



משרד התשתיות הלאומיות
האנרגיה והמים
המכון הגיאולוגי

גיאולוגיה של תשתיות ומים בירושלים

יעקב ארקין ועמוס אקר

תוכן העניינים

עמוד

5	1. הקדמה.....
5	1.1 הבעת תודה.....
6	1.2 תיאור גיאוגרפי של סביבת ירושלים.....
6	1.3 תיאור גיאולוגי של הסלעים בסביבת ירושלים.....
13	2. הגיאוטכניקה של הסלעים בסביבת ירושלים.....
13	2.1 הקדמה גיאוטכנית.....
15	2.2 היחידות הגיאוטכניות.....
15	יחידה I.....
16	יחידה II.....
16	יחידה III.....
18	יחידה IV.....
19	יחידה V.....
19	יחידה VI.....
20	3. עבודות גיאוהנדסיות נבחרות באזור ירושלים.....
20	3.1 מנהרות וגשרים.....
21	3.2 פרויקט גילה.....
23	3.3 מנהרת גילה הקצרה.....
26	3.4 מנהרת גילה הארוכה.....
29	3.5 גשר גילה.....
35	3.6 מנהרת הר הצופים.....
41	4. אספקת המים.....
41	4.1 כללי.....
42	4.2 מי תהום.....
48	4.3 מקורות המים בנחל קדרון.....
49	4.4 בורות מים ובריכות.....
53	4.5 אמות המים.....
56	4.6 ביוב.....
57	המערכת המערבית.....
58	המערכת המזרחית.....
59	5. רשימת ספרות.....
65	6. נספחים.....

רשימת האיורים

7	1. מפה טופוגראפית של ירושלים וסביבתה.....
8	2. מיקומה של ירושלים בתוך המבנים הגיאולוגיים של יהודה וחברון.....
8	3. חתך גיאולוגי מזרח-מערב, דרך הרי יהודה.....
11	4. מקרא סטרטיגרפי של הגיאולוגיה בסביבות ירושלים.....
12	5. מפה גיאולוגית של ירושלים וסביבתה.....
13	6. יחסי הגומלין שבין סידוק, מים וסלע.....
14	7. קוהזיה וזווית החיכוך בהשוואה לאחוז המים ביחידת החואר הקירטוני של תצורת כפר שאול במנהרת גילה הקצרה.....
17	8. מפה גיאוטכנית של ירושלים וסביבתה.....
21	9. מפת מיקום של פרויקט גילה.....
22	10. שיטות מומלצות לכריית מנהרות המתאימות לאיכויות.....
24	11. חתך גיאוטכני לאורך מנהרת גילה הקצרה.....

	12. מראה של הכניסה הצפונית של מנהרת גילה הקצרה
24	בתצורת כפר שאול, בזמן הבניה
25	13. הכניסה הדרומית של מנהרת גילה הקצרה בתצורת עמינדב
	14. פני הסלע הנכרה במנהרת גילה הקצרה בתוך היחידה
25	התחתונה של תצורת כפר שאול (גיר וקירטון)
26	15. חתך גיאוטכני לאורך מנהרת גילה הארוכה
27	16. סדקים קרסטיים בכניסה הצפונית של מנהרת גילה הארוכה
27	17. פתחה הצפוני של מנהרת גילה הארוכה בתחילת העבודות
	18. חתך גיאולוגי עמודי במעבר מתצורת מוצא לתצורת עמינדב המראה את מיקומו של "אזור המעבר"
28	19. בלוק של דולומיט באזור המעבר
28	20. חתך גיאולוגי לאורך תוואי גשר גילה
29	21. גשר גילה בזמן הבניה עם חמשת עמודי התמך
30	22. העמוד Do של גשר גילה
30	23. בור הבסיס של העמוד Do
31	24. קדיחת קידוחי תצפית והזרקת מלט, (grouting) בבור הבסיס של העמוד Do
31	25. קידוח Fo1 בבור הבסיס של העמוד Fo בגשר גילה
33	26. גשר גילה. גלעיני הקידוחים F1, F2, F3 בבור הבסיס של העמוד Fo
34	27. בור הבסיס של העמוד Do. מפת סדקים ואזורי קרסט
35	28. מיקום מנהרת הר הצופים וקידוחי המחקר
37	29. מנהרת הר הצופים. תיאור קידוח Z4
38	30. חתך גיאוטכני לאורך תוואי מנהרת הר הצופים
39	31. אתר מנהרת הר הצופים. גרף פלסטיות של חרסית בתצורת מנוחה החוארית-קירטונית
39	32. שיטת עבודה מוצעת לכריית מנהרה לפי מיון מסת הסלע
40	33. מפה הידרוגיאולוגית המציגה תת-אקוויפרים, קידוחים, מעיינות ובורות מים
43	34. מפת מפלסים של תת-האקוויפר התחתון של חבורת יהודה בירושלים (מרץ 1984)
45	35. מפת מפלסים של תת-האקוויפר התחתון של חבורת יהודה בירושלים וסביבתה (מרץ 1984)
46	36. מפה איזוכלורית (מג/ל) של תת-האקוויפר התחתון של חבורת יהודה בירושלים וסביבתה. (אפריל-מאי 1985)
47	37. מפה גיאולוגית של אזור הר הבית
50	38. מפה סטרוקטוראלית (מ') וחתך סטרוקטוראלי בירושלים וסביבתה לפי תצורת מוצא (Kumo)
51	39. מערכת אמות המים הקדומות שסיפקו מים לירושלים
54	40. אמת המים התחתונה בצדו הדרומי של הר ציון, שבורה בחלקה ובתוכה צינור החרס שהונח ע"י העותמנים
55	41. אמת המים התחתונה בצדו המערבי של הר ציון ליד בריכת הסולטאן. צינור חרס עותמני מותקן בתוך האמה
55	42. אגני הניקוז ומתקנים לטהור שפכים באזור ירושלים
56	

רשימת הטבלאות

	1. פרמטרים גיאוטכניים של התצורות עמינדב,
15	וורדים ביחידה I. נתונים כלליים מסביבת ירושלים.....
	2. פרמטרים גיאוטכניים של תצורת כפר שאול
18	ביחידה III. נתונים כלליים מסביבת ירושלים.....
19	3. תכונות גיאוטכניות מייצגות של סלעים בתצורת מנוחה ביחידה V
20	4. תכונות גיאוטכניות מייצגות של דוגמאות של קירטון חרסיתי. ביחידה VI ...
20	5. תכונות גיאוטכניות מייצגות של דוגמאות קרקע ואלוביום ביחידה VI
44	6. רום מי התהום, Cl ו- NO ₃ בתת-האקויפר התחתון של חבורת יהודה.....
	7. אנליזות כימיות של מים (מג/ל) מתת-האקויפרים
48	התחתון והעליון של חבורת יהודה.....
52	8. בריכות ומאגרי מים היסטוריים שאינם בשימוש כיום.....

רשימת הנספחים

	I. פרמטרים גיאוטכניים מדודים של סלעים מהתצורות:
65	עמינדב, ורדים, כפר שאול, בינה, ורדים ומנוחה.....
70	II. מונחון.....
71	III. המחבר דר' יעקב ארקין.....
72	IV. המחבר מר עמוס אקר.....

