הוקם מדרום מזרח לרמלה ב-1953, וב-1969 רכשה נשר את מפעל 'הר-טוב' הסמוך לבית שמש שהיה בבעלות חב' 'שמשון', ובנתה על חורבותיו מפעל חדש וחדש באותם הימים.

במהלך שנות ה-90, כמענה לעלייה המסיבית מברית המועצות, נבנו ברמלה שני כבשנים חדשים בטכנולוגיה של 'קווים יבשים'. אלה החליפו את הכבשנים הישנים שפעלו בטכנולוגיה הלא יעילה אנרגטית של 'קווים הרטובים'.

הקווים ה'יבשים' הגדילו את תפוקת מפעל רמלה המחודש בכמעט פי 5, מכ-2500 טון ליום של הכבשנים ה'רטובים' לכ-11,000 טון ליום של הקווים ה'יבשים'.



איור 1. פנורמה של שני הקווים היבשים החדשים במפעל רמלה

פתיחת שוק המלט לתחרות

בעקבות המחאה החברתית של 2011, דו"ח הוועדה לשינוי חברתי – כלכלי (וועדת טרכטנברג, 2011), דו"ח הוועדה לעידוד התחרות בענף המלט (וועדת הרשקוביץ, 2012), והחלטות ממשלה שהתבססו על דוחות אלה, השתנתה המציאות הכלכלית שיוקית של נשר באופן הבא:

1. נשר מכרה את מפעל הר-טוב במסגרת הסדר רגולטורי מ-2014
 2. נוצרו תנאים נוחים בסביבה הגיאוגרפית העולמית ליבוא מלט וקלינקר במחירים זולים מאוד ולהקמת מפעלי טחינת קלינקר
- כתוצאה מכך הפך שוק המלט המקומי לשוק עם ריבוי שחקנים.

מפעל נשר רמלה**מצב נוכחי; כושר ייצור וכוח אדם**

נכון להיום ייצור הקלינקר במפעל נשר רמלה מתבסס על שני כבשנים בטכנולוגיה "יבשה" שהחליפו במהלך שנות ה-90 מספר כבשנים ישנים שעבדו בטכנולוגיה "רטובה". כבשן מס' 1 החל לפעול בשנת 1995 ומייצר כ-1.6 מיליון טון/שנה קלינקר, כבשן מס' 2 החל לפעול בשנת 1999 ומייצר כ-2.2 מיליון טון/שנה קלינקר.

טחינת צמנט מתבססת על 7 טחנות צמנט, מהן 6 בטכנולוגיה "כדורית" ואחת בטכנולוגיה "וורטיקאלית". במהלך השנה הקרובה נשר מתכננת להכניס לפעולה טחנה וורטיקאלית נוספת. כושר הטחינה הכולל של אגף הטחינה מוערך בכ-5.5 מיליון טון/שנה.

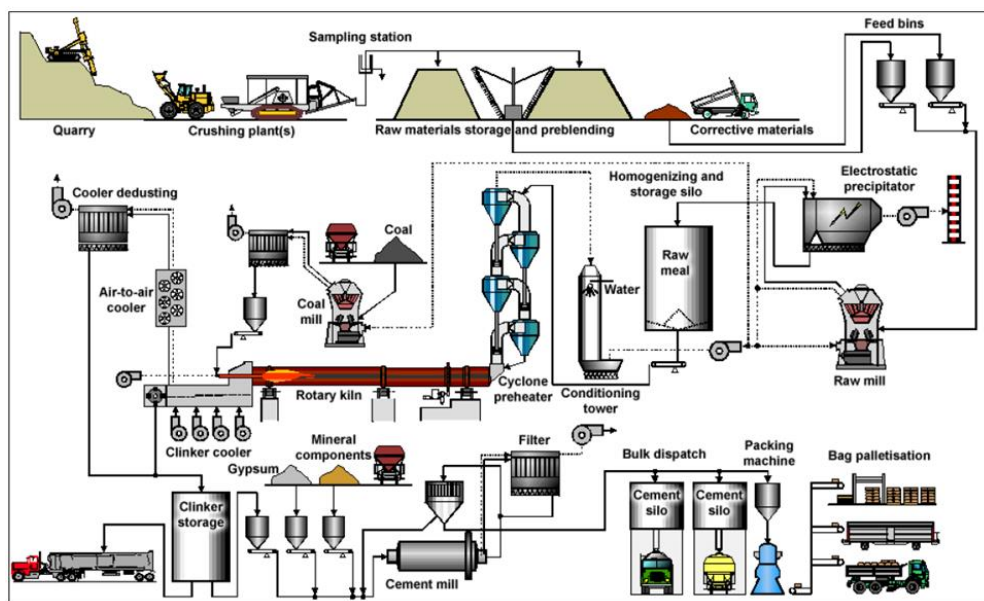
נשר מייצרת חמישה סוגי צמנט עיקריים, ארבעה מהם מיועדים לשוק הבטון המובא ותעשייה הבטון הטרומית ומשווקים בתפוזרת (מכליות צמנט), וסוג אחד שמשווק בשקים 50 או 25 ק"ג ואינו מיועד לרכיבים מבניים (קונסטרוקטיביים).

הייצור בנשר רמלה ומערכת אבטחת האיכות מפוקחים ע"י מכון התקנים הישראלי וכל המוצרים מסומנים בתו-תקן ישראלי. החברה מפעילה מעבדה מוסמכת **ISO17025** ע"י הרשות הלאומית להסמכת מעבדות. למפעל 5 תווי תקן ישראלים, ביניהם: תקן ניהול איכות **ISO-9001**, תקן ניהול סביבה **ISO-14000**, בטיחות **ISO-45000** ותקן ניהול אנרגיה.

בנשר רמלה כ-280 עובדי מפעל וכ-150 עובדי קבלן קבועים.

טכנולוגיה

תהליך ייצור הצמנט הינו תהליך רציף המחולק למספר אזורים תפעוליים (איור 2). תחילתו בהזנת חומרי גלם המשמשים לייצור הקלינקר, בתהליכים פיזיקאליים הכוללים גריסה, טחינה, ייבוש ומינון הרכב מדויק. תערובת הגלם הטחון מוזנת לראש מגדל המחמם המוקדם להשבת חום מגזי הפליטה של הכבשן, ומשם לריאקטור נייח (המכונה קלצינר) מחומם דלק בטמפ' אופייניות של כ-900°C שתפקידו פירוק אבן הגיר ויצירת סיד. משם זורם הגלם אל הכבשן הסובב, ובטמפ' של כ-1450°C הופך בסדרת תהליכיים מינרלוגיים סבוכים לקלינקר - חומר גרנולרי שחור-אפור אשר מהווה את המרכיב העיקרי בצמנט.



איור 2. תרשים סכמטי המתאר מתקן ייצור צמנט אופייני בטכנולוגיה יבשה, מתוך ה-BREF של תעשיית הצמנט

הקלינקר מקורר במהירות לשימור תכונותיו ההידראוליות במקרר אוויר, שתפקידו הנוסף הוא השבת חום לתהליכים הקודמים, ומשם מועבר לטחינה דקה בטחנות הצמנט, עם מרכיבים נוספים בהתאם לסוג הצמנט. הצמנט הטחון מאוחסן בסילוסים (ממגורות) ייעודיים, ומשם משווק בתפוזרת או ארוז בשקים ללקוחות החברה.

עם המצאת הצמנט והקלינקר המודרניים בסוף המאה ה-19 התפתחה הטכנולוגיה הבסיסית לייצור הקלינקר בכבשן, ועד לזמן זה מהווה הכבשן הסובב את המרכיב החיוני והחשוב ביותר במערכת הייצור. לתפקוד הכבשן השפעות משמעותיות ביותר מבחינת תפוקות הייצור, התשומות ואיכות המוצר.

פיתוח מגדל המחמם המוקדם באמצע המאה ה-20 והמצאת הקלצינר הניח הביאו לפריצות דרך טכנולוגיות מבחינת תשומות האנרגיה ותפוקת הייצור בתעשיית הצמנט. מבחינה תהליכית הגלם הטחון מוזן לראש המגדל, ועובר בנפילה גרביטציונית סדרה אנכית של ציקלונים, כשמנגד זורמים גזי הפליטה החמים הנוצרים בתהליכי שריפת הדלק בכבשן

ובקלציינר. מעברי החום גז-מוצק יעילים מאוד, ולמעשה ישנה השבת אנרגיה כמעט מלאה במהלך זה, תוך חימום הגלם מטמפ' כניסה של כ- 100°C עד לטמפ' הקלציינר באזור ה- 900°C . תגובת פירוק האבן לסיד מתרחשת בקלציינר וצורכת כ-60% מהאנרגיה הכללית בתהליך. משם זורם הגלם אל הכבשן הסובב להשלמת תהליך יצירת הקלינקר.

חומרי גלם

ניתן לחלק את חומרי הגלם במפעל מלט לשני שלבי הייצור העיקרים בייצור הצמנט: שלב ייצור הקלינקר ושלב טחינת הצמנט.

חומרי הגלם המשמשים לייצור קלינקר מספקים למערכת הכימית ארבעה מרכיבים עיקריים, והם: תחמוצת סידן (CaO), סיליקה (SiO_2), אלומינה (Al_2O_3) וברזל (Fe_2O_3). אבן גיר מהווה את המרכיב העיקרי במערכת ותכולתה בקלינקר כ-75%. חוואר וחרסית (בדרך כלל קרקעות חקלאיות) מספקות סיליקה, אלומינה וברזל. להרכב הכימי המדויק של הקלינקר יש השפעה רבה על התהליכים שמתרחשים בכבשן; הקינטיקה והיעילות האנרגטית של התהליכים, רמות סחרור הגזים הנדיפים בכבשן, בניית ציפויים, פליטות גזים וכדומה. להרכב המדויק של חומר הגלם יש גם השפעה קריטית על איכות הקלינקר והצמנט שייטחן ממנו. בכדי להגיע להרכב כימי מדויק מוסיפים לתערובת הבסיסית של גיר, חוואר וחרסית, חומרים מתקנים: בוקסיט ואפר פחם העשירים באלומינה, חול סיליקה כמתקן סיליקטי, ו-Mill scale (תוצר לוואי של ייצור פלדה) כמתקן ברזלי. כל חומר ממונן למערכת בנפרד, כשמערכות בקרת הרכב כימי בזמן אמת, ודיגומי מעבדה על בסיס שעתי מוודאים עמידה ביעדי ההרכב. תערובת הגלם נטחנת לגודל גרגר אופייני של כ-10-20 מיקרון במטרה להבטיח העברת חום יעילה במגדל המחמם המוקדם, וקינטיקה מהירה של התהליכים המינרלוגיים המתרחשים במעבר מ-"גלם" ל-"קלינקר" בכבשן. בטמפ' הגבוהה של הכבשן "מתארגנת" הכימיה הכללית הזו ליצירה של ארבעה מינרלים חדשים המרכיבים את הקלינקר ומכונים בתעשיית הצמנט אל"ט (Ca_3SiO_5), בליט ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$), אלומינט ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) ופריט ($\text{Ca}_4\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_{10}$). שני ה-Ca-סיליקטים, האל"ט והבליט, מהווים כ-80-85% מהקלינקר ולהם תפקיד מרכזי בתהליכי ההידרציה והתפתחות החוזק.

חומרי הגלם המשמשים לייצור צמנט כוללים מרכיבים "קבועים" ומרכיבים "משתנים" לפי סוגי הצמנט השונים. כל הצמנטים התקניים מכילים קלינקר וגבס. במגע עם מים עובר הצמנט סדרה מורכבת של תהליכי הידרציה, בסופם מפתח הבטון חוזק פיזי ועמידות לתנאי הסביבה בהם הוא אמור לתפקד. הסולפט מהגבס מעכב בכמה שעות את תהליכי ההידרציה, ונותן את האפשרות לייצר בטון מתועש במפעלי בטון מבוקרים מודרניים, ולספק את הבטון כשהוא עדין במצב זרים אל אתרי הבנייה במערבלים ייעודיים (מיקסרים). בנוסף על שני המרכיבים הללו ניתן להוסיף לצמנט אבן גיר וחומרים פוצולאניים שונים, טבעיים או ממקורות תעשייתיים שונים. אבן גיר נחשבת 'מלאן' (filler) ולא מיוחסות לה תרומות משמעותיות מבחינת תפקוד הצמנט בבטון. פוצולאן הוא חומר המכיל סיליקה אמורפית פעילה, המסוגלת בתנאים מתאימים להשפיע על תגובות ההידרציה ותפקוד הצמנט בבטון. ידועים פוצולאנים טבעיים, שמקורם בפעילות געשית, וידועים פוצולאנים תעשייתיים, בעיקר אפר-פחם וסיגים של תנורי היתוך ברזל. כל חומר ממונן לטחנת הצמנט בנפרד, כשדיגומי מעבדה על בסיס שעתי מוודאים עמידה ביעדי איכות והרכב. תערובת הצמנט נטחנת לגודל גרגר אופייני של כ-10-20 מיקרון במטרה להבטיח קינטיקה יעילה של תהליכי ההידרציה המתרחשים במעבר מאבקה טחונה לרכיב בטון קשוי.

המעבר לשימוש בתחליפים ובפסולות – פתרון סביבתי ברמה ארצית
תעשיית הצמנט מתבססת על תהליכים עתירי אנרגיה לצורך ייצור הקלינקר בכבשנים. במהלך 20 השנים האחרונות נראה תהליך כלל עולמי שמטרתו התבססות על מקורות אנרגיה מפסולות על חשבון דלק פוסילי. מדינות אירופה מובילות את התהליך הזה מלחצי אסדרה וכלכלה חריפים יותר הקיימים בשוק האירופאי, אך נראה שתהליך דומה מתרחש למעשה בעולם כולו, וכן בישראל.

נכון להיום שיעור החלפת הדלק הפוסילי בפסולות בנשר-רמלה עומד על קרוב ל-30%, ונשר שמה לעצמה ליעד להכפיל את הכמות בשנים הקרובות. המקורות העיקריים לתחליפי דלק הם: **RDF** (דלק המיוצר מטיפול מקדים בפסולות עירוניות ותעשייתיות), צמיגים גרוסים, וממסים אורגאניים תעשייתיים. כמו כן עושה נשר שימוש בפסולות כתחליף לחומרי גלם שונים, כגון קרקעות לטיפול מפרויקטים תשתיתיים ומאתרי בניה, פסולות מייצור בטון ועוד.

השימוש בפסולות כמקור לאנרגיה וגלם טומן בחובו שלושה ערכים חיוביים ברמה הלאומית: הפחתת הטמנת פסולת, הפחתת פליטות גזי חממה לאוויר והפחתת ניצול משאבי טבע מתכלים. ביחד עם היתרונות הסביבתיים הדבר מעניק לתעשייה המקומית יתרונות כלכליים, ומגדיל את מעגל התעסוקה המקומי גם בתעשיית הצמנט וגם בתעשיות אספקת הפסולות וייצור התחליפים.

השימוש בתחליפי גלם ודלק מעוגן בתהליכי אסדרה מעמיקים שמבטיחים טיפול סביבתי ובטוח, תוך הפעלת מערכת ניהול מקיפה המוסדרת בהיתרים והרישיונות של המפעל.

אתגרים סביבתיים

תעשיית הצמנט עושה שימוש נרחב בחומרי-גלם ודלקים, וניתן למנות כמה אתגרים סביבתיים איתם היא מתמודדת, ברמה העולמית, בהווה ובעתיד הנראה לעין.

נכון להיום האתגר המשמעותי ביותר הוא הפחתת פליטת גזי חממה. תעשיית הצמנט אחראית על כ 6%-7% מכלל פליטות CO₂ העולמיות, בתהליכי פירוק אבן גיר בכבשן ושריפת דלקים. קיימים שני תהליכים משמעותיים דרכם ניתן להפחית פליטת גזי חממה, והם שימוש בפסולות עם רכיב ביומסה כמקור לדלק, והפחתת תכולת הקלינקר בצמנט. את המהלך הראשון מקיימת תעשיית הצמנט ביחד עם שוק הפסולות ההולך ומתפתח, ואת המהלך השני מפתחים ביחד עם שוק יצרני הבטון, והתאמת הבטונים לצמנטים דלי-קלינקר חדשניים.

מפעלים לייצור צמנט נמצאים בדרך-כלל קרוב לריכוזי אוכלוסיה, במטרה להפחית את מרכיב ההובלה של הצמנט והבטון. כתוצר לוואי צריכה להתמודד התעשייה עם לחצים הקשורים בקרבה גיאוגרפית זאת, מבחינת נושאי נראות ונוף, רעש, מטרדי ריח ואבק.

הקירבה למוקדי אוכלוסיה והגידול המהיר במודעות הציבור לנושאים סביבתיים מחייב את תעשיית הצמנט לקיום דיאלוג שקוף ופתוח מול הקהילה, ועדכון תפישה ודרכי פעולה.

לחצי הסביבה מתורגמים ברמת האסדרה לתקני פליטה הולכים ומחמירים ואכיפה לוחצת. מזהמי האוויר העיקריים של תעשיית הצמנט, להוציא גזי חממה, הם אבק ותחמוצת חנקן, ותקני הפליטה המתהדקים מחייבים השקעות ענק בהקמה והפעלה של מתקני הפחתה.

תמ"א 1/4/14**הליך אישור התוכנית**

עם הקמת הקווים היבשים במפעל רמלה במהלך שנות ה-90 כמענה לגידול צרכי הבנייה ולעליה הגדולה ממדינות חבר העמים, היה ברור שעתודות הגיר במחצבה בגבולות של אז לא יספיקו עבור הגדלת הייצור בקווים החדשים.

לכן במקביל לבניית הקווים החדשים החלו בירורים בנשר ומול הרשויות למציאת פתרון לצורך בהגדלת מצבת עתודות הגיר למפעל רמלה. במסגרת זו בוצעו סקרים בשטחים קרובים למחצבה וגם מרוחקים יחסית, דוגמת אתר גימזו שמעבר לכביש 1 ואתר מבוא חורון מאזור נטף, ואפילו נבחנו רעיונות של כרייה תת קרקעית מתוך קירות המחצבה. עם גילוי מערת איילון באפריל 2006 וההתחייבות של נשר לשמר את המערה מצב יתרת העתודות החמיר. בעיית המחסור בעתודות גיר למפעל רמלה החדש הגיע עד לרמת המועצה הארצית לתכנון ולבנייה ובמרץ 2010 הורתה המועצה הארצית על קידום תכנית מתאר ארצית ברמה מפורטת (פרוטוקול המועצה הארצית מס' 518, 2010). הרעיון בבסיס ההחלטה היה לבחון ולמצות את כל העתודות האפשריות סביב מחצבת נשר רמלה, במרחב שהוגדר כ'משולש הכבישים' (איור 3); כביש 6 מצפון מערב, כביש 1 מצפון מזרח וכביש 431 מדרום. זאת כחלק ממדיניות תמ"א 14 ב' להעדיף פתרונות של הרחבה של מחצבות קיימות על פני פתיחה של אתרים חדשים.

היות ומדובר על תוכנית מקיפה שנפרשת על פני מספר רשויות מקומיות, וכרוכה בהסטת תשתיות ארציות כולל הטיית נחל איילון הוחלט שהיא תוגש במתכונת של תוכנית מתאר ארצית (תמ"א), אולם ברמה מפורטת. המשמעות של כך היא שמתוקף תוכנית זו ניתן יהיה להוציא רישיונות חציבה. על מנת לקדם את התוכנית הוקמה ועדת עורכים וחברת גיאופרוספקט נבחרה לערוך את התוכנית.



איור 3. 'משולש הכבישים'; מרחב הבדיקה של תמ"א 1/4/14 על פי החלטת המועצה הארצית מס. 518 בהמשך לכך התקיימו ישיבות של ועדת העורכים לתוכנית, במהלכן הוצגו חלופות וגובשה חלופה נבחרת להמשך תכנון. בדצמבר 2012 המליצה הולנת"ע (ועדת המשנה לנושאים תכנוניים עקרוניים), ביושבה כוועדת היגוי לתוכנית, על החלופה הנבחרת וכשנה לאחר מכן המליצה למועצה הארצית על העברת התוכנית להערות הועדות המחוזיות והשגות הציבור. בנובמבר 2014 החליטה המועצה הארצית על העברת התוכנית לאישור הממשלה ובאוגוסט 2015 אושרה התוכנית.

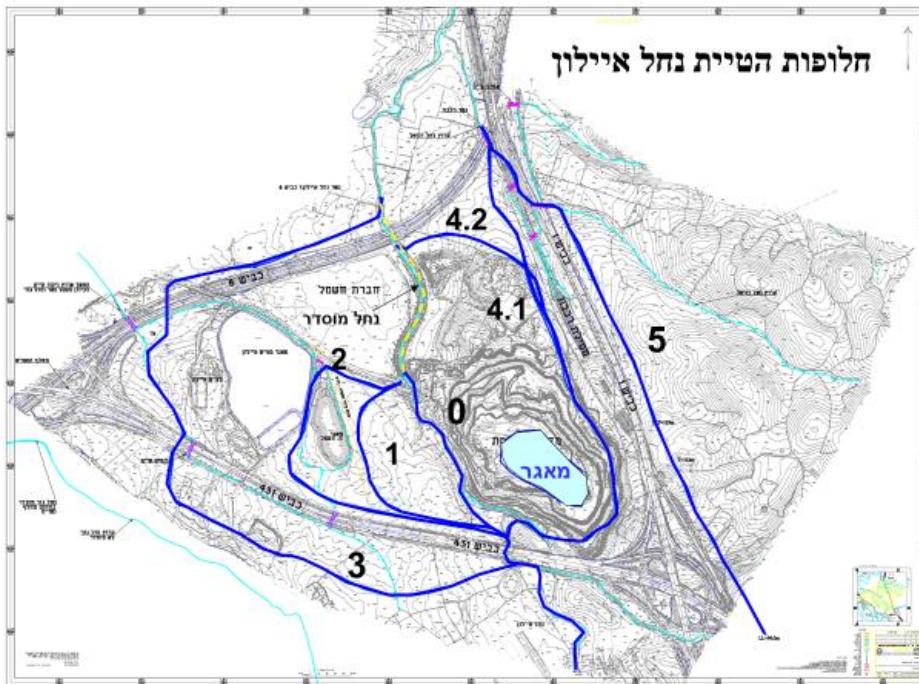
עיקרי התוכנית

תמ"א 1/4/14 הינה תכנית מתאר ארצית ברמה מפורטת לייעוד שטחים לכרייה ולחציבה ולהתוויית נחל איילון בסמוך למחצבת נשר רמלה. מטרת התוכנית לייעד קרקע לכרייה ולחציבה של גיר למלט לשנת היעד 2040, תוך ניצול מיטבי של חומר הגלם במשולש התשתיות התחום בין הדרכים 1, 6 ו-431 (איור 3).

התוכנית מאפשרת שיקום חלק משטח המחצבה (כ-450 דונם) לאחר מיצוי חומר הגלם וייעודו למאגר לקליטת מי שיטפונות של נחל איילון (יפורט בהמשך). במסגרת התוכנית תוכננה הטיית נחל איילון לצורך ניצול מיטבי של חומר הגלם ויצירת שטח ציבורי פתוח סביבו, וכן הסטת תשתיות ארציות אשר פרושות במרחב 'משולש הכבישים' וחוצות את השטחים הפוטנציאליים להרחבת המחצבה (קו מתח עליון, קווי מים, קו ביוב). היקף העבודות בתוכנית הוערך בכ-140 מיליון טון גיר למלט שיספיקו עד לשנת 2040. שטח התוכנית הוא כ-2300 דונם.

פרויקט הטיית נחל איילון

נושא מהותי בתוכנית, מבחינת ניצול מיטבי של פוטנציאל חומרי הגלם במשולש הכבישים היה התוויה מחודשת של נחל איילון אשר חוצה את המרחב הנדון. לצורך כך הוכנו ונדונו 5 חלופות להטיית הנחל (איור 4) ולאחר בחינת החלופות מכלל ההיבטים הרלוונטיים; אקולוגיה, ניקוז, זמינות השטח, שלביות הביצוע וכו', הוחלט לבחור בחלופה מס' 1 (איור 5). פרויקט הטיית נחל איילון כלל עבודות עפר בהיקף של כ-1.7 מיליון מ"ק, העתקת קו ביוב ממודיעין וקו מקורות מתוך שטחי החציבה המיועדים אל מעבר לתוואי ההטיה של הנחל, חפירת מובל מים מתחת לכביש המוביל למחצבה, מיגון מסוע האבן הצמוד לכביש המחצבה, בניית גבעות נופיות לאורך תוואי ההטיה, גשר להולכי רגל מעל הנחל, מצפור ועיצוב אקולוגי של התוואי על פי הנחיות אקולוג התוכנית ואדריכלית הנוף שלה. עיצוב זה כלל שתילה של אלפי עצים, דיפון קטעים בקרקעית הנחל באבנים גדולות להגנה מפני כרסום על דפנות הנחל. הפרויקט בוצע ונוהל על ידי נשר בשיתוף עם חברת מרום תובל. העבודות על הפרויקט החלו במרץ 2017 והסתיימו בשלהי 2019, בעלות כוללת של 100 מיליון ש"ח.



איור 4: חמש חלופות הטיית נחל איילון שנבחנו בוועדת העורכים של תמ"א 1/4/14



איור 5: חלופה 1, החלופה הנבחרת מתוך החמש שבאיור 4

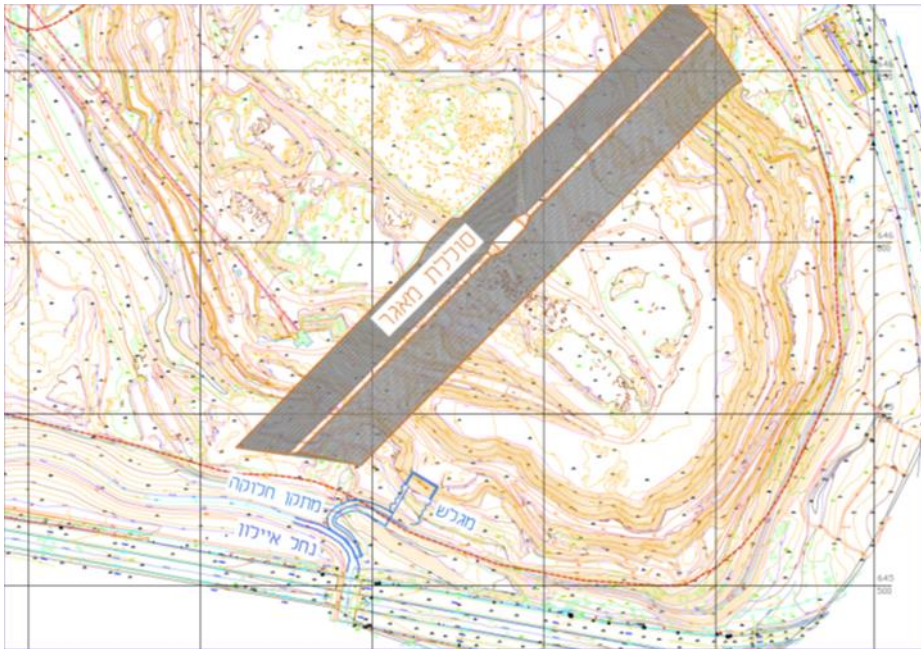
השתלבות בפרויקט המסילה הרביעית בנתיבי איילון כאחד הפתרונות לקליטה והאטת אירועים שיטפוניים בנחל איילון

הוספת מסילה רביעית לאורך נתיבי איילון היא פרויקט לאומי חיוני ומהווה חלק מתוכניות הפיתוח של התחבורה הציבורית במדינה כפתרון לצוואר הבקבוק הארצי בפרוודור איילון.

הוספת המסילה הרביעית בנתיבי איילון יצמצם באופן משמעותי את חתך הזרימה בתעלת נחל איילון התחומה בין נתיבי איילון והמסילות העוברות בו. לכן פרויקט המסילה הרביעית מחייב מתן מענה מקדים לאירועי זרימה משמעותיים בנחל איילון ויובליו. לצורך כך הוצעו פתרונות במעלה הנחל, המתבססים על איגום והחדרה במחצבות נשר, מודיעין ונטוף ובמאגר משמר איילון, ופתרונות במורד, הכוללים את פארק אריאל שרון, פשט ההצפה בשטחי מקווה ישראל ומובל תת-קרקעי לים. במסגרת תמ"א 1/4/14 תוכנן מאגר ויסות והחדרה באגף הדרום מזרחי של מחצבת נשר אשר יקלוט זרימות שיטפוניות מעל מפלס מסוים בנחל איילון המוסט. למאגר במחצבת נשר אושרה תכנית ניקוז אשר נמצאת בשלב זה בתכנון מפורט על ידי נתיבי ישראל ובתיאום מול נשר.

תוכנית המאגר מורכבת משלושה אלמנטים (איור 6):

1. מתקן חלוקה אשר ינתב את המים הזורמים באיילון מעבר לספיקה מסוימת לכיוון המגלש. מתקן זה יכול גם אפשרות לעצור את ההזרמה למאגר המחצבה במקרה שמפלס המים במאגר יאיים לגלוש מעבר לסכר.
 2. מגלש של כ-60 מ' שיאפשר הזרמת כמות משמעותית של מים תוך שימור נתיבי הגישה במדרגת החציבה של מפלס 55.
 3. סוללה/סכר בגובה של 17 מ' אשר יאפשר אגירה של כ-4 מיליון מ"ק מים ללא הצפת כל רצפת המחצבה מעבר לסכר.
- במצב הנוכחי פוטנציאל אגירת המים במאגר אינו עולה על 2 מיליון מ"ק. זאת בשל העובדה שמתאר קירות החציבה בגזרה הנתחמת בסוללה אינו במצבו הסופי ויש בו עדיין נפח משמעותי של חומר גלם המיועד לחציבה.
- נשר עושה מאמץ ניכר להשלים בשנים הקרובות את החציבה המלאה של גזרה זו כך שבסופה יתקבל הקיבול המתוכנן של המאגר בהיקף של כ-4 מיליון מ"ק.



איור 6: תוכנית ראשונית של מאגר הוויסות לזרימות שיטפוניות בנחל איילון

מחצבת נשר רמלה

חתך סטרטיגרפי (גיאופרוספקט, 2014)

החתך הסטרטיגרפי בתחום מחצבת נשר רמלה מורכב מהיחידות המפורטות להלן מהעתיקה לצעירה (איור 7).

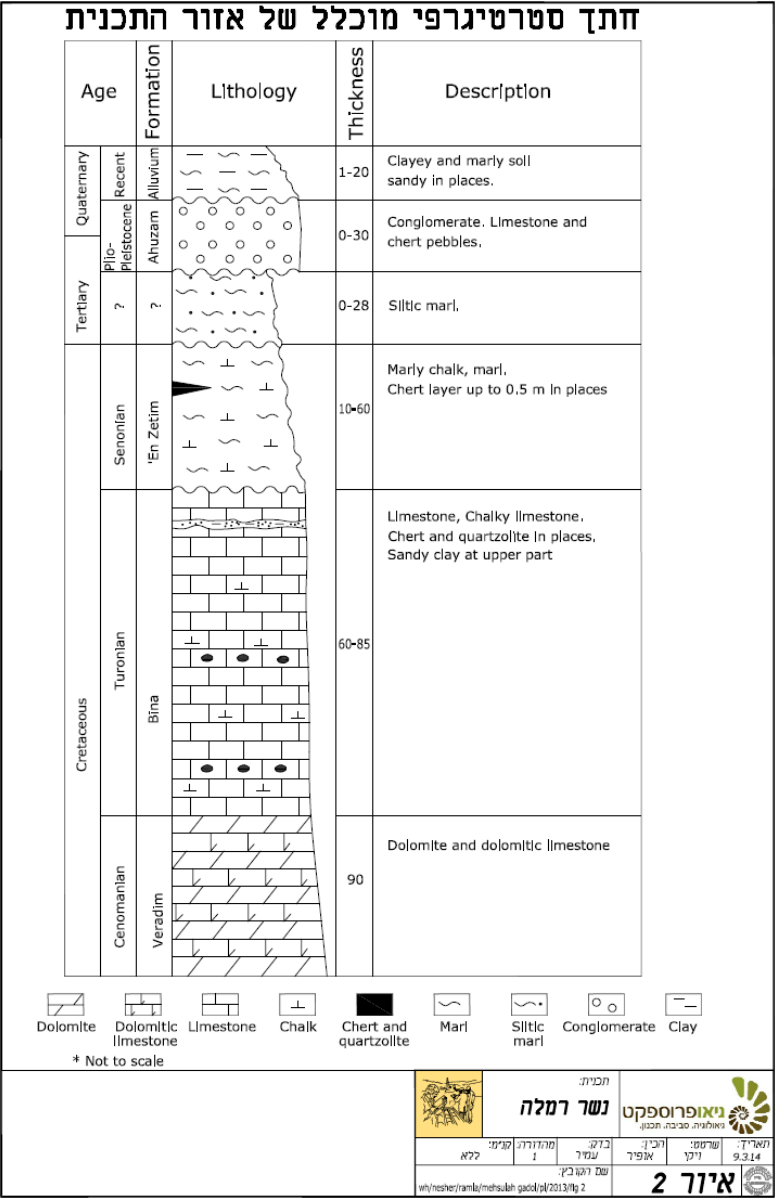
תצורת בעינה

מגיל טורון. המסלע מורכב בעיקרו אבני גיר ואבני גיר קירטוניות, המהוות מרכיב עיקרי בייצור הצמנט. כינויה השגור בנשר הוא 'טורון'.

תופעות צירור בעלות מאפיינים שונים מופיעות בשלושה אופקים לאורך חתך התצורה. היות וצור הוא חומר הרסני לתהליך ייצור המלט נדרש לפנות חלק מהתופעות צור אלו.

כ-5 עד 10 מ' מתחת לגג היחידה מצוי אופק של חרסית חולית, שעוברת בהדרגה לגיר בלוי בבסיסה. עוביה השכיח הוא 5-10 ס"מ, אולם במקומות היא מתעבה לחצי מטר ויותר. יחידה זו מקבילה ל'יחידה הקלסטית' של תצורת נצר, המוכרת מהנגב הצפוני (Sandler, 1996).

תופעות קארסטיות בעלות מאפיינים של קארסט היפוגני (נוצר בתוך מפלס מי התהום) (נעמן, 2011) שכיחות ביותר באזור, מיוחסות לאנומליית איילון (Frumkin and Gvirtzman, 2006). עובי התצורה באזור נע בין 60 ל-85 מ'.



איור 7. חתך עמודי מוכלל במחצבת נשר רמלה וסביבתה. מתוך גיאופרוספקט, 2014

התצורה מונחת בהתאמה על גבי תצורת ורדים, בסיסה אינו חשוף בשטח המחצבה. במערב עוברת התצורה לתלמי יוסף.

תצורת עין זיתים

מגיל סנון. המסלע מורכב בעיקר חוואר-קירטוני, אשר מכיל מעט פוספט (בד"כ בין 1.5 ל-3% P_2O_5). כינויה השגור בנשר הוא 'סנון'.

במקומות מופיעה באמצע התצורה לשון צור דקה ועדשתית, בעובי של עד כחצי מטר, המיוחסת לתצורת מישאש. עובי תצורת עין זיתים באזור נע בין 10 ל-60 מ'. היות ועל פי רוב זו היחידה העליונה ברצף הקרבונטי של הקרטיקון, מדובר בדיקוק כתוצאה מבליה והסרה ולא כתוצאה משינויי עובי במקור (השתפלות דיפרנציאלית ופעילות סינטקטונית). המסלע החווארי-קירטוני של תצורה זו משמש חומר גלם בייצור הצמנט (יחד עם סלעי תצורת בעינה).