1. הקדמה

הספר דן בצד הגיאולוגי הקשור לבניית תשתיות הנדסיות ומיועד לאנשי מקצוע העובדים בתחומי הגיאוטכניקה, למתכנני תשתיות, אדריכלים, קבלני עבודות תשתית ולאלה המתעניינים בפיתוח ירושלים. בספר מתוארות תכונות פיסיקליות ומכניות של היחידות הגיאוטכניות של הסלעים באזור ירושלים. מוצגים פרמטרים גיאוטכניים, שנמדדו בעת כריית שתי מנהרות גילה ובנית הגשר שביניהן וכריית מנהרת הר הצופים. כמו כן מוצגים פרמטרים גיאוטכניים מפרויקטים אחרים שנעשו בעבר ונמדדו במעבדה הגיאוטכנית של המכון הגיאולוגי של ישראל בירושלים. בספר. מופיע פרק על אספקת המים לירושלים עם דגש על ההידרוגיאולוגיה, האקויפרים, פרשת המים התת-קרקעית וסכנות זיהום המים שמתחת לעיר. מצורפים בו נספחים הכוללים פרמטרים גיאוטכניים מדודים של היחידות הגיאולוגיות העיקריות בצורת גרפים ורשימות.

1.1 הבעת תודה

תודתנו נתונה לדר' עודד כץ, דר' עמוס סולומון ודר' זאב לוי על שקראו את העבודה והעירו הערות מפורטות ומנחות. למר עמוס ישראלי ז"ל על קריאתו והבעת דעתו על הספר ולמר מיכה בלום, מנהל מחלקת הביוב בתאגיד המים של ירושלים "הגיחון", על הדיון הפתוח בנושא סילוק הביוב מירושלים.

תודתנו נתונה גם לחברים במכון הגיאולוגי ובמכונים אחרים אשר העלו הערות והצעות חשובות. תודה מיוחדת ניתנת למר אלי רם על עזרתו, נאמנותו וחברתו בעבודות השדה והמעבדה, המוצגות בספר.

המחברים מודים למכון הגיאולוגי על תמיכתו ולגב' בת שבע כהן, נילי אלמוג וחנה נצר-כהן על שעזרו בהכנת הספר להוצאה לאור.

1.2 תיאור גיאוגרפי של סביבת ירושלים

ירושלים ממוקמת על המורדות המזרחיים של הרי יהודה ברומים שבין 700 מ' ל- 820 מ' מעל פני הים התיכון, במפגש קו האורך $31^{\circ} 78' N$ וקו הרוחב $35^{\circ} 21' E$. פרשת המים העילית הארצית העוברת בעיר (איורים מס' 33, 34). מחלקת את האזור באופן ברור לשני אזורים אקלימיים. צדה המערבי הוא בעל אקלים ים תיכוני עם מגוון הקרקעות והצמחייה האופייניים לאקלים זה. צדה המזרחי, הנמצא בתנאים של צל-הגשם, מוגבל בקרקעות ובצומח ויוצר את המעבר מאקלים ים תיכוני למדבר יהודה. הקיץ הוא חם ויבש והחורף קר ולח. ממוצע הגשמים השנתי בירושלים (בין החדשים אוקטובר ואפריל) הוא כ- 500 מ"מ, בהשוואה ל- 600 מ"מ באזור החוף (נתניה) ו- 50 - 110 מ"מ מזרחה יותר בים המלח. הטמפרטורות במשך השנה נעות לרוב בין $8^{\circ} C$ ל- $28^{\circ} C$ (Mehares, et al., 1995) עם טמפרטורות שיא היכולות להגיע בקיץ ל- $34^{\circ} C$ ואף יותר ומתחת ל- $0^{\circ} C$ בחורף. במספר חורפים יכול לרדת שלג במשך 1-3 ימים.

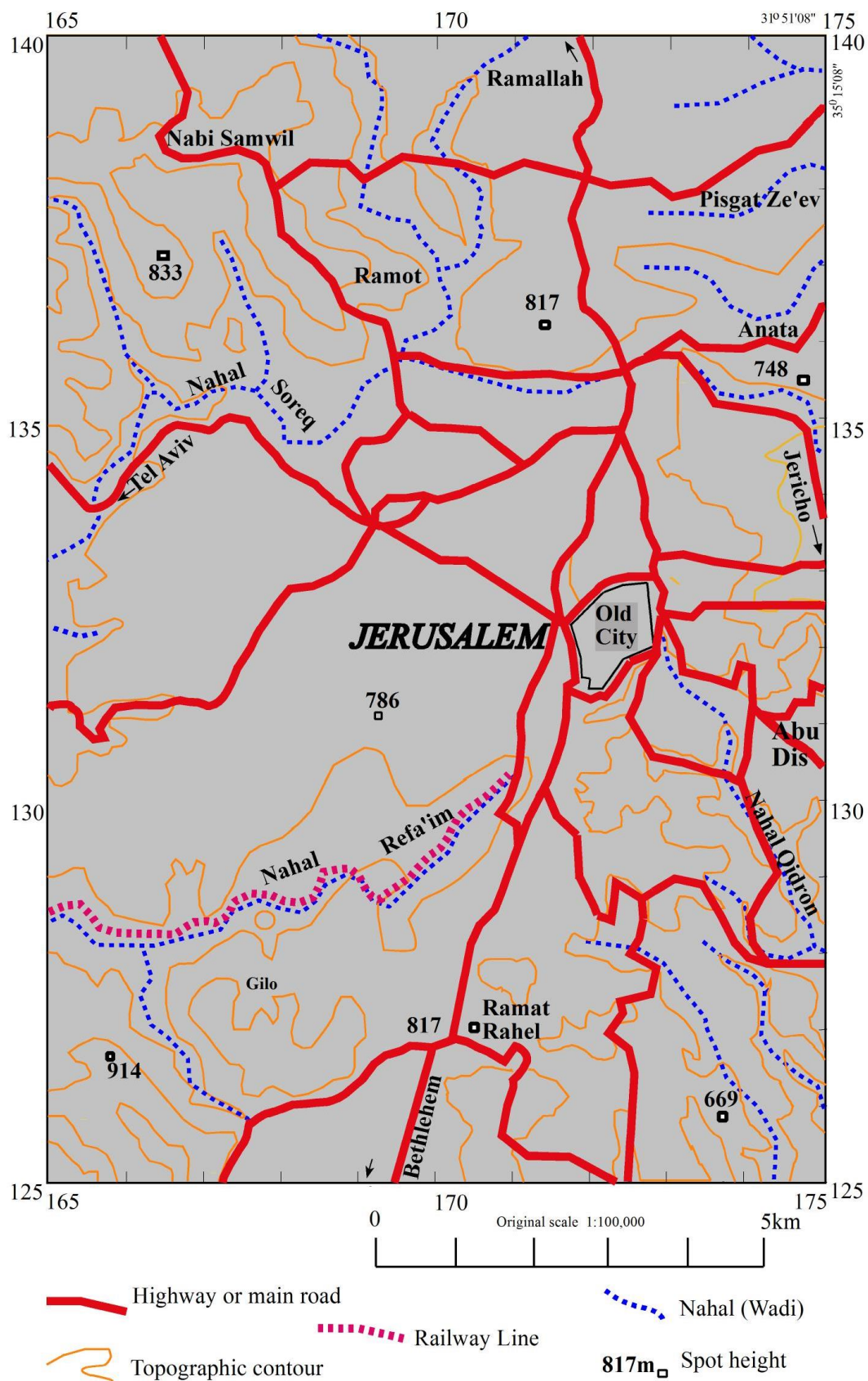
1.3 תיאור גיאולוגי של הסלעים בסביבת ירושלים

הסלעים באזור ירושלים שקעו בים הטתיס הקרטיקוני לפני 70 - 100 מיליוני שנים. הים הציף חלקים נרחבים של המזרח התיכון אשר כללו גם מדף יבשתי שטוח רחב ידיים. עומק הים היה רדוד וטמפרטורת המים באזור זה היתה באופן כללי חמה. בעלי החיים שחיו בים זה נמצאים כיום כמאובנים בתוך התצורות הגיאולוגיות השונות וכוללים שלדים של מיקרואורגניזמים, צדפות, קיפודיים ושבולולים. שוניות של רודיסטים נבנו באזורים רדודים מאד (Arkin and Hamaoui, 1967). דינוזאורים שוטטו במישורי הבוץ והשאירו טביעות רגל (Avnimelech, 1962).

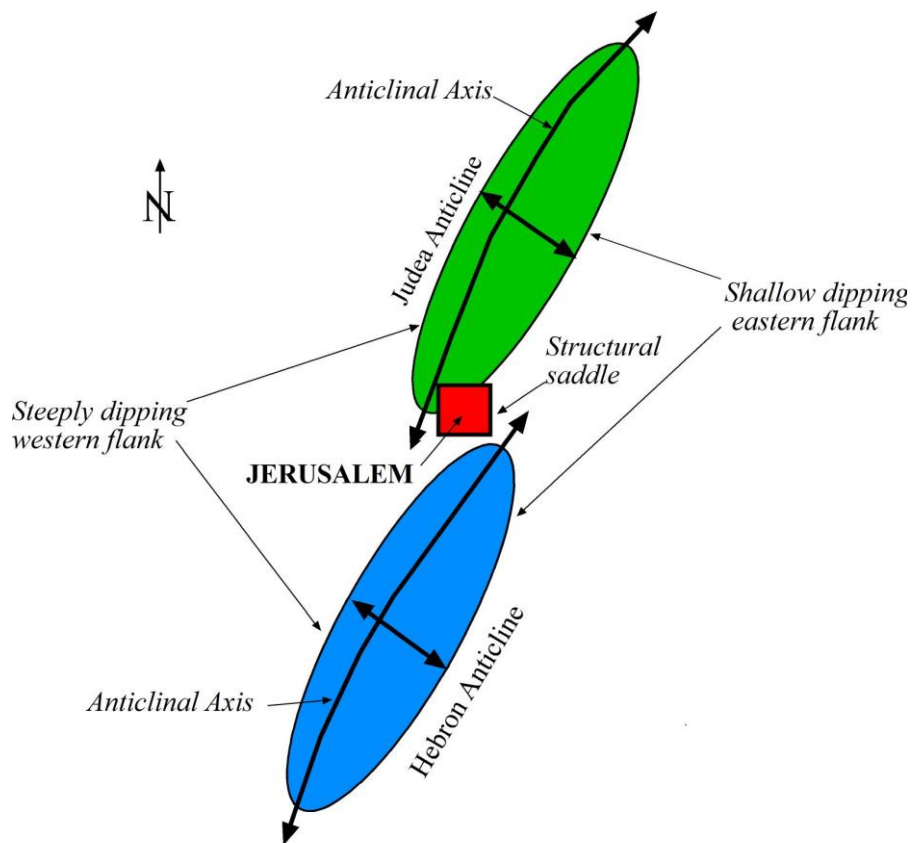
הזמן הרב שבו התקיימה ההצפה מעל האזור הביא לשקיעת רצף עבה של סלעים קרבונאטים שהגיע באזור ירושלים עד קרוב ל- 1000 מ'. תנועות טקטוניות מאוחרות יותר שינו בהדרגה את המדף היבשתי השטוח. הסלעים הקרבונאטים קומטו והורמו ויצרו נוף הררי של אנטיקלינות וסינקלינות בכיוון כללי צפון מזרח - דרום מערב. מבני קימוט אלה יוצרים כיום את עמוד השדרה ההררי של ישראל.

ירושלים ממוקמת צפונית לאוכף הסטרוקטוראלי שבין האנטיקלינות הא-סימטריות של יהודה וחברון (איור מס' 2) שכוון הוא צפון מזרח - דרום מערב. צידם המערבי של מבנים אלו הנו תלול יותר מאשר צידם המזרחי ונוחת אל מתחת למישור החוף. צידם המזרחי הוא כאמור בעל נטייה מתונה יותר ונוחת באופן הדרגתי אל בקע ים המלח (איור מס' 3).

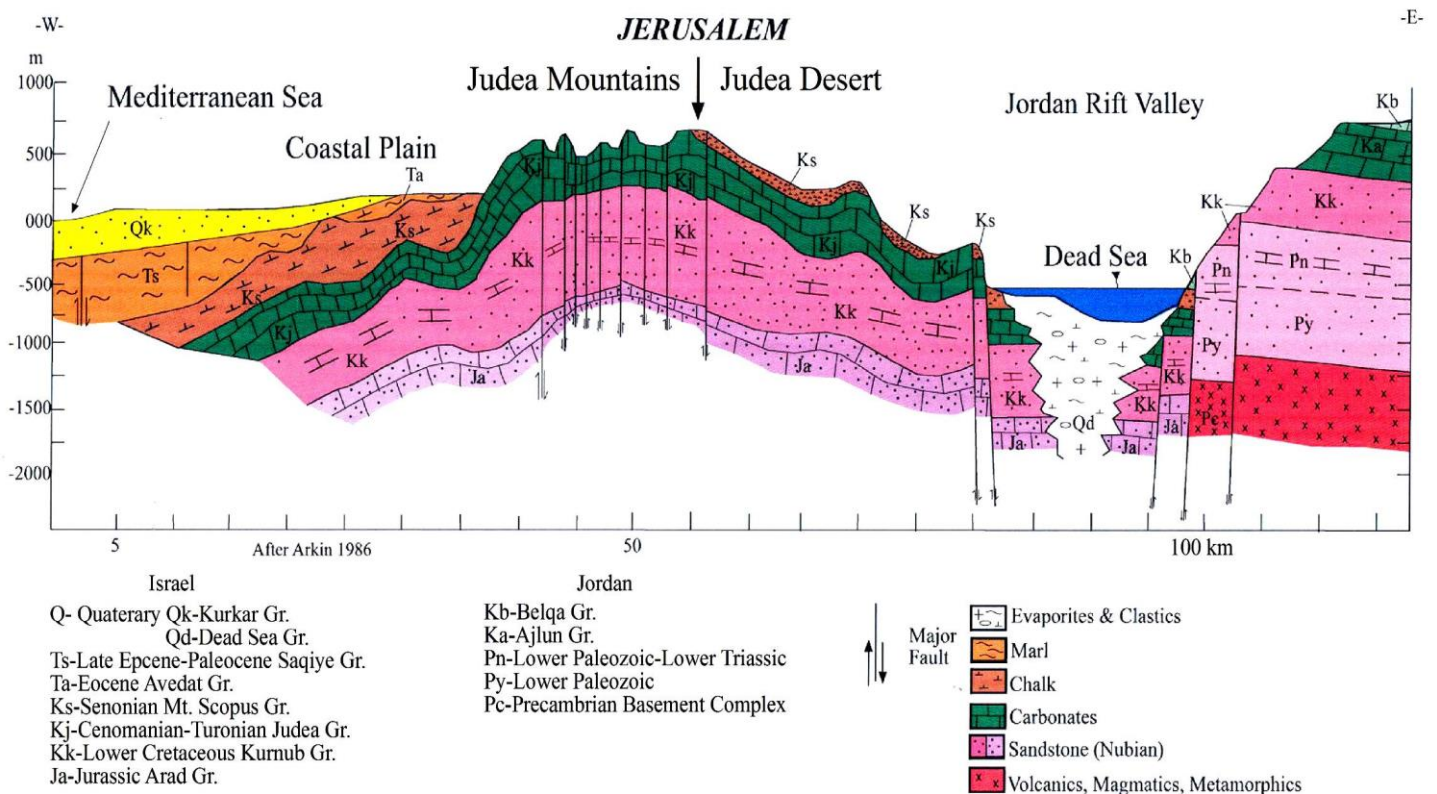
תוך כדי התרחשות התהליכים הגיאולוגיים שגרמו ליצירת המבנים הגיאולוגיים שקעו בים בסינקלינות ועל גבי צלעות האנטיקלינות מגוון של סלעים קרבונאטים רכים יותר (קירטון וחואר) מגיל קרטיקון עליון. סלעים אלו מכילים כמות רבה של מאובנים מיקרוסקופיים, אמוניטים ושרידי דגים (שלדים, שיניים וקשקשים). סלעים צעירים יותר מגיל ניאוגן והווה שקעו בד"כ בעמקים ועל צלעות האנטיקלינות.