התצורה מונחת באי התאמה על גבי תצורת בעינה. אי ההתאמה מתבטאת בשכבת **Hard ground** קשה בגג תצורת בעינה ובשינוי עובי ביחידה העליונה של תצורת בעינה (בין גג התצורה לאופק היחידה הקלאסטית).

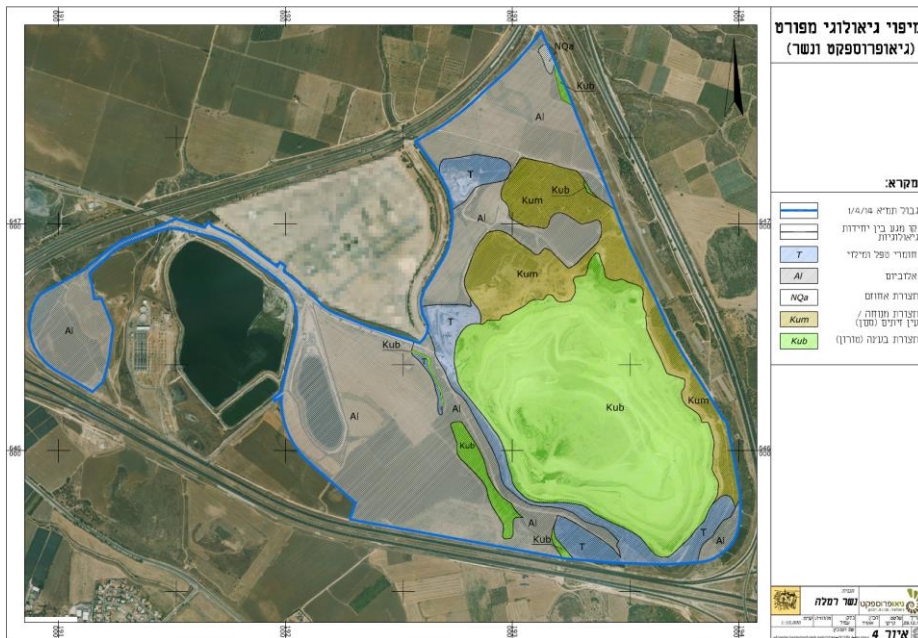
לחומר התצורה החווארי יחסית ולתכולת ה- P_2O_5 בו יש השפעה משמעותית על איכות תערובת הגלם המוזנת לכבשן וכן על איכות הצמנט המיוצר. מסיבה זו לפרמטר ה'יחס סנון' (כך מכונה בנשר תכולת החומר מתצורת עין זיתים בתערובת הגלם המוזרמת למפעל מהמחצבה; תצורת בעינה + תצורת עין זיתים) יש חשיבות רבה בתכנון ותפעול המחצבה עד כדי כך שהוא אחד הגורמים העיקריים אשר עיצבו את מבנה המגרסה הראשונית שבתוך המחצבה (ראו סעיף שיטת החציבה).

חוואר סילטי

יחידת חוואר סילטי זהוב, אפור וחום בעובי של 2-28 מ'. היחידה אותרה רק בתת הקרקע, בקידוחי המרחבים השטוחים מכוסי הקרקע האלוביאלית שמצפון וממערב לבור החציבה הנוכחי. נראה על פי קידוחים אלה שהשתרעותה מוגבלת לכיסים/עדשות בקוטר של עד מספר מאות מטרים ובעובי של עד כ-30 מ'. היחידה מונחת באי התאמה אירוזיבית על תצורת עין זיתים או בע'נה. נעשה ניסיון לקבוע את גיל היחידה באמצעות פורמיניפרה אולם לא ניתן

היה לקבוע את גילה או את השתייכותה לתצורה מוכרת כלשהי באופן חד משמעי (אלמוגי-לבין, 2011). מעל החוואר הסילטי מופיעות, שוב באי התאמה יחידות האלוביום או קונגלומרט אחוזם.

ההרכב הכימי של היחידה מגוון ו'רועש': תכולת הקרבונט בה נמוך יחסית (50-80% ~), יחס הסיליקה לאלומינה והברזל ביחידה (פרמטר משמעותי בתעשיית הצמנט המכונה סיליקה מודול) גבוה יחסית ו'רועש' ביחס לחומרי הגלם המתאימים לשימוש עבור ייצור קלינקר, ותכולת הזרחן בה בינוני עד נמוך (>1%). רעש כימי זה בהרכב היחידה מקשה על האפשרות לנצלה במערך חומרי הגלם של המפעל ברמלה. חלקים ממנה יחייבו מינון נמוך בתערובת הגלם וחלקים אחרים יהיה צורך לפנות.



איור 8: מיפוי גיאולוגי מפורט בתחום 'הקו הכחול' של תוכנית תמ"א 1/4/14 (גיאופרוספקט, 2014)

תצורת אחוזם

מגיל פליוקן-פלייסטוקן מוקדם. התצורה בנוייה מקונגלומרט פלוביאלי, פולימיקטי, של גיר, קירטון וצור, עם מטריכס חרסיתי-חולי ולעיתים אף חווארי. מיון החלוקים בה גרוע ומידת העיגוליות בה משתנה. עובי התצורה נע בין 0 ל-30 מ' והיא מופיע כשכבה רציפה בעובי

משתנה במרחבים השטוחים, מכוסי הקרקע, שמצפון וממערב לבור החציבה הנוכחי (איור 8).

התצורה מונחת באי התאמה אירוזיבית על גבי סלעי החוואר הסילטי, הקירטון של תצורת עין זיתים, ובמקומות מסוימים אפילו על גיר בע'נה. תצורה זו מהווה חומר טפל. היא אינה ניתנת לשימוש בתהליך ייצור הצמנט בעיקר בשל חלוקי הצור השכיחים בה.

אלוביום

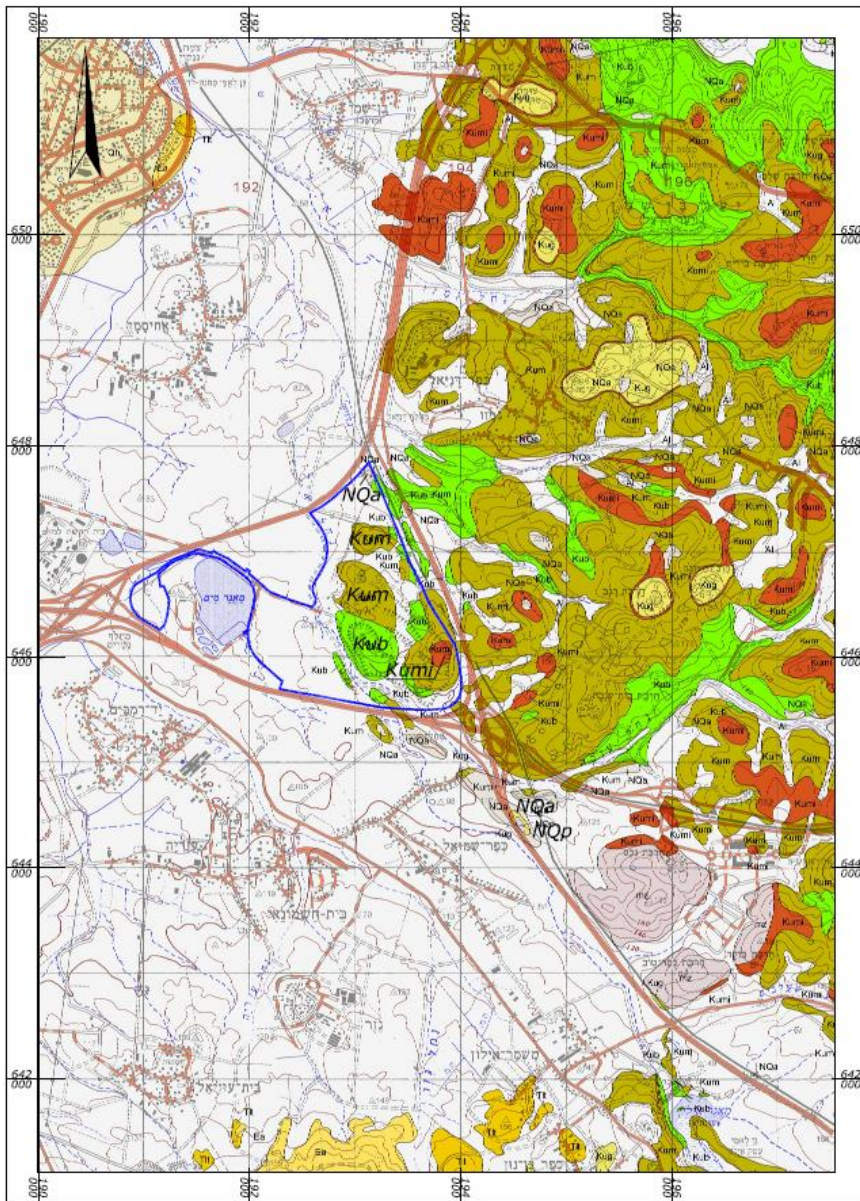
מגיל קוורטר. קרקעות חרסיות אלוביאליות, בד"כ שמנות עם תצבירי קרבונט. על פי רוב החרסית בקרקעות שמנה בכל החתך, אולם במקומות היא נעשית חולית בחלק התחתון. קרקע זו משמשת לעיבודים חקלאיים. קרקעות אלו יוצרות כיסוי המשתרע על נרחבים מצפון וממערב לבור החציבה הנוכחי. העובי המאפיין של חתך הקרקעות לא עולה על 10 מ', אולם התעבויות מקומיות של מעין בורות חרסית בעובי שעשוי להגיע ל-15 ו-20 מ' הן תופעה שכיחה. הקרקעות החרסיות השמנות, שעומדות בהגדרות האיכות הנדרשות לייצור, משמשות כחומר גלם חרסיתי לייצור הצמנט.

המבנה הגיאולוגי

אזור המחצבה מצוי ברכס אנטיקלינלי רדוד מערבית לסינקלינה השטוחה אשר מלווה ממערב את אנטיקלינת רמאללה. ההתרוממות הסטרוקטורלית הזו יוצרת את גבעות הנארי הטרשיות של השפלה הפנימית באזור זה ואשר מהן התחילה להתפתח המחצבה (איור 9).

בבחינה כללית של סביבת המחצבה נראה שיש נטייה מתונה למערב ולצפון מערב. קווי שבירה מובהקים, אשר חוצים את כל החתך, לא אובחנו בקירות המחצבה. מצד שני שכיחות בהן הסטות אנכיות בס"ג של עד 20 ואפילו 30 מ'. להעתקות אנכיות אלה יש בד"כ צורה של מעין 'קערות' בקוטר של עשרות עד מאות מטרים, כאשר בשוליהן יש נטיות שעשויות להגיע לכדי עשרות מעלות. העתקות אלה אינן חודרות את כל חתך תצורת בעינה, ונראה שמקורן בקריסות והתמוטטויות לתוך חללים קארסטים.

ראשית המחצבה היתה במחשופים של גיר בעינה בדופן הצפונית של נחל ענבה שהלכו והתפשטו צפונה לאורך נחל איילון וצפון מזרחה לגבעות הטרשים מצופות נארי, הביטוי הטופוגרפי לרכס האנטיקלינלי הרדוד באזור (גיאופרוספקט, 2006). כיום, לאחר תוכנית



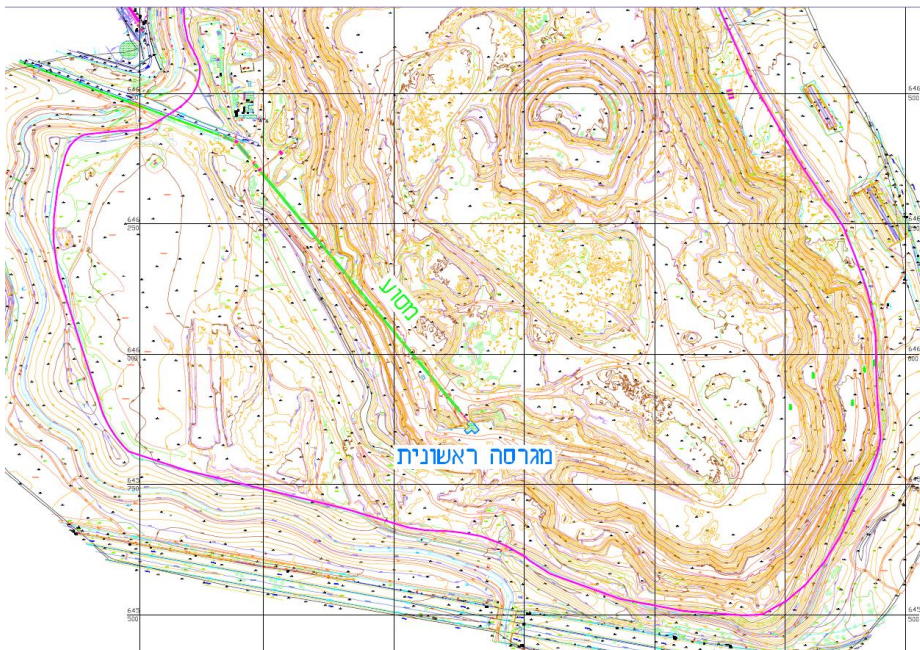
איור 9: ה'קו הכחול' של תוכנית מחצבת נשר רמלה על רקע החלק הדרום מערבי של המפה הגיאולוגית גיליון לוד (יחיאלי, 2008)

הרחבה למחצבה; תמ"א 1/4/14, התפשטו שטחי המחצבה לעמקים שהשתרעו ממערב וצפון מערב לגבעות הטרשים של ראשית החציבה. בעמקים אלה מצוי חתך רביעוני המונה באי-התאמה אירוזיבית על תצורות עין זיתים ובעינה (איור 7 ו-8).

שיטת החציבה

תכונות המסלע של החתך הגירי של תצורת בעינה שהוא קירטוני ורך יחסית מאפשר חציבה באמצעות חריש שן בולדוזר. הבולדוזר חורש תא שטח בחזית קיר חציבה כלשהו ולאחר מכן דוחף את החומר החרוש אל המדרגה שמתחתיו, ומשם הוא מועמס ע"י שופלים למשאיות המחצבה.

משאיות המחצבה מובילות את החומר למגרסה הראשונית שבדופן הדרומית של המחצבה (איור 10). החומר נגרס במגרסה הראשונית אל מסוע באורך של כ-3 ק"מ שמוביל את החומר למפעל, להמשך גריסה, ערבוב וטחינה.



איור 10: המגרסה הראשונית שבעומק המחצבה על הדופן הדרומית, והמסוע שמוביל את חומר הגלם למפעל

היות ויש שני סוגי חומר קרבוני במחצבה; אבן גיר קירטונית מתצורת בעינה – 'טורון', וחואר קירטוני מתצורת עין זיתים – 'סנון', אשר צריכים להיות מסופקים ביחס קבוע לתהליך הייצור – 'יחס הסנון', ישנם שני בורות קליטה במגרסה הראשונית; אחד לטורון ושני לסנון. האבן הגרוסה יוצאת מהמגרסה בשני זרמים אל המסוע למפעל ביחס הסנון שנקבע מעת לעת על בסיס שיקולי מצאי חומר הגלם, יעדי הרכב חומר הגלם, ושיקולים תפעוליים. בד"כ יחס הסנון הוא סביב 20%, שהוא תוצאה של מכלול השיקולים שפורטו קודם.

הצריכה השנתית הממוצעת של חומר הגלם מהמחצבה היא 5.5 מיליון טון. למרות שהמחצבה והגריסה הראשונית עובדים סביב השעון 7 ימים בשבוע, יש הרבה הפסקות בגריסה אפילו ברמה יומית. וכדי לספק את הצריכה השנתית של המפעל, כולל לצריכות שיא, כושר הגריסה המירבי של המגרסה הראשונית הוא 1200 טון\שעה, ותפוקת המחצבה המירבית ליום עומדת על כ-25 אלף טון.

בעית החללים הקארסטים במחצבה

המעבר מחציבה בשיטת הקידוח-פיצוץ לחריש בולדוזר התרחשה ב-1992, עם תחילת בניית המגרסה הראשונית והמסוע בתוך המחצבה. בין היתר בשל הרגישות ההנדסית של מתקנים אלה.

ב-22 לדצמבר 1997, כחמש שנים לאחר המעבר לשיטת החריש אירע אסון במחצבה כאשר בולדוזר צנח כ-40 מ', תוך כדי החריש, לקרקעית חלל ענק בקוטר של כ-25 מ' (איור 11), ומפעילו מר חסון פארס ז"ל נהרג.

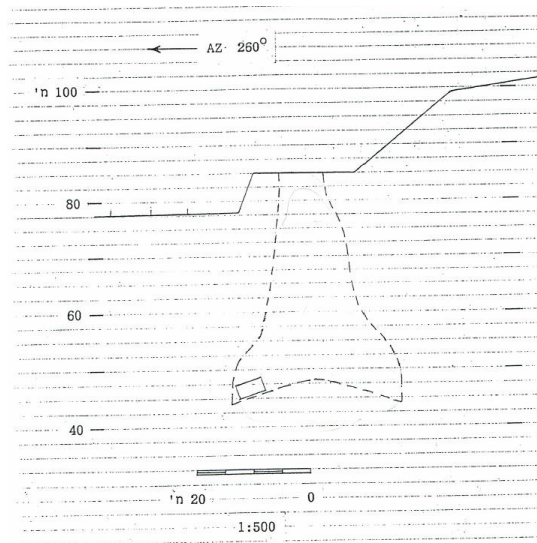
בעקבות האסון בוצעו מספר פעולות:

ג. הוחל באופן מיידי בביצוע קידוחי בטיחות שיטתיים בכל משטחי העבודה והדרכים

ד. הוכן דו"ח גיאוטכני ע"י ד"ר אבנר ארזי אשר הוזמן ע"י משרד העבודה ונשר (ארזי, 1998)

ה. בוצע סקר גיאומורפולוגי וגיאואידרולוגי ראשוני (פרומקין וארזי, 1999)

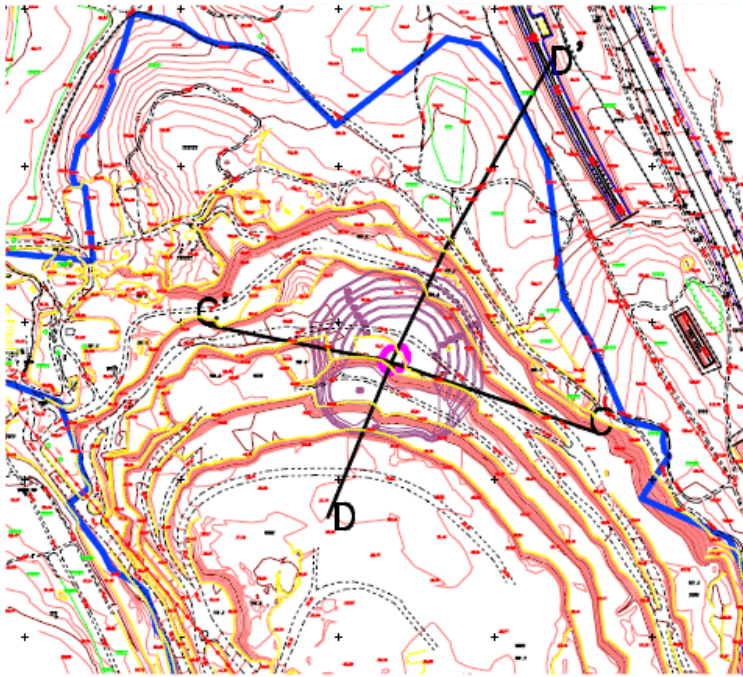
ו. בוצעו ניסיונות איתור חללים בשיטות גיאופיזיות מגוונות; GPR, גיאוחשמל, דיפרקציה סייסמית



איור 11: חתך מקורב של מערת האסון. מקומו המקורב של הדחפור מסומן במלבן (אריז, 1998) לאחר גילוי מערת איילון באפריל 2006 נוספו שני מחקרים משמעותיים להבנת מערכת הקארסט ויציבות החללים הקארסטים במחצבה:

א. מחקר בנושא יציבות החללים הקארסטיים כפונקציה של גודל החלל; בוצע ע"י המחלקה למדעי הגיאולוגיה והסביבה של אוניברסיטת בן-גוריון. מחקר זה בוצע באמצעות מידול מסת הסלע במחצבה וביצוע אנליזת מאמצים והתפתחות מעוותים כתוצאה מהיווצרות חלל, בשיטת ה-**DDA** (חצור, ויינשטיין ובקון, 2007). מחקר זה היווה את הבסיס לתכנון ה'מבנה לשימור' מעל ובשולי מערת איילון (חצור, ויינשטיין ובקון מזור, **Hatzor, Wainshtein and Bakun Mazor, 2009**, 2010) (איור 12).

ב. עבודת הגמר של ישראל נעמן על מערכת הקארסט והאקולוגיה של מערת איילון (נעמן, 2011)



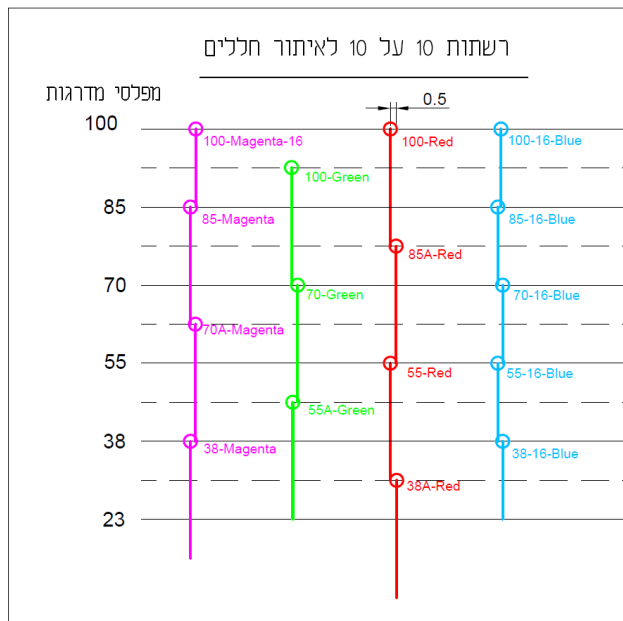
איור 12: המבנה לשימור מערת איילון שנבחר ע"י חצור, ויינשטיין ובקון מזור (2009) על רקע מפת מחצבת רמלה מאוקטובר, 2008.

המסקנות מכלל המחקרים והעבודות שנעשו הן כדלקמן:

5. החתך הנחצב במחצבת רמלה נגוע בתופעות קארסטיות (חללים וקריסות) בשכיחות גבוהה במיוחד. עובדה זו מיוחסת לאופי מי התהום מתחת למחצבה, שהם חמים ואגרסיביים יחסית מבחינת כושר המסת גיר. תופעה זו נחקרה במספר עבודות וכוונתה ע"י **Frumkin & Gvirtzman (2006) Ayalon Saline Anomaly (ASA)** (בורג, גבריאלי וגוטמן, 2001, נעמן, 2011).
6. לא נמצאה עד עתה שיטה גיאופיזית שתוכל לתת מענה יישומי מספק לאיתור חללים מבחינה בטיחותית ותפעולית, ונדרש להסתפק בשלב זה בקדיחה שיטתית של כל משטחי העבודה במחצבה לצורך איתור מוקדם של חללים מסוכנים בתת הקרקע. לאור זאת פותחו בנשר לאורך השנים ועל בסיס מחקרי הצוות הגיאוגנדי מאוניברסיטת בן-גוריון, רשתות קידוחים במתאר ריבועי של **10x10 מ'**, ובעומק של 24 מ', אשר

משולבות במפלסי החציבה כך שבטווח הרדוד של עד 8 מ' מתקבלת רשת משולבת של 5x5 מ'. זו מגינה בפני חללים קטנים יחסית בטווח הרדוד. בטווח העמוק של עד 16 מ' (24 מ' של הקידוח פחות 8 מ' של מקטע החציבה של הבולדוזר – הסבר בפסקה הבאה) מתקבלת רשת מרווחת יותר של 10x10, אשר מיועדת לאיתור חללים גדולים יחסית בעומק (איור 13).

היות ושיטת החציבה היא של חריש בולדוזר יש להתחשב בכך שהבולדוזר 'מכרסם' בהדרגה את המרווח שנבדק ע"י הקידוחים ומותיר מרווח בדוק שהולך ומתדקק תוך כדי החציבה. מצב זה חייב הכשרת מפלס ביניים לקדיחה באמצע כל מדרגת חישוב של 15 מ' (איור 13). לו חציבת מדרגות ה-15 מ' היתה מתבצעת במהלך אחד היתה נותרת מתחת לבולדוזר שכבת סלע בדוקה של 8 מ' בלבד, וזו אינה מספיק עבה להגנה בפני חללים עם מפתח גדול.



איור 13: תרשים רשתות הקידוחים לאיתור חללים על רקע מפלסי החציבה במחצבה

ארכיאולוגיה

ב-20-25 שנים האחרונות חפירות ההצלה הארכיאולוגיות מהוות מגבלה תפעולית על פיתוח המחצבה, וכן מעמסה כלכלית כבדה על חברת נשר.

מלבד קצב השחרור האיטי של שטחים חדשים לחציבה, יש קושי רב אפילו לתכנן בטווח קרוב את פיתוח השטחים לחציבה, כיוון שלא ניתן לצפות מראש מה יימצא מתחת לפני הקרקע וכמה זמן ייקח להשלים את החפירה ואת תיעוד הממצאים.

המצב בשנים הללו שהחפירות חונקות ומגבילות את פיתוח המחצבה וכל פיסה שמשוחררת מבחינה ארכיאולוגית נחצבת בו ברגע.

היו תקופות בעבר הלא רחוק שהחפירות הארכיאולוגיות כמעט ומנעו מהמחצבה לספק את חומר הגלם הנדרש למפעל.

להלן סקירה קצרה של האתר הארכיאולוגי שבמחצבת נשר רמלה מאת וולדימיר וולף אברוטיס, הארכיאולוג הראשי של החפירה:

'האתר הארכיאולוגי 'נשר-רמלה' שוכן בצפון-מערב שפלת יהודה, בשטחה של מחצבת מפעל המלט "נשר"-רמלה, כ- 5 ק"מ מזרחית לרמלה, 5 ק"מ דרומית-מזרחית ללוד וכ- 7 ק"מ צפונית לתל גזר. האתר תחום על ידי נחל איילון במערב, כביש 1 במזרח – צפון-מזרח וכביש 431 בדרום. בתקופה הרומית האתר שכן בקרבת הדרך שהובילה מלוד-דיוספוליס לירושלים ועברה באמאוס (רול, תשל"ו). האתר משתרע על שתי גבעות בגובה 110-125 מ' מעל פני הים. מהאתר נשקף מבט אל מישור החוף במערב, תל גימזו בצפון-מזרח, תל גזר ושפלת יהודה בדרום. באמצע שנות ה-90, בעקבות הפיתוח המואץ של המחצבה, התחילו באתר חפירות הצלה, שהתנהלו בחסות גופים שונים, בשטחים שונים של האתר (Avrutis, 2012). משנת 2006 ועד היום החפירות באתר נערכות בחסות האקדמית של המכון לארכיאולוגיה ע"ש זינמן באוניברסיטת חיפה, בראשותם של שלמה קול-יעקוב (2006-2020), אלכסנדר מלמד (2011-2014) וולדימיר וולף אברוטיס (2014-2020). האתר נמצא, כאמור, בתחום המחצבה של "נשר מפעלי מלט ישראליים בע"מ", המממנת את החפירות במטרה לשחרר את השטח לכרייה בסיומן. במהלך החפירות באתר נחשפו ממצאים רבים תקופות שונות: פליאולית עליון, ניאולית קדם-

קרמי, כלקולית מאוחר, ברונוזה קדומה א', פרסית, הלניסטית, רומית קדומה, ביזנטית (איור 14), מוסלמית קדומה וממלוכית (Avrutis, 2015).



תמונה 1.



תמונה 2.



תמונה 3.

איור 14: ממצאים נבחרים מהתקופה הביזנטית מחפירות מחצבת רמלה: תמונה 1; כנסייה, תמונה 2; סרקופג מעוטר, תמונה 3; גת תעשייתית

קירות סופיים

לחציבה באמצעות חריש בולדוזר יש בעייה נוספת והיא שיפועי קירות החציבה המתונים יחסית, אשר נוצרים בעת החציבה בשיטה זו; ס"ג של 45° - 50° . כל עוד מדובר על קירות שצפויים להיחצב לא נגרם בשל כך איבוד חומר אולם כאשר מגיעים לגבולות התוכנית השארת שיפועים מתונים כאלה בקירות החיצוב על פני 4-5 מדרגות החציבה הצפויות בגבולות התוכנית תגרום לאיבוד מיליוני מ"ק רבים לאורך גבולות המחצבה (איור 15).

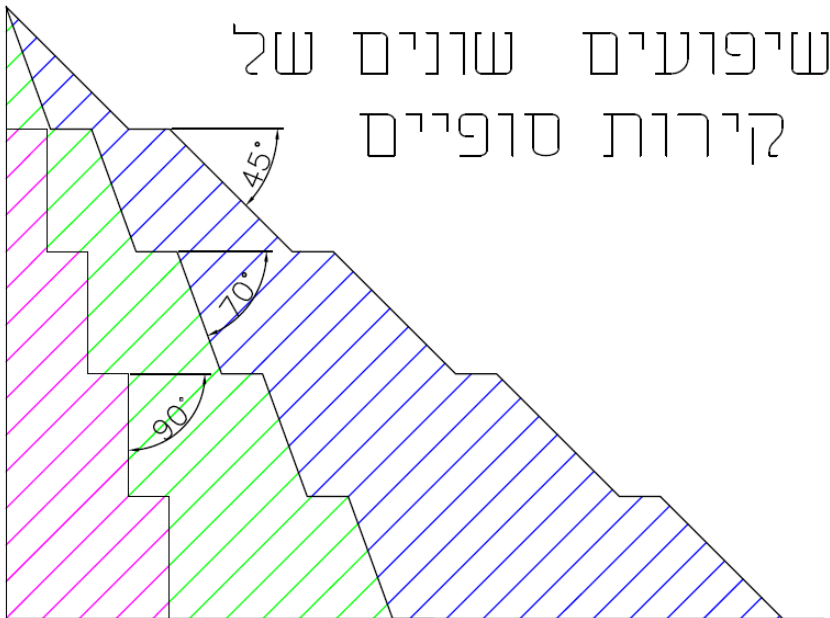
הדרך המעשית להתליל את הקירות לאורך גבולות החציבה היא בסיתותם באמצעות באגר פטיש. עצם הסיתות של הקירות היא פעולה יקרה ואיטית ביחס לחציבה הרגילה באמצעות חריש בולדוזר.

בנוסף לפעולת הסיתות עצמה ישנם מגבלות תפעוליות שנובעות מהצורך בסיתות קירות, לדוגמה:

3. באגר פטיש יכול לסתת קיר בגובה של עד כ-5 מ' בלבד. לכן נדרש לייצר לכל קיר של 15 מ' גובה שלושה מפלסי ביניים רק לצורך הסיתות וזה כמובן מעכב מאוד את קצב החציבה.

4. ברגע שמייצרים קיר חציבה סופי של 15 מ' וחותרים את מפלס החציבה שמתחתיו לרוחב הנדרש של 5 מ', על פי התוכנית, לא ניתן יותר לחזור ולחצוב בקטע זה. לכן החציבה של קירות סופיים צריכה להתבצע לאורך גזרות ארוכות יחסית, בתכנון מוקדם של עקב בצד אגודל, ולעיתים בחוסר התאמה לטיפוסי הגלם הנדרשים לייצור במפעל.

בשנים האחרונות המחצבה מתמודדת עם סוגיית הפיתוח וטיפול של קירות סופיים ואנו נוכחים חדשות לבקרים עד כמה הטיפול הזה מגביל, מעכב ומייקר את פעולות החציבה המחצבה.



איור 15: חתך רוחב בקירות מחצבה עם 5 מדרגות של 15 מ' ומפלסי ביניים של 5 מ' אשר ממחיש את רוח או איבוד חומר הגלם במצב של סיתות או אי סיתות קירות החציבה מ- 45° ל- 70°

תחנות הסיוור

מרכז המבקים

יוצגו שתי הרצאות:

1. שביט דן: מפעל נשר רמלה – טכנולוגיה וקיימות סביבתית בייצור צמנט
2. אורי מור: תוכנית הרחבת מחצבת רמלה; תמ"א 1/4/14, ורקע גיאולוגי וסוגיות

תפעוליות במחצבת רמלה

סיוור במפעל

תצפית והסבר על מתקני קו 1

תצפית על המחצבה

הצגת צורת עבודת המחצבה: סוגיות תפעוליות והקשר למבנה הגיאולוגי

ארכיאולוגיה

ביקור במחנה הארכיאולוגיה וקבלת הסבר על החפירות מפי ולדימיר אברוטיס, מנהל החפירה

סיוור רגלי בפרוייקט הטיית נחל איילון

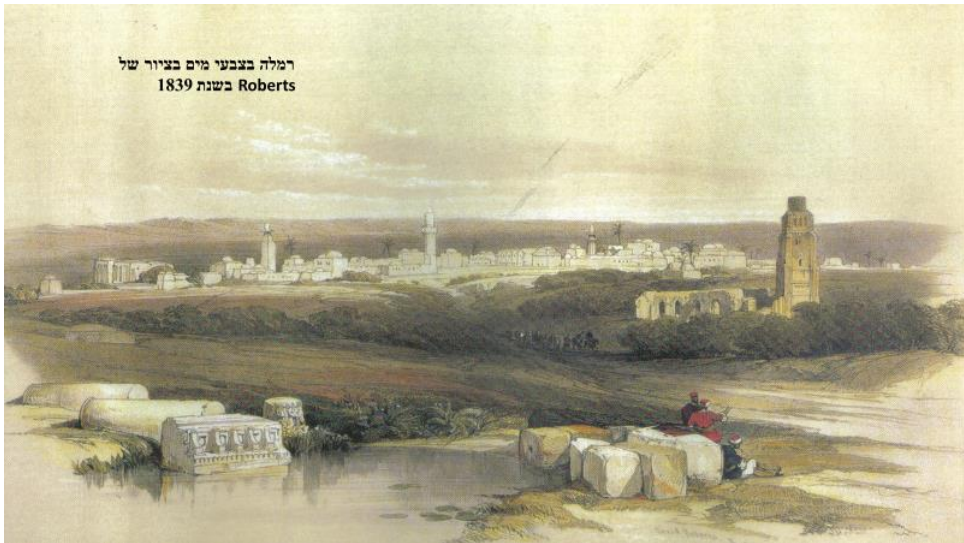
סיוור לאורך תוואי ההטייה של נחל איילון תוך קבלת הסברים על הפרוייקט

ספרות

- אלמוגי-לבין, א., 2011. תוצאות האנליזה המיקרופליאונטולוגית של 8 דוגמאות חוואר שבוצעה במכון הגיאולוגי, ירושלים – דו"ח פנימי.
- ארזי, א., 1998. ניתוח ממצאים ודרכי פעולה אפשריות בעיקבות אסון המערה מ-22 דצמבר 97 במחצבת נשר רמלה – דו"ח פנימי.
- גיאופרוספקט, 2006. סקר גיאולוגי משלים באמצעות קידוחים באתר פי גלילות – דו"ח פנימי.
- גיאופרוספקט, 2014. סקר גיאולוגי לבחינת מצאי ואיכות חומר גלם ליצור צמנט פרטלנד בתחום 'משולש התשתיות', נשר רמלה – דו"ח פנימי.
- וועדת טרכטנברג, 2011. דו"ח הוועדה לשינוי חברתי כלכלי.
- וועדת הרשקוביץ, 2012. דו"ח הוועדה לעידוד התחרות בענף המלט.
- חצור, י.ח., ויינשטיין, א. ובקון, ד., 2007. יציבות בורות קארסטיים במחצבת נשר רמלה – דו"ח פנימי.
- חצור, י.ח., ויינשטיין, א. ובקון מזור, ד., 2009. יציבות מבנה לשימור במחצבת נשר רמלה – דו"ח פנימי.
- יחיאלי, י., 2008. מפה גיאולוגית גיליון לוח, 1:50,000. הוצאת המכון הגיאולוגי, ירושלים.
- נעמן, י., 2011. מערכת הקרסט והאקולוגיה של מערת איילון, ישראל. עבודת מסטר, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- נשר מפעלי מלט ישראליים בע"מ, 2002. המלט ויוצרים, הרעיון ומימושו 1923-2001.
- פרוטוקול המועצה הארצית מס' 518, 2010. תמ"א 1/4/14: תוכנית מתאר ארצית ברמה מפורטת להרחבת מחצבת נשר רמלה. 12-15, 34.
- פרומקין, ע. וארזי, א., 1999. סקר גיאומורפולוגי וגיאוהידרולוגי להבנת התפתחות מערות במחצבת נשר רמלה – דו"ח פנימי.
- רול, י., 1976. מערך הדרכים הרומיות בארץ ישראל. קדמוניות 38:33-50.
- Avrutis, V.W., 2012. Late Chalcolithic and Early Bronze Age I Remains at Nesher-Ramla Quarry. Haifa.
- Avrutis, V.W. 2015. Wine Presses at Nesher-Ramla Quarry. A Thousand Years of Winemaking. Haifa.
- Hatzor, Y.A., Wainshtein, I, Bakun Mazor, D., 2010. Stability of karstic caverns in blocky rock masses. Intern. Jour. of Rock Mechanics & Mining Sciences. 47:1289-1303.
- Frumkin, A., Gvirtzman, H., 2006. Cross – formational rising groundwater at an artesian karstic basin: the Ayalon Saline Anomaly, Israel. Journal of Hydrology. 318, 316-333.
- Sandler, A., 1996. A Turonian subaerial event in Israel: Karst, sandstone and pedogenesis. Geological Survey Bulletin, 85, 52 pp.