איור מס' 1. מפה טופוגראפית של ירושלים וסביבתה.



איור מס' 2. מיקומה של ירושלים בתוך המבנים הגיאולוגיים של יהודה וחברון.



איור מס' 3. חתך גיאולוגי מזרח-מערב דרך הרי יהודה.

רצף הסלעים בירושלים וסביבותיה חולק ל- 3 חבורות:

1. בבסיס, חבורת כורנוב מגיל קרטיקון תחתון
2. מעליה, חבורת יהודה מגיל קרטיקון תחתון-תיכון הבנויה מסלעים קרבונאטים (גיר ודולומיט) הבונים את האנטיקלינות.
3. מעליה, חבורת הר הצופים מגיל קרטיקון עליון עד הטרצייר הבנויה מקירטון וצור מסיבי. חבורה זו בונה בד"כ את דפנות האנטיקלינות.

סלעי חבורות יהודה והר הצופים (גיר, דולומיט, חואר, קירטון וצור) הם הסלעים הנחשפים באזור ירושלים. הסלעים באזור ירושלים חולקו ליחידות ליתוסטרטיגרפיות אשר ניתנות לקורלציה גם עם אזורים אחרים בארץ (ובמזרח התיכון) ואלו הן:

חבורת יהודה

גיל החבורה הוא קרטיקון תחתון-תיכון. עובייה גדול מ- 900 מ'. (Arkin & Hamaoui, 1967) (איורים מס' 4, 5). החבורה מחולקת לחלק תחתון הבנוי מדולומיט משוכב עם מעט מאד גיר וחואר ולחלק עליון המורכב מגיר יותר מסיבי, דולומיט ומעט קרטון וחואר. החבורה מחולקת מלמטה כלפי מעלה לתצורות הבאות:

תצורת גבעת יערים

דולומיט משוכב היטב (1.50-0.50 מ) בעקר דק גבישי. בחלק התחתון הגבישים גדולים יותר. בחלק העליון מופיעה שכבת קוורצוליט (0.90 מ) ומכילה מאובנים של רודיסטים וגסטרופודים. התצורה מכוסה במקומות בנארי ואדמה.

תצורת שורק

התצורה מחולקת לשנים. החלק התחתון מורכב מגיר משוכב דק עם שכבות ביניים של חואר הגיר בעיקר פלספאריט וביומיקריט. במקומות התצורה בנויה מדולומיט עם דרוזות של קוארץ, גבישי קוארץ וצור בעדשות או בשכבות.

תצורת כסלון

התצורה מורכבת מדולומיט מסיבי עם עדשות של קוארצוליט וגבישי קוארץ. צור מופיע בחלק התחתון. מאובנים של רודיסטים וגסטרופודים נמצאים בחלקה העליון של התצורה. בשטח התצורה בונה מצוק שעובר לטרסה.

תצורת בית מאיר

התצורה מורכבת מדולומיט משוכב היטב עם צור וקוארצוליט ושכבות ביניים של חואר. התצורה מחולקת לשתי יחידות, התחתונה בנויה מדולומיט משוכב, דק גביש עם צור וספרוליטים. בחלקו מכוסה בנארי. החלק העליון בנוי מדולומיט משוכב היטב, דק גביש עם עדשות צור. שני החלקים מופרדים ע"י חואר צהוב.

תצורת מוצא

בנויה מחואר, חרסית ומעט אבן גיר. התצורה מהווה גבול ברור בין שני חלקי החבורה. מעיינות הנובעים מעל חואר זה שמשו באלפי השנים האחרונות להשקיית כרמים, מטעי זיתים וגנים אשר נטעו לידם.

תצורה עמידה

התצורה מונחת על תצורת מוצא. בנויה מדולומיט מסיבי, נקבובי, במקומות רבים עם חללים גדולים, במיוחד לאורך שברים גדולים. שברים וחללים אלו הופכים אותה לאקופר חשוב בתת-הקרקע.

תצורת כפר שאול

מונחת על תצורת עמידה. בנויה מקירטון, מעט חואר ומאבן גיר משוכבת דק בחלקה העליון. אבן גיר משוכבת זו (מיזי דיר יסיני) היא המקור העיקרי לאבני הריצוף הטבעיים המשמשים לריצוף ולציפוי.

תצורת ורדים

מונחת מעל תצורת כפר שאול. בנויה מדולומיט אפור קשה. בעבר, נחצבו סלעים אלו כאבני בנין קשים (בלוקים לציפוי חיצוני של קירות) ללא הדר כלשהו. כיום הם נגרסים לחצץ עבור תעשיית הבניה. תצורת ורדים מאופיינת בתופעות קרסט בצורת מערות ובנטיפים בהן כמו מערת שורק.

תצורת בינה

הנה החלק העליון של חבורת יהודה. מונחת על תצורת ורדים. התצורה בנויה מאבן גיר מיקריתית בצבע צהוב בהיר משוכבת דק ומאבן גיר גבישית, לבנה, גסת גרגר משוכבת עבה. אבן הגיר המיקריתית שמה בעבר לריצוף רחובות (הרומאים) ומשמשת גם כיום, במצב מלוטש לבניית מדרגות, לחיפוי חדרי מדרגות וכ"שיש" במטבחים. הנה אבן הבניה העיקרית לבלוקים של אבן המשמשים לציפוי קירות בירושלים.

הטרמינולוגיה של אבני בנין אלה בירושלים היא כלהלן, מלמטה למעלה:

מיזי אחמר – 40-60 מ' של דולומיט וגיר בצבעים של צהוב-קרם ואפור בהיר עם כתמים אדומים לא אחידים, דק גרגר, צפוף, קשה, אטום, שכבות עבות, יוצר צוקים, קרסטי.

מעליו מלכה – 10-24 מ' של גיר לבן ביוספריטי עם רודיסטים ומאובנים אחרים, נקבובי, קשה, שכבות עבות, מערות. יוצר צוקים, בליה בצבע אפור. רך בתת הקרקע, מתקשה בחשיפה לפני הקרקע תוך מספר ימים.