סיור מספר 5: ב' - אתרים ארכאולוגיים ברמלה

אמיר גורז'לזני
רשות העתיקות



אמת המים גזר-רמלה, מהתקופה האסלאמית הקדומה (תחנה 1)

מתוך חדשות ארכאולוגיות 117; 120

http://www.hadashot-esi.org.il/report_detail.aspx?id=178&mag_id=110

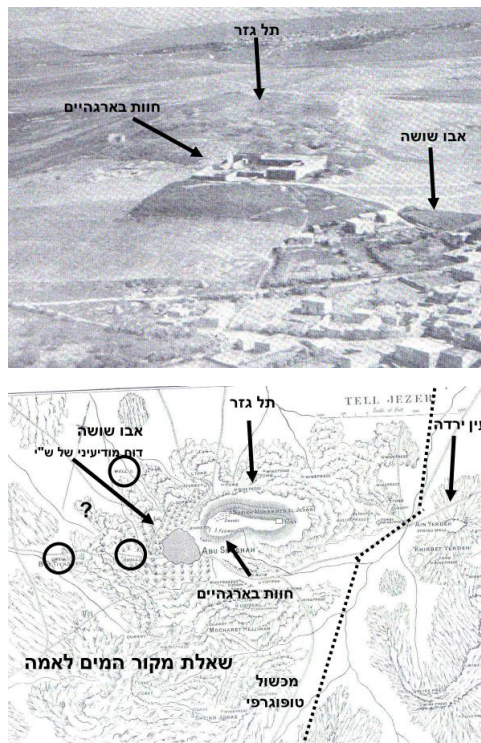
http://www.hadashot-esi.org.il/report_detail.aspx?id=794&mag_id=114

Gorzalczany A. 2011. The Umayyad Aqueduct to Ramla and Other Finds near Kibbutz Na'an. *'Atiqot* 68:193–219.

Gorzalczany A. 2014. A Section of the Gezer-Ramla Aqueduct (Qanat Bint al-Kafir) and a Mamluk-Period Cemetery near Moshav Yashresh. *'Atiqot* 79:213–230.

בחודשים יולי-אוגוסט 2001 נערכה חפירה בקנאת בנת אל-כאפר, כ-1.5 ק"מ ממזרח לקיבוץ נען (הרשאה מס' A-3460), בעקבות חשיפת שרידים קדומים במהלך עבודות סלילה של כביש חוצה ישראל. החפירה, מטעם רשות העתיקות ובמימון חברת דרך ארץ, נוהלה על ידי א' גורזלזני, בסיועם של ח' ציון-צינמון וו' שלומי (ניהול שטח), י' רחמים (מנהלה), א' האג'יאן (מדידות), צ' שגיב (צילום), מ' אבישר (ייעוץ קרמי), מ' שויסקיה (ציור כלי חרס),

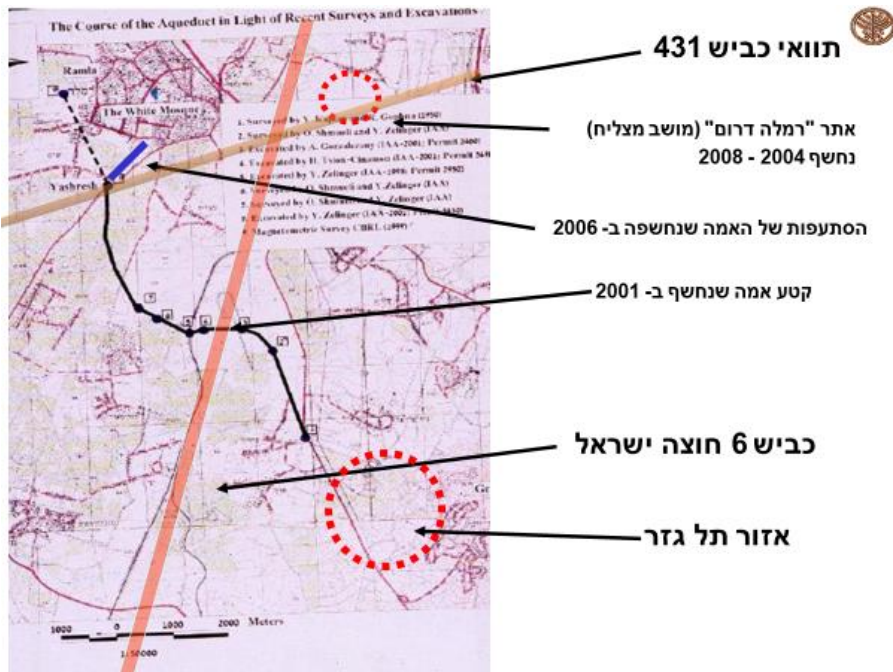
א' אלטמרק (מעבדת מתכת), י' גורין-רוזן (זכוכית), ר' חן (גילוי מתכות), י' פורת (זיהוי טיח), א' צצקין (אנליזה של טיח), י' דריי (ייעוץ לשחזור טכנולוגיה קדומה), צ' צוק וי' פלג (ייעוץ בהידראוליקה ואמות מים), מ' שרון (אפיגרפיה), ש' גת וד' נחליאלי (ייעוץ במקורות היסטוריים), חברת אלבטרוס (צילום אוויר), א' היימן (ייעוץ גיאולוגי), א' בוארטו (בדיקות פחמן 14), מפעל השקיה בקיבוץ נען (חישוב ההידראוליקה וסיוע משרדי), חברת בן ארי (סיוע טכני רב), תחום שימור ברשות העתיקות (שימור האמה והעתקת חלק ממנה), א' ינאי, כ' סארי, א' שמואלי, י' זלינגר, ד' ברשד וי' גוטמן.



איורים 1, 2: סימון של ציונים גיאוגרפיים ומקורות מים על גבי מפה של הסקר הבריטי

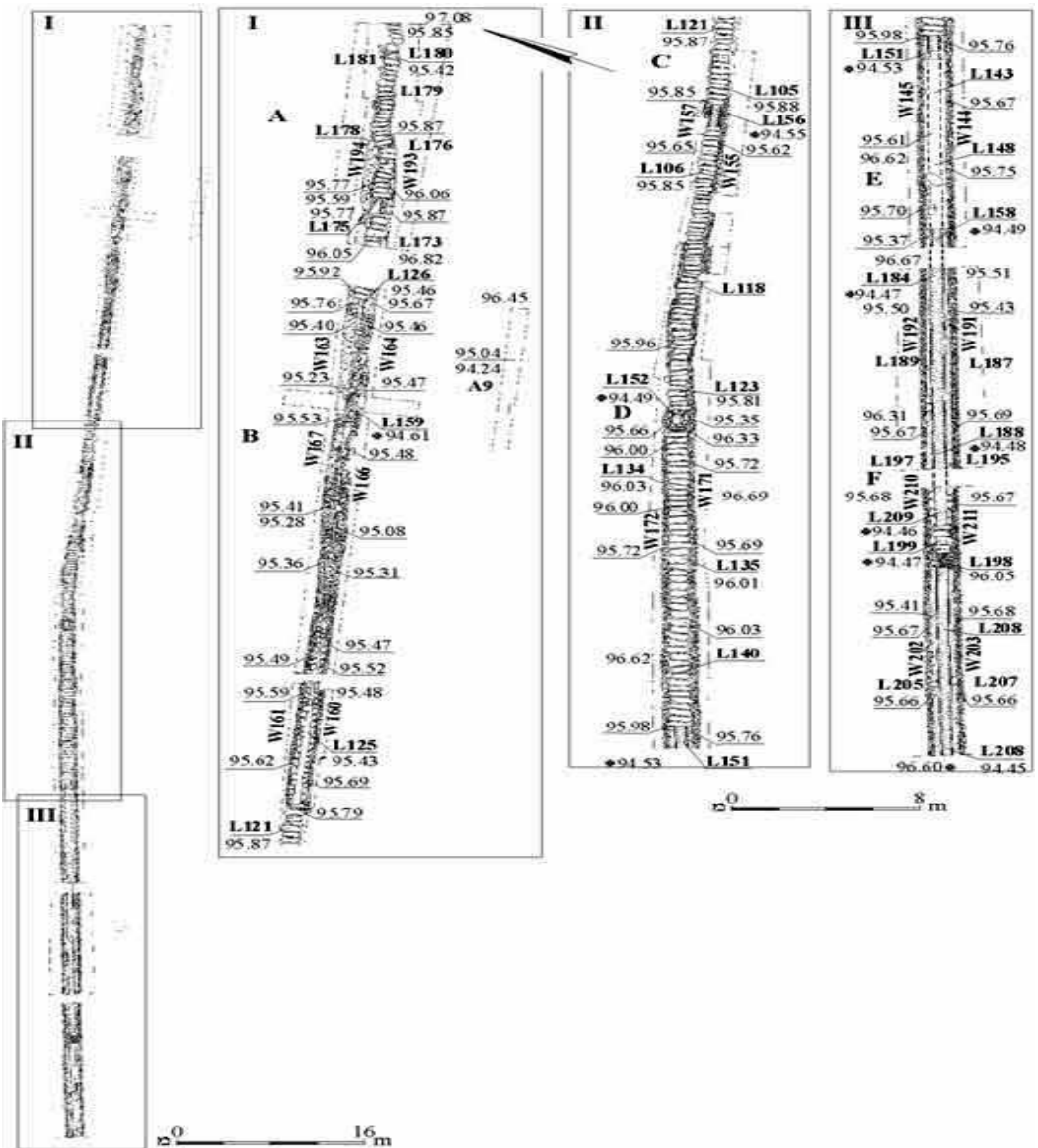
בחפירות בשנת 2001 נפתחו שני שטחי חפירה. בשטח A נתגלתה אמה שהוליכה מים אל העיר רמלה במאות הח'-הט' או ה'ל' לסה"נ. בשטח B נתגלו מבנה, קטעי קירות ובור בנוי ששימשו כנראה בתקופה הביזנטית.

אמת המים לרמלה ידועה ממקורות היסטוריים, וכן מוכרת ממפות הסקר הבריטי (Survey of Western Palestine). (איורים 1, 2). ב-1950 תיעדו ר' גופנא וי' קפלן קטע קטן של האמה, שנתגלה לא רחוק מהכניסה למושב פתחיה במהלך ביצוע עבודות תשתית. בשנים האחרונות נערכו שתי חפירות הצלה על ידי י' זלינגר מטעם רשות העתיקות על תוואי האמה (ראה חדשות ארכיאולוגיות 76:111-77) ובסקר גיאופיזי שנערך באזור רמלה בשנת 1999 (A. Petersen and R. Wardill 2001; Levant 33) אותרו בעזרת רדאר חודר קרקע כמה אנומליות שזוהו על ידי הסוקרים כשרידים של אמות מים. החפירה הנוכחית מוסיפה מידע חשוב על המיקום, התוואי וטכניקת הבנייה של אמת המים ומפעלי מים מהתקופה האסלאמית הקדומה. היום ניתן לשחזר את מסלול האמה כמעט בשלמותו (איור 3).



נתגלו שרידים של אמת מים לאורך כ-150 מ במספר מקטעים A-F; שכיוונם הכללי מזרח-מערב) עם פנייה מתונה דרומה בחלק המערבי של האמה. מחוץ לגבולות החפירה, ממערב,

הובחנו על פני השטח בקטע שאורכו כ-170 מ', טיח ואבני בנייה המעידים על המשך תוואי האמה. לאמה (1.5 מ' רוחב, 1.2 מ' גובה) יסוד שנבנה מאבני שדה מלוכדות בחומר מליטה ועליו שני קירות מקבילים (0.4-0.5 מ' רוחב) בנויים אבני גיר מסותתות.



F-A איור 4: אמת המים, תכנית של הקטע החפור בשנת 2001, קטעים

הקירות טוּחו בצד הפנימי והחיצוני וצופו בשכבה נוספת מבחוץ ומבפנים של אבני שדה שביניהן חומר מליטה אפור. לטיח המכסה את הדפנות הפנימיות של האמה (1-2 מ"מ עובי) גוון אדמדם והוא מכיל קוורץ, שברי כלי חרס וצדפים. על הטיח הובחנה שכבת טיח מאוחרת, ככל הנראה שלב של תיקונים. זוהי שכבה אפורה-לבנה והיא שינתה במקצת את החתך המלבני של התעלה להובלת מים (0.50-0.55 מ' רוחב) כך שהחיבור בין הקירות והרצפה מתעגל. בתוך התעלה, עד לגובה של 0.6 מ', גובה זרימת המים, ניתן להבחין בהיווצרות שכבות של טרוורטין. עוביין מגיע לחמישה מילימטרים בשלב הקדום, ולפחות מכך בשלב המאוחר (איורים 4-7).



מפעל נשר

חפירות 2001: מראה כללי של האמה בניצב לכביש 6 בסלילה, מבטים למזרח ולצפון מזרח



איורים 5-6: קטע מאמת המים שנחפר בשנת 2001, בעת סלילת כביש 6 (חוצה ישראל), צילום אוויר במבט מזרח וצפון-מזרח

בקטע A שבתחום האדמה האלוביאלית, הובחן דיפון חיצוני אלכסוני מטוּח היורד משני צדי ראש התעלה עד למרגלותיה, ותפקידו ככל הנראה להגן מפני הסחף הצפוי בסביבה חרסיתית

אלוביאלית. בזכות הדיפון נשתמרה צורתה המקורית של האמה בקטע זה. לעומת זאת, בקטעים B-C עוותה האמה כתוצאה מתזוזה וקריסה של הקירות כלפי פנים (איורים 3, 4) ורוחבה צומצם לכדי סנטימטרים ספורים. האזור שבו נגרמו העיוותים חופף לאזור שבו הקרקע חרסיתית אלוביאלית כבדה, המתאפיינת בתזוזות ותפיחה כתוצאה מספיגת לחות. ייתכן שלאחר שהשימוש באמה פסק, גרם המשקל הרב של האדמות האלוביאליות באזור זה לקריסה של דופנות התעלה פנימה, בייחוד אם התעלה היתה חשופה וריקה. נוסף על כך, נשדדו באזור זה לוחות הכיסוי, כנראה כבר בזמן קדום, ובהשוואה לקטעים אחרים (להלן) נראה כי עובדה זו תרמה אף היא לקריסה (איור 7).

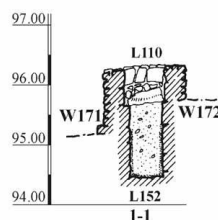
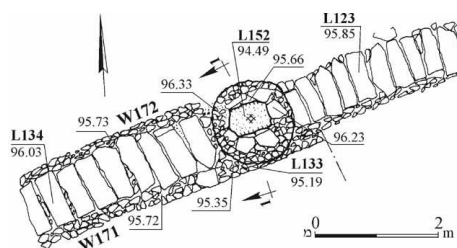
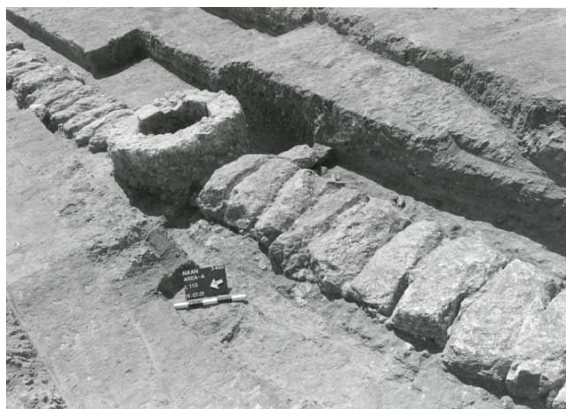


איור 7: אמת המים בזמן החפירה, מבט כללי לכיוון מזרח. ראה את סימני שוד אבני הכיסוי

הקטע המרכזי של האמה השתמר היטב וכל אבני הכיסוי (0.80 מ' אורך, 0.30 מ' רוחב, 0.12 מ' עובי) נמצאו באתרן. באזור של קרקעות החמרה היציבות במרכז שטח החפירה ולכיוון מערב, נגרמו פחות נזקים לאמה וצורתה המקורית של התעלה עם החתך המלבני נשתמרה. בכמה נקודות בקטעים בוצעו חתכי בדיקה שנועדו לבחון את עומק תשתית האמה ואת טכניקת הבנייה. התברר כי הקטע המרכזי של האמה חפור אל תוך אדמת החמרה. בחתך אחד הובחנו תעלות יסוד לעומק של כ-0.7 מ'. יסוד האמה בנוי על תשתית רחבה ממנו בכ-

0.2 מ'. התשתית (1.5 מ' רוחב, 0.7 מ' עומק) נבנתה מאבנים קטנות מלוכדות בטיט אפור על רובד של חול.

כדי לשמור על השיפוע הרצוי לצורך זרימה תקינה של המים השתמשו מתכנני המפעל בטכניקות שונות בהתאם לנתונים הטופוגרפיים. בחלק המזרחי נבנתה האמה על פני השטח, ואילו בחלקים המרכזי והמערבי היא נחפרה אל תוך שכבות אדמת חמרה וחול. על פי מדידות שבוצעו לאורך האמה השיפוע שלה קבוע למדי (1.2%) למעט באזור המרכזי שבו התרחשו כנראה תזוזות קרקע.



איורים 8, 9: פיר הביקורת, צילום ותוכנית, חפירות רשות העתיקות בשנת 2001

בקטעים המרכזים נחשפו פירי ביקורת, במרחק של כ-35 מ' זה מזה. פי הפיר בקטע D (איורים 8–9) השתמר בשלמותו. דופןו החיצונית עגולה (1.3 מ' קוטר) והפנימית משושה (0.7 מ' קוטר), והוא מתרומם 0.5 מ' מעל לוחות הכיסוי. פתח הפיר מרובע וגודלו מספיק למעבר אדם. הפיר נבנה באזור שבו האמה פונה בזווית של 8° דרומה. לעומת הקודם, הפיר בקטע F נמצא במצב השתמרות לא טוב. בניית פירי ביקורת במקומות שבהם תואי האמה משנה כיוון מוכרת מאמות אחרות בארץ ישראל, וכנראה שהסיבה לכך קשורה בתחזוקה שוטפת הנחוצה בייחוד בנקודות תורפה שבהן עלול להצטבר סחף.

חישוב ראשוני של ספיקה מרבית באמה, המבוסס על נתוני החפירה (קוטר ושיפוע של האמה) העלה תוצאה אפשרית של מאות מ"ק לשעה. מעיין עין ירדה שממזרח לתל גזר לא מספק היום כמות מים כה גדולה ומיקומו מקשה על זיהוי כמקור המים. בסקרים שנערכו באזור נתגלו שישה מעיינות באזור הכפר אבו שושה שלמרגלות תל גזר. היום ספיקתם נמוכה, אך סביר שבעבר היתה גבוהה בהרבה. ייתכן שמימי כמה מעיינות רוכזו יחד כדי לספק כמות מים שתצדיק בנייה של מפעל מים המיועד לעיר בירה שמתגוררים בה אלפי תושבים.

על פי הממצא הקרמי יצאה האמה מכלל שימוש ככל הנראה במהלך המאות ה'ט' או ה'ל' לסה"נ. השערה זו עולה בקנה אחד עם המקורות ההיסטוריים. עוד נמצאו בחפירה משקולת ברונזה, שברי כלי זכוכית, מעט עצמות בעלי חיים, מסמרי ברונזה וברזל ושברי שיש הנושאים שתי אותיות בשפה הערבית שאינן ניתנות לפענוח.

הסתעפות האמה

בחפירות נוספות שנערכו במשך החודשים יוני-אוגוסט 2006 נחשף קטע נוסף של אמת המים שהשתמרה היטב, פרט לשלושה מקומות שבהם היא נפגעה מעצי זית ולקטע שבו חותך אותה קיר בטון התוחם את מטע הזיתים (איורים 10–13). כיוונה הכללי של האמה דרום-מערב–צפון-מזרח; היא נחשפה עד לעומק של 1 מ' מפני השטח. האמה נחפרה אל תוך שכבות חמרה המכסות שכבת חרסית כהה ומהודקת שעוביה אינו אחיד. היא מורכבת משני קירות מקבילים, שיטת הבנייה והטכניקה (לקבות סוגי הטיח) זהים לאלה שנחשפו בקטעים אחרים של האמה,

מה שמרמז שכל המפעל נבנה כמיזם אחד. מצב ההשתמרות משביע רצון, פרט לעשרים המטרים הדרומיים-מערביים שבהם נשדדו כנראה לוחות הכיסוי בימי קדם. בצדה הדרומי-מערבי ניזוקה האמה מתנודות קרקע, במיוחד באזורים שבהם היא בנויה על אדמת חרסית. ייתכן כי חיסרון לוחות הכיסוי תרם אף הוא לחוסר יציבות האמה; תופעה דומה הובחנה בחפירות ליד קיבוץ נען. האמה והתעלה נחפרו בשלושה ריבועים. בריבוע הצפוני נחשפה האמה לאורך 0.9 מ', והתבררו מידותיה (1 מ' רוחב כולל של האמה, 0.35 מ' רוחב התעלה, 0.8 מ' עומק התעלה; בקטע זה לא השתמרו לוחות הכיסוי של התעלה. בריבוע האמצעי התגלו בתעלה שתי שכבות של טיח; השכבה השנייה היא כנראה תיקון מאוחר. לאורך האמה אותרו שני פירי ביקורת. ממדי התעלה והפירים לא אפשרו מעבר אדם לצורך ניקוי ותחזוקה, בניגוד לפירים בקטע האמה שנחשף באזור נען. ייתכן כי דרך הפירים הציפו את התעלה במים כדי לאתר בה סתימות. מבדיקת גובה התעלה בשני קצותיה התברר כי היא נבנתה בשיפוע של 5%, כפי שהמליץ ויטרוביוס בנוגע לבניית אמות מים. בחלקה הצפוני-מזרחי של האמה נחשפו שני קברים החותכים את תעלת היסוד של האמה ולכן הם מאוחרים לה. שני הנקברים הונחו בכיוון מזרח-מערב והם פונים לדרום. נקבר אחד הונח בארטיקולציה המלמדת על קבורה ראשונית. בקבר השני התגלו רק שברי עצמות, כיפת גולגולת והמחצית העליונה של שלד הנקבר.

קטע האמה שנחשף בחפירות 2006 הוא הצפוני ביותר מכל קטעי האמה שנחשפו עד כה. האמה נכנסת כאן לעיר רמלה. היא צרה יותר מאשר בקטעים אחרים שנחשפו בעבר. לכן ייתכן כי קטע האמה שנחשף כאן הוא סעיף משני של האמה. אפשר שהאמה התפצלה לכמה סעיפים לפני כניסתה לעיר, וכל סעיף הוליך לאזור אחר בעיר. לאחר שאמת המים יצאה משימוש או אולי עוד בזמן השימוש בה הוסב השטח שמצפון לה לבית קברות מוסלמי. אפשר אולי לקבוע את זמנו של בית הקברות לתקופות האיובית-הממלוכית על סמך מטבע מנחושת (פלס) שנמצא סמוך לאחד הקברים. המטבע מתואך לימיו המאוחרים של השליט הממלוכי ברקוק (1389-1398 לסה"נ).



מתחם "קקונדה" ליד ישרש (נחפר במסגרת כביש 431)

סעיף משני של האמה?



סעיף זה ללא ספק נבנה באותו מיזם,
אך גודלו (רוחב התעלה) מחצית
מהסיף הראשי. ככל הנראה, בין הנקודה
המוכרת בישרש לחפירה הנוכחית קיימת
התפצלות של התעלה



איורים 10-13: הסתעפות מהאמה המרכזית, חפירות רשות העתיקות בשנת 2006

ברכת הקשתות (תחנה 2)

(מתוך goramla.com; Wikipedia, קדמוניות 135, חדשות ארכאולוגיות 122, http://www.hadashot-esi.org.il/Report_Detail_Eng.aspx?id=1575)

היא בריכה תת-קרקעית לאגירת מים השוכנת בצפון העיר רמלה ואשר נחפרה בתקופתו של הארון א-רשיד, (809–763) הח'ליף החמישי מבית עבאס. הבריכה היא חלק ממאגרי המים שנבנו בתקופת בית עבאס, והיא נודעה גם בשמות "ברכת העיזים", "ברכת הבת הכופרת" ו"ברכת הלנה". השם ברכת הקשתות הוענק לראשונה בשנת 1961 עם פתיחת האתר לביקורי תיירים. כיום האתר מהווה מוקד תיירות כאשר ניתן בתשלום לשכור סירה ולשוט במאגר.

מבנה הבריכה הושלם בשנת 789 וזאת על-פי כתובת בערבית שנמצאת בכניסה אליה:

"בשם אללה הרחמן והרחום... זה מה שנעשה בפקודתו של דינאר, סוכן אמיר המאמינים יאריך אללה את שלטונו. המלאכה נעשתה בידי עבד א... בד' אל חג'ה 172" (איור 14).

הכתובת פוענחה לראשונה על ידי האפיגרפיסט והיסטוריון השוויצרי מאקס ואן ברשם (1863–1921) (איור 15).

הבריכה (איורים 16–21) היא המבנה היחידי בארץ ישראל שניתן לשייכו באופן וודאי לתקופה העבאסית. שטח הבריכה הוא כחצי דונם, וגובה תקרתה כתשעה מטרים. עומקה מגיע למטר בודד ונפחה הוא כ-5,700 מ"ק) בדומה לשלושת מאגרי המים שליד המסגד הלבן בעיר, שנפחם ביחד עומד על כ-6,000 מ"ק). הבריכה הווארה בעזרת פתחים בתקרתה, ששימשו גם להורדת דליי מים לשאיבה. הגג נתמך על ידי שלושה טורי עמודים. בכל טור חמישה עמודים, ובין כל זוג עמודים ישנה קשת תומכת. מבנה הבריכה מהווה תקדים ראשון לשימוש בקשת המחודדת, ודגם זה אומץ לימים בידי הצלבנים, נדד עימם לאירופה והתפתח, לקראת סוף המאה ה-12, לקשת הגותית. הבריכה נבנתה באיכות גבוהה ונשתמרה על אף רעידות האדמה הרבות שפקדו את רמלה, שחלקן אף החריבו אותה. כיום אוגרת הבריכה מי הגשמים, אך בעבר ניזונה ממי מעיינות מסביבות תל גזר שהובאו אליה באמצעות אמת מים.

הברכה הופיעה בסצנה מהסרט "חמבה ונערי ההפקר". היא נחשבת לאטרקציה תיירותית, וניתן לשוב בסירות בתוך המאגר. המקום שופץ ונפתח מחדש בקיץ 2009.



איור 14: הכתובת העבאסית בכניסה לברכה היום. הכתובת פוענחה לראשונה על ידי מאקס ואן ברשם (Max van Berchem), אפיגרפיסט והיסטוריון שוויצרי



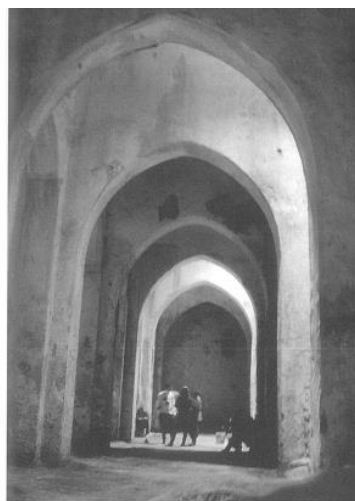
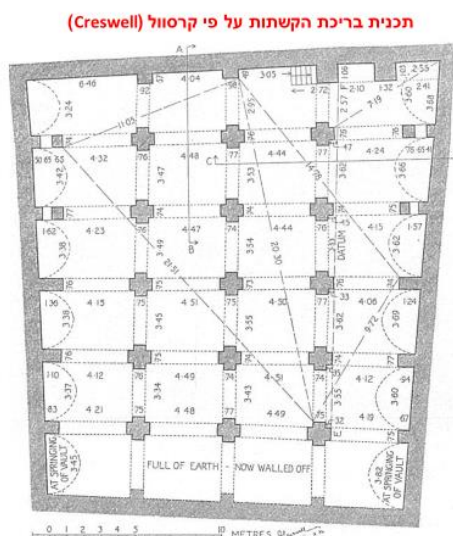
איור 15: מאקס ואן ברשם, אפיגרפיסט והיסטוריון שוויצרי (1863–1921)



איור 16: נראה כללי מתוך הבריכה



איור 17: פתחים לתאורה ולהוצאת מים מותקנים על גבי הקמרונות המכסים את הבריכה



הבריכה הדרומית במסגד

איור 18: תכנית של הבריכה על פי קרסוול בהשוואה לבריכה הדרומית במסגד מתוך: Creswell K.A.C. 1939. *Early Muslim Architecture*. Oxford. Pp. 228–230.



איור 19: מראה מתוך הבריכה



איור 20: ריצוף בתוך הבריכה



איור 21: פנים הבריכה וגרם מדרגות היורד אליה, צילומים משנת 1937

המגדל הלבן (תחנה 3)

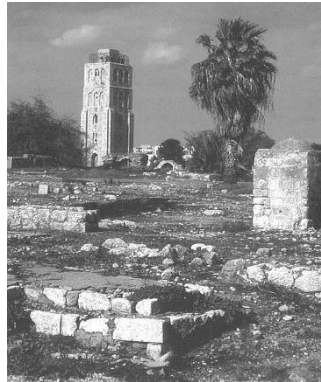
(מתוך goramla.com, קדמוניות 135)

המסגד הלבן הוא מהאתרים ההיסטוריים והארכיאולוגים המעניינים ביותר ברמלה בפרט ובכלל. זהו מבנה מוסלמי המסמל את גדולתה ותפארתה של רמלה בימי הביניים. בתחומו חורבת מסגד גדול, מגדל מרובע בולט יפה על סביבתו, מאגרים תת-קרקעיים למים בנויים היטב וקבר א-נבי צאלח, הקדוש למוסלמים.

המגדל הוא מרובע וגובהו מגיע ל 30 מ' (איורים 22, 27–31). 119 מדרגות סובבות ומובילות אל קצהו למעלה וממנו מראה נהדר על פני רמלה וסביבתה הרחוקה. במגדל שיש קומות ובקומה השישית למעלה בנוי חדר קטן. מגדל היה מצויר על שטר כסף של חמש לירות, בתקופת הבריטים בארץ. חורבת המסגד נמצאת אל מול המגדל, דרומה. אפשר להכיר בו את 'המיחראב', שקע בנוי בקיר הדרומי, שאליו יפנה המוסלמי בעת תפילתו, בכיוון דרומה אל מכה ומדינה – ערי הקדושות בארץ ערב. המסגד היה בתפארתו בימי השלטון הממלוכים ונקרא בשם ערבי: ג'מע אלאביאד – המסגד הלבן. כנראה על לוחות השייש שציפו את קירותיו. המסגד נקרא גם על שם 'ארבעים הגיבורים' (בערבית: ארבעין אלמע'אזי), שהתפרסמו באגדת האיסלם. בדורות הבאים נעזב המסגד וחרב עם דילדול העיר וירידתה מגדולתה בחיי המוסלמים. אל מול פתח המסגד, במרכז החצר הגדולה, נראים שרידי מבנה מרובע לרחצה. מבנה כזה בנוי בכל מסגד מוסלמי לצרכי נטילת הידיים ורחיצת הרגליים לפני הכניסה לתפילה. חצר המסגד היא כמעט מרובעת בצורתה ומשתרעת על שטח של 84×93 מ'. קירותיה סביב מכוונים לארבע רוחות השמיים. מאגרים תת – קרקעיים בנויים מתח לחצר המסגד, בשלוש קבוצות. הן שימשו לאגירת מים לצרכי המסגד והתושבים. מדרגות יורדות אליהן מטה. בכל מאגר ניצב טור עמודים ועליהם בנויות שתי שורות של קשתות, קמרונים, התומכות את התקרה. המאגר הגדול ביותר בנוי לצד דרום, בגבול המסגד, ובו טור עמודים אחד. בכל אחד משני המאגרים האחרים שני טורי עמודים ועליהן בנויות שלוש שורות של קשתות. קיבולם של שלוש המאגרים יגיע ל-6400 מטרים מעוקבים. הדרומי – 2200 מ"מ, המערבי – 2000 מ"מ והמזרחי דומה לו – 2000 מ"מ.