מעליו מיזי חילו – 60-90 מ' של גיר ביומיקרטי צהוב לבן, צפוף, קשה, משוכב, סטילוליטיים, דרגשים בעובי של 20-70 ס"מ.

חבורת הר הצופים

סלעי חבורת הר הצופים שמעל לחבורת יהודה, הנם מגיל קרטיקון עליון עד פלאוקן. הם בעלי עוביים שונים, מתדקקים על דפנות האנטיקלינות ובמספר מקרים נעלמים לגמרי (Arkin, 1976).

תצורת מנוחה

זו התצורה העיקרית של החבורה סביב ירושלים. בנויה מקירטון לבן אשר בכמה אזורים מעורב בחרסית. הקירטון, במספר מקומות, צבוע על ידי תחמוצות ברזל באופן בלתי אחיד בצבעי ורוד עד אדום בהיר. סלע זה לאחר שעבר ליכוד גירי והתקשה משמש לרוב כציפוי לקירות הבתים. באזור הרטוב, דרומית מערבית לירושלים, סלעים אלה נמצאים ומהווים חומר גלם לתעשיית המלט.

תצורת מישאש

מונחת מעל תצורת מנוחה. בנויה בעיקר מצור חום מסיבי. בירושלים וסביבתה תצורת מישאש נחשפת בצדה המזרחי של העיר (Arkin, 1976).

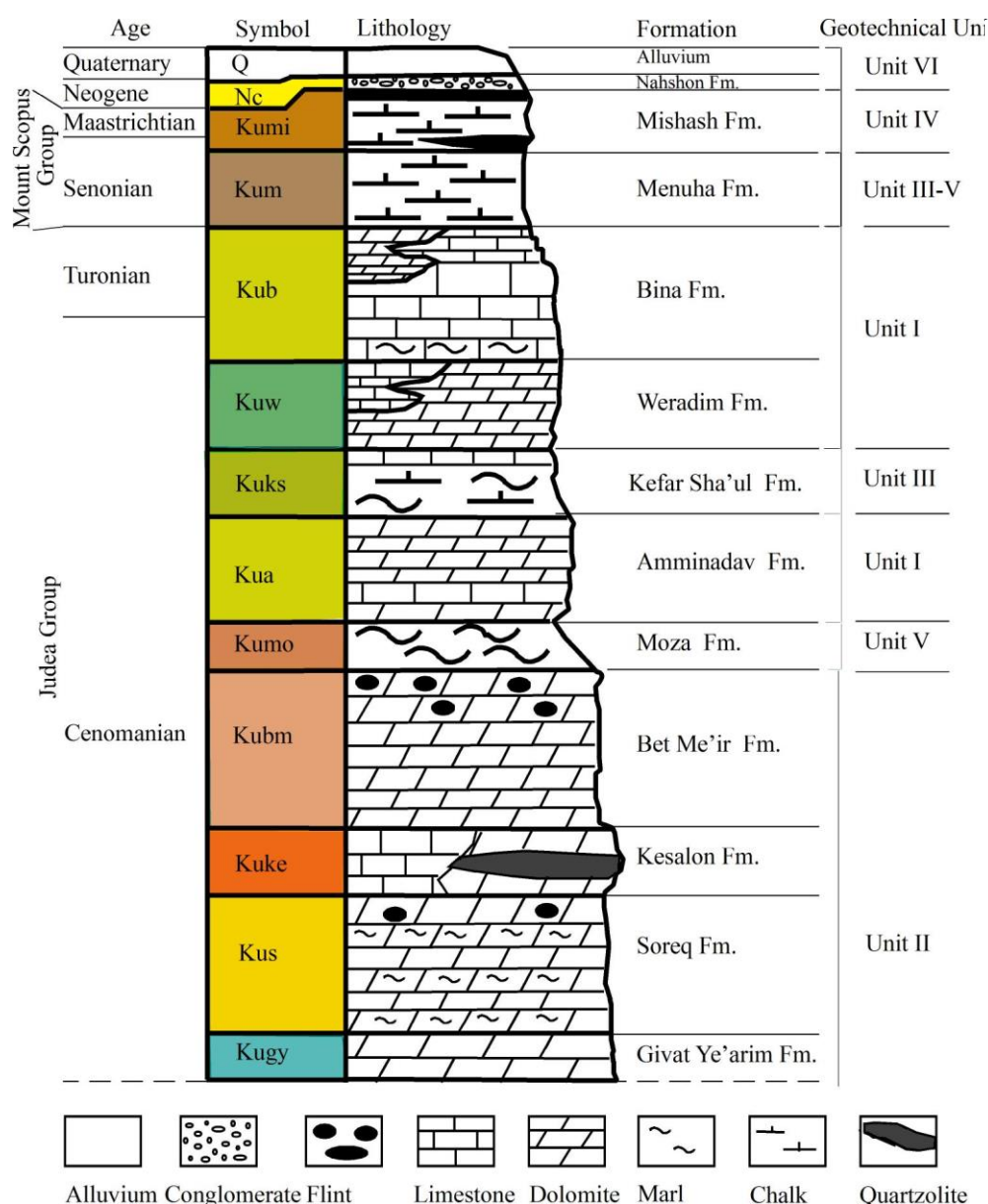
בליה וארוזיה הכתיבו מורפולוגיה וטופוגרפיה ייחודית עבור כל סוג סלע במחשופי הסלעים השונים:

הסלעים הרכים יוצרים בד"כ את הנוף המעוגל בראשי ההרים שהורחבו על ידי האדם לטרסות רחבות.

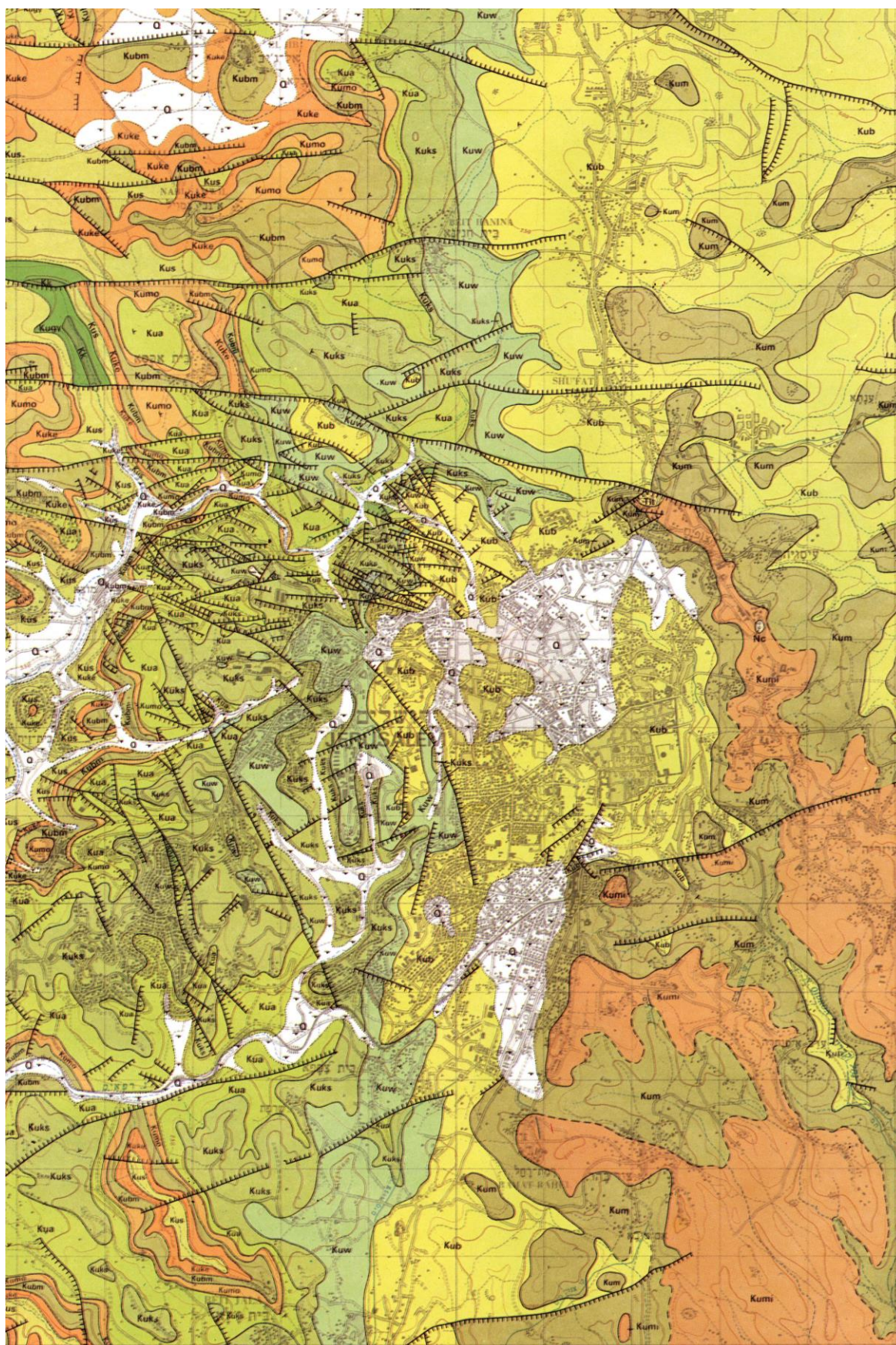
הסלעים הקשים יוצרים את הטרסות הטבעיות בצורת מדרגות במדרונות ההרים ובאפיקי הוודיות.

קרום גירי אפור לבן, הידוע בשם נארי, התפתח על הסלעים הרכים.

קרקעות ים תיכוניות טיפוסיות התפתחו על הסלעים: טרה-רוסה אדומה-חומה התפתחה על סלעי הגיר והדולומיט ורנדזינה חומה-אפורה על סלעי הקירטון.



איור מס' 4. מקרא סטרטיגרפי של הגיאולוגיה בסביבות ירושלים.



איור מס' 5. מפה גיאולוגית של ירושלים וסביבתה.

מקרא: ראה איור מס' 4.

2. הגיאוטכניקה של הסלעים בסביבת ירושלים

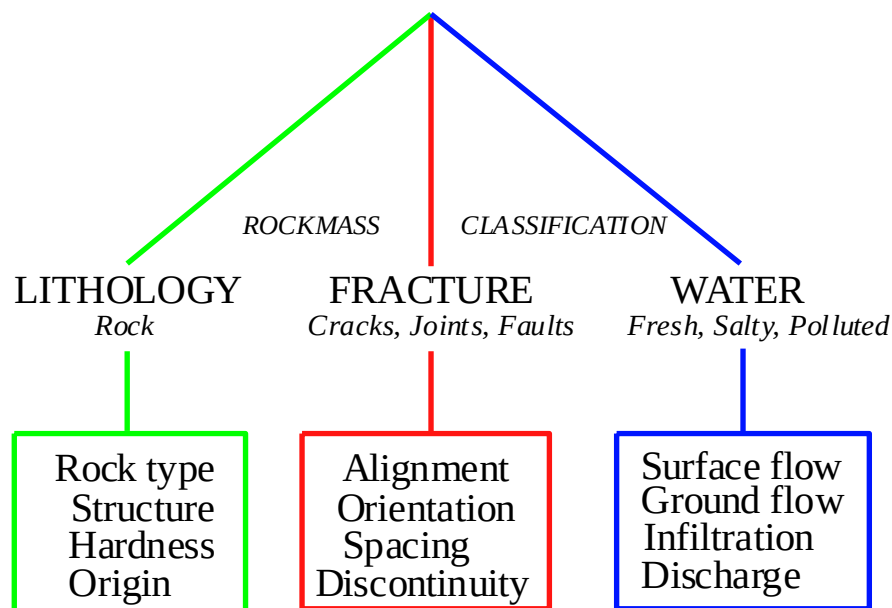
2.1 הקדמה גיאוטכנית

התכונות הגיאוטכניות של סלעים שונים מוגדרות באמצעות בדיקות מעבדה על סלעים טריים. אלה מופיעים בד"כ רק במחשופי כבישים חדשים או בחפירות. באתרים הנדסיים ובכול בניה תת-קרקעית דרוש לבצע קידוחי גלעין על מנת לבדוק את תכונות מסת הסלע ולהסיר את אי-הודאות בתכונות אלו עד כמה שניתן.

המיון של מסת הסלע (Rock Mass) מאפשר לתת ביטוי מספרי לאיכות מסת הסלע כך שניתן להשתמש בנתון זה בחישובים למטרות הנדסיות כמו: תכנון תנאי הביסוס של מנהרות, או מבנים תת קרקעיים אחרים. הביטוי המספרי מאפשר לחשב את יציבות מסת הסלע ומכאן לקבוע את גודל פתח המנהרה, את שיטת כריית המנהרה וצורת התימוך. לכל הפרמטרים האלה יש השפעה חשובה על סוגן ומחירן (הכלכלי) של התמיכות הדרושות להקמת מבנה בטוח על פני השטח ובתת-הקרקע.

התכונות הגיאוטכניות, הפיסיקליות והכימיות של מסת סלע כלשהו הן תוצאה של יחסי הגומלין שבין סידוק, מים וסלע (איור מס. 6).

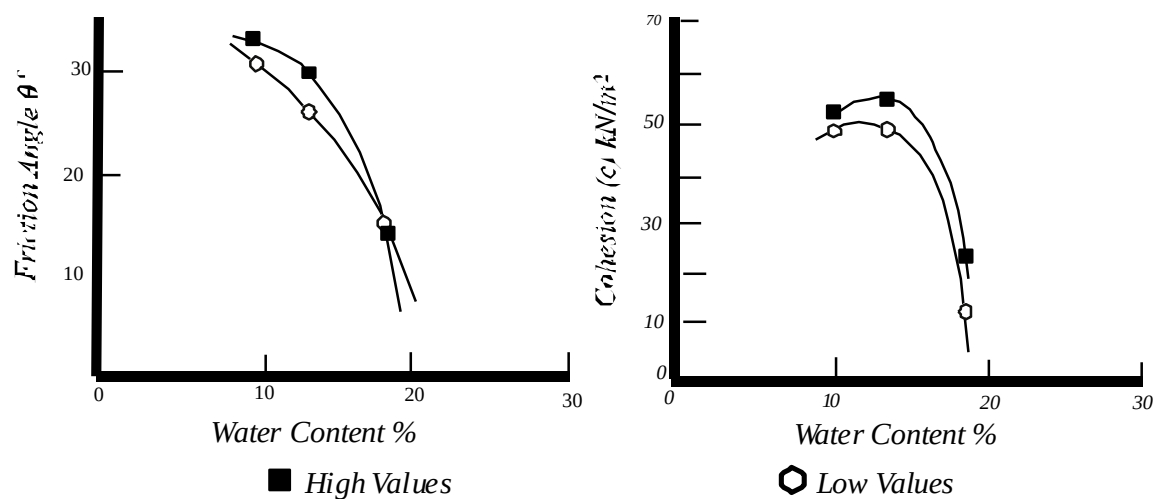
Interaction of three essential parameters



איור מס' 6. יחסי הגומלין שבין סידוק, מים וסלע.