תוכנית של המסגד הלבן ברמלה (איורים 23–24)

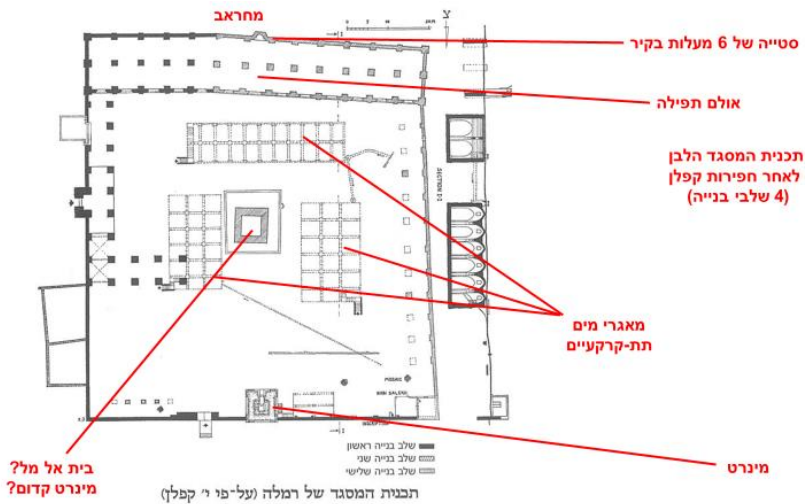
החצר כמעט מרובעת. בחלקה הצפוני המגדל המרובע ועל – ידו החדר שבו מראה המסורת את קבר נבי צאלח (ציור בעמ' קודם). בקיר הסמוך כתובת ערבית (צ' בעמ' הבא). במרכז החצר שרידי מקום – רחצה למתפללים. סביבו המאגרים התת – קרקעיים למים. בחלקה הדרומי חורבנות המסגד הגדול: אולם – תפילה ארוך ובצדו הדרומי 'המיחראב' – השקע בקיר שאליו יפנה המוסלמי בתפילתו בכיוון אל מכה ומדינה, ערי האיסלם הקדושות. בכניסה אל המאגר הדרומי, נשארה על הקיר כתובת ערבית כתובה על טיח בצבע אדום, שטושטשה במרוצת הדורות וקריאתה אינה שלמה. אפשר להבחין בה את השם הפרטי של האמיר המוסלמי סייף א – דין ביגות, והמלה 'א-שאם' וזה שמה הערבי של ארץ – ישראל וסוריה בימי הביניים. האמיר ביגות נזכר בספרות הערבית, ומסופר עליו שמונה בסוריה למשנה למלך הממלוכי, בשנת 1407, ואחרי זמן קצר נאסר והוצא להורג. אפשר להניח שתאריך הכתובת במאגר המים הנה שנת 811 לספירת המוסלמים, והיא שנת 1408 לספירת הנוצרים.



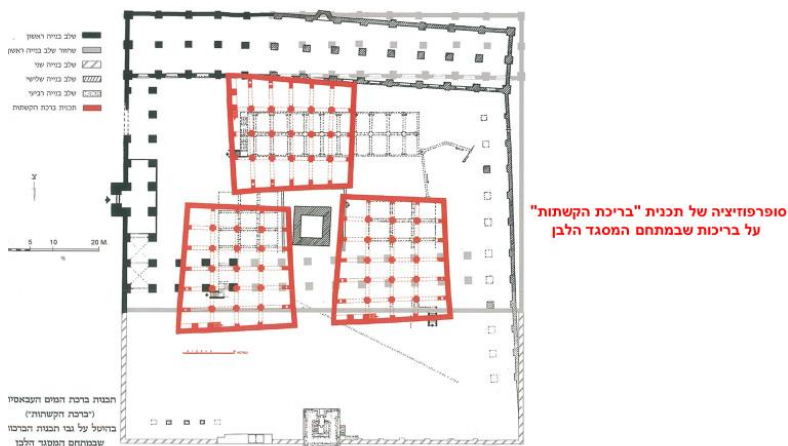
איור 22: המינרט היום

היסטוריון ערבי אחר מספר, שבעקבות הרעש שפקד את רמלה בשנת 1033, הפך מסגדה הגדול למעיין מפולת. אולי רמז הוא למסגד הלבן הנזכר. כן מסופר שבימיו של צאלח א-דין, מנצח הצלבנים, שוקם המסגד ב-1190, ותוקן בדורות הבאים. בשנת 1874 הגיעה לרמלה המשלחת הסקר הבריטי שגם התקינה תוכנית של החצר ופירוט בניינה, אולם בה מובאים בטעות ארבעה מאגרים תת-קרקעיים שווים ביניהם, וזה אינו מתאים למציאות. מעל הכניסה

אל המגדל חקוקה כתובת ערבית המספרת על בנינו בשנת 1318 (איורים 32–34) בימי הסולטן מוחמד אבו-קלאון, המהלכים החשובים ביותר בשושלת המוסלמים – הממלוכים, שבירתם הייתה בקאהיר של מצרים והם גם שלטו על ארץ-ישראל המשך כמאתיים וחמישים שנה, בקירוב. בשנת 1949 נחקרה חצר המסגד ושרידיה השונים ע"י ד"ר יעקב קפלן, מטעם אגף העתיקות ומשרד הדתות. הוא גם התקין תוכנית חדשה של חצר המקדש. כן הוכנו תוכניות של המגדל המרובע בחלקיו השונים.



איור 23: שיחזור החלקים של המסגד



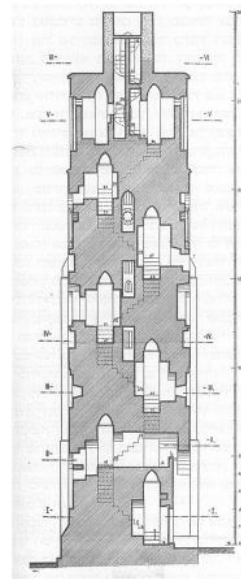
איור 24: סופרפוזיציה של תכנית בריכת הקשתות (באדום) על תכנית מאגרי המים של המסגד



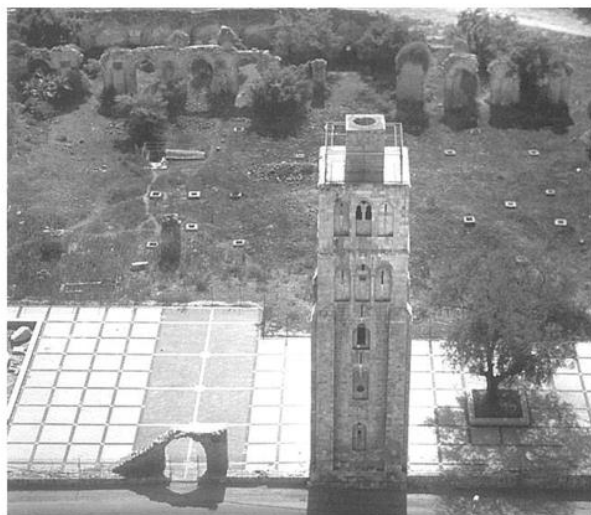
**חזית האולם התפילה המקורה
ליד הקיר הדרומי**



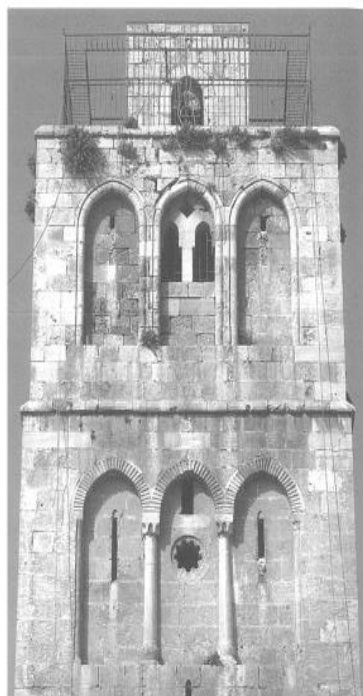
**המינרט, צילום
חזית וחתך**



איורים 25, 26: חזית של אולם התפילה והמחראב בקיר הדרומי
איורים 27, 28: צילום וחתך של המינארט.



המינרט הממלוכי
(מבט לדרום)



המינרט, חלק עליון



הכניסה למינרט

איורים 29–31: מבטים על המינרט: צילום אוויר, החלק העליון, הכניסה.



כתובות שמאלית, שורה לא גמורה



מדליון מגולף באזור הפתח, לא גמור



כתובת בכניסה מעל הדלת, מתארכת את המינרט לחודש שעבאן AH 718, כלומר אמצע אוקטובר 1318

איורים 32–34: כתובות הקדשה באזור הפתח של המינרט

ביבליוגרפיה נוספת

- Ad, U. 1999. Remains of the “Unfinished Aqueduct” North of Binyamina. *Atiqot* 38:93* - 98* (Hebrew with English Summary P. 228).
- Avissar, M. 1996. The Medieval Pottery. In A. Ben-Tor, M. Avissar and Y. Portugali eds. *Yoqne'am I: The Late Periods* (Qedem Reports 3). Jerusalem. 75 – 187.
- al-Balādhurī, Ahmad b. Yahyā 1866. Futūh al-buldān. Leiden.*
- Barna, P. S. 1957. *Fluid Mechanics for Engineers*. London.
- Blake, G. S. and Goldschmidt, M. J. 1947. *Geology and Water Resources of Palestine*. Government Printer of Palestine. Jerusalem.
- Chow, V. T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. New York.
- Conder, C. R. and Kitchener, R. E. 1882. In E. H. Palmer and W. Besant eds. *The Survey of Western Palestine*. Vol II. Sheets VII - XVI (Samaria). London.

- El'ad A. 1978. *The Coastal Cities of Eretz-Israel in the Arab Period (640-1099) on the Basis of Arab Sources*. Cathedra. Vol. 8, pp. 156-178. (Hebrew).
- Farrington, I. S. 1980. The Archaeology of Irrigation Canals, with Special Reference to Peru. *World Archaeology* 11(3): 287-305.
- Fox, R. W. and Mc Donald, A. T. 1985. *Introduction to Fluid Mechanics*. New York.
- Francis, J. R. D. 1958. *A Textbook of Fluid Mechanics for Engineering Students*. London.
- Garbrecht, G. 1980. The Water Supply System at Tuḏpa (Urartu). *World Archaeology* 11 (3): 306 – 312.
- Gil M. 1981. *The Sixty Year War (969-1029)*. Shalem. Vol. 3. (Hebrew).
- Grewe, K. 1986. *Atlas der Römischen Wasserleitungen Nach Köln*. Rheinisches Landesmuseum. Bonn.
- Gutfeld, O. 1999a. Ramla (A) *ESI*. 109: 65*-66*.
- Gutfeld, O. 1999b. Ramla (B) *ESI*. 109: 67*.
- Gutfeld, O. 1999c. Ramla: Excavations to the North of the White Mosque. In Gibson, S. and F. Vittto eds *Ramla: The Development of a Town from the Early Islamic to Ottoman Periods. One-Day Conference 25th March 1999. Booklet N° 4. IAA*. Jerusalem. Pp. 34 – 37.
- Hodge, A.T. 1992. *Roman Aqueducts and Water Supply*. London.
- Kark, R. and Shiloni T. 1984. The Renewal of the Settlement at Gezer. In A. Shiller (ed.) *Ze'ev Vilnay Book*. Ariel Press, Jerusalem pp. 331-341. (Hebrew).
- Kletter, R. 2000. Ramla. *ESI* 111: 56*.
- Luz N. 1996 Umayyad Ramleh: Urban Renewal in Palestine –Geo-Historical Aspects. *Cathedra*. Vol. 79: 22–51. (Hebrew).

Luz N. 1998. The Aqueduct that Won Over Gravity! A Geographic Look at Historical Sources with an Example of the Aqueduct of Ramla. *Geographic Studies of Israel* 15: 117-126. (Hebrew).

Macalister, R. A. S. 1912. *The Excavation of Gezer 1902 – 1905 and 1907 – 1909*. Vol. I. London.

al-Muqaddasī , *Shams al-Din Muhammad b. Ahmad*, 1906. *Ahsan al-taqāsīm fī ma'rifat al-āqālīm*, Leiden.

Petersen, A. and Wardill, R. 2001. Interim Report on a Geophysical and Surface Survey of Ramla. *Levant* 33: 1 – 6.

Pholio Vitruvius 1989. De Architectura, Book VIII (translated by Leah Di Segni). In Amit D, Hirschfeld Y. and Patrich J. (eds.) *The Aqueducts of Ancient Palestine, Collected Essays*. Jerusalem. pp. 29-32. (Hebrew).

Porath Y. 1989. Hydraulic Plaster of Aqueducts as a Chronological Indicator. In Ami D, Hirschfeld Y. and Patrich J. (eds.) *The Aqueducts of Ancient Palestine, Collected Essays*. Jerusalem. pp. 69-76. (Hebrew).

Porath Y. 1989. Basic Terminology of Ancient Water Supply Systems. In Amit D, Hirschfeld Y. and Patrich J. (eds.) *The Aqueducts of Ancient Palestine, Collected Essays*. Jerusalem. pp. 77-78. (Hebrew).

Rosen Ayalon, M. 1976. The First Mosaic Discovered in Ramla. *IEJ* 26 (2-3): 104 – 119.

Rosen Ayalon, M. and Eitan, A. 1969. Ramla Excavations, Finds from the Eight Century. *Israel Museum Exhibition Catalogue*. 66. Jerusalem.

Rosenthal, R and Sivan, R. 1978. Ancient Lamps in the Schloessinger Collection. *Qedem* 8.

Sextus Iulius Frontius 1989. De Aquae Ductu Urbis Romae. (translated by Leah Di Segni). In Amit D, Hirschfeld Y. and Patrich J. (eds.) *The Aqueducts of Ancient Palestine, Collected Essays*. Jerusalem. pp. 33-46. (Hebrew).

Sharon M. 1986. *The Cities of the Holy Land Under Islamic Rule*. Cathedra. Vol. 40. Pp. 83-120. (Hebrew).

Tsuk, Ts. 1999. The Aqueducts to Sepporhis. In Meyers, E. M. ed. *Galilee Through the Centuries, Confluence of Cultures*. Winona Lake. Indiana. Pp. 161-175. Urquhart, L. C. 1940. *Civil Engineering Handbook*. New York.

Vitto. F. 2000. Ramla, Ha-Shoftim (North) Quarter. *ESI* 111: 55*.

Vitruvius. 1980. On Architecture. Book 8. (LCL) Transl. F. Granger. London .

Vitruvius. 1999. Ten Books on Architecture. Book 8. Transl. I. Rowland. Cambridge University Press.

Zelinger, Y. 2000. Na'an (East), The Ramla Aqueduct. *ESI* 111: 58*.

Zelinger ,Y. 2000. Ramla, Yehezqel Street. *ESI*. 111: 57*.

סיו' מספר 6:

ליתולוגיה ותפוצת הסלעים בנקרופוליס של ירושלים בתקופת Lithology and the distribution of Early בית שני Roman Era tombs in the Jerusalem's necropolis

Nurit Shtober-Zisu¹ and Boaz Zissu²

3. Department of Israel Studies, University of Haifa
(nshtober@research.haifa.ac.il)
 4. The Martin (Szusz) Department of Land of Israel Studies and
Archaeology, Bar Ilan University (boaz.zissu@biu.ac.il)
- Introduction

This guide appears on the other side of the book, on page 206

כתוב בשפה האנגלית ומופיע בסוף החוברת בעמוד 201

סיור מספר 7:

מעמס ועד ימינו: בעקבות רעידות האדמה ההיסטוריות ונזקיהן בעיר העתיקה בירושלים (והפתעות ארכיאולוגיה)

מוטי זוהר¹, עמית ראם²

1. החוג לגיאוגרפיה ולימודי הסביבה, אוניברסיטת חיפה

2. ארכיאולוג מחוז ירושלים, רשות העתיקות

מבוא

במהלך 3000 השנים האחרונות הצטברו עדויות רבות להתרחשות רעידות אדמה בישראל וסביבתה (Ambraseys, 2009; Amiran, Arie, & Turcotte, 1994). מרבית הרעידות מיוחסות לפעילות הסיסמית של טרנספורם ים המלח (Agnon, 2014; Garfunkel, Zak, & Freund, 1981; Hamiel et al., 2009; Marco & Klinger, 2014). לפי המקורות ההיסטוריים ירושלים נפגעה לא פחות מ 14 פעמים בין המאה השמינית לפנה"ס לראשית המאה העשרים ובסבירות גבוהה אף יותר אך המקורות המדווחים חסרים (Zohar, Salamon, & Rubin, 2017). סיור זה יתמקד בהיכרות עם רעידות האדמה שפקדו את ירושלים ובסקירת הנזקים שחלקם ניכרים עד היום. במהלך הסיור נדגים את השימוש במקורות המידע השונים וננסה לענות האם ובאיזה מידה השפיעו רעידות האדמה על האוכלוסיה באותה התקופה. בנוסף, נבקר בכמה אתרים ארכיאולוגיים שאינם פתוחים לקהל לאורך המסלול ונשמע סיפורים וחוויות מפי הארכיאולוג הראשי של ירושלים.

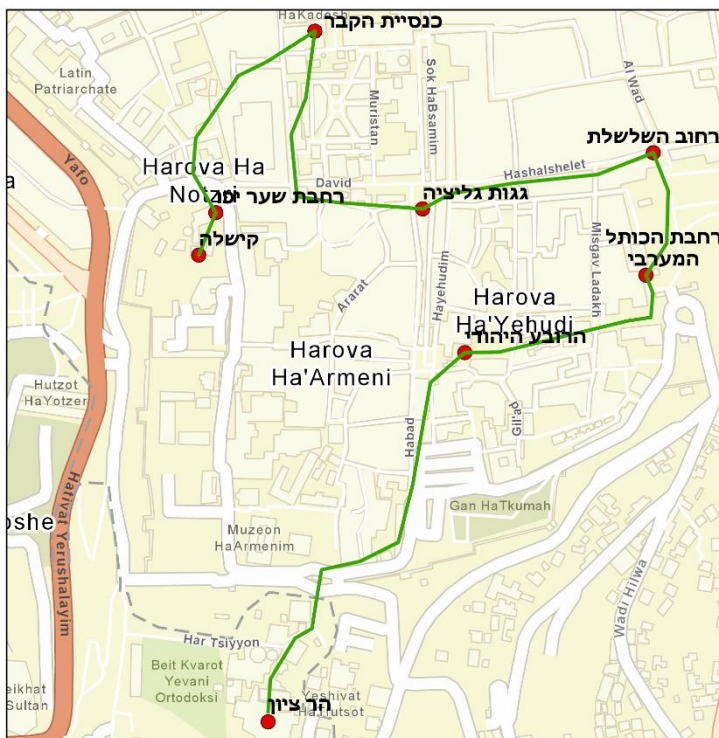
מקורות המידע

מקורות המידע של המחקר העוסק ברעידות האדמה ההיסטוריות כמו גם הסיור עצמו הם קבוצת הקטלוגים הביקורתיים והעדכניים שפורסמו לאחרונה (Ambraseys, 2009; Guidoboni & Comastri, 2005; Guidoboni, Comastri, & Traina, 1994; Ambraseys & White, 1997; Karcz, 1987, 2004; Meghraoui et al., 2003; Salamon, 2009; Salamon, Rockwell,

(Guidoboni, & Comastri, 2011), מאמרים העוסקים ברעידות ספציפיות (Ambraseys, 1997; Ambraseys & Barazangi, 1989; Ambraseys & Karcz, 1992; Ambraseys & Melville, 1988; Avni, 1999; Hough & Avni, 2010; Amiran, 1952; Amiran et al., 1994; Willis, 2015), קטלוגים המוקדמים לסוף המאה ה-20 (Zohar, Rubin, & Salamon, 2014), ועדויות המבוססות על מקורות ויזואליים (2015)

מסלול הסיור

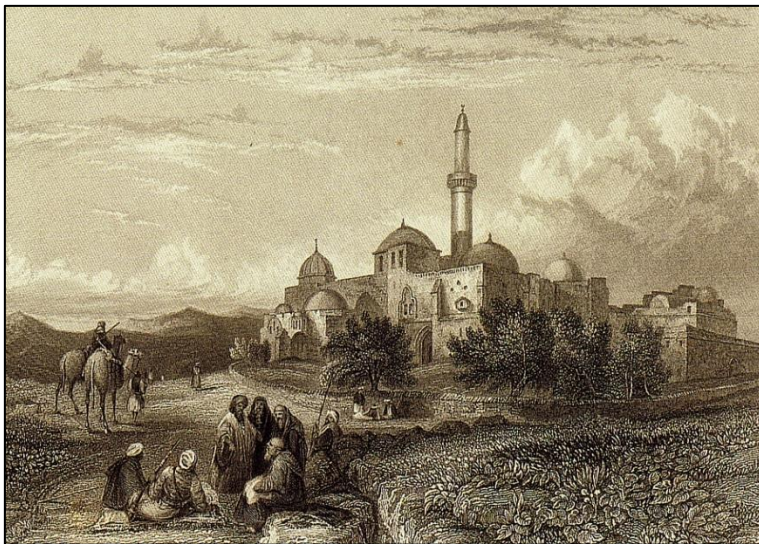
ראשית המסלול בהר ציון וסימונו בשער יפו ובמהלכו נבקר ברובעים היהודי והנוצרי (איור מס' 1). הביקור בתחנות השונות יסקור לסירוגין את רעידות האדמה ההיסטוריות וממצאים ארכיאולוגיים מחפירות המתקיימות בעיר העתיקה. משך הסיור הצפוי הוא כשש שעות.



איור 1: מפת מיקום של אזור הסיור, מסלול ותחנות הסיור

תחנה מס' 1: ביקור במתחם הקדוש בהר ציון

הר ציון מופיע לראשונה בכתבים בספרו של בנימין מטודלה במאה ה-12. במאה ה-15 בעקבות סכסוכים בין היהודים לנוצרים עוברת החזקה על ההר לידי הממלוכים שבונים במקום מסגד (Fabri, 1480-1483). ב-1517 העות'מאנים משתלטים על המקום ובונים מינרט על גבי גג חדר הסעודה האחרונה ומייפים את כוחה של משפחת דג'אני להחזיק במקום ועד לתקופת המנדט הבריטי היה סגור ללא-מוסלמים (Bartlett, 1844). ב-1948 לוחמי הפלמ"ח בראשות דוד אלעזר (דדו) מנסים לפרוץ מכאן לתוך העיר הנצורה ולהחזיק ברובע אך ללא הצלחה. לאחרונה שופץ המתחם והוכשר לביקורי קהל. ננסה לענות מי באמת קבור בקבר דוד על הר ציון? האם הנכונות האגדות והשמועות על מערה מסתורית החבויה תחתיו, ואיך מהנדס איטלקי מפוקפק קשור לכל העניין? ננסה לענות על שאלות אלו כמו גם להתחקות אחר רעידת האדמה שהתרחשה ב-1834 באמצעות מקרה בוחן היסטורי והערכת נזקים (Zohar et al., 2015) (איור מס' 2)



איור 2: מתחם הר ציון, 1833 (ג'ורג' באלמר לפי סקיצה שרשם פרידריך קתרווד)

תחנה מס' 2: הרובע היהודי ורחבת בית הכנסת החורבה

ב 11 ביולי 1927 התרחשה רעידת אדמה ברחבי ארץ ישראל המנדטורית. מוקד הרעידה היה בצפון ים המלח ועוצמתה 6.25 (Avni, 1999; Shapira, Avni, & Nur, 1993). ירושלים כמו גם ערים נוספות נפגעה קשות לרבות הרובע היהודי. ב 1948 עבר הרובע היהודי לשליטת ירדנים ולאחר ששוחרר ב 1967 עבר שיפוץ ושחזור מאסיבי שמחק חלק גדול מן העדויות לרעידת האדמה. למרות זאת, מספר ממצאים עדיין ניכרים בשטח. בתחנה זו ננסה לעמוד על הנזקים שנגרמו לרובע היהודי ונספר כיצד ובאיזה אופן השפיעה הרעידה על תושבי הרובע.

תחנה מס' 3: תצפית הכותל המערבי

תצפית על הכותל המערבי בסמוך לבית הכנסת עץ חיים ורחבת הכותל נתאר את סיפורה של רעידת האדמה שהתרחשה ב 363 (Russell, 1980) ואת הוויכוח באשר לסיבה שבעטיה נפלו אבני הכותל.

תחנה מס' 4: ביקור בחנות מקומית ברחוב השלשלת

האם מדובר בחנות "תמימה"? מה מסתתר מאחורי הקירות? נצלול להרפתקה תת קרקעית של ממש באתר הידוע רק לארכיאולוגים מועטים.

תחנה מס' 5: גגות גליציה

תצפית על אתרים ומקומות בולטים כגון הר הזיתים וכנסיית העלייה, אוגוסטה ויקטוריה, הר הצופים, כנסיית הגואל, כנסיית הקבר ומסגד עומר, הפטריארכיה היוונית אורתודוקסית, המצודה, אל-פאקריה, אל ג'אמי עומר, אל-חמרה. נתאר את פרופיל הנזקים להר הבית וסביבתו ברעידות האדמה של 363, אמצע המאה השמינית, 1033, 1927. נספר גם את סיפורה המעניין של האוניברסיטה העברית והאופן בו התמודדה עם תוצאות הרעידה ב 1927 והשלכותיה (Selzer & Zohar, 2019)



איור 3: נזק למבנה בהר הזיתים (מתוך אוסף מאטסון, ספריית הקונגרס האמריקאי)

תחנה מס' 6: כנסיית הקבר

האתר המיוחס לצליבתו, קבורתו ותחייתו של ישו. הוקם במאה הרביעית לספירה ככל הנראה בעקבות ביקורה בירושלים של הלנה, אמו של הקיסר הרומי-ביזנטי קונסטנטינוס. הכנסייה עלתה באש בשריפה שפרצה ב 1808 ולמרות זאת חושפת את סיפורן של כמה רעידות אדמה ובהן 33, 1546 (Ambraseys & Karcz, 1992), 1927 ואף רעידת האדמה שהתרחשה ב 2004 (Salamon, 2004) (איור 4)



איור 4: נזקים לכנסיית הקבר לאחר רעידת האדמה ב 2004

תחנה מס' 7: רחבת שער יפו

בעקבות רעידת האדמה של 1927 נסקור את קו המבנים ברחבת שער יפו: המצודה, מלון אימפריאל, מלון אמדורסקי, סוכנות הנסיעות של תומס קוק, הדואר האוסטרי וכנסיית המשיח. נתאר את פעולות השיקום לאחר הרעידה באמצעות מחלקת העבודות העירוניות (Public Working Department) ואת פועלו של הגיאולוג וויליס בילי לאחר רעידת האדמה (Willis, 1928)

תחנה מס' 8: הקישלה

בשנת 1999 נערכו חפירות מתחנת לקישלה (תחנת המטרה התורכית) סמוך לשער יפו. הממצאים המפתיעים הם בין החשובים שנתגלו בשנים האחרונות. החפירות סגורות לקהל אך אנו ניכנס ונשמע את סיפורו של המקום מימי מלכי יהודה ועד ימי הבריטים.

ספרות

- Agnon, A. (2014). Pre-instrumental earthquakes along the Dead Sea Rift. In Z. Garfunkel, Z. Ben-Avraham, & E. Kagan (Eds.), *Dead Sea Transform Fault System: Reviews, Modern Approaches in Solid Earth Sciences* (Vol. 6, pp. 207-261). Dordrecht: Springer.
- Ambraseys, N. N. (1997). The earthquake of 1 January 1837 in Southern Lebanon and Northern Israel. *Annals of Geophysics*, 11(4), 923-935.
- Ambraseys, N. N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East. A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900* (1 ed.). New York: Cambridge University Press.
- Ambraseys, N. N., & Barazangi, M. (1989). The 1759 Earthquake in the Bekaa Valley - Implications for earthquake hazard assessment in the eastern Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 94(B4), 4007-4013. Retrieved from <Go to ISI>://A1989U090200011
- Ambraseys, N. N., & Karcz, I. (1992). The earthquake of 1546 in the Holy Land. *Terra Nova*, 4(2), 253-262. Retrieved from <Go to ISI>://A1992HR72300016
- Ambraseys, N. N., & Melville, C. P. (1988). An analysis of the Eastern Mediterranean earthquake of 20 May 1202. In W. K. H. Lee, Meyers, H., and Shimazaki, K. (Ed.), *Historical Seismograms and Earthquakes of the World* (1 ed., Vol. 1, pp. 181-200). San Diego, California: Elsevier.
- Ambraseys, N. N., & White, D. (1997). The seismicity of the eastern Mediterranean region 550-1BC: a reappraisal. *Journal of Earthquake Engineering*, 1, 603-632.

- Amiran, D. H. K. (1952). A Revised Earthquake-Catalogue of Palestine. *Israel Exploration Journal*, 1, 223-246.
- Amiran, D. H. K., Ariei, E., & Turcotte, T. (1994). Earthquakes in Israel and adjacent areas: Macroseismic observation since 100 B.C.E. *Israel Exploration Journal*, 44(3-4), 260-305.
- Avni, R. (1999). *The 1927 Jericho earthquake, comprehensive macroseismic analysis based on contemporary sources*. (Ph.D.). Ben Gurion University, Beer-Sheva.
- Bartlett, W. H. (1844). *Walks about the City and Environs of Jerusalem*. London: A. Hall, Virtue & Co.
- Fabri, F. (1480-1483). The book of the wanderings of Brother Felix Fabri (A. Stewart, Trans.). In (Vol. 7). London: Palestine Pilgrims' Text Society.
- Garfunkel, Z., Zak, I., & Freund, R. (1981). Active faulting in the Dead Sea rift. *Tectonophysics*, 80, 1-26.
- Guidoboni, E., & Comastri, A. (2005). Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean Area from the 11th to the 15th Century. In. Bologna: INGV-SGA.
- Guidoboni, E., Comastri, A., & Traina, G. (1994). Catalogue of Ancient Earthquakes in the Mediterranean Area up to the 10th Century. In. Bologna: ING-SGA.
- Hamiel, Y., Amit, R., Begin, B. Z., Marco, S., Katz, O., Salamon, A., . . . Porat, N. (2009). The Seismicity along the Dead Sea Fault during the last 60000 years. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3), 2020-2026. doi:10.1785/0120080218
- Hough, S. E., & Avni, R. (2010). The 1170 and 1202 CE Dead Sea Rift earthquakes and long-term magnitude distribution of the Dead Sea fault zone. *Israel Journal of Earth Sciences*, 58, 295-308.
- Karcz, I. (1987). *Bibliographic Reliability of Catalogues of Historic Earthquakes in and around Israel*. *Catalogue of Turcott and Ariei (1986)*. Retrieved from Jerusalem:
- Karcz, I. (2004). Implications of some early Jewish sources for estimates of earthquake hazard in the Holy Land. *Annals of Geophysics*, 47(2/3), 759-792. Retrieved from file:///D:/motti/m-academic/ph.d/references/done/Karcz_2004_Implications%20of%20some%20early%20Jewish%20sources.pdf
- Marco, S., & Klinger, Y. (2014). Review of on-fault paleoseismic studies along the Dead Sea fault. In Z. Garfunkel & Z. Ben-Avraham (Eds.), *Dead Sea Transform Fault System: Reviews, Modern Approaches in Solid Earth Sciences* (Vol. 6, pp. 183-205). Dordrecht: Springer.
- Meghraoui, M., Gomez, F., Sbeinati, R., Van der Woerd, J., Mouty, M., Darkal, A. N., . . . Barazangi, M. (2003). Evidence for 830 years of seismic quiescence from palaeoseismology, archeoseismology and historical seismicity along the Dead Sea fault in Syria. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1-2), 35-52. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00144-4

- Russell, K. W. (1980). The earthquake of May 19, A.D. 363. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 238, 47-64.
- Salamon, A. (2004). *Seismically induced ground effects of the February 11, 2004, $M_L=5.2$, northeastern Dead Sea earthquake*. Retrieved from Jerusalem:
- Salamon, A. (2009). Patterns of seismic sequences in the Levant-interpretation of historical seismicity. *Journal of Seismology*, 14(2), 339-367. Retrieved from <Go to ISI>://000275416100010
- Salamon, A., Rockwell, T., Guidoboni, E., & Comastri, A. (2011). A critical evaluation of tsunami records reported for the Levant coast from the second millennium BCE to the present. *Israel Journal of Earth Sciences*, 58, 327-354.
- Selzer, A., & Zohar, M. (2019). The ruins in the chemistry building are revised". The Hebrew university competes with the damages of the earthquake of July 1927. *Cathedra*, 171, 75-96.
- Shapira, A., Avni, R., & Nur, A. (1993). A new estimate for the epicenter of the Jericho earthquake of 11 July 1927. *Israel Journal of Earth Science*, 42, 93-96.
- Willis, B. (1928). Earthquakes in the Holy Land. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 18, 72-103.
- Zohar, M., Rubin, R., & Salamon, A. (2014). Earthquake damage and repair: new evidence from Jerusalem on the 1927 Jericho earthquake. *Seismological Research Letters*, 85(4), 912-922. doi:10.1785/0220140009
- Zohar, M., Rubin, R., & Salamon, A. (2015). Why is the minaret so short? Evidence on earthquake damage in Mt. Zion. *Palestine exploration quarterly*, 147(3), 230-246. doi:10.1179/1743130114Y.0000000016
- Zohar, M., Salamon, A., & Rubin, R. (2017). Earthquake damage history in Israel and its close surrounding - evaluation of spatial and temporal patterns. *Tectonophysics*, 696, 1-13. doi:10.1016/j.tecto.2016.12.015

סיור מספר 8:

אתגרי אספקת המים לירושלים – עבר, הווה ועתיד

עליזה הר שושנים¹, עודד לרנר¹, מיקי אלישע¹, עמית בראל²

1. חברת מקורות

2. אקולוג הנדסה

רקע

מערכת אספקת המים הקיימת היום המספקת מים לעיר ירושלים ולסביבתה הגיעה בשנים האחרונות לתפוקה מירבית וקיים מחסור במים ההולך ומחריף עם הזמן. נוסף על כך, מקורות המים בישראל השתנו ומושתתים יותר על מערכות ההתפלה הפזורות לאורך חופי ישראל. על כן, נדרש פרויקט עם אופק שירות בהיבט אספקת המים לירושלים בהתאם לצפי העתידי ולגידול האוכלוסיה של העיר והאיזור. לאור זאת מקדמת חברת מקורות את מערכת אספקת המים החמישית לירושלים אשר הינה פרויקט אסטרטגי ברמה לאומית ובשל חשיבותה הוגדרה המערכת על ידי ממשלת ישראל כמפעל תשתית לאומי. על מנת לעמוד על היקף מפעל אספקת המים הסיור יתחלק ל-2 תחנות ראשיות:

- **בתחנות אתר חולדה** של מקורות נשמע על ההיסטוריה המפוארת והמאתגרת של אספקת המים לבירה בימי המנדט ובשנותיה הראשונות של המדינה, וכן על המערכת הנוכחית על שלל מתקניה.
- **בתחנות מנהרת ה"קו ה-5"** נתרשם ממנהרת המים העצומה שכרייתה מסתיימת בימים אלו ומתחנת השאיבה המיועדת להעלות את המים במעלה ההר.

תחנות אתר חולדה – עבר והווה

נתפצל ל-2 קבוצות לשמוע על ההיסטוריה של אספקת המים, מפי עליזה הר שושנים, ועל מערכת אספקת המים הנוכחית מפי עודד לרנר.

ירושלים העיר הצמאה למים תמיד - בתחומי העיר היו מעיינות מעטים: מעין הגיחון ועין רוגל שסיפקו מים לתושבים בעת הקדומה. במקרא אנחנו שומעים על המלך חזקיה שבנה את נקבת השילוח - מפעל מים שאפשר הכנסת מים לעיר גם בעת מצור.