מימדי האלסטיות והפלסטיות של סלעים ואיתור תופעות של אי-רציפות (בהם שברים, סדקים, חרסית, שינוי פציאס וקרט) באתר הבניה הנם נתונים חיוניים לתכנון מבנים בטוחים. בנוסף, שינויים בתכולת חרסית וחול בתוך מרקם הסלע ואי אחידות בגודל הגרגר הנם תכונות חשובות גם כן. כל אלה הינם חיוניים גם בבעיות סביבתיות כמו זיהום קרקע ומים, ובמיוחד כאשר נדרשות פעולות שיקום.

השפעת המים על הקוהזיה וזווית החיכוך של חואר קירטוני של תצורת כפר שאול מוצגת באיור 10 מס'.



איור מס' 7. קוהזיה וזווית החיכוך בהשוואה לאחוז המים ביחידת החומר הקירטוני של תצורת כפר שאול במנהרת גילה הקצרה.

בהגדרת איכות מסת הסלע נלקחים בחשבון הפרמטרים הבאים:

“דירוג איכות הסלע” RQD- Rock Quality Designation,

(Deere . et al, 1974) מבוסס על אחוז הדגימה של חלקי גלעין שלמים הגדולים מ- 10 ס"מ.

“דירוג מסת הסלע” RMR -Rock Mass Rating,

(Bieniawski 1980).

“איכות הסלע” Q, (Barton et al., 1974).

“זווית החיכוך הפנימית” ϕ , (Internal Friction Angle)

שלושת המדדים: RQD, RMR ו-Q הנם שיטות מיון של סלעים המסייעות

בבחירת טכניקת כריית המנהרה המתאימה לסלעים אלה.

השיטות המקובלות לקביעת איכות מסת הסלע פותחו בצפון אמריקה ובצפון אירופה ששם סלעים קשים (קריסטלינים ומטמורפים) נפוצים ביותר ומי תהום הנם חלק אינטגרלי מהסלעים. בירושלים ובמרבית האזורים בישראל המים אינם מרכיב ראשי של הקרקע ואינם מצויים בקרבת פני הקרקע מלבד אזורים בשפלת החוף. לפיכך היה צורך להתאים את השיטות הנזכרות לתנאים המיוחדים של הסלעים הסדימנטריים המרכיבים את רוב שטח הארץ.

אי-רציפות מסווגת בהתאם לכיוון, צורה, תדירות, צפיפות, ודרגת הפתיחה. התופעה מתחלקת לשתי קבוצות. הראשונה, שברים או סדקים שיטתיים שהנם תוצאה של משטר המאמצים האזורי ומאופיינים על ידי רציפות. השנייה, שברים או סדקים לא שיטתיים אשר אינם המשכיים ומהווים חלק ממערכת של שחרור מאמצים מקומיים. סדקים בקבוצה השנייה בד"כ נעלמים עם העומק.

2.2 היחידות הגיאוטכניות

סלעי התצורות הגיאולוגיות השונות באזור ירושלים חולקו לשש יחידות גיאוטכניות. כל יחידה כוללת בתוכה מספר תצורות בהן התכונות הגיאוטכניות של הליתולוגיות דומות. (איורים מס' 7, 4).
להלן תיאור היחידות:

יחידה I. דולומיט וגיר קשים

יחידה זו כוללת את התצורות: בינה (Kub), ורדים (Kuw) ועמינדב (Kua).
תצורות גיאולוגיות אלו מורכבות בדרך כלל מסלעי גיר ודולומיט קשים בשיכוב דק עד מסיבי. השינויים בתכונות הגיאוטכניות במסת הסלע תלויים בעיקר ביחס ה Ca/Mg שבסלע (טבלאות מס' 1,2). בקידוחי גלעין אחוז הסלע הנלכד הוא טוב מאד, לעתים קרובות הוא מגיע ל- 100%.
"דירוג איכות הסלע" (RQD) נע בד"כ בין 70%-100%,
דירוג מסת הסלע (RMR) הנה בדרך כלל באיכות טובה, 72-84, וזווית החיכוך הפנימית (ϕ) הנה גבוהה, 40° - 45° .

במחשופים של יחידה זו הסלעים הם בדרגות בליה שונות קרוב לפני השטח. קיימות תופעות של קרסט, בצורת מערות וחללים הממולאים לעתים קרובות בקרקע טרה רוסה חומה-אדומה ושברי סלעים. דבר המוריד את איכות מסת הסלע במידה ניכרת. תכונות סלע אחרות מופיעות בטבלה מס' 1 ובנספח I.

טבלה מס' 1. פרמטרים גיאוטכניים של התצורות עמינדב וורדים ביחידה I.

ערכים כלליים בסביבת ירושלים.

פרמטרים גיאוטכניים	עמינדב (דולומיט ואבן גיר)	ורדים (דולומיט ואבן גיר)
קרבוט (%)	79-100	98-100
צפיפות מירבית (t/m^3)	2.21-2.77	2.34-2.67
אחוז נקבוביות (%)	0.25-22.36	0.18-13.29
חדירות (מילידרסי)	0.10-26.00	0.13-0.32
כוח מתיחה (גלעין 2") MPa	14-18	9-27
כוח מתיחה (גלעין 2 ס"מ) MPa	13-26	5-19
חוזק פטיש שמידט (דוגמת שדה) MPa	121-217	99-251
עיוות (%)		0.98-1.51
אלסטיות MPa		3310-5940
רגישות למים (יחס כוח יבש/רווי)	קטן מ- 1 (נמוך)	1-1.5 (בינוני)
עומס (יסודות) MPa	גדול מ- 1 (גבוה)	גדול מ- 1 (גבוה)
חוזק נקודה חד צירית (פטיש שמידט) MPa	21-100	90-100
חוזק חד צירית (גלעינים) MPa	28-111	43-140

יחידה II גיר דולומיטי עם שכבות ביניים של חואר וקורצוליט.

יחידה II מורכבת מתצורת בית מאיר (Kuke) ומחלק מהתצורות שורק (Kus) וגבעת יערים (Kugy). תצורות אלו בנויות מגיר דולומיטי משוכב היטב עם שכבות ביניים דקות של חואר דבר היוצר נוף של מדרגות. בדרך כלל נבנו על קצות מדרגות אלו קירות נמוכים מסלעי הסביבה כדי למנוע את סחיפת הקרקע שהצטברה במשך מאות השנים ושמשה לחקלאות.

מסת הסלע הטרי הוא באיכות $Q=14-16$ שהיא משביעה רצון עד טובה ו- RMR בערכים של 60-80.

סלעים בלויים וסדוקים של יחידה זו הנם באיכות ירודה באופן משמעותי. ערכי ה- Q שלהם הם, 0.09-0.25 (נמוכים) וערכי ה- RMR הם 26-49. תכונות נוספות ניתן לראות בנספח I.