בתקופות מאוחרות יותר הוזרמו לעיר מים ממקומות מרוחקים יותר כמו המעיינות באזור הרי חברון: אל ערוב והביאר - מים שהועברו באמצעות מפעלי מים מרשימים שכללו אמות: האמה העליונה והאמה התחתונה, ובריכות: בריכות שלמה ובריכות ארטס.

בתחומי העיר נבנו בריכות לאיגום מי השיטפונות- בריכת ממילא ובריכת הסולטן ובין החומות בריכות נוספות לאגירת מי גשמים. בנוסף, נחצבו בורות בחצרות הבתים שאף הם התמלאו ממי הגשמים (בור גדול ממדים מצוי בהר הבית).

עם גידול האוכלוסייה בעת החדשה התעורר צורך למצוא מקורות מים נוספים. אלו נמצאו ממזרח לעיר- המעיינות בוואדי קלט, משם הובלו המים לעיר על ידי יוניי בשם מברומטיס שקבל מהשלטון העות'מאני זיכיון להוביל מים לעיר. הנהנים העיקריים ממים אלו היו היושבים במזרח העיר ברובם התושבים הערביים. תושבי ירושלים הישראלים שהחלו להתיישב בשכונות המערביות יותר החלו לחוש בצורך הגדל והולך למים, ואף השלטון הבריטי נתן דעתו על-כך אולם זמן רב חלף עד שהרצונות והתוכניות הגיעו לכלל מעשה. שלטון המנדט הבריטי הניח קו מים ממעיינות הירקון עד לירושלים. קו מים באורך 62 ק"מ בקוטר 18" העלה את המים מגובה 30 מ' במעיינות הירקון עד לגובה 800 מ' בירושלים. לאורך הקו נבנו ארבע תחנות שאיבה:

בראש העין, בלטרון (אל-קובייב), בשער הגיא ובסריס (שואבה). מהתחנה האחרונה הועלו המים אל בריכת מים בקיבולת של 20 אלף קוב שנבנתה בשכונת רוממה בירושלים.

7/1/36 חנך הנציב העליון –סיר ארתור וקופ את התחנה וירושלים החלה מקבלת בין 100 ל-120 קוב מים לשעה. בשנות השיא הגיעה הצריכה ל- 4 מלמ"ק בשנה.

השמחה לא ארכה זמן רב כי בפרעות (תרצ"ו-תרצ"ט) שפרצו אח"כ חיבלו הערבים בקו המים וגרמו שיבושים באספקת המים לעיר. מי שסבל בעיקר מההפסקות באספקת המים היו השכונות היהודיות שהתבססו על המים שהגיעו מראש העין. השכונות הערביות קיבלו את מימיהן ממזרח וכך לא נפגעו מהפגיעה בקווי המים.

עם פרוץ מלחמת השחרור (כ"ט בנובמבר 47'), הבינו בירושלים שחייבים לדאוג למקור מים חלופי כי הקו עלול להיות נתון לחסדם של הערבים. ולכן כבר ב-19/12/47 התכנסה מועצת העיר לדון בנושא המים והתקבלה תכנית לאגור מים בבורות הנמצאים בחצרות הבתים. למשימה גויסו כ-40 מתנדבים שערכו את "מפקד הבורות" במהלכו נסקרו 1,800 בורות ברחבי העיר ונבדקו קיבולת ומצב הבור. הבורות הולאמו ואחרי טיפול של ניקוי ותיקון מולאו במי גשמים וגם במי הקו המנדטורי. לאחר מילוי הבורות עמדו לרשותם 115,000 מ"ק, שהספיקו עפ"י הקצבה של 10 ליטר לאדם ליום ל-115 ימים (100 אלף תושבים היו אז בירושלים). הבורות נחתמו והמים נשמרו לשעת חירום שהגיעה בעקבות חבלה בקו המים, ובתחילת מאי 1948 התחילה ירושלים להשתמש במי הבורות. המים חולקו במשורה ע"י מכליות ותורים צצו בנקודות חלוקה שונות בעיר. לאחר עזיבת הבריטים את הארץ, מתגברים הקרבות, המצור נמשך והמחסור מחריף, ככל שעובר הזמן הולכים המים ומתמעטים.

ניסיונות לחידוש אספקת המים מראש המים נעשים במהלך ההפוגות בקרבות, אך ללא הועיל. עם חלוף הזמן גוברים המצוקה והמחסור במים (בשלב מסוים סופקו לאדם 5 ל" ליום בלבד), וראשי היישוב נדרשים לפתרונות למצוקת המים בעיר. מועלות אפשרויות שונות עד שלבסוף הצעה שהעלתה חברת מקורות התקבלה - להביא מים מקבוצת חולדה (חבורה ע"י מקורות לקו מים מספר שנים קודם לכן והייתה מרכזית בהתרחשויות בתש"ח). מקורות נרתמה למבצע בזק במהלכו גויסו עובדים מ"סולל בונה" ומ"חרות", הובאו צינורות שנקנו מספר שנים קודם - בתום המלחמה באירופה, שם שמשו במהלך המלחמה להובלת מים לכיבוי אש. תוך פחות משלושים יום הונח קו השילוח, ונבנתה בריכת השילוח ושתי תחנות.

ב-13 באוגוסט '48, למחרת הלילה בו מופצצת תחנת לטרון, הופעל קו השילוח לראשונה, כשכל הבריכות והבורות בירושלים כבר ריקים.

קו זה הציל את ירושלים מצמא בימי המצור ואף לאחר המלחמה המשיך לשמש (לאחר שיפורים) כקו המים לעיר עד הנחת הקו השני שנחנך ב-53'.



איור 1. חתכים של צינורות אספקת המים לירושלים המוצגים במוזיאון "דיזל חולדה".



איור 2. תוואי קווי אספקת המים לירושלים.

טבלה 1. נתוני קווי אספקת המים לירושלים

קווים	הקמה	קוטר	כמות שנתית	הערות
הקו הראשון (המנדטורי)	1936	18 אינץ'	4 מיליון מ"ק	פוצץ על ידי הירדנים ב-1948
קו השילוח	1948	10-12 אינץ'	0.7 מיליון מ"ק	פעל זמנית בתקופת מלחמת השחרור
הקו השני	1953	24 אינץ'	10 מיליון מ"ק	פעיל
הקו השלישי	1979	36 אינץ'	14 מיליון מ"ק	פעיל
הקו הרביעי	1994	42-50 אינץ'	50 מיליון מ"ק	פעיל
הקו החמישי	ירושלם בעשור השני של שנות האלפיים	80-100 אינץ'	150 מיליון מ"ק	בתכנון

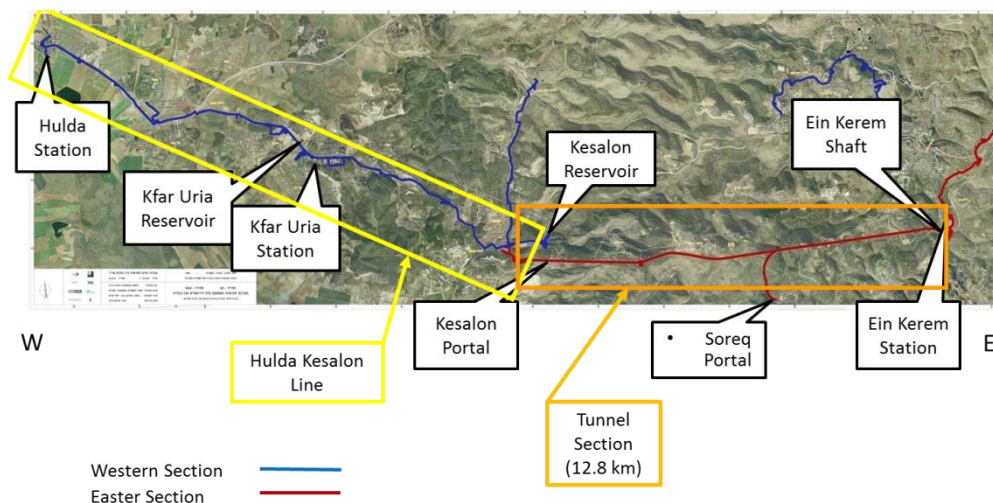
תחנות מנהרת הקו החמישי – עתיד

בתחנה זו נבקר בפורטל כסלון של מנהרת הקו ה-5, בתחנת השאיבה הסמוכה ובמנהרת הצד, ונשמע מפי מיקי אלישע (מנהל הפרויקט) ועמית בראל (גיאולוג ראשי) על האתגרים וההצלחות.

סקירה כללית

מיקום הפרויקט

קטעו המערבי של קו המים החמישי לירושלים תחילתו בתחנת השאיבה חולדה וסיומו בתחנת השאיבה כסלון הקרובה גיאוגרפית לצומת אשתאול וכולו בוצע בשיטת "חפירה וכיסוי". קטעו המזרחי של קו המים מתחיל בפורטל כסלון ומסתיים בפיר עין כרם (צומת עין כרם) ומבוצע ע"י כריית מנהרה. ההחלטה להעברת קו המים דרך מנהרה יעודית נבעה ממספר שיקולים ביניהם השפעת עבודות התקנת הקו על הסביבה ושיקולים הנובעים משיפועי הטופוגרפיה החדים הקיימים לאורך המקטע המזרחי שבין צומת אשתאול לצומת עין כרם.



איור 3. מפת מיקום של אזור הסיור, מסלול ותחנות הסיור

נתוני המנהרה וספיקת קו המים

אורכה הכולל של המנהרה מגיע לכ-13 ק"מ, כרייתה מבוצעת בזווית משתנה של 1-3% וקוטרה כ-3.9 מ'. פתח המנהרה ממוקם בגובה 304 מ' מעל פני הים עם כיסוי סלע רדוד של כ-15 מ' מתחת לפני הקרקע ופיר סיום המנהרה ממוקם בגובה של כ-521 מ' מעל פני הים. כיסוי הסלע המקסימלי במנהרה מגיע עד לכ-300 מ' מתחת לפני הקרקע. קו המים החמישי הינו צינור פלדה שעוביו משתנה בין 16-25 מ"מ וקוטרו 102" (כ-2.5 מ'), בעל יכולת ספיקה של כ-65,000 מ"ק לשעה המתחבר בקצהו למערכת הגיחון.

שיטת כריית המנהרה הראשית

עבודות הכרייה בפרויקט זה בוצעו בכמה שיטות כרייה שונות ובמוקדים שונים, כאשר כריית המנהרה הראשית, מנהרת כסלון, בוצעה בשיטת **TBM (Tunnel boring machine)** באמצעות מכונת **Open shield TBM** המיועדת לכרייה במסלע קשה. למכונה זו יש תמיכה עצמית בעזרת שני זוגות "גרפרים" (דמויי "ידיים") האוחזים בקירות המנהרה בחוזקה ומאפשרים את פעולת הדחיפה של הראש הקודח.



איור 4. עבודות הרכבת מכונת ה- TBM - Open shield בשלביה הראשונים

גיאולוגיה**רקע גיאולוגי של אזור הפרויקט**

תור הסלעים באזור ירושלים שקע בים הטתים הקרטיקוני לפני כ- 144-66 מיליוני שנים. הים הציף חלקים נרחבים של המזרח התיכון אשר כללו גם מדף יבשתי שטוח רחב ידיים. הזמן הרב שבו התקיימה ההצפה מעל האזור הביא לשקיעת חתך עבה של סלעים קרבונאטים שעוביו מגיע עד לכ-1000 מ'. בשלב מאוחר יותר תנועות טקטוניות שינו את תבליטו השטוח של מדף היבשת ויצרו מבני קימוט של אנטיקלינות וסינקלינות בכיוון כללי צפון מזרח - דרום מערב המוכרים לנו כיום כנוף ההררי של שדרת ההר.

תוואי המנהרה בפרויקט זה עובר דרך חתך הסלעים הקרבונטיים של הרי יהודה ולאורכה נחשפים סלעי חבורת הר הצופים וחבורת יהודה. זיהוי סוגי ליתולוגיות הסלעים השונות ותכונותיהן מהוות מרכיב עיקרי ביציבות ההנדסית של המנהרה. עיקרי הסלעים הקרבונטיים הבונים את עיקר המנהרה הינם אבני גיר, דולומיט וחואר, כאשר באזור פורטל המנהרה הראשית נמצאו גם סלעי קירטון וצור.

סטרטיגרפיה וחתכים גיאולוגיים

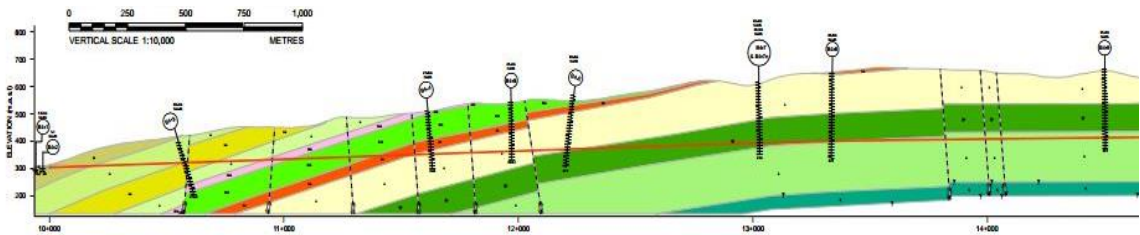
כחלק מהכנת מסמכי מכרז הפרויקט בוצעה חקירה גיאוטכנית-גיאולוגית לכל אורכו של תוואי המנהרה העתידי. חקירה זו כללה סקר רפלקציה סיסמית וכ-3.5 ק"מ של קידוחי גלעין רציף. בדיקות רבות בוצעו בבורות הקידוחים השונים בינהן בדיקות יחודיות כדוגמאת צילום וידאו, **Hydrofracturing**, מהירות סיסמית ועוד. בסיום איסוף המידע הכולל בוצע ניתוח הנתונים, ריכוזם והכנת חתכים גיאולוגיים המושלכים על גבי תוואי הפרויקט.

Kesalon (Main) Portal

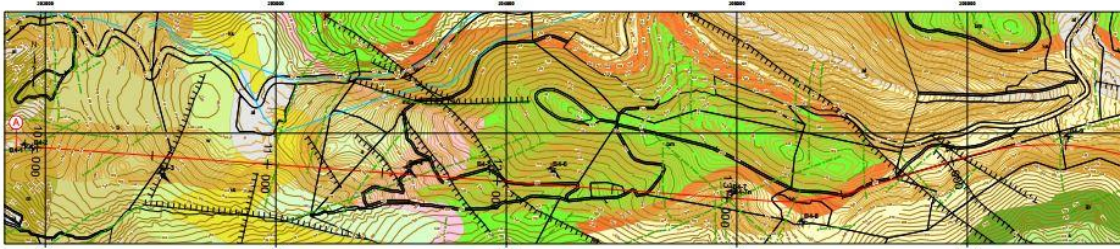
Tunnel

Symbol	Formation	Lithology	Age
al	---	Clay, grave (Alluvium)	Quaternary
m	Menuha	Chalk, marly chalk, bituminous chalk with chert lenses and beds	Senonian
b	Bina	Limestone interbedded with chalky limestone	Turonian-Cenomanian
w	Weradim	Dolomite and limy dolomite	Cenomanian
ks	Kefar Shaul	Chalky and marly limestone	Cenomanian
a	Aminadav	Massive, hard dolomite	Cenomanian
mo	Moza	Marl interbedded with chalky limestone	Cenomanian
bm	Bait Meir	Dolomite interbedded with marl	Cenomanian
ke	Kesalon	Massive dolomite and limestone	Cenomanian
s	Soreq	Dolomite, at places limy with marl beds	Cenomanian
gy	Giv'at Yearim	Massive, fractured dolomite, well bedded	Cenomanian
k	Kefira	Limestone interbedded with thin limy dolomite and marl beds	Cenomanian-Albian
q	Qatana	Nodular limestone interbedded with marl	Albian

איור 5. חתך סטריגרפי על סמך החקירה הגיאולוגית המקדימה של תוואי המנהרה



איור 6. חתך גיאולוגי, מבט צד, של תוואי המנהרה על סמך החקירה הגיאולוגית המקדימה



איור 7. חתך גיאולוגי, מבט "על", של תוואי המנהרה על סמך החקירה הגיאולוגית המקדימה

תיעוד ומיפוי גיאולוגי-הנדסי

במהלך ביצוע הכריה בשיטות השונות, קיים מעקב, תיעוד ומיפוי גיאולוגי-הנדסי צמוד ושוטף המבוצע ע"י צוות גיאולוגים. מיון מסת הסלע מאפשר מתן ביטוי מספרי לאיכותו למטרות הנדסיות. תכנון תנאי הביסוס של מנהרות, או של מבנים תת קרקעיים אחרים, מבוסס על ההגדרה הגיאוטכניות של מסת הסלע כפי שהוגדרה ע"י התכונות הפיסיקליות, הכימיות והמכניות של הסלעים הקיימים בתוואי הפרויקט.



איור 8. תיעוד של נטיית שכבות הסלע הנמדדות כחלק מעבודת המיפוי הגיאולוגי-הנדסי המבוצע באופן צמוד לכריית המנהרה

סיור מספר 9:

הידרוגיאולוגיה של אקוויפר ירת"ן, סוגיות של אספקת מים, רגולציה וזיהום תעשייתי

יוסף גוטמן

הידרולוגיה. חברת מקורות ואחרים

מבוא

אקוויפר ההר המערבי שנקרא בפי אנשי המקצוע "אגן ירקון תנינים", הוא מרכיב חשוב במערכת הארצית של מדינת ישראל וההפקה ממנו משפיעה ומושפעת מההפקה ממקורות המים הנוספים של המערכת הארצית (מי ים מותפלים, אקוויפר החוף והכנרת).

המודל ההידרוגיאולוגי הקונספטואלי ומדיניות ניהול הפקת מי התהום מהאגן היא דוגמה לניהול מיטבי של אקוויפר קרבונטי שמשלב הבנה של הגיאולוגיה, ההידרולוגיה והגיאוכימיה של מקורות המים ביחד עם צרכי האספקה המקומיים והאזוריים.

התרחבות הישובים, הזדקנות הקדוחים (רבים מהם בני גיל מעל ל-50 שנה), מגבלות רדיוס מגן, תהליכי המלחה וחשש לזיהומים במקומות שונים ברחבי האקוויפר, עלולים להביא תוך מספר שנים את משק המים וחברת מקורות למצב בו כושר ההפקה הנוכחי באקוויפר ירקון תנינים יקטן משמעותית ועימו תקטן גם הגמישות התפעולית שהינה מרכיב חשוב בניהול המשולב של מערכת המים הארצית.

מטרות הסיור

1. להכיר את המערכת ההידרוגיאולוגית של אקוויפר חבורת יהודה באגן ירקון-תנינים.
2. תפעול האקוויפר בעידן ההתפלה.
3. זיהומים (טבעיים ואנתרופוגניים) והשפעתם על קידוחי ההפקה (כתם כפר אוריה, זיהום תעשייתי ממפעל התעשייה האווירית, תוכניות להקמת תחנת כוח בצומת קסם).
4. מעיינות הירקון בראש העין, קידוח ראש העין 13 (בקדיחה).
5. תוכניות להסטת ההפקה למורדות המזרחיים של רגלי ההר- רגולציה והידרולוגיה.

רקע הידרוגיאולוגי

השדרה ההררית המרכזית של ישראל הבנויה משכבות עבות של סלעים קרבונטים (גיר ודולומיט) עם שכבות ביניים של חוואר וחרסית, מרכיבות את האקוויפר הקרבונטי של אגן ירקון תנינים (אקוויפר ההר המערבי).

גבולות השתרעותו (תרשים 1) הוא מקו ניצנה - ירוחם בדרום ועד אזור בנימינה ויקנעם בצפון ומאזור החוף במערב ועד לצירי הקמר של שדרת ההר המרכזית במזרח.

האקוויפר מורכב בעיקר משכבות גיר ודולומיט וביניהם שכבות קרטוניות, חוואריות וחרסית. העובי הכולל של האקוויפר נע מכ- 800 מ' בצפון ובמרכז האגן לכ- 500-550 מ' בחלק הדרומי של האגן. את החתך האקוויפרי ניתן לחלק לשלוש יחידות הידרו-סטרטיגרפיות והם: יחידה תחתונה (KUJ1) המורכבת מדולומיט וגיר סדוק ומתאפיינת במוליכות הידראולית גבוהה.

יחידה אמצעית (KUJ2) המורכבת מחילופין של קרטון, קרטון גירי, חוואר ולעתים גם דולומיט ומתאפיינת במוליכות הידראולית נמוכה עד בינונית.

יחידה עליונה (KUJ3, KUJ4) מורכבת מגיר ודולומיט סדוקים ומתאפיינת במוליכות הידראולית גבוהה.

זרימת מי התהום מהאזור ההררי למורד נעשית תוך עקיפת מכשולים סטרוקטורליים. השינוי ברום המפלסים בין האזור ההררי למרגלות ההרים הוא של מאות מטרים (250-450 מ') על פני מרחק אווירי שבין 15-20 ק"מ בלבד. מדובר בגרדיינט זרימה מאד חריף ועל מנת לשמור על המפלסים הגבוהים בחלק ההררי, נדרשים מחסומים הידרולוגים מקומיים בדמות אזורים בעלי מוליכות הידראולית נמוכה. חלק מהמחסומים ההידרולוגים מוכרים על בסיס המידע הגיאולוגי ומיידע מקידוחים שנקדחו בהר הגבוה. עם זאת, ישנם אזורים נרחבים בהר הגבוה בהם המיידע על מפלסי המים והתכונות ההידראוליות הוא מועט או שבכלל לא קיים. באזורים אלו יש קושי לאתר את מיקומם של המחסומים ההידרולוגים הנדרשים על מנת לשמור על מפלסי מים גבוהים באזור ההררי שבמעלה האגן.

כוון הזרימה ממערב לרגלי ההרים הוא מדרום לצפון לעבר המוצאים הטבעיים ובגרדיינט מתון ביותר (3-5 מ' על פני מרחק של כ- 150 ק"מ). גרדיינט כה מתון מצביע על מוליכות הידראולית גבוהה מאד המלווה באגירות קטנה מאד בחלק הכלוא של האקוויפר. תרשים 2 מציג את מסלולי הזרימה מתוך דפני (2012).

היציאות הטבעיות לפני תחילת ההפקה היו בעיקר דרך שני מעיינות. מעיינות הירקון במרכז האגן דרכו שפעה כמות שנתייה שהוערכה בין 220-240 מלמ"ק/שנה ומעיינות התנינים בפניה הצפון-מערבית של האגן דרכם שפעו כ- 110 מלמ"ק/שנה.

מעיינות הירקון הם מעיין מסוג **overflow** האנלוגי לפתח ניקוז עליון של מיכל הרגיש מאוד לשינויים בעומד המים. בשנות הששים של המאה העשרים, כתוצאה מהשאיבה ושנות הבצורת, ירד מפלס המים מתחת לרום הנביעה ושפיעת המעיינות פסקה. השפיעה חזרה

לתקופה של כשנתיים לאחר חורף 1991/92 בו עלו מפלסי המים באגן ביותר מ-10 מ' תוך כ-3 חודשים.

מעיינות התנינים הממוקמים בקצה הצפון-מערבי של האגן משמשים כמוצא התחתון של האקוויפר ובאנלוגיה למעיינות הירקון, מעיינות התנינים הם סוג של פתח ניקוז תחתון. בניגוד למעיינות הירקון שהתייבשו, מעיינות התנינים ימשיכו לנבוע (אם כי בספיקה הולכת וקטנה) מאחר והשאיבה נעשית רחוק ממוצא המעיינות וברום מפלס הגבוה במספר מטרים מהמעומד המניע של המעיין.

על בסיס החלוקה ההידרו-סטרטיגרפית, מפלסי המים ואיכות המים מתברר כי האקוויפר מתחלק לשני תת אקוויפרים. תת אקוויפר עליון ביחידות (KUJ3, KUJ4) ותת אקוויפר תחתון ביחידה KUJ1. היחידה האמצעית מהווה בחלק מהאזורים כשכבה המפרידה בין שני תת האקוויפרים ובאזורים אחרים כשכבה אקוויפרית.

ממוצע המילוי החוזר השנתי המחושב לתקופה שבין 1952-2019 הוא כ-345 מלמ"ק, החציון הוא כ-331 מלמ"ק וסטיית התקן כ-120 מלמ"ק. סטיית התקן עומדת על כ-30% וקשורה להשפעות של שינוי אקלים ושינויים בפיזור ובעוצמת הגשמים במהלך חודשי החורף.

הפיזור והשונות של המשקעים על גבי המחשופים של אזורי המילוי החוזר ביחד עם השונות בתכונות ההידראוליות בין חלקי האקוויפר, מביאה להבדלים בתנודות המפלס העונתיות והרב שנתיות בין אזורים שונים ברחבי האגן. באופן כללי, התגובה של מפלסי המים לגשם גבוהה בחלק הצפוני של האגן מזו שבמרכז ובדרום האגן.

שמחלקים את מחשופי האקוויפר על פי שייכותם לאחד משני תת האקוויפרים (עליון ותחתון), מתברר שרוב שטחי המילוי החוזר (כ-70%) שייכים לתת האקוויפר התחתון. לעומת זאת, עיקר השאיבה מתבצעת באמצעות קידוחים שמפיקים מתת האקוויפר העליון. מאחר והשאיבה הגדולה מתת האקוויפר העליון איננה מתבטאת בירידות מפלסים, משמעות הדבר שחייבת להיות תרומה משמעותית של מי תהום מתת האקוויפר התחתון לתת האקוויפר העליון שתביא למאזן מים מאוזן בתת האקוויפר העליון בין הכניסות (מילוי חוזר ישיר ומעבר מים מתת האקוויפר התחתון) לבין היציאות (הפקה ושפיעת מעיינות).

מדובר במעבר מים מסיבי (עשרות רבות של מלמ"ק/שנה) שמחייב איתור אזורים נרחבים בהם גיאולוגית יכול להיווצר קשר לטרלי בין תת האקוויפר התחתון לעליון. האיתור של אותם אזורים הוא בעייתי מאחר ורוב המידע הגיאולוגי מרוכז בקידוחי המים שממוקמים לרגלי ההרים ואילו המידע בחלקים המערביים של האגן הוא מועט ולעתים אף חסר. הקושי לאיתור אזורי הקשר בין האקוויפרים נובע גם מהעובדה שברוב הקידוחים העמוקים החתך

האקוויפרי הקרבונטי נקדח ברובו בתנאי איבוד מחזור לעתים גם ללא לקיחה של גלעינים. מאחר ומיקומם של אזורי הקשר (מעברי מים) אינו ידוע, כל המודלים התלת-מדדיים (3D) שמנסים לדמות את מעבר מים מהאקוויפר התחתון לעליון אינם מדויקים (בלשון המעטה).

לאורך הגבול המערבי של האגן נקדחו מספר קידוחי ניטור לעומקים שבין 1000-1400 מ' לגוף המים המלוח שממוקם במבנה סינקלינלי שממערב לשדות השאיבה. המים המלוחים הם בריכוז כלוריד שבין 15000-17000 מגכ"ל ומבחינה כימית ואיזוטופית זהים למי ים קדומים שחדרו לאקוויפר ונאגרו בתוך הסינקלינה (בורג, תלחמי, 2014). השרות ההידרולוגי מודד את השינויים ברום אזור המעבר בין המים המתוקים למלוחים במטרה לעקוב אחר התפשטות גוף המים המליח כתוצאה מהשאיבה של מים שפירים. הניטור של אזור המעבר הוא פרמטר נוסף שיש לקחת בחשבון בעת ניהול ההפקה באקוויפר.

המים המלוחים מתאפיינים בטמפרטורה נמוכה ($25-27^{\circ}\text{C}$) שדומה לטמפרטורות המוכרות בקידוחים שמפיקים מגוף המים השפירים ומרמזת על מהירות זרימה גדולה הגורמת לקרור התווך האקוויפרי דרכו היא זורמת. במערכת זרימה כה אינטנסיבית היה ניתן לצפות לכך שגוף המים המלוח המצוי לאורך הגבול המערבי של האקוויפר, יישטף החוצה במרוצת אלפי השנים על ידי זרימת המים המתוקים. בפועל זה לא קורה והאקוויפר לאורך הגבול המערבי מכיל מים מלוחים, בגלל שזרימת המים המתוקים בחלק המערבי של האגן, מתרחשת רק בחלק העליון של החתך האקוויפרי ובשכבה דקה המונחת על גבי המים המלוחים, בעוד שיתר החתך האקוויפרי אשר מכיל מים מלוחים, אינו מושפע מזרימת המים המתוקים ומתנהג כמו גוף סטגננטי.

הפקה באמצעות קידוחים

האקוויפר מורכב מאזור פריאטי שמתחיל בקרבת קו פרשת המים במזרח ומסתיים כ- 3-1 ק"מ ממערב לרגלי ההרים. ממערב לאזור הפראטי האקוויפר נמצא בתנאי כליאה. קו הכליאה מוגדר כקו שממערב לו מפלס המים נמצא מעל לגג האקוויפר העליון (תרשים 1). רוב הפקת מי התהום מתבצעת באזור הפראטי שלרגלי ההרים ועד למספר קילומטרים ממערב לקו הכליאה (אזור המעבר בין החלק הפראטי לחלק הכלוא). הקידוחים הראשונים נקדחו לרגלי ההרים עוד בשנות הארבעים של המאה העשרים. בשנות החמישים והששים של המאה העשרים היתה פעילות מואצת של פיתוח ההפקה לרגלי ההרים באמצעות עשרות רבות של קידוחים שנקדחו בעיקר לתת האקוויפר העליון.

רוב הקידוחים שנקדחו לפני כ- 50-60 שנה חדרו רק כמה עשרות מטרים לתוך התווך הקרסטי של תת האקוויפר העליון. מרביתם נקדחו בשיטות קדיחה שנחשבות היום כמושנות כאשר החלק העליון מפני הקרקע ועד למפלס המים לא מולט ולא מוגן כראוי מזהומים

פוטנציאלים הקיימים על פני השטח. למרות זאת, אירועי הזיהום כתוצאה מזיהום מפני השטח הם מועטים ומוסברים במוליכות ההידראולית האופקית הגבוהה של האקוויפר שמתבטאת בזרימה אופקית מהירה של מי התהום ובאנאיזוטרופיות של האקוויפר.

בגלל שעיקר המילוי החוזר הוא בתת האקוויפר התחתון ומסיבות רגולטוריות של שמירה על אזורי הגנה, המדיניות בשנים האחרונות היא לקדוח את הקידוחים החדשים שלרגלי ההרים בעיקר לחלקים העמוקים של תת האקוויפר העליון ולתת האקוויפר התחתון (ראה פרק עתיד אקוויפר ירקון תנינים בעשורים הבאים).

ממצאי הקדיחה וניתוח של לוגים חשמליים ממספר רב של קידוחים מראים שהחתך האקוויפרי שעוביו מגיע לכמה מאות מטרים, מורכב ממספר רב של סדקים גדולים וקטנים וחללים קרסטיים. מניתוח של לוגים חשמליים ומצילומי טלביזיה זוהו במספר קידוחים חללים קרסטים שגובהם מגיע למספר מטרים ואשר ממוקמים בעומק של מאות מטרים מתחת לפני הקרקע.

מיקומם של הסדקים הגדולים והמערות הקרסטיות המשמעותיות משתנה בין קידוחים סמוכים ולאורך החתך האקוויפרי שעוביו כאמור מגיע למאות מטרים (תרשים 3). לכן, לא ניתן להשתמש במיקומם בחתך לצורך קורלציה גיאולוגית מרחבית. מה שכן ניתן לומר הוא שישנו קשר ישיר בין הכמות וגודל הסדקים והמערות הקרסטיות שלאורך החתך האקוויפרי שנקדח בקידוח ספציפי, לתכונות ההידראוליות שלו (תולכה וספיקה יחסית) שמתקבלות באותו קידוח במהלך שאיבת הניסיון.

בקידוחים בהם נקדח חתך עשיר בסדקים ובמערות קרסטיות, נצפה לקבל ספיקה יחסית גבוהה (ספיקות שעתיות גבוהות עם נפילות דינמיות קטנות) ותולכות גבוהות (אלפים עד עשרות אלפי מ"ר/יממה) ולהיפך.

כתם המליחות בשדה קידוחי כפר אוריה

שדה קידוחי כפר אוריה ממוקם ממערב לכביש שער הגיא-בית שמש ממערב לנחיתת האגף המערבי של קמר רמאללה. רוב קידוחי השדה נקדחו לפני עשרות שנים. מרביתם לחלק העליון של האקוויפר העליון (תרשים 4).

קידוח כפר אוריה 11 הוא היחיד שנקדח ומפיק מהאקוויפר התחתון של חבורת יהודה.

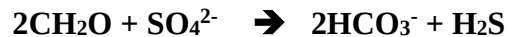
שדה קדוחי כפר אוריה מתחלק לשני אזורי מליחות: אזור דרום מזרחי בו המליחות נמוכה מ-200 מג"ל המייצגת למעשה את האקוויפר באזור הקרוב לאזור המילוי החוזר וניזון ישירות מתרומת המילוי החוזר, ואזור צפון מערבי בו המליחות נעה בין 300-500 מג"ל (כולל גם את קידוחי איילון).

בחלק ניכר מהקידוחים הפתוחים באקוויפר העליון, המים נטולי חמצן מומס ומכילים ריכוזים משתנים של H_2S ואמוניה (NH_4^+) המעידים על מים מחוזרים, כאשר מחוץ לאזור, המים עשירים בחמצן מומס והאקוויפר ניזון ממילוי חוזר מתחדש.

עבודות שונות בוצעו במטרה להבין את הסיבה לכתם המליחות ולמים המחוזרים במרכז האגן. הוצעו מספר מגננונים כגון כניסה מהצד של מים שמקורם בגוף אבפוריטי, תמלחת שארית של מי ים פליאוקניים ושטיפת מלחים וחומר אורגני משכבות חבורת הר הצופים.

העבודה האחרונה והמקיפה שעסקה בהבנת תהליכי ההמלחה באזור זה, היא העבודה של בורג וחובריו (2001).

קיומם של מי תהום מחוזרים המכילים H_2S הינה תופעה מוכרת בעולם. מקובל כי מקור ה- H_2S במים הינו בחיזור בקטריאלי של סולפאט, המתרחש בנוכחות ותוך כדי חימצון חומר אורגני, כמתואר בנוסחא:



בורג וחובריו (2001) הראו כי בקידוחים המערביים (סביבת צומת נחשון ומערבה לה) ולהם ריכוזי H_2S גבוהים, האקוויפר העליון נמצא במצב פראטי-מקורה. באזור זה, ישנה אפשרות של דליפת מים משכבות הקירטון שמעל אל תוך האקוויפר העליון דרך מערכות סידוק. ככל שהולכים מזרחה לתוככי הסינקלינה (תרשים 4), האקוויפר עובר להיות במצב כלוא ולא תתכן דליפת מים מלוחים יחסית מסלעי הקירטון של חבורת הר הצופים שמעל אל תוך האקוויפר העליון.

עדויות איזוטופיות לחלחול מים מחבורת הר הצופים לתת האקוויפר העליון ניתנו בעבר ע"י קרויטורו (1987) ו-Guttman and Kronfeld (1982).

אזור המעבר ממצב כלוא לפראטי-מקורה מצוי כיום באזור קידוח כפר אוריה 6 (ממוקם קרוב לכניסה למושב כפר אוריה). בשנות החמישים-ששים של המאה הקודמת, אזור המעבר היה מערבית לקידוח כפר אוריה 6 שהיה באותה תקופה בתנאי כליאה. השאיבות המסיביות בשנות הששים והשבעים של המאה הקודמת, הורידו את מפלסי המים אל מתחת לגג האקוויפר והקידוח עבר ממצב כלוא למצב פראטי-מקורה.

ההתאמה בין המצב ההידרולוגי של האקוויפר העליון (כלוא/פראטי-מקורה) לבין פיזור המליחות וה- H_2S במרחב של האקוויפר העליון, מוכיחה שמקור ההמלחה של האקוויפר העליון, בחלקו המערבי של שדה כפר אוריה, הוא מדליפת מים מחבורת הר הצופים שמעל לאקוויפר. מים אלה מלוחים יחסית ומכילים חומר אורגני אותו מיצו מסלעי הקירטון הביטומניים.

המודל הנ"ל יכול להסביר גם את העדר H_2S באקוויפר העליון הכלוא בקידוחי עג'ור ובקידוחי שפלת לוד שממערב לקו הכליאה. יש לציין שרוב הקידוחים נקדחו לפני עשרות שנים והחתך של חבורת הר הצופים נסגר בצינורות אטומים ללא מלט מאחוריהם. המשמעות היא שאין הפרדה טובה בין שכבות הקירטון לאקוויפר ממנו מפיקים הקידוחים, דבר העשוי לגרום להגברת כניסת מים משכבות הקירטון לאקוויפר העליון.

המודל שתואר אינו מתאים לקידוחים המפקים מהאקוויפר התחתון. קידוח כפר אוריה 11 הוא הקידוח הראשון שנקדח לאקוויפר התחתון בשדה זה. אחת הסיבות לקדיחתו היתה הרצון לקבל מים ללא H_2S .

במהלך קדיחתו (תרשים 5), בעומק 810-830 מ' נמצאו חתיכות לבנות שזוהו באמצעות XRD כגבס. בדיגום מים שנעשה התברר כי החלק התחתון (תצורת כפירה) מכילה מים מלוחים (כלוריד כ- 1575 מג"ל וסולפט כ- 3310 מ"ג/ל). כאשר אזור המעבר נמצא בעומק של כ- 740 מ'. בעקבות הממצאים נסתם החלק התחתון של הקידוח במלט (תרשים 5).

מקור המליחות ומקור הגבס שבתחתית הקידוח עדיין איננו ברור. הקידוחים הקרובים שמפיקים מהאקוויפר התחתון של חבורת יהודה (שדה אשתאול במזרח, קידוחי אחיסמך וגמזו מצפון ומצפון מערב), ירדו עד קרוב לבסיס האקוויפר התחתון ומפיקים מים במליחות שבין 100-50 מג"ל. לאחר סתימת החלק התחתון, קידוח כפר אוריה 11 מפיק משכבות תצורת גבעת יערים מים במליחות של כ- 90 מג"ל בלבד.

הממצאים שאותרו בקידוח כפר אוריה 11 הם נקודה בודדת במרחב וקשה ממנה להעריך את ההשתרעות המרחבית של שכבות הגבס והמים המלוחים. כלומר, לא ידוע האם מדובר בתופעה מקומית, המוגבלת לסביבת קידוח כפר אוריה 11, או לשטח נרחב יותר ברחבי האגן. ישנן שתי אפשרויות והם: אפשרות אחת היא שיתכן שאסוציאציה דומה בין שכבות גבס ומים מלוחים השתרעה בעבר על פני שטחים נוספים באקוויפר התחתון, כאשר בחלק מהאזורים, המים המטאוריים גרמו לסילוק המים המלוחים ולהמסתו המוחלטת של הגבס. אפשרות שנייה היא שמדובר "בכיס" מקומי שגבולתיו אינם ידועים בהעדר קידוחים ומיידע. בשתי האפשרויות, ברור כי לממצאי קדוח כפר אוריה 11 חשיבות רבה בעת תכנון הפקה עתידי מהאקוויפר התחתון בשוליים המערביים של שדה כפר אוריה.

עקרונות ניהול ההפקה באקוויפר

מערכת המים הארצית מתבססת כיום על שילוב בין מים מותפלים ומים ממקורות טבעיים (אגן ירקון תנינים, אקוויפר החוף והכנרת). לפני כניסת המים המותפלים למערכת הארצית בשנת 2005, שימש אגן ירקון תנינים כמקור מים משמעותי של המערכת הארצית.

מדיניות התפעול של אגן ירקון תנינים מנצלת קודם כל את התכונות ההידראוליות של האקוויפר הקרסטי שמתאפיין במוליכות הידראולית גבוהה ובגרדינט מפלסים שטוח על פני מרחק של כ- 150 ק"מ. תכונות אלו מאפשרות להשתמש באקוויפר כצינור תת קרקעי רחב ורגיונלי שמעביר מים מאזור לאזור. כלומר, ניתן להסיט את השאיבה מאזור אחד למשנהו על פי צרכי אספקת המים, תוך שינוי כווני זרימה רגיונליים ושימוש באקוויפר כאוגר (יומי או שבועי) וכמובל מים.

על מנת להגיע ליכולות נידוד ההפקה מאזור אחד לשני, נדרשים כמויות גדולות של קידוחים שפרוסים לאורך ולרוחב האגן וכושר הפקה שעתי הגבוה משמעותית מהמילוי החוזר. כושר השאיבה השעתית של כלל הקידוחים הקשורים למערכת הארצית הוא כמעט פי 2 מהמילוי החוזר הממוצע.

עם כניסת המים המותפלים למערכת הארצית השתנה משטר ההפקה מהאקוויפרים ובניהם גם מאגן ירקון תנינים.

המים המותפלים מסופקים למערכת לאורך כל השנה בכמות שנקבעה בהסכמים שחתמה המדינה עם כל מתקן התפלה. כאשר ההשלמות, בעיקר בחודשי הקיץ כאשר הצריכה גבוהה, מגיעה מהפקת מי תהום מאקוויפר החוף ומאגן ירקון תנינים.

משטר התפעול הנוכחי מתבטא בכך שהקידוחים שמפיקים מאגן ירקון תנינים עובדים בעיקר בחודשי הקיץ. כלומר, אותה כמות שאיבה שבעבר הופקה על פני כל השנה, מופקת כיום בעיקר בחודשי הקיץ. מצב זה מחייב כושר שאיבה ואיגום גדול מאד ברמה יומית.

היקפי ההפקה באגן נקבעים על פי רום המפלס שמעל לרום תפעולי מינימלי (קו אדום) שנקבע לפני עשרות שנים על בסיס ההנחה שההמלחה תגרם מחדירה של מי ים כדוגמת מנגנון פן ביני באקוויפר חופי. הקו האדום נקבע דאז ברום שמאפשר לחץ נגדי מספיק של מים שפירים שימנע חדירת מי ים לעבר קידוחי השאיבה.

ממצאי קידוחי הניטור שנקדחו לאורך הגבול המערבי הראו כי המים מלווים הם תמלחת פוסילית החסומה לים. במקרה זה, רום המפלס המינימלי (הקו האדום) צריך להיות ברום שישמור על שווי משקל דינמי בין גוף המים השפירים וגוף המים המלווים וימנע תזוזה של גוף המים המלווה לעבר גוף המים השפירים.

ניהול מיטבי של האקוויפר הוא כאשר מפלסי המים נמצאים כל הזמן מספר מטרים מעל לקווים האדומים. אולם, למרות שפע הנתונים וניהול ההפקה המוצלח, הסוגיה מהם קווי התפעול המינימלי עדין לא נפתרה ולכן התפעול הנוכחי מתבסס על הקווים האדומים שנקבעו לפני עשרות שנים.

ניהול נכון של משאבי המים באגן, צריך להתבסס על הבנה עמוקה של המערכת הגיאולוגית, ההידרולוגית ועל סכנות ההמלחה שעלולות להיגרם במשטרי תפעול שונים.

פיזור ההפקה מאקוויפר ירקון תנינים בעשורים הבאים

חלק ארי של שטח האגן הכולל גם עשרות קידוחי השאיבה, ממקום באזור המרכז שבין חדרה לגדרה. מדובר באזור שמאוכלס בצפיפות ע"י ישובים רבים שכל הזמן רוצים להתרחב ולגדול ועל ידי מפעלי תעשייה רבים ותשתיות רבות (כבישים ראשיים, מסילות רכבת, קווי נפט, גז, ביוב וכדומה) החוצות את האגן לאורכה ולרוחבה.

באזור שפלת לוד -ראש העין פועלים עשרות קידוחי מקורות ותיקים (בני גיל 50-60 שנה) בסמיכות לאזורי תעשייה, חקלאות ומגורים. סמיכות זו היא תוצאה של תכנון שהיה נכון לשנות הששים, והפכה כיום לבעיה כפולה שמסכנת את הקידוחים מחד ומפריעה לתוכניות הפיתוח מאידך.

חלק מהתשתיות מהוות מקור זיהום המסכן את איכות המים המעולה. דוגמה מוחשית לסכנות הזיהום של האקוויפר באזור שפלת לוד, קיבלנו לפני כשנתיים כאשר התגלה זיהום ממקור תעשייתי במספר קידוחי הפקה שממוקמים מסביב למפעלי התעשייה האווירית. מקור הזיהום הוא בתחום מפעלי התעשייה האווירית. בגלל המוליכות ההידראולית האופקית הגבוהה, התפשט הזיהום בזמן קצר צפונה (בכוון הזרימה) והגיע גם לקידוחים המרוחקים מספר ק"מ ממקור הזיהום.

הפעלת קידוח לוד 18 במספר פעימות והזרמת המים לנחל עריף, ככל הנראה האטה את קצב התזוזה של הכתם צפונה (תרשים 6).

בתקופה האחרונה, עולה יוזמה להקים תחנת כוח פנים ארצית באזור צומת קסם ולהעביר קווי גז ותשתיות בסמיכות למעיינות הירקון ולשדה קידוחי ראש העין. כושר ההפקה הנוכחי של קידוחי ראש העין עומד על כ- 7000 מק"ש. בעבר כושר ההפקה הכולל היה בין 10-12 אלף מק"ש. מימוש התוכניות להקמה והעברת תשתיות ברדיוס המגן של קידוחי ראש העין, תחייב להחליף חלק מהקידוחים הישנים בקידוחים חדשים שיקדחו לתצורת עמידב (חלק תחתון של האקוויפר העליון) ולתצורות גבעת יערים וכפירה (האקוויפר התחתון).

כדי להתמודד עם הסיכון לקידוחים הקיימים, הוכן בחברת מקורות סקר סיכונים שהראה כי כמחצית מהקידוחים באזור שפלת לוד ראש העין, צפויים לצאת מפעולה בעשור הקרוב כתוצאה מזיהום ומכשולים סטטוטוריים.

אחת החלופות היא להסיט את השאיבה מזרחה, למעלה הזרימה, שם ישנם שטחים נרחבים המיועדים ליעור ואשר יישארו נקיים ופתוחים גם בעתיד בתוקף תוכניות המתאר.

החלפה הדרגתית של הקידוחים הישנים בקידוחים חדשים (שיבנו בשיטות קדיחה מודרניות) אשר ימוקמו באותם שטחים פתוחים, תיצור את ההפרדה המתבקשת בין קידוחי מי תהום לבין אזורי תעשייה, חקלאות ומגורים ותאפשר הפקה של מים נקיים ללא חשש לזיהום

ובמקביל תשחרר שטחים ממגבלות הפיתוח המוטלות עליהם מכוח תקנות בריאות העם (רדיוס מגן).

חברת מקורות בשת"פ עם רשות המים ועם וועדת התכנון הלאומית (ות"ל), מקדמת בימים אלו תוכנית מתאר ארצית שנקראת תת"ל 100 ומטרתה לשריין ברחבי הארץ (בעיקר באזור המרכז) אתרים למיקום קידוחים חדשים. אתרים שבתחום רדיוס המגן שלהם אין תוכניות עתידיות לתשתיות מזהמות. במסגרת זו, מתבצעת עבודה סטטוטורית והידרולוגית נרחבת. כאשר, באזור המרכז, בין יער בן שמן לעיר אלעד, אותרו מספר נקודות פוטנציאליות לקדיחה. הנקודות קרובות לקווי מקורות קיימים, לתשתיות חשמל ולדרכי גישה. הבדיקות הראשונות הראו כי יש להן היתכנות סטטוטורית. ברובן ניתן יהיה לקדוח צמד קידוחים – לאקוויפר העליון ולאקוויפר התחתון של חבורת יהודה, ובכך לאפשר הפקה הידרולוגית מאוזנת. צמצום המכשולים הסטטוטוריים וקדיחת שני קידוחים בחצר אחת, תביא לחיסכון בתשתיות (חצר קידוח משותף, קו מים אחד וקו חשמל אחד) ובעלויות.

ספרות

בורג, א., גבריאלי, א., גוטמן, י. 2001. הגורמים להתפתחות תנאים מחזרים באקוויפר חבורת יהודה בשפלת יהודה והמלצות תפעוליות, דו"ח מכון גיאולוגי **GSI/9/2001**, כ-50 עמ'.

גבריאלי, א., בורג, א., גוטמן, י. (2008). מקור ההמלחה והתפתחות התנאים המחזרים באקוויפר חבורת יהודה באזור כפר אוריה ובדרום אגן באר שבע. כנס אגודת משאבי המים (אי"ל).

בורג, א., תלחמי, פ. 2014. פרויקט ניטור ירת"ן. הרכבים כימיים ואיזוטופים בקידוחי הניטור ובקידוחים נבחרים. דוח' התקדמות שנה ח'. דו"ח מכון גיאולוגי **GSI/17/2014**, כ-50 עמ'.

גוטמן, י. 1980. מחקר האיזוטופים הטבעיים של אורניום באקוויפר הקנומני-טורוני באגן ירקון תנינים. חיבור לתואר **M.sc** אוניברסיטת תל-אביב.

גוטמן, י., גולדשטוף, י., ביידא, א., מרכדו, א. 1988. סימולציה של משטר הזרימה והמליחות באגן ירקון-תנינים-באר שבע בעזרת מודל דו שכבתי. דוח' תת"ל 01/88/23, כ-30 עמ'.

גוטמן, י., מרכדו, א., מיכאלי, א., ביידא, א. 1988. ניתוח ממצאי קידוח מנשה ת/3 והשלכותיהם על דרכי הניטור וההפעלה של אקוויפר ירקון תנינים. דוח' תת"ל 01/88/8, כ-20 עמ'.

גוטמן, י., צוקרמן, ח. 1995. אגן ירקון תנינים- באר שבע, הצבה וכיול מודל זרימה ומליחות. דוח' תת"ל 01/95/72, כ-50 עמ'.

גוטמן, י. רוזנטל, א., בורג, א., גבריאלי, א. 2008. המצאות גבס ומים מלוחים בקדוח כפר אוריה 11 וההשלכות על פיתוח ותפעול מקורות המים במרכז אגן ירקון תנינים. תקציר בכנס האגודה למשאבי מים

דפני, א., 2009. שדה הזרימה של מי התהום השפירים והמלוחים באגן ירקון-תנינים, ישראל. חיבור לשם קבלת תואר דוקטורט לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית ירושלים.

מרכדו, א., 1980. מליחות מי התהום באגן באר שבע- ירקון- תנינים, מודל קונצפטואלי של משטר המליחות ומקורותיה באקוויפר חבורת יהודה. דוח' תה"ל 01/80/60, כ-70 עמ'.

קרויטורו, ל., 1987. אפיון מערכות הזרימה בסלעים קרבונטיים על ידי הפרמטרים של מי התהום במרכז ישראל. חיבור לשם קבלת תואר דר', מכון ויצמן.

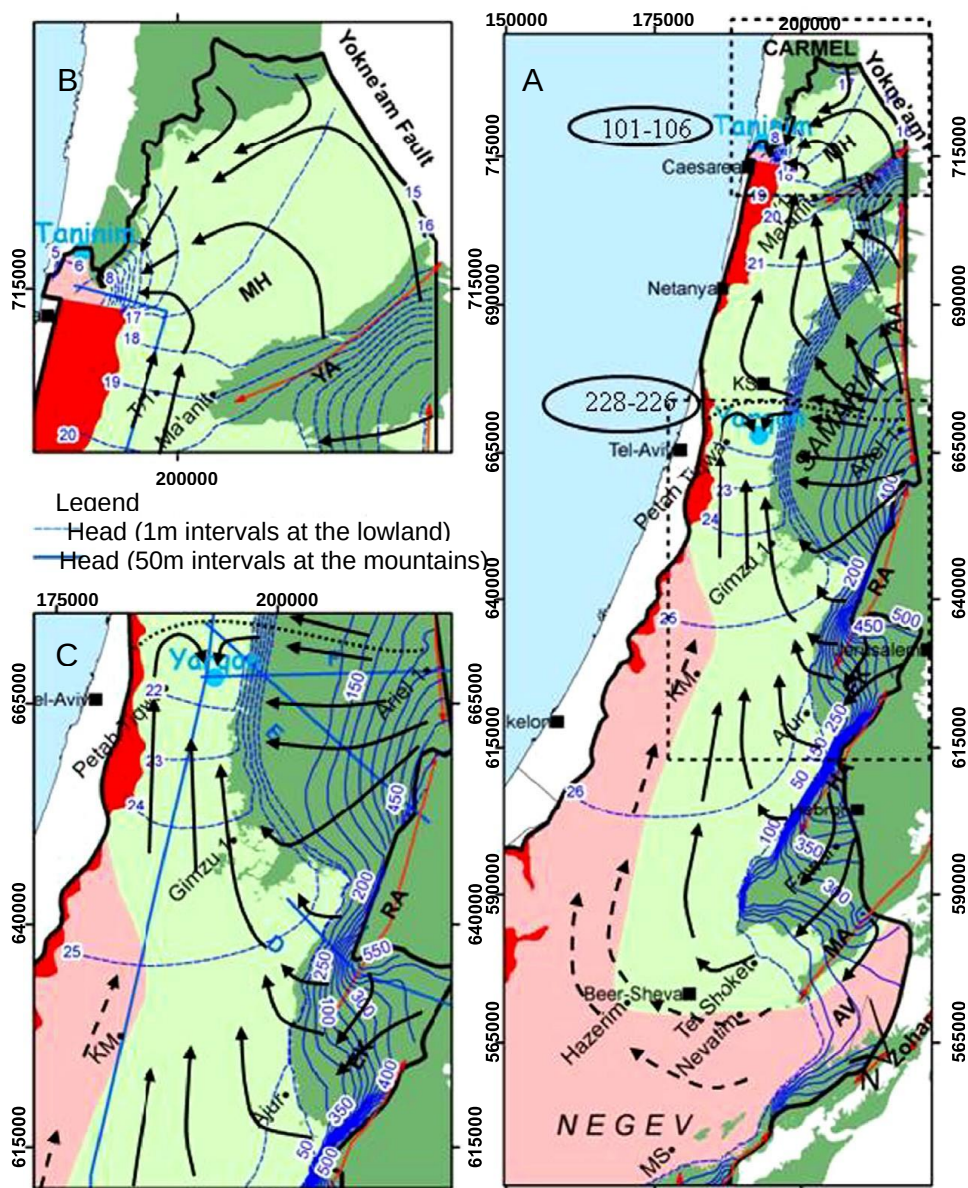
Avisar, D., Rosenthal, E., Flexer, A., Shulman, H., Ben-Avraham, Z., Guttman, J. 2003. Salinity sources of Kefar Uriya wells in the Judea Group aquifer of Israel. Part 1- Conceptual hydrogeological model. Journal of hydrology 270 (2003): 27-38.

Gavrieli, I., Burg, A., Guttman, J. 2002. Transition from confined to phreatic conditions as a factor controlling salinization and change in redox state, Upper subaquifer of the Judea Group, Israel. Hydrogeology Journal (2002) 10: 483-494.

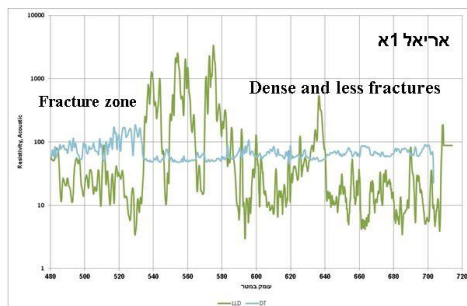
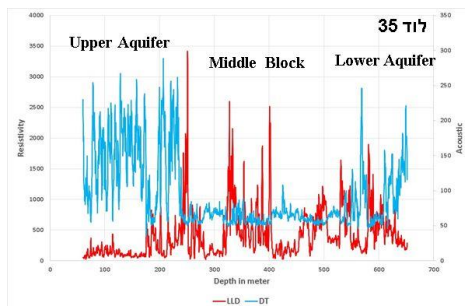
Guttman, J. Kronfeld, J. 1982. Tracing interaquifer connections in the Kefar Uriyya- Agur region (Israel), using natural uranium isotopes. Journal of Hydrology, 55 (1982) 145-150.



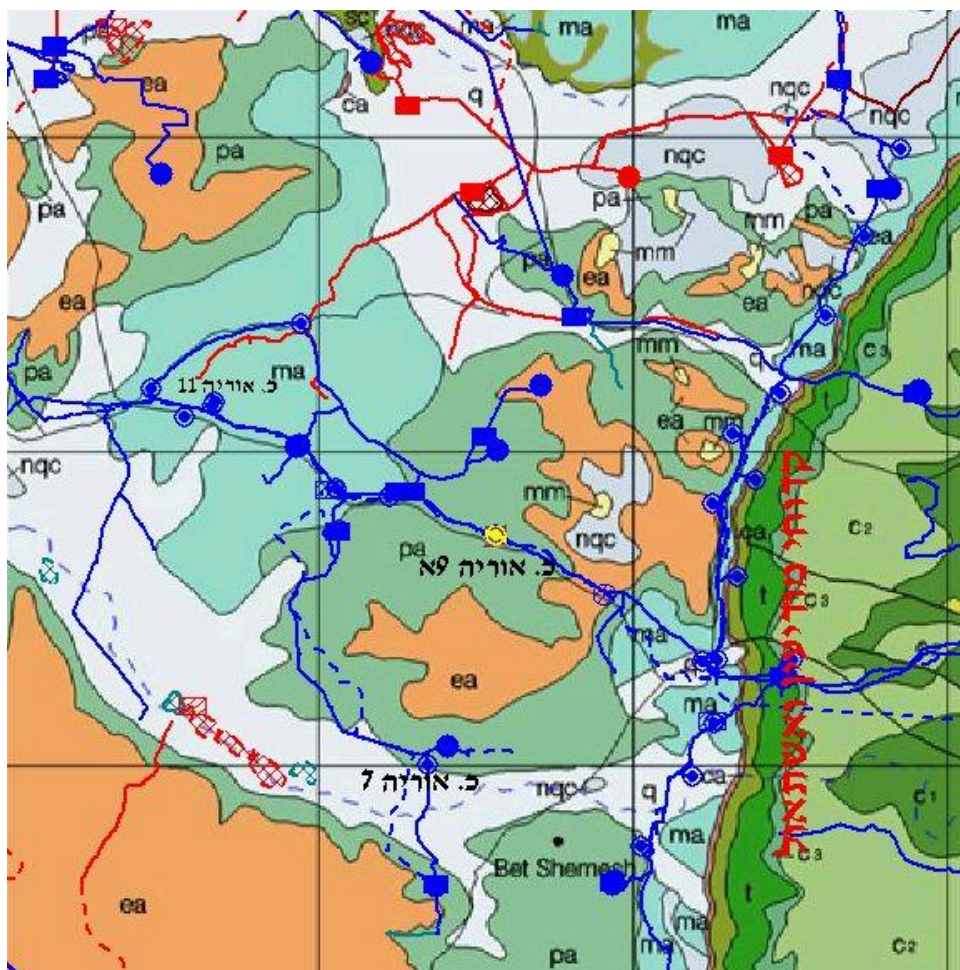
תרשים 1: גבולות האגן וחלוקה לאזור פראטי וכלוא



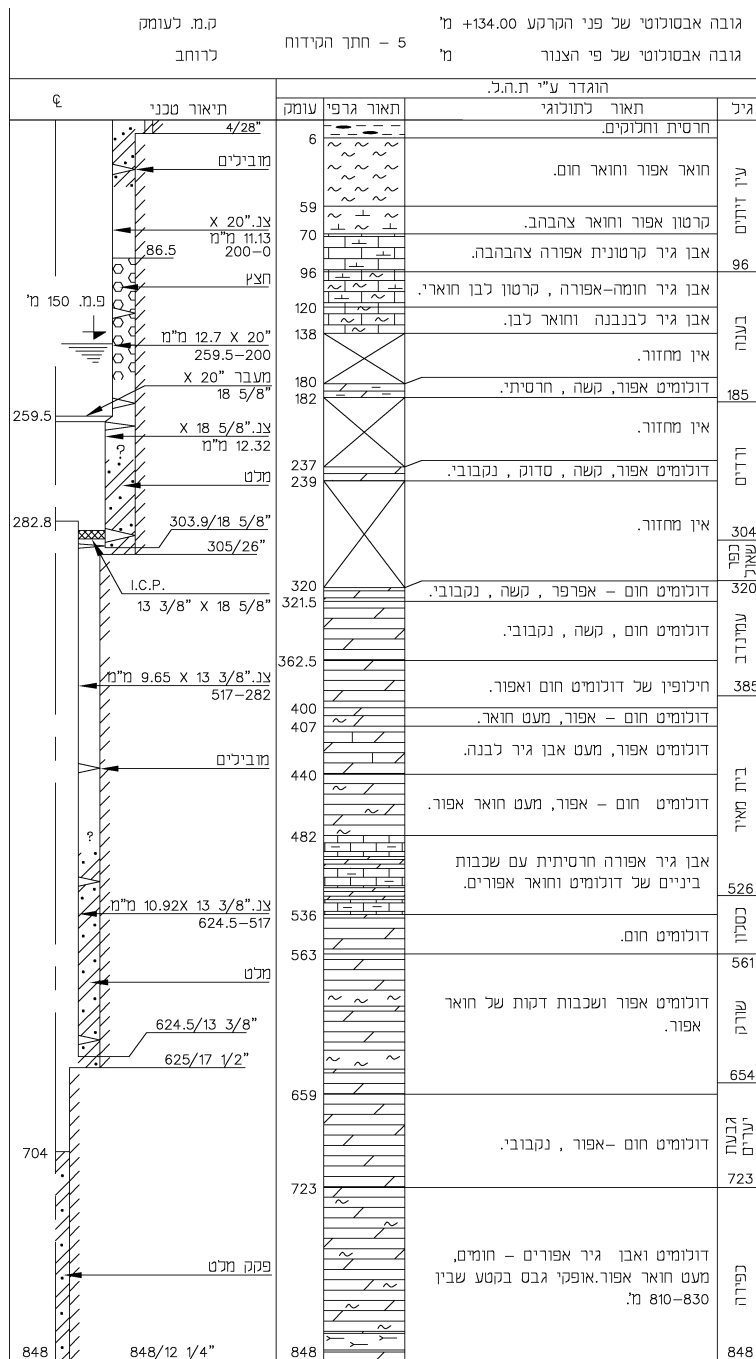
תרשים 2: מתווה הזרימה באגן ירקו תנינים. מקור: דפני 2009



תרשים 3: השונות של המערכת הקרסטית מתוך לוגים של שני קידוחים אופניים



תרשים 4: מפה גיאולוגית שדה קידוחי כפר אוריה



תרשים 5: חתך קידוח כפר אוריה 11



תרשים 6: גבולות כתם הזיהום באזור התעשייה האווירית

References

- Arkin Y. and Ecker A. 2007. Geotechnical and hydrogeological concerns in developing the infrastructure around Jerusalem. Jerusalem: Geological Survey of Israel.
- Flexer A. and Honigstein A. 1984. The Senonian succession in Israel lithostratigraphy, biostratigraphy and sea level changes. *Cretaceous research* 5(4): 303-312.
- Kloner A. and Zissu B. 2007. The Necropolis of Jerusalem in the Second Temple Period. Leuven and Dudley MA: Peeters.
- Sneh A. and Avni Y. 2011. Geological maps of Israel (1:50,000) Sheet 11-II: Jerusalem - (Partly revised, 2013).
- Shtober-Zisu N. and Zissu B. 2018. Lithology and the distribution of Early Roman-era tombs in Jerusalem's necropolis. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 42(5): 628-649.

Stop 3. Sanhedrin tombs (at Sanhedriya garden) – hewn in Nezer Fm.



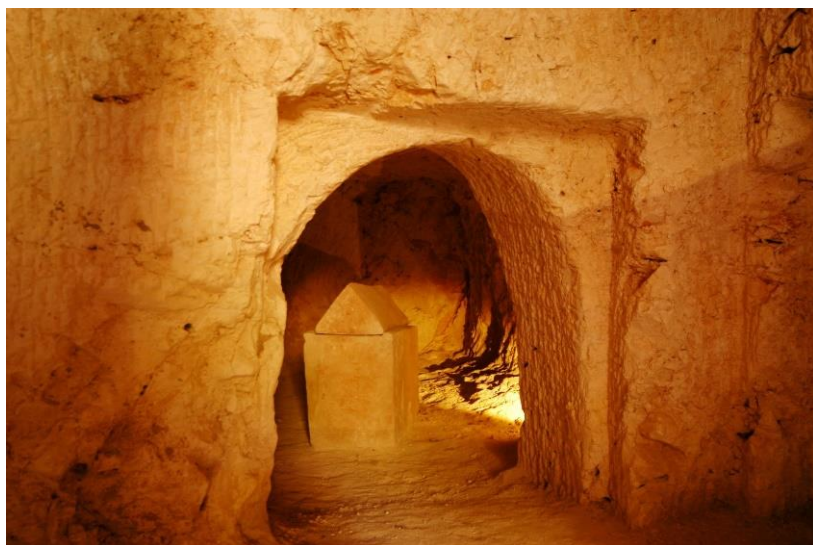
Stop 4: Jason tomb hewn in Weradim Fm. (Mizi Ahmar)



Stop 1: The Kidron Valley tombs hewn in Shivta and Netzer formations (Photo by Boaz Zissu)



Stop 2: Inside one of the burial chambers at the “Tomb of Nicanor”, hewn in Menuha Fm. (Photo by Boaz Zissu)



Burial places reflect external and natural conditions

Typically, Jewish burial was performed outside the settled area and at a reasonable distance from the settlement. The distribution of tombs around the city suggests that they were not planned by a central authority. It seems that burial was conducted by the families and not by the community, and according to available bedrock. The tombs are laid out in clusters around the city in places where the rock was amenable to cutting. The authorities apparently were careful not to create a public nuisance, although they did not design a master plan for burial. Moreover, we propose that the choice of burial places reflect external and natural conditions. We assume that in some cases, owners of estates located in suitable lithologies, such as the Menuha Fm., granted burial rights to additional families. This can explain the large number of tombs in this formation and the clusters of burial systems; for example, at Giv'at Ha'Mivtar, the western slopes of Mount Scopus, Abu-Tor, Azal Stream and the Armon Ha'Naziv Ridge.

* * *

of the poor quality of the bedrock, the masons had to cut out the bedrock defects and chiselled out elements of harder limestone, to complete the desired structure. In other cases, fissures and cavities formed along the border between calcrete and the underlying chalk were sealed and smoothed out with a mixture of plaster and small field stones. In hard limestone or dolomite rocks, encountering a substantial karst cavity might result in the abandonment of the entire excavation project; (2) Superficial defects that required only aesthetic solutions. In these cases, only some cosmetic solution was needed, which in most cases was either chiselled out or concealed with plaster.

Financial means

Generally, there is a correlation between the size of the courtyard, the overall decoration of the façade, complexity of the burial system and sculpting quality, with the tomb owners' financial means. The tombs quarried in the massive Shivta and Weradim Formation are surely monumental, but their relative number is limited. Quarrying in the hard Shivta Formation required funding. Therefore, this geological formation did not allow the creation of tombs for people from a lower socioeconomic class. Only those families who could afford the cost of quarrying difficult rock types did so. Good examples are the monumental tombs in the Kidron Valley or Jason's Tomb. The rocks extracted from these lithostratigraphic units were later used for significant building projects in Hellenistic and Early Roman Jerusalem.

Rock decay characteristics

The observed rock decay features are typical of the amalgamation of climate and lithology in the Mediterranean zone. Rock surfaces are mostly decayed by chemical dissolution, forming pits, microkarren and cm-size rills, enhanced by structural fissures in the rock. Condensation corrosion and excess moisture observed on the ceilings of some structures, along with bio-erosion, are also common. For example, vertical fractures of a cm scale produced dissolved microrills and a brecciated appearance. Although the fractures were closed, micro flow-paths formed and were observed in the bedrock both at the Simeon the Just Tomb and at the Sanhedrin Tomb, both in the Nezer Formation. The fine polished façades of the Sanhedrin Tomb are surprisingly preserved, although dissolution along perpendicular fissures (length and breadth) was visible on the ceiling of the vestibule. Karst dissolution processes are also common among the Weradim, Shivta and Nezer formations and microkarren solution pits are visible on the rock surface. Cyanobacteria cover both the façades and the ceiling in most rock-cut chambers and roots penetrating through fissures or bedding planes, cause fissures to widen, leading to sporadic rock falls are also common, especially in the soft Menuha Fm.

Handling rock defects

During the hewing process, the ancient masons had to find various solutions when encountering lithological defects: (1) Major defects, endangering the stability of the rock-cut chamber. These required complementary building with ashlar stones as observed at Jason's Tomb. In other cases, as a result

between the lateral spots within the same layer, and these differences are closely spaced (some are just dozens of centimetres apart). The hard-rock spots exhibit values of $66.4 > R > 45.1$, and the soft-rock spots exhibit values of $45 > R > 19.8$. These differences are perhaps the most prominent in the studied area. We presume that this lateral variation in the rock hardness favoured the rock-cutters and enabled the excavation of almost 100 tombs (and probably many more) in this unit. Compared to the Weradim dolomites, the Nezer Formation is characterized by moderate R-values but with less pronounced differences between the high and low average values. The hard layers have values of $54.5 > R > 19.2$. The soft layers have values of $39 > R > 16.4$. In all cases, the Shivta Formation exhibits extremely high R-values: $69.1 > R > 49.3$. This formation is composed of hard, dense, biosparitic limestone, which certainly hindered the stone-cutting process. The softest lithostratigraphic unit is the Menuha Formation with generally low R-values: $30.1 > R > 11$. This formation is composed of chalk and marl and is covered in places by calcrete.

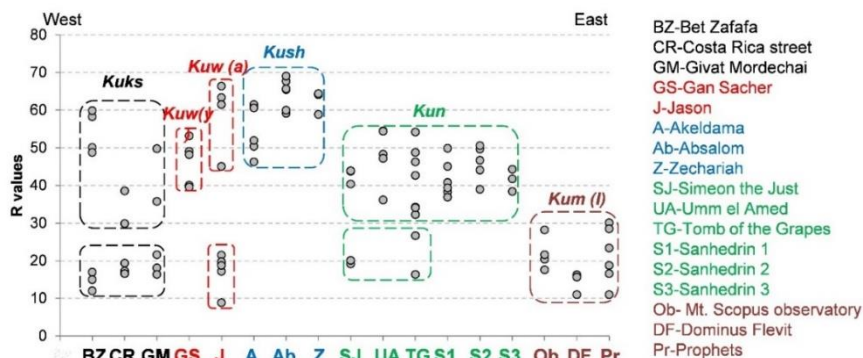


Figure 4. The Schmidt hammer values obtained for 17 tombs in five geological formations. (Abbreviations: Kuks=Kefar Shaul Fm., Kuw(y)=Weradim Fm. (Mizi Yahudi), Kuw(a)=Weradim Fm. (Mizi Ahmar), Kush=Shivta Fm., Kun=Nezer Fm., Kum= Menuha Fm., Kumi=Mishash Fm. (Shtober-Zisu and Zissu, 2018)

tombs were hewn in the thick limestone strata of the Nezer Formation, including extremely fine stonework sculpted with floral and geometric motifs in the façade, the vestibule and the pediment.

Almost 17% of the tombs are carved into the hard carbonate limestone and dolomite layers of the Weradim and Shivta formations. The Weradim Formation extends into the western part of the necropolis, while the Shivta Formation is characteristic of the mountain piedmonts near the valley bottoms, mainly in the eastern and southern parts of the necropolis. For example, the monumental tombs in Kidron Valley and the tombs in Ben-Hinnom Valley are carved into the Shivta Formation. The Weradim and Shivta formations are both characterized by karst phenomena in the form of caves, exposing various speleothem features. In the Weradim Formation, at Jason's Tomb, we observed a cyclic alternation of soft laminar and porous strata with dense, hard limestone layers. These, together with postdepositional vertical fissures, form a rectangular structure in the rock face, favouring the extraction of building stones.

Rock hardness and burial cave distribution

The rock hardness of 17 tombs was measured using a Silver Schmidt hammer (type N), and are presented in Figure 4. The tombs tested in the Kefar Shaul Formation reveal two types of rocks of different rebound hardness. The hard layers are composed of thin-bedded limestone ($59.9 > R > 29.9$), and the softer layers are composed of interbedded marl and chalk ($21.7 > R > 12$). A similar tendency was observed in the Weradim (Mizi Ahmar) Formation and the Turonian Nezer Formation. The Weradim (Mizi Ahmar) Formation appeared slightly brecciated; the hardness differences are less distinct between the consecutive layers and more pronounced

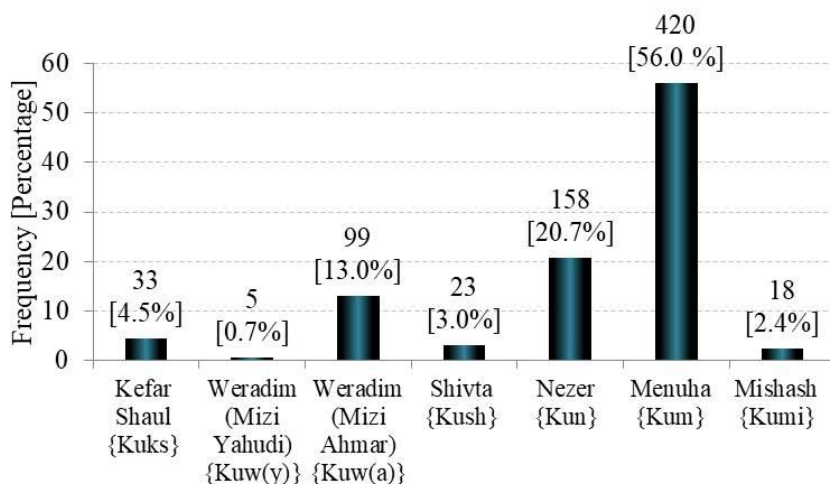


Figure 3. Distribution of tombs by geological formation. 75% of the tombs are hewn in the chalk and Nari of Menuha Formation and the well bedded limestone (of Nezer Formation) Shtober-Zisu and Zissu, 2018).

Figure 3 demonstrates the percentage of the tombs hewn in each lithostratigraphic unit. Most tombs (56%) are cut in the chalk and marls of the Menuha Fm., which is composed of fractured massive clayey chalk and covered by a 1–2-m-thick layer of hard calcrete crusts (Nari). Another soft lithological unit in the necropolis is the Kefar Shaul Fm., but it contains fewer than 5% of the total number of tombs. This scarcity may be attributed to the relatively limited exposure of this formation. In addition, the Kefar Shaul Fm. comprises a large amount of marl strata, decaying to rock-powder even in the very recent outcrops along the roadsides. Therefore, it is possible that if more tombs existed in the Kefar Shaul Fm., they did not survive.

Another 20% of the tombs were cut into the Nezer Fm. This unit is characterized by well-bedded micritic, pale-yellow limestone and thick-bedded white, coarse crystalline limestone superimposed in alternating hard and soft beds, which can reach several metres in thickness. Monumental

The ancient city of Jerusalem was built on the Nezer Formation, taking advantage of the hilly topography and the relatively hard limestone strata. Most tombs found west of the city were excavated in the Weradim dolomite and limestone. Those found north of the city were mainly hewn into the well-bedded Nezer Formation, while the tombs hewn east or south of the ancient city were mainly within the soft units of the Menuha Formation (Figure 2b).

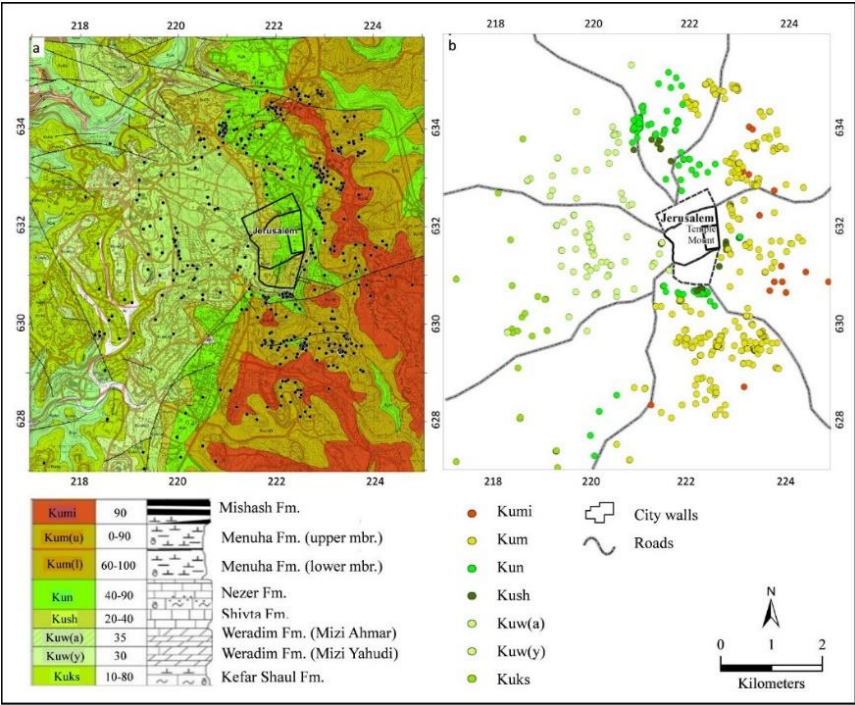


Figure 2. The ancient necropolis of Jerusalem during the Hellenistic and early Roman periods: (a) Tombs are marked black over the geological map; (b) Distribution of tombs by geological formation (Geological map modified from Sneh and Avni, 2011; Shtober-Zisu and Zissu, 2018).

1. *The Menuha Formation (Kum)* is 0–90 m thick and is almost entirely composed of chalk with a hard-bedded ‘flamy’ chalk at the base. This formation might include three types of rock masses with a range of geotechnical properties: white to grey massive chalk, which may reach the hardness of limestone in places; white to grey and pink massive clayey chalk with fractures infilled with clay and calcite; and light yellow to brown massive marl and clay, often with limonite and manganese staining. Their distribution is variable and interchanges within a few metres.

2. *The Mishash Formation (Kumi)* is 90 m thick and composed of massive brecciated brown chert or alternating beds of chalk and chert. This unit also includes massive brown chert and flint with silicified chalk and some phosphorite beds. The chert and flint essentially consist of quartz, with a hardness similar to glass, and occur as discontinuous bands or individual concretions that cause difficulties in drilling and excavation.

Jerusalem is located north of the structural saddle between the NE–SW-orientated Judea and Hebron anticlines. Following the development of these structures, a succession of softer Senonian age carbonate rocks (chalk and marl) with inherent crystallinity and fossil content were deposited in the synclines and overlapped the flanks of the anticlines (Arkin and Ecker, 2007). Thus, the distribution and exposure of rocks of various ages are the result of the geological structure: all layers dip eastwards at a gradually increasing rate, representing the eastern flank of the Judea anticline.

Geological formations and the distribution of tombs.

We plotted 764 tombs over the geological map of Jerusalem. The results clearly indicate that most of the tombs are located east of the city and are superimposed on the soft geological units (Figure 2a).

The upper Judea Group outcrop is subdivided within this study into five units according to the latest geological map published by the Survey of Israel (Sneh and Avni, 2011).

1. *The Kefar Shaul Formation (Dir Yassini Formation [Kuks])* is 10–80 m thick and composed of marl and chalk, with well- and thin-bedded limestone; it appears discontinuously between the Weradim and Shivta formations in the western part of the study area.

2. *The Weradim Formation (Mizi Yahudi Member [Kuw(y)])* is 30 m thick and composed of hard, massive, coarse and dense dolomite. Karst phenomena and microkarren structures are common.

3. The Weradim Formation (Mizi Ahmar Member or the lower-Bina Formation [Kuw(a)]) is 35 m thick and composed of bedded fine crystalline and dense dolomite.

4. *The Shivta Formation (Meleke or the mid-Bina Formation [Kush])* is 20–40 m thick, consisting of massive, biosparitic/fossiliferous limestone and limey dolomite and forming a typical cliff morphology with many caves.

5. *The Nezer Formation (Mizi Hilu or the upper-Bina Formation [Kun])* is 60–90 m thick and mostly consists of well-bedded, dense biomicritic limestone, as well as dolomite and marl. The upper contact with the Senonian succession is usually conformable.

The overlying Mount Scopus Group consists of several formations of the Palaeocene, characteristic of mid-shelf central lithofacies. During the Senonian–Palaeocene, deep seawater gave rise to the massive chalk and marl deposits of the Mount Scopus Group. Two formations represent the Mount Scopus Group within the study area (Arkin and Ecker, 2007; Flexer and Honigstein, 1984).

usually made of chalk or limestone and sometimes painted or ornamented with carved or incised designs).

Quarrying was carried out from the cave entrance towards the inner chambers. When possible, square blocks were removed from the chambers: channels were cut into the edges of the blocks, which were then detached from the bedrock. The whole necropolis area and especially the Shivta and Nezer limestone formations contain large quarries. A variety of rock types were quarried for building purposes from the limestone and dolomite in and around the historical city of Jerusalem. These rocks were characterized by the local stonecutters according to their hardness and colour. For example, white, hard, crystalline limestone was originally referred to as Meleke or the 'stone of the kings'; cream-coloured micritic limestone was known locally as Mizi Hilu (sweet rock); reddish limestone was termed Mizi Ahmar (red rock); and grey crystalline dolomite was known as Mizi Yehudi (Jewish rock) (Arkin and Ecker, 2007).

The lithostratigraphic sequence

The lithostratigraphic sequence is commonly characterized by the late Cretaceous Judea Group, which is composed of a thick (900–1000 m) sequence of hard and permeable limestone and dolomite, interbedded with argillaceous impermeable layers - when the common depositional environment was within a wide shallow platform lagoon with barrier reefs, isolating the lagoon from the open sea. Subsequently, the overlying Senonian–Maastrichtian sediments are characterized by a thick sequence of homogeneous chalk and marls (the Mount Scopus Group).

Introduction

During the last 150 years, various archaeological excavations and surveys undertaken in and around ancient Jerusalem revealed approximately 900 rock-cut tombs in the extensive necropolis surrounding the city. This large number of tombs has been archaeologically dated to the last 150 years before the destruction of the city by the Romans in 70 CE.

The necropolis was 10 times the size of the inhabited portion of the city, forming a ring approximately 3–5 km wide around the city walls and dividing the built-up city from the villages on the other side. The tombs, arranged in clusters within this strip, were cut into the slopes and cliff walls of the wadis (dry stream valleys) surrounding the city and extending up to the city walls (Kloner and Zissu, 2007).

Each tomb typically served an extended family and included one or more underground chambers and various architectural features. The burial complex can be divided into two main components, each one serving a different function: (a) external components – which included a courtyard, vestibule and additional facilities, such as tomb markers (*nefashot*), and sometimes ritual baths; (b) the internal components, where the bodies were actually buried, including burial niches (*kokhim*) and *arcosolia*.

During the Hellenistic and Early Roman periods, Jews used to bury their dead in what is known as a 'double burial': first, the corpse was placed supine in a burial facility within the family tomb, usually a *kokh*, niche or pit cut into the rock. After a certain period of time when the flesh had decayed, the bones were carefully transferred from the primary to the secondary burial site within the same rock-cut tomb, either placing the bones loosely in a *kokh* or into an ossuary (small, covered receptacles

or south of the ancient city mainly met the soft Menuḥa Formation (56%). Excavating in the hard limestone of Shivta Formation required high effort and funding and therefore the tombs number is limited (3%). In some cases, owners of estates located in soft lithologies granted burial rights to additional families, as proved by the large number of tombs and the clusters of burial systems in the Menuha Formation.

Rock surfaces are mostly decayed by chemical dissolution, enhanced by structural fissures in the rock. Condensation-corrosion and excess moisture were observed on the ceilings of some structures, along with bio-erosion. Two types of defects are common in the local rock: (1) Major defects, endangering the stability of the rock-cut chamber that required complementary building with ashlar stones, and (2) Superficial defects that required only aesthetic solutions.

Plan and schedule:

The field trip includes 4 stops: (1) The Kidron valley tombs; (2) The Tomb of Nicanor at Mt. Scopus; (3) Eshkolot tomb at Sanhedriya garden; and (4) Jason tomb (Figure 1).

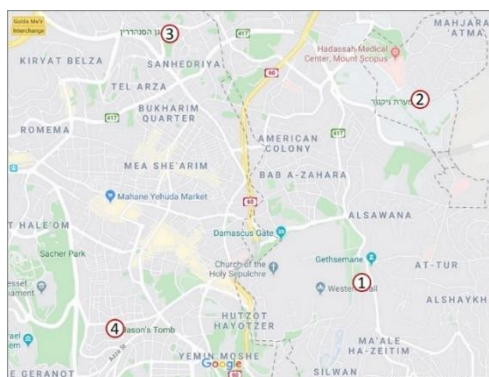


Figure 1: The field trip stops

Fild trip 6:

Lithology and the distribution of Early Roman Era tombs in the Jerusalem's necropolis

Nurit Shtober-Zisu¹ and Boaz Zissu²

1. Department of Israel Studies, University of Haifa
(nshtober@research.haifa.ac.il)
2. The Martin (Szusz) Department of Land of Israel Studies and
Archaeology, Bar Ilan University (boaz.zissu@biu.ac.il) Introduction

Abstract

During the last 150 years, various archaeological excavations and surveys revealed approximately 900 rock-cut tombs in the extensive necropolis surrounding ancient Jerusalem, dated to the late Hellenistic and Early Roman periods. The field trip goals are to examine the spatial distribution of these tombs in relation to the lithological units and rock hardness and to examine the diverse methods by which the ancient masons solved various lithological defects they encountered during the tomb excavation.

The field trip is based on a study conducted in recent years (Shtober-Zisu & Zissu, 2018). The study demonstrated that the substrate played a crucial role in the establishment of the city and the residents' living conditions and that the presence or absence of caves in certain areas can be explained lithologically. Most tombs found west of the city were excavated in the Weradim Formation (13.7%); those found north of the city were mainly hewn into the well-bedded Nezer Formation (20.7%); the tombs hewn east

Vaks, A., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Matthews, A., Frumkin, A., Dayan, U., Halicz, L., Almogi-Labin, A., Schilman, B., 2006. Paleoclimate and location of the border between Mediterranean climate region and the Saharo-Arabian Desert as revealed by speleothems from the northern Negev

Desert, Israel. *Earth and Planetary Science Letters* 249, 384–399. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.009>

von Blanckenburg, F., 2005. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters* 237, 462–479.

Zilberbrand, M., Rosenthal, E., Weinberger, G., 2006. Survey of the chemical composition of groundwater in the Judea Group aquifer, Yarkon-Taninim basin (No. Hydro/2006/1). Israel Hydrological Service.

Mudd, S.M., Furbish, D.J., 2006. Using chemical tracers in hillslope soils to estimate the importance of chemical denudation under conditions of downslope sediment transport. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 111. <https://doi.org/10.1029/2005JF000343>

Picard, L., 1943. Structure and evolution of Palestine with comparative notes on neighboring countries. *Geol. Dept., Bull. Hebrew Univ., Jerusalem* 4–134.

Portenga, E.W., Bierman, P.R., 2011. Understanding Earth's eroding surface with ¹⁰Be. *GSA today* 21, 4–10. <https://doi.org/10.1130/G111A.1>

Ryb, U., Matmon, A., Erel, Y., Haviv, I., Benedetti, L., Hidy, A.J., 2014a. Styles and rates of long-term denudation in carbonate terrains under a Mediterranean to hyper-arid climatic gradient. *Earth and Planetary Science Letters* 406, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.008>

Ryb, U., Matmon, A., Erel, Y., Haviv, I., Katz, A., Starinsky, A., Angert, A., Team, A., 2014b. Controls on denudation rates in tectonically stable Mediterranean carbonate terrain. *Geological Society of America Bulletin*.

Ryb, U., Matmon, A., Haviv, I., Benedetti, L., 2015. Exhumation and uplift coupled with precipitation along the western Dead Sea Rift margin. *Geology* 43, 483–486.

Ryb, U., Matmon, A., Porat, N., Katz, O., 2013. From mass-wasting to slope stabilization putting constraints on a tectonically induced transition in slope erosion mode: a case study in the Judea Hills, Israel. *Earth Surf Proc Land* 38, 551–560. <https://doi.org/10.1002/Esp.3291>

Stone, J.O., Allan, G.L., Fifield, L.K., Cresswell, R.G., 1996. Cosmogenic chlorine-36 from calcium spallation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 679–692.

Stone, J.O.H., Evans, J.M., Fifield, L.K., Allan, G.L., Cresswell, R.G., 1998. Cosmogenic chlorine-36 production in calcite by muons. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, 433–454.

- Ben-Asher, M., Haviv, I., Roering, J.J., Crouvi, O., 2019. The potential influence of dust flux and chemical weathering on hillslope morphology: Convex soil-mantled carbonate hillslopes in the Eastern Mediterranean. *Geomorphology* 341, 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.021>
- Densmore, A.L., Ellis, M.A., Anderson, R.S., 1998. Landsliding and the evolution of normal-fault-bounded mountains. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 103, 15203–15219.
- Enzel, Y., Amit, R., Dayan, U., Crouvi, O., Kahana, R., Ziv, B., Sharon, D., 2008. The climatic and physiographic controls of the eastern Mediterranean over the late Pleistocene climates in the southern Levant and its neighboring deserts. *Global and Planetary Change* 60, 165–192.
- Frankel, K.L., Pazzaglia, F.J., 2006. Mountain fronts, base level fall, and landscape evolution insights from the southern Rocky Mountains, in: Willett, S.D., Hovius, N., Brandon, M.T., Fisher, D.M. (Eds.), *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*. Geological Society of America Special Paper, Boulder, Colorado, pp. 419–434.
- Frumkin, A., Ford, D.C., Schwarcz, H.P., 2000. Paleoclimate and vegetation of the last glacial cycles in Jerusalem from a speleothem record. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 863–870.
- Godard, V., Ollivier, V., Bellier, O., Miramont, C., Shabanian, E., Fleury, J., Benedetti, L., Guillou, V., 2016. Weathering-limited hillslope evolution in carbonate landscapes. *Earth and Planetary Science Letters* 446, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.017>
- Heimsath, A.M., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K., Finkel, R.C., 1999. Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth. *Geomorphology* 27, 151–172.
- Merino, E., Banerjee, A., 2008. Terra rossa genesis, implications for karst, and eolian dust: A geodynamic thread. *Journal of Geology* 116, 62–75.

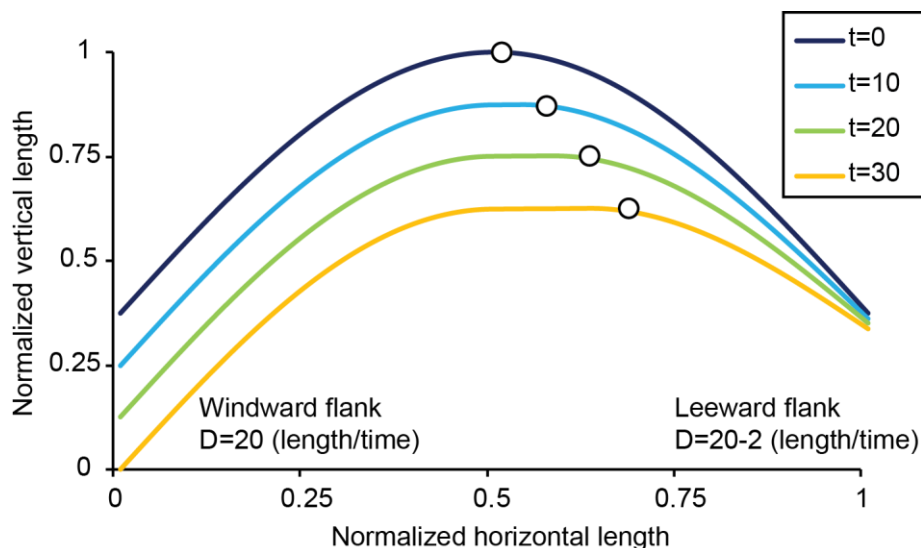


Figure 12 – Time-variation in the morphology of an arch experiencing a uniform denudation over the windward flank (left) and differential denudation over the leeward flank (right). Over the leeward flank of the arch, denudation rate decreases (linearly) by an order of magnitude between the water divide and left-most margin. Over time, the water divide (white dots) migrates towards the lee-side leaving a planar surface which cuts through the structure. This simple model demonstrates that the non-symmetric denudation pattern generated by the rain-shadow effect, will drive to generate and/or maintain the upper “Oligocene truncation” surface.

References

- Affek, H.P., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Matthews, A., Eiler, J.M., 2008. Glacial/interglacial temperature variations in Soreq cave speleothems as recorded by “clumped isotope” thermometry. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 5351–5360. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.06.031>
- Bar, O., 2009. The shaping of the continental margin of Central Israel since the Late Eocene - tectonics, morphology and stratigraphy (Ph.D.). Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva.
- Bar, O., Zilberman, E., Feinstein, S., Calvo, R., Gvirtzman, Z., 2016. The uplift history of the Arabian Plateau as inferred from geomorphologic analysis of its northwestern edge. *Tectonophysics* 671, 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.004>

100's of meters of rock from above the Judea Hills, indicating that the hilltops of the range have been lowered significantly below such a surface. A planar surface may be preserved if denudation of hilltops was overall homogenous at length scales of ~ 10 km. The fact that precipitation imposes a first-order control over denudation, while lithological variation does not appear to play a significant role, is consistent with such mechanism. In addition, the planar surface may be generated and/or maintained by the asymmetric denudation pattern dictated by the rain-shadow. Over time, such a pattern acting on an initially-symmetrical arch, will drive the water divide east, leaving a planar surface west of the water-divide (Fig. 12).

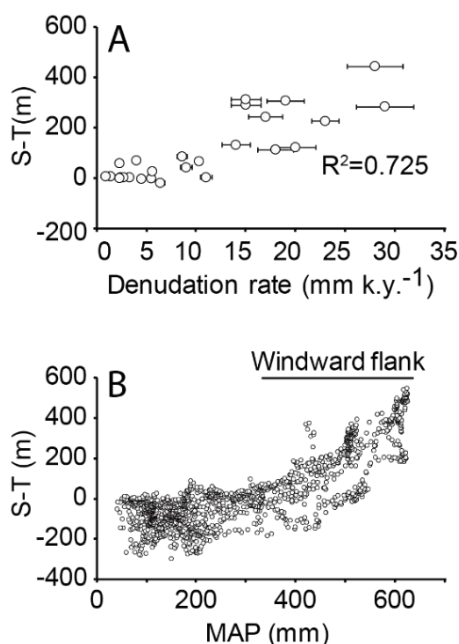


Figure 11 – A) Published denudation rate data (Ryb et al., 2014a, 2014b) limited to interfluvial sites across the Judea Range correlate with local S-T (elevation difference between a stratigraphic datum and the present topography; see text) values. B) Mean annual precipitation (MAP) values are plotted against S-T values of major interfluvial sites across the Judea Range. Nonlinear increase in S-T values with MAP occurs across the windward flank of the range. Figure modified after Ryb et al. (2015).

S-T values are therefore a function of post Turonian sediment accumulation, pre-range truncation and post-range denudation. Importantly, only the latter component is a function of the orographic precipitation pattern observed today. The trend in S-T values across the Judea Range correlates well with the MAP and with ^{36}Cl -based denudation rates (Figs. 10D and 11A, respectively), and is therefore interpreted to be governed by D_{syn} . Because the trend in MAP is controlled by the rain-shadow effect of the range, these correlations suggests the existence of the rain shadow over a 10^6 – 10^7 yr time scale. Considering the differences in denudation rates across the range, a maximum of 16 Myr are required to develop the observed 450 m S-T difference (Fig. 3A). Indeed, previous studies suggest that by mid-Miocene, the Judea Range was uplifted to ~500 m above sea level, and that the Mediterranean was the main source for humidity to the region (Gvirtzman et al., 2011). Considered together, these data suggest that the rain shadow of the Judea Range was established during the early or middle Miocene and triggered a stable spatial pattern of denudation. In the above analysis, episodic variations in climate and/or denudation are integrated over these time scales. The validity of the S-T analysis has been tested in the Negev, where Miocene alluvial sediments overlie the Oligocene truncation surface along major interfluvies, thus indicating that very little denudation has affected these surfaces. There, S-T values do not correlate with precipitation but with structure, i.e., it is largely a function of D_{pre} .

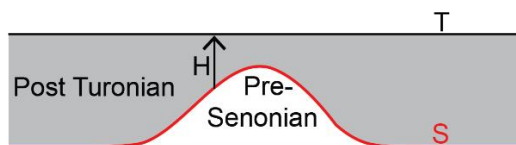
While Oligocene truncation has likely affected the Judea Range, the robust correlations we observe between S-T values, ^{36}Cl based denudation rates and mean-annual precipitation values are consistent with the removal of

$$\text{Eq 3. } T = S + H - (D_{\text{pre}} + D_{\text{syn}})$$

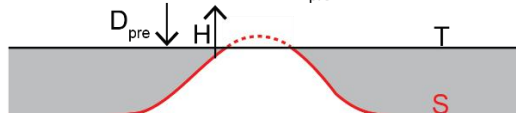
Rearranging Equation 3, the value of S-T can be described as

$$\text{Eq 4. } S - T = D_{\text{pre}} + D_{\text{syn}} - H$$

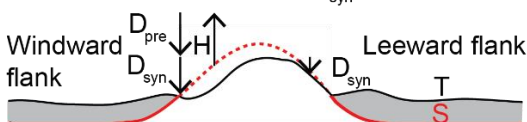
A. Post-Turonian deposition (H)



B. Pre-range truncation (D_{pre})



C. Syn-range denudation (D_{syn})



D. Transect across the Judea Range

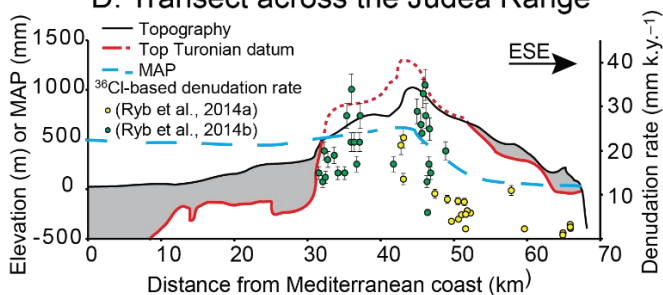


Figure 10 - A–C) Illustrations of the general stratigraphic datum (S) and topography (T) S-T value concept (see text). D) Transect across the Judea Range showing topography and top-Turonian datum elevations (m), and mean annual precipitation (MAP, mm) profiles. Coincidentally, MAP values are similar to the range of elevations and therefore the same vertical axis was used for both data. Published denudation rates from across the Judea Range are projected onto the transect. To avoid the effect of mechanical erosion processes in the arid and hyperarid zones (MAP < 200 mm), we limit in situ denudation rate data to interfluvies. Data from Mediterranean and semiarid climate zones include all available denudation rates. Denudation rates follow the trend of MAP across the range, and decrease by an order of magnitude between the western and eastern flanks. Figure modified after Ryb et al. (2015).

of this morpho-stratigraphic feature has required hyper-arid climate up until the Pleistocene to keep post-Oligocene denudation at a minimum (few 10's of meters at most, Bar et al., 2016).

Ryb et al. (2015) have estimated the long term total denudation above the envelope topography of the Judea Range by measuring the difference between the top of the Turonian datum (S) and current topography (T) (hereafter S-T). The absolute volume of rock removed is poorly constrained, and they considered S-T values to represent relative differences in the denudation of different parts along the range. Adhering to interfluvial features that define the envelope topography ensures a minimum contribution of mechanical processes to the net denudation. Their analysis uses the top of the Aptian–Turonian sequence, because it is the youngest pre-deformation datum. Aptian–Turonian units are continuous and their thicknesses do not vary greatly throughout the region. Accumulation of Senonian to early Oligocene sediment elevates the surface (T) above the top-Turonian datum (S) by the sediment thickness (H) (Fig. 10A):

$$\text{Eq 1. } T = S + H.$$

Denudation during possible exposure periods between the Senonian and Oligocene prior to the range uplift (D_{pre}) lowers the surface relative to the top-Turonian datum (Fig. 10B):

$$\text{Eq 2. } T = S + H - D_{\text{pre}}$$

Post-Oligocene denudation (D_{syn}) has an effect similar to that of D_{pre} ; however, because this component is related to the uplift of the range to its present form, it is a strong function of the precipitation gradient (Fig. 10C):

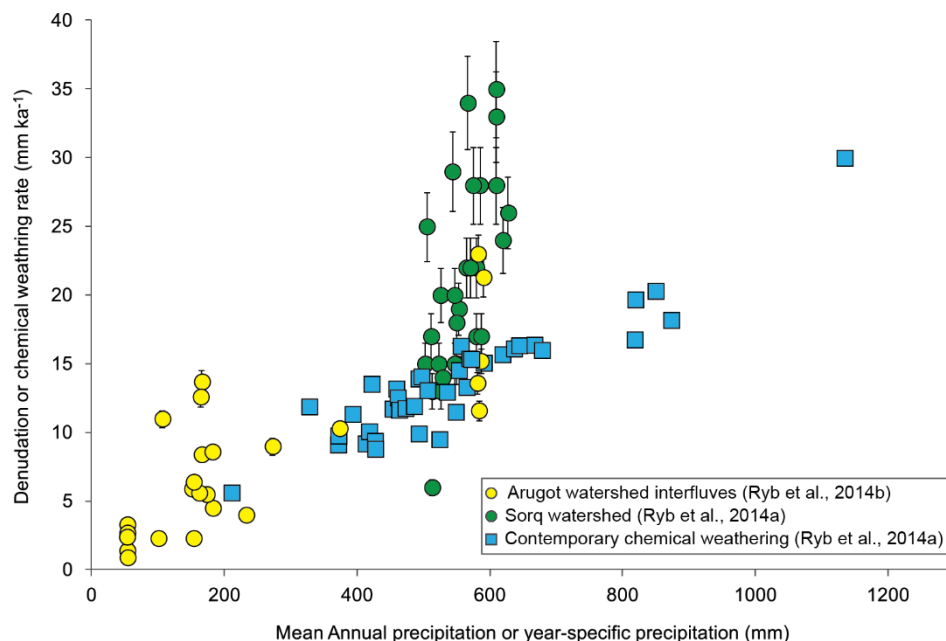


Figure 9 - ³⁶Cl-based long-term denudation rates (yellow and green dots) and annual chemical weathering rates (light-blue squares) plotted against local mean annual precipitation (MAP) values and year-specific precipitation in Jerusalem, respectively. Chemical weathering rates were calculated by Ryb et al. (2014b) based on annual recharge and average composition of the western Judea Range regional aquifer. Annual Precipitation records in Jerusalem represent precipitation over the aquifer recharge area. Long-term denudation rates of interfluvies and the Mediterranean climate zone in the Arugot watershed correlate linearly with MAP, and agree with the linear trend of contemporary chemical weathering rates. Denudation rates from the western face of the Judea Range (green dots) also correlate linearly with MAP; however, these rates diverge from the linear trend of contemporary chemical weathering rates, and are on average higher. Therefore, it has been suggested that effective precipitation over the western face of the Judea Range was higher than at present over the time scales averaged by ³⁶Cl method (10⁴–10⁵yr) (Ryb et al., 2014b). Figure modified after Ryb et al. (2014a).

From this view point the top-surface of the Judea hills constitutes an extensive planar surface which cuts across different lithological units. Studies have associated this surface with a regional truncation during the Oligocene (Bar, 2009; Picard, 1943), and suggested that the preservation

change has a limited effect, and the average decrease of $\sim 7^\circ\text{C}$ that was calculated for the Judea Hills during the Last Glacial Maximum can explain only $\sim 10\%$ of the increase in denudation rate (Eq. 5). In contrast, a glacial-interglacial average increase in the precipitation gradient and overall effective-precipitation by $\sim 40\%$ can explain the long-term denudation rate of the exposed bedrock (Fig. 9). Indeed, an increase in regional rainfall by a factor of two has been suggested by Enzel et al. (2008) and Vaks et al., (2006) for the Last Glacial Maximum. Ryb et al. (2014a) have calculated ^{36}Cl based denudation rates in the Arugot drainage, over the eastern lee-side of the Judea Range where climate varies from Mediterranean near the water divide to hyper arid close to the Dead Sea Rift escarpment. There, long-term denudation rates vary linearly with MAP values in agreement with the trend predicted by the annual solute-load analyses. They therefore suggested that the inferred increase in effective precipitation during glacial periods has been limited to the western, windward flank of the range, while over the eastern-flank glacial-interglacial average effective-precipitation has remained similar to modern values.

Chemical weathering rates calculated from the annual flux of dissolved carbonate rock, divided by the aquifer recharge area, range between 6 and $30 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (which is equivalent to mm kyr^{-1}) and vary linearly with annual precipitation (Fig. 9). In the calculation of chemical weathering rates, we ignored surface runoff, decreased precipitation over the aquifer's southern recharge area, and potential dependencies between recharge and precipitation. Actual chemical weathering rates are therefore potentially underestimated. The linear dependency in Figure 9 indicates that precipitation is a major limiting factor for annual chemical weathering and, consequently, for denudation. Figure 9 shows a comparison between the annual chemical weathering rates (calculated from the regional aquifer solute load) and the long-term (10^4 yr time scale) denudation rates (based on ^{36}Cl concentrations in bedrock) versus annual precipitation measured in Jerusalem or local MAP values. The trend formed by long term denudation rates in the Soreq drainage lies above that generated by annual chemical weathering rates, is steeper and intersects below the origin. Considering that most of the chemical weathering concentrates at (or near) the surface, and that mechanical weathering was negligible over the cosmogenic averaging window, these discrepancies are puzzling and should be explained. The cosmogenic averaging window for denudation rates of $<30 \text{ mm kyr}^{-1}$ encompasses no less than the last 20–25 kyr. This period reflects glacial and interglacial climates, and on average, colder and wetter climatic conditions (Affek et al., 2008; Enzel et al., 2008), likely with thicker soil and denser vegetation and lichen covers (Enzel et al., 2008; Frumkin et al., 2000). Lower temperatures would have certainly increased CO_2 solubility and, as a result increased the rate of denudation in the past. Still, temperature

by the measured HCO_3^- concentrations. Given sufficient time for equilibration, more of the runoff samples would have acquired HCO_3^- concentrations similar to those measured in the perched spring and aquifer waters. Therefore, it seems that on an annual time scale, chemical weathering focuses at the surface and can be considered as the chemical component of denudation. The similarity in HCO_3^- concentrations between perched springs and the regional aquifer indicates that water-carbonate equilibration is almost complete before infiltration of the water below the Soreq drainage base level. HCO_3^- concentrations in individual springs vary by 15%–30%, possibly in response to seasonal variations in dissolved CO_2 caused by temperature and biorespiration. Nevertheless, discharge varies by 300%–600%. Therefore, recharge (or effective precipitation) imposes major control over carbonate weathering, while other factors (temperature, $p\text{CO}_2$, or residence time) are secondary.

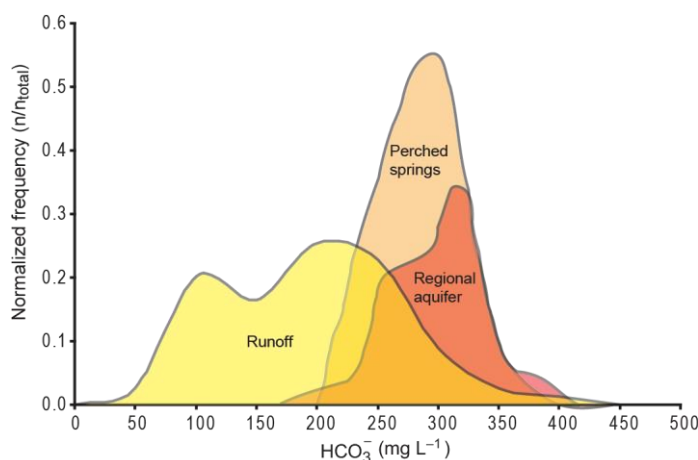


Figure 8 - Distribution of HCO_3^- concentrations in runoff, springs, and Western Mountain Aquifer samples. Aquifer and springs data include selected samples from Zilberbrand et al. (2006) database. Figure after Ryb et al. (2014b).

high landslides frequency to the stabilization of the hillslopes may include a gradual weakening of the uplift. However, the gradual decrease in landslide activity can be explained simply by the time in which the geomorphic signal of base-level stabilization traveled across the drainage, as suggested by the model presented by Densmore et al. (1998).

En-Sataf (31°46'30.93"N/35° 7'42.63"E) – Denudation across temporal scales and long-term landscape evolution of the Judea Range

En-Sataf is a perched spring that emerges from the Soreq Formation at the eastern slopes of Mt. Eitan. Runoff water (collected during rain-events) and spring-water (from three perched springs, including En Sataf) have been collected during the 90's and analyzed for dissolved load compositions by Profs. Avraham Starinsnky and Amitai Katz. Together with annual measurements of the mountain aquifer water recharge and composition, these measurements reflect carbonate mineral dissolution at different temporal and spatial scales.

Figure 8 presents the distribution of dissolved HCO_3^- concentrations in runoff, springs, and the regional aquifer waters. The concentrations in the springs and in the aquifer waters overlap within 1σ (mean values of $265 \pm 37 \text{ mg L}^{-1}$ and $290 \pm 44 \text{ mg L}^{-1}$, respectively). The mean HCO_3^- concentration in runoff water samples is lower ($168 \pm 74 \text{ mg L}^{-1}$). However, 35% of runoff samples have HCO_3^- concentrations above 200 mg L^{-1} , which is well within the range of springs and the regional aquifer. Runoff samples were collected during rain events before they had completed interacting with the bedrock surface. Therefore, their potential for dissolution is higher than expressed

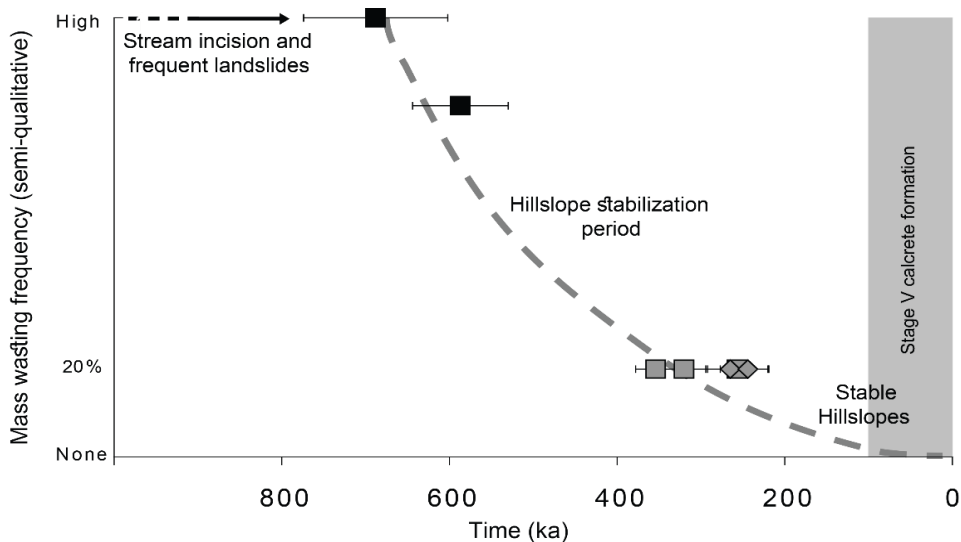


Figure 7 - Interpretation of alluvial and colluvial TT-OSL ages in terms of relative landslide frequency. Zano'ah alluvial fan samples are marked with black squares, YKL samples are marked with gray squares, samples dated from Soreq alluvial terrace deposited at the current streambed level are marked with gray diamonds, and the minimum time required for stage V calcrete to develop is marked by a gray rectangular. Dashed gray arrow across the stabilization period is one possible landslides decay curve.

Gradual transition from landslide-controlled to dissolution controlled hillslope erosion, as documented in the Soreq drainage, reflects the hillslope response to dramatic weakening, or cessation, of stream incision. Such a response is expected to follow stabilization of the base level at the piedmont, rather than distal base level stabilization (the Mediterranean coast is located ~40 km west to the Judea Hills mountain front) (Frankel and Pazzaglia, 2006). It is suggested that weakening of tectonic uplift rate led to decrease in stream incision to a rate that is lower than the erosive capacity of carbonate dissolution in the Judea Hills. At that point carbonate dissolution of the hillslopes kept pace with stream incision and prevented the development of critical slopes. The period of 330 to 580 ka between the

around the same time of the YKL (354 ± 24 ka), and that the other 31 landslides that lack morphologic features occurred prior to the YKL but after the establishment of the base level at 688 ± 86 ka, the landslide frequency had dropped gradually to $\sim 20\%$ within ~ 330 ka (Fig. 7). Since landslides that lack morphologic features and reach the present streambed can be identified only along road-cuts, it is likely that a number of them were left unmapped and as a consequence uncounted. Therefore, the 330 ka should be regarded as a maximum period for 80% decrease in landslide frequency. This period of relaxation which is calculated based on our field observations and TT-OSL dating agrees well with the results of numerical modeling; Densmore et al. (1998) predicted that an abrupt cease in uplift activity will be followed by gradual decay of landslide frequency due to progressive cession in stream incision and the onset of aggradation throughout the drainage. Their model employed physical parameters typical to the Basin and Range province, and predicted that a 90% decrease in landslide activity will occur ~ 100 ka after uplift had ceased, in the order of our results.

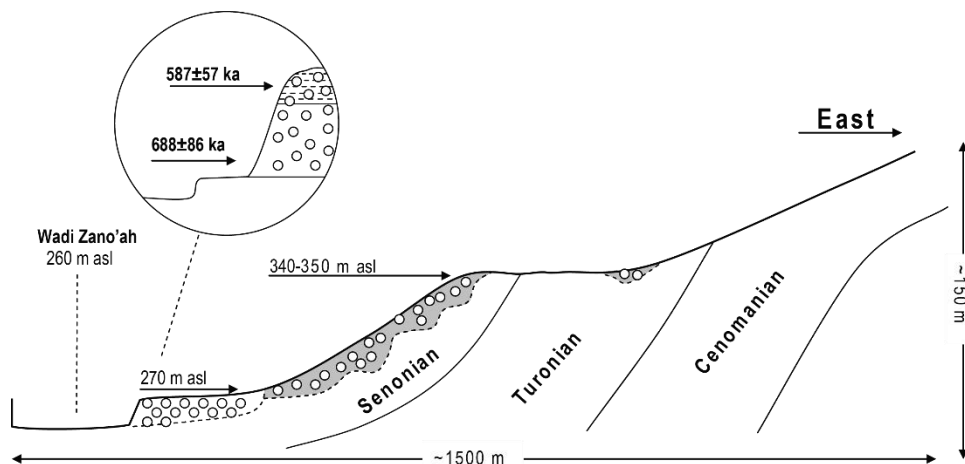


Figure 6 - Schematic cross-section through the Judea Hill mountain front, east of Wadi Zano'ah (35.007° E/31.726° N). Two conglomerate units are present: the higher (older) one, marked by gray background, is cemented by massive calcrete and its original fan morphology has eroded. The lower (younger) one has a hard-pan calcrete evolved on the top of the outcrop (dashed lines texture), and its fan morphology is preserved. Measured TT-OSL ages are indicated in the circular inset.

Deposition of alluvial fans at the mountain front is expected to occur when high flux of sediments is delivered from the slopes to the drainage system due to frequent landslides. Incision of the Zano'ah tributary into the fan sediments became possible when the flux of sediment decreased. Therefore, between the accumulation of the sediment at the base of the fan outcrop (688±86 ka) and the abandonment of the top of the fan (587±57 ka), sediment flux, and by inference, landslides frequency in the Zano'ah tributary decreased dramatically (Fig. 7). The YKL is one of few (six out of total 37) which reached the present streambed that has a recognizable scar morphology and may represent one of the youngest landslides that occurred in the Judea Hills, possibly during a period of relatively low landslide frequency. Stable base level can generally enable a limited number of landslides to occur; assuming that all six 'Young' landslides occurred

Zano'ah alluvial-fan (31°43'30.63"N/35° 0'30.04"E) – Tectonically-driven transition from mass-wasting to slope stabilization

Two generations of alluvial fans were explored at Wadi Zano'ah, a tributary of the Soreq that runs along the mountain front (Fig. 6). The relicts of the higher and older conglomerate are found coating the mountain front face up to 90 m above the current streambed; these relicts are entirely cemented by stage V hard-pan calcrete. The original morphology of the fan/terrace in which they were deposited has been eroded and a distinguished morphologic surface cannot be identified. The second and younger generation reaches a thickness of up to ~10 m and was deposited at the current base level. Its flat top is cemented by thick, stage V calcrete. Relicts of similar conglomerates, which are situated at the same level, are found along the mountain front down to the Soreq outlet. TT-OSL ages derived from the Zano'ah alluvial fan are the same within errors, though obviously the deposition of the conglomerate (688 ± 86 ka) at the base of the fan predates its abandonment (587 ± 57 ka). These constraints push the stabilization of the Soreq drainage base-level further back in time.

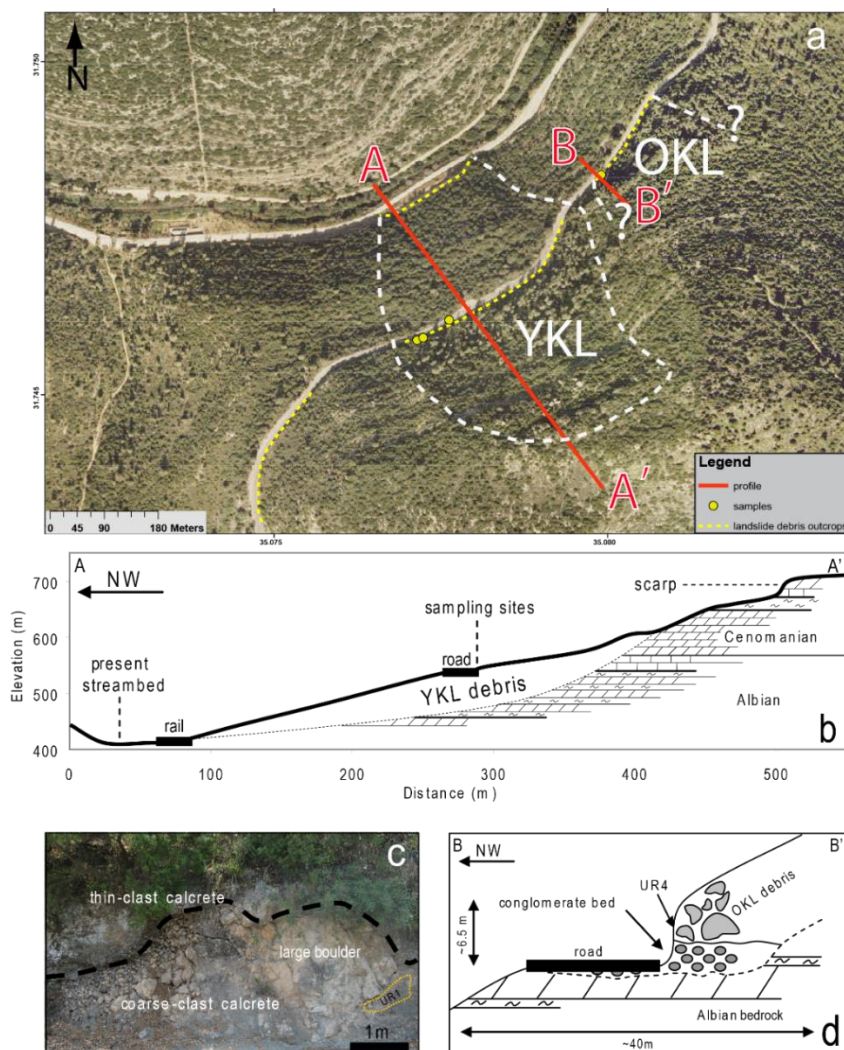


Figure 5 - A) Orthophoto of the 'Old' and 'Young' Ktalav landslides sites (OKL and YKL, respectively) and location of calcrete samples collected for OSL dating. The boundaries of the YKL are visible and a prominent scarp is found at the top of the landslide. OKL has no apparent topographic expression. Its debris is exposed only along the road cut. **B)** Cross-section through the YKL (marked A-A' on the orthophoto), the scarp is clearly visible at the top of the slope. **C)** YKL debris crop out along the road cut. A sharp transition between lower coarse-clast calcrete and upper thin-clast calcrete and the location of sample used for OSL dating are highlighted. **D)** Schematic cross-section across the OKL outcrop. OKL debris overlies a conglomerate bed ~100 m above the present Soreq stream. Figure from Ryb et al. (2013).

and the lack of calcrete-coated debris down slope of the outcrop (Fig. 5A) suggest that the conglomerate was buried by the landslide shortly after its deposition. The 'Old' Ktalav landslide (OKL) calcrete yielded a TT-OSL age of 1056 ± 262 ka. This age is in agreement with the 100 m higher base level at the time of slope failure of the OKL, and suggests that the Soreq had incised in response to tectonic uplift between 1-0.35 Ma.

Based on dating of alluvial and colluvial deposits (including the YKL and OKL), Ryb et al. (2013) argued that following the cessation of tectonic uplift, the Soreq base level and adjacent hillslopes stabilized during the mid-Pleistocene and have been eroding thereafter mainly through dissolution. Consistent with this interpretation, denudation rates of exposed bedrock along a single interfluvial or hillslope profile are mostly spatially uniform, indicating that hillslopes have been retreating in a parallel manner at about the same rate as interfluvial valleys are being lowered. The preservation of knickzones in the streams and non-concave hillslope profiles in a stable base-level drainage system since the mid-Pleistocene can be explained by a decrease in stream power that immediately followed base-level stabilization. Assuming that the hydraulic gradient remains constant, the loss of stream power can be attributed to a significant decrease in effective-precipitation, the formation of karst-drainage, and/or a decrease in the supply of abrasive clasts to the streams.

can easily lead to a collection of samples from surfaces that have experienced a recent removal of soil at a rate that scales with hillslope convexity. Indeed, Godard et al., (2016) sampled carbonate clasts immediately next to bedrock samples, and found that pairs of clasts and bedrock samples had similar ^{36}Cl concentrations and Mg/Ca ratios, consistent with negligible downslope transport of large rock clasts.

Looking east, landslide scar and debris can be seen on the western slopes of Mt. Giora. Relict landslide debris, cemented by highly-evolved calcretes, are common to the Judea Hills Hillslope. Ryb et al., (2013) mapped several dozens of such landslides in the Soreq drainage. The majority of which have been identified along road-cuts, do not preserve any morphological features (e.g., scar or debris fan). In contrast, six landslides (including the one observed here) preserve some morphological features and reach within few meters of the modern streambed, and are therefore considered to be younger.” Optically Stimulated Luminesces (OSL) and Thermally Transferred OSL (TT-OSL) dating of calcretes that have evolved into the landslide debris, suggest that the both landslide and the local base-level (modern Soreq streambed) have been stable at least since 354 ± 24 ka.

A few hundred meters north of the ‘Young’ Ktalav landslide (YKL), the debris of a second landslide are exposed along the road cut. The debris, now cemented by thick (~4-5 m) calcrete, covers a rare conglomerate relict, some 100 m above the present streambed. Chert pebbles, included in the conglomerate, were derived from Senonian units which currently crop out only at the water divide, ~20 km to the east. The presence of these pebbles in the conglomerate indicates that it was deposited along the main Soreq stem. The preservation of the conglomerate bed on the steep slope (30-40°)

hillslopes typically have partial soil cover, concentrated in depressions at the top of bedrock steps, thus preventing the continuous down-slope diffusion of large rock clasts.

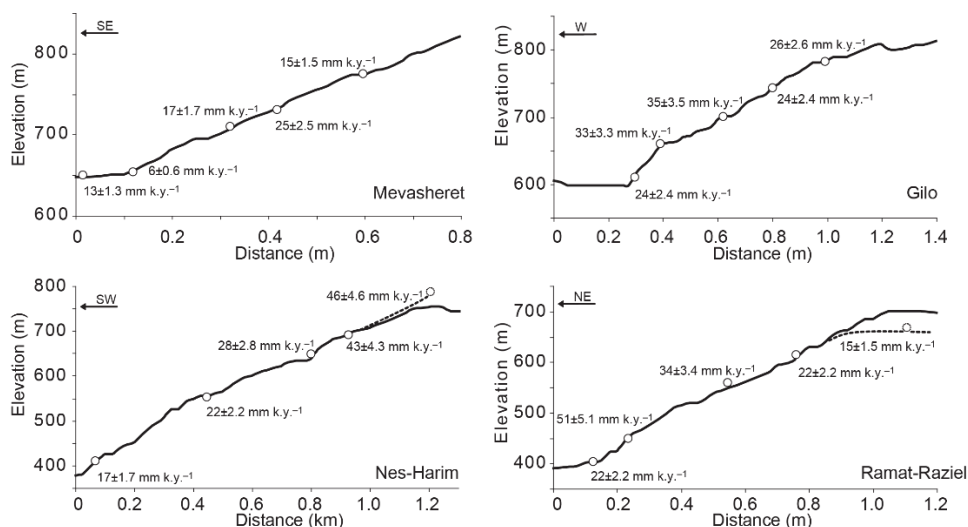


Figure 4 - Denudation rate distribution along four hillslope profiles in the Judea Hills. Dashed lines delineates projection of samples onto to the profile. Figure modified after Ryb et al. (2014b).

An alternative explanation is that different sampling strategies, rather than a mechanistic difference, have led to this apparent discrepancy; ³⁶Cl concentrations are sensitive to mass-removal above the sampled rock surface, regardless whether it is rock or soil that are being removed. Unlike large rock clasts, terra-rossa soil can easily wash down-slope, at a rate that is likely to increase with hillslope gradients. Ryb et al. (2014b) have collected samples from prominent outcrops that were unlikely to have been covered by soil within the averaging window of ³⁶Cl – and therefore their results describe the rate of bedrock removal. A different sampling strategy (perhaps dictated by a terrain that does not have such prominent surfaces)

to chemical denudation over the cosmogenic averaging window. Denudation rates of exposed bedrock along a single interfluvial or hillslope profile are mostly spatially uniform, indicating that hillslopes have been retreating in a parallel manner at about the same rate as interfluvial valleys are being lowered.

In contrast to the above findings, recent studies have reported significant correlations between slope convexity and denudation rate in the Luberon mountain range in France (Godard et al., 2016) and northern Israel, (Ben-Asher et al., submitted to GSA Bulletin) and consequentially argue for a significant contribution of mechanical processes to the overall denudation and shaping of hillslopes in tectonically-stable Mediterranean terrains that are dominated by 'hard'-carbonates (i.e., dolostone and limestone). Specifically, these correlations have been argued to reflect a significant contribution of clasts from the bedrock to the soil and their transport downslope (as is frequently the case in silicate terrains, and tectonically active, glaciated or arid carbonate terrains, Ryb et al., 2014a). If we consider a dissolution rate of $\sim 20 \text{ mm kyr}^{-1}$, a carbonate block of 10^3 cm^2 is expected to dissolve entirely within 5000 years. This estimation is maximal, as dissolution can be faster under soil cover. For mechanical processes to be an effective component in denudation, solid rock clasts must be transported to the channel within thousands of years, while the average colluvium residence times in diffusive down-slope transit are typically an order-of-magnitude longer (Mudd and Furbish, 2006). This simple comparison suggests that most of the carbonate rock clasts transported by the Soreq system (prior to modern human intervention) are derived from outcrops within 10's of meters from the main-channel. Moreover, the Judea Hills

tributaries), it may be interpreted as a weathering-limited system (i.e., delivery of sediment to streams is limited by the rate of sediment production) adjusting to a pulse of incision. Nevertheless, other observations are inconsistent with mechanical processes playing a major role in hillslope denudation; Some of the hillslopes are mantled by thick calcrete crusts, there is no evidence for recent mass-wasting events, and the sediment yield in the drainage is low. Notably, there is no sediment accumulation at the mountain front, and significant portions of the Soreq main-channel and its tributaries are bedrock channels. During floods, the majority of sediment is suspended terra rossa washed from the basin. It must be emphasized, however, that the terra rossa is mainly eolian in source (Yaalon, 1997), and therefore the addition and removal of terra rossa cover are not directly related to the underlying bedrock erosion. How should we interpret the landscape of the Soreq drainage? Is it an effective, weathering limited, fluvial system in terms of hillslope erosion, sediment entrainment, and transport, or an inherited landscape that reflects past hydrologic conditions, which have since changed? If so, what forced the hydrological transition?

³⁶Cl denudation rates calculated along hillslope profiles are similar to those calculated along interfluves and maintain the same correlation with MAP while being independent from hillslope gradient. This result is valid for the entire exposed bedrock sample population (Fig. 3), as well as along single hillslope and interfluve profiles (Fig. 4). The lack of correlation between denudation rate and hillslope gradient suggests that mechanical denudation processes (which depend on hillslope gradient) have been limited relative

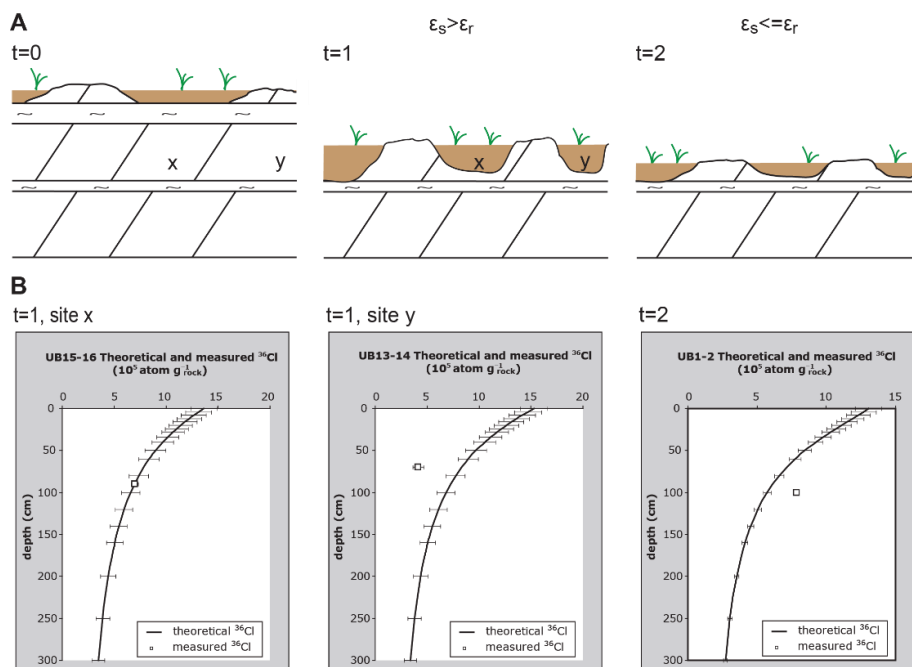


Figure 3 - (A) Schematic model for the formation and decay of soil pocket landforms within a massive carbonate bed bounded between thin marl beds, where ϵ_r and ϵ_s are bedrock denudation rates of exposed and soil-covered bedrock, respectively. At t_0 , the landscape is planar above site “x,” and elevated above site “y.” At t_1 , a massive carbonate bed crops out, and differential erosion begins to deepen soil pockets associated with surface irregularities. Between t_1 and t_2 , the erosion pattern is reversed, and the soil pocket depth decreases. **(B)** ^{36}Cl concentration measured at the bottom of three different soil pockets compared with ^{36}Cl concentration profiles calculated for adjacent exposed bedrock (see text for details). Figure modified after Ryb et al. (2014b).

Soreq-Drainage Panorama (31°44'46.18"N/35° 3'48.40"E) – Hillslope processes in the Soreq Drainage

This view-point offers an excellent panorama of the meandering Soreq channel and surrounding hillslopes. Incising 400 m into the Judea Hills carbonate highland, the Soreq catchment is a well-developed ephemeral fluvial system (Fig. 1). With steep convex-linear hillslopes (in places exceeding 30°) and non-concave stream profiles (of the main and side

meters thick carbonate beds, which (when exposed) are denuding at a rate of $\sim 20 \text{ mm kyr}^{-1}$, soil pockets are expected to evolve on time scales of only a few 10^5 yr . Hence, bedrock beneath a soil pocket experiences relatively rapid change in soil cover thickness, geometric effect, and bedrock erosion rates over time.

These dynamics are expressed in the relations between ^{36}Cl concentrations measured at the bottom of soil pockets and those calculated at an equal depth below adjacent exposed bedrock. At the initiation of a soil pocket, high bedrock erosion rates are the result of the combined effect of high $p\text{CO}_2$ beneath soil cover and the focused runoff from surrounding exposed bedrock patches toward the pocket. As subsoil $p\text{CO}_2$ is expected to remain high beneath soil cover, we hypothesize that soil pocket deepening must stop due to the decrease in the pocket's hydraulic conductivity. Such a decrease might be caused by an intersection of the soil pocket bottom with a clay-rich bed (Fig. 3), or simply by the accumulation of terra rossa and its enrichment in clay as carbonate dissolution progresses (Merino and Banerjee, 2008). Regardless of the specific mechanism, hydraulic conductivity limitation on carbonate dissolution capacity means that during the cycle of soil pocket deepening, some of the carbonate dissolution potential may remain unutilized, and that denudation of exposed bedrock surfaces controls the overall lowering of the surface.

lithological and environmental parameters (% of insoluble residue, Mg/Ca ratio, Rock strength (Schmidt-Hammer rebound values), elevation and hillslope gradient) show considerably weaker and/or insignificant correlations. These observations are consistent with carbonate mineral dissolution, limited by precipitation amount, controlling the denudation of exposed rock surfaces.

In silicate terrains, soils are derived mostly from in situ weathering of rock. Soil thickness and production rates are therefore linked to overall rates of erosion (Heimsath et al., 1999). In contrast, carbonate bedrock may dissolve under soil cover, while soil is accumulating or is being removed. In the following discussion, we therefore consider the erosion of bedrock at the bottom of soil pockets rather than overall denudation, which includes the removal of both bedrock and soil. In the Judea Hills, field observations indicate that at a certain point in time, bedrock erosion rate in soil pockets drops below that of adjacent exposed bedrock, and the pocket depth decreases (Fig. 3). These observations include pocket-depth limitation to ~2 m and exclusive containment within massive carbonate units. In the absence of such a decrease in bedrock erosion rate, soil pockets would have been observed in all units as the denudation front progressed. Bedrock erosion rates vary in soil pockets because acid production and hydraulic conductivity are expected to change as the soil and vegetation cover change, and as the bottom of the pocket interacts with different lithologies. In contrast, denudation rates of exposed bedrock show only mild variation. The formation of a soil pocket within a massive carbonate bed is limited by bed thickness (Fig. 3); since soil pockets in the Judea Hills evolve in few-

At steady-state, the fluxes of ^{36}Cl formation and removal are balanced, and the concentration of ^{36}Cl along a depth-profile is a function of denudation rate. Reaching steady state requires the removal of ~ 1 m of rock, at a constant rate (von Blanckenburg, 2005). Assuming such steady state has been reached we have calculated denudation rates of the carbonate bedrock surfaces across the Judea Hills (Soreq drainage). These rates average over 10^4 - 10^5 years – integrating glacial and interglacial climates.

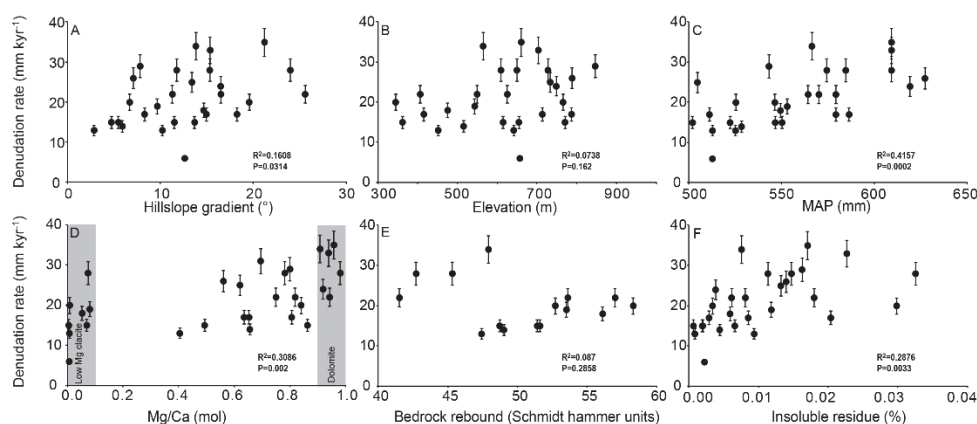


Figure 2 - Denudation rates calculated for exposed bedrock samples plotted against different environmental and lithological variables. (A) Denudation rates plotted against local hillslope gradient; denudation rates are clearly decoupled from hillslope gradient. (B) Denudation rates plotted against elevation; denudation rates are clearly decoupled from elevation. (C) Denudation rates plotted against local mean annual precipitation (MAP) values; samples show a general positive dependency on MAP values. (D) Denudation rates plotted against bedrock Mg/Ca molar ratios. Average denudation rate of low-Mg calcites is lower than that of high-Mg calcites and dolomites. (E) Denudation rates plotted against bedrock Schmidt hammer rebound values. (F) Denudation rates plotted against insoluble residue weight fraction. Figure modified after Ryb et al. (2014b).

^{36}Cl based denudation rates of exposed bedrock surfaces in the Soreq drainage average at 21 mm kyr^{-1} and are correlated with mean annual precipitation (MAP) values at the site of sampling (Fig. 2). Other

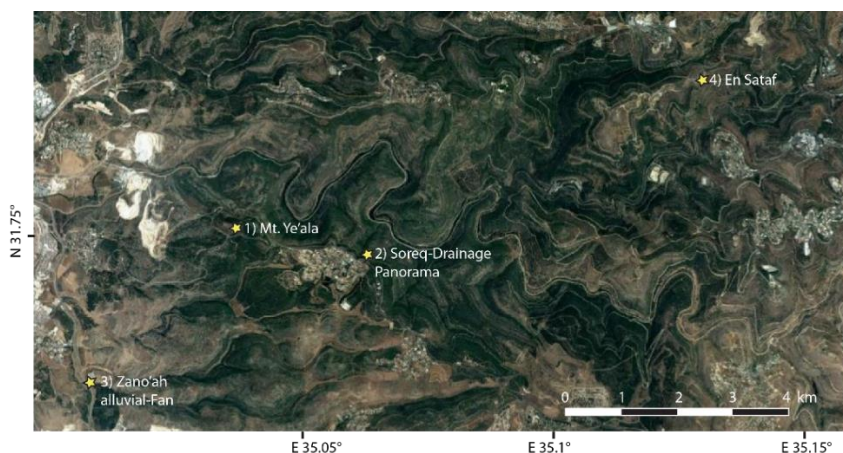


Figure 1 – Location map of the Soreq Drainage and main field-trip sites.

Mt. Ye'ala ($31^{\circ}45'3.07''\text{N}/35^{\circ}2'17.59''\text{E}$) – The rate and style of hilltop denudation

Aminadav Formation dolostone crops-out near the top of Mt. Ye'ala, forming rock-tables separated by terra-rossa soil pockets. This 'table-and-pocket' landform is typical to massive carbonate rock units (e.g., Aminadav, Weradim and Bina Formations) in the Judea Hills, and is far less common in other units consisting of 'soft' carbonates (e.g., chalk, marl) or alternations of thin marl-dolomite beds (e.g. Soreq Fm.). In the following discussion we address the environmental controls on long-term rate and style of denudation (e.g., mechanical vs. chemical) of hilltops in the region, and the dynamics that shape the 'table-and pocket' landform.

Chlorine-36 is a cosmogenic radio-nuclide that forms at the upper meters of the Earth-surface through interaction between cosmic radiation and target-elements in carbonate mineral lattice, and is removed from the surface via radioactive decay (half-life of 301 kyr) as well as denudation (Stone et al., 1996, 1998).

Field trip 2:

Climatic and tectonic controls on landscape evolution in the Judea Range

Uri Ryb and Ari Matmon

Freddy and Nadine Hermann Institute of Earth Sciences, Hebrew University of Jerusalem

Introduction

Landscape evolution has been mostly studied in terrains dominated by silicate rocks, in which the rate of mass removal is largely controlled by topography (Portenga and Bierman, 2011). In this field-trip we will explore the environmental factors which control the rate of denudation and mechanism (mechanical or chemical) of landscape evolution in a carbonate terrain. The Judea Hills are located over the western, Mediterranean-facing flank of the Judea Range, and consist of a thick sequence of Cretaceous marine carbonates (mostly beds of dolostone, limestone and marl). We demonstrate how the interplay between climate and tectonic activity has shaped this region since the Miocene. The data and interpretations we present in this field trip are largely a synthesis of four publications that emerged from U.R. thesis (Ryb et al. 2013, 2014a, 2014b, 2015).

The Israel Geological Society and the Israel Association of Water Resources 2020

Jerusalem Hills

Field Trips Guide



Editors:

Leeron Ashkenazi and Chen Kenigsberg