יחידה III – דולומיט גירי, גיר דולומיטי וקירטון בלוי בחלקו.

היחידה בנויה מחלקה העליון של תצורת כפר שאול (Kuks) ומחלקה התחתון של תצורת מנוחה (Kum). שמעליה. סלעי היחידה הנם סלעים הבלויים באופן חלקי. אחוז הבליה מתאים לשינויים בתחולת ה- Ca/Mg הקיים בסלע. כאשר תחולת ה- Ca גבוהה נוצרת על הסלע שכבת חיפוי של נארי. חלקה העליון של תצורת כפר שאול (טבלה מס' 1) בנוי מסלעים משוכבים דק עד דק מאד. קירטון תצורת מנוחה (טבלאות 2, 3) מכיל לעתים כמויות משתנות של חרסית.

איכות מסת הסלע משתנה מאד בין בינוני לטוב. ערכי ה- RMR נעים בין 48-55 וערכי ה- Q נעים בין 0.28-7.50. ה- RQD הוא בתחום הרחב שבין 17%-84%.

יחידה זו כוללת 3 סוגים של מסת סלע היכולים להחליף אחד את השני בשדה תוך מספר מטרים. אלו הם:

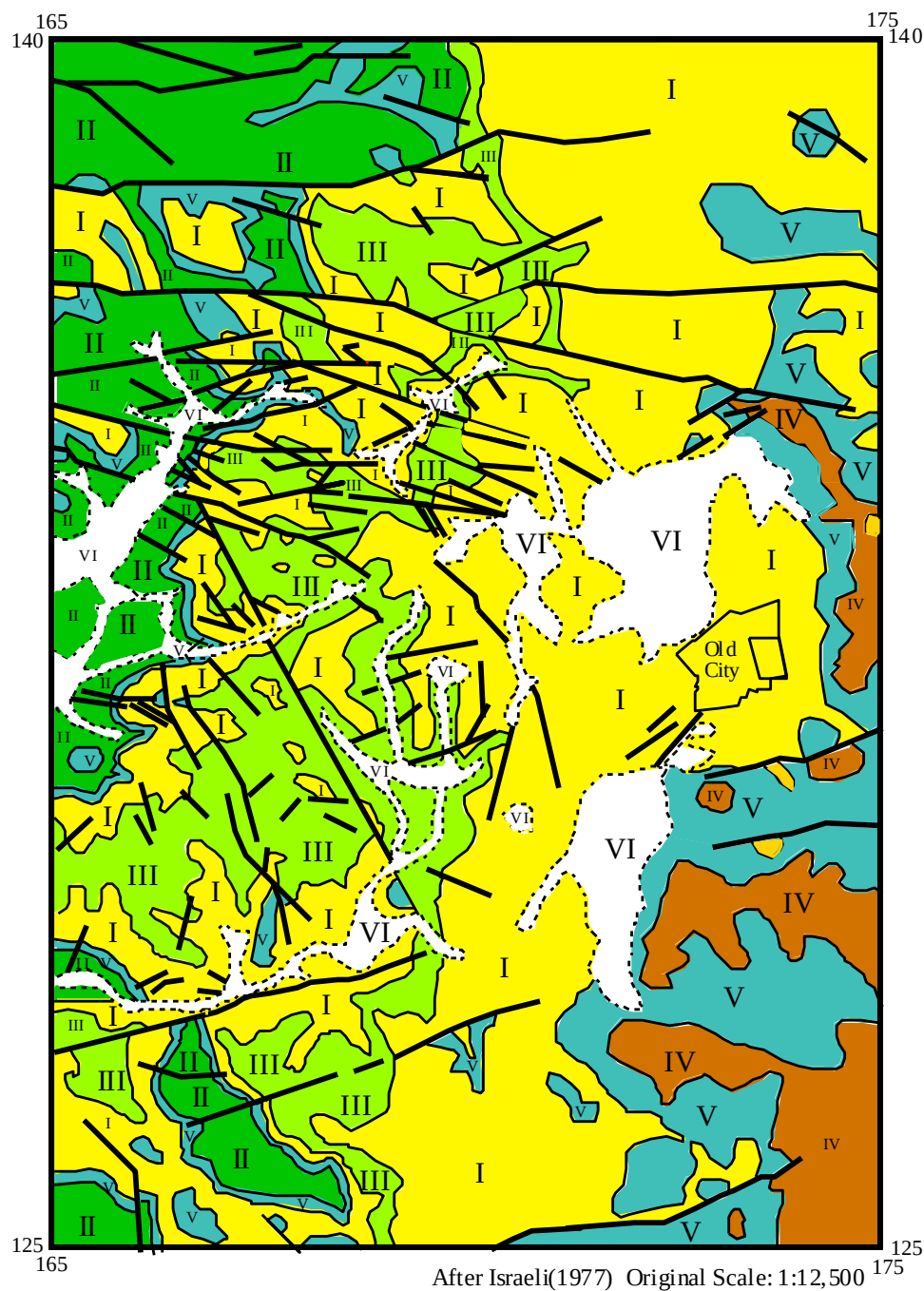
א. קירטון מסיבי לבן עד אפור המגיע במקומות אף לקשיות של אבן גיר. קיימים בו שרידי מאובנים גדולים ותופעות המסה עם מילוי קלציט. אחוז השבת גלעין בקידוחי גלעין הוא טוב וה- RQD נע בין 30%-60% כאשר הכל מותנה בצפיפות הסדקים באותו מקום. חוזק ללחיצה חד כיוונית (Unconfined Compressive Strength)

בו הוא 57×10^3 ק"ג/סמ"ר.

ב. קירטון חרסיתי מסיבי לבן עד אפור, וורוד עם סדקים ממולאים בחרסית ובקלציט. השבת גלעין ו- RQD משתנים ברחבי מסת הסלע. לחץ התנפחות (Swelling pressure) נע בין 0.33-0.57 ק"ג/סמ"ר.

בקבוצה זו נכלל גם קירטון חוארי שהוא בעל ערכים גיאוטכניים הרבה יותר נמוכים; חוזק
ללחיצה חד כיוונית הוא בממוצע 13.6 ק"ג/סמ"ר ומודול האלסטיות הוא
 $6.8 \times 10^3 \text{ ק"ג/סמ"ר}$. בתנאי יובש מסת הסלע היא מלוכדת ויציבה.

בקירטון יבש הינו בממוצע 88.5 ק"ג/סמ"ר ומודול האלסטיות (Module of Elasticity)



I - Geotechnical Unit

I - Kuw, Kub, Kua

II - Kugy, Kus, Kuke, Kubm

III - Kuks, Kum

— Contact

— Fault

Kus - Lithological Unit

IV - Kumi, Kum

V - Kumo

VI - Q

- - - Alluvial contact

See Figure 8 for geological legend and lithological description.

איור מס' 8. מפה גיאוטכנית של ירושלים וסביבתה.

ג. חואר וחרסית בצבע צהוב בהיר עד חום לעיתים עם כתמי לימוניט ותחמוצות מגנן וברזל. השבת גלעין ו - RQD בתחום שינויים גדולים. לחץ התנפחות יכול להגיע ל- 2.51 ק"ג/סמ"ר. התנפחות חופשית אוניאקסיאלית יכולה לעבור את ה- 3%.

המגוון של סוגי מסות הסלע הללו ביחידה גיאוטכנית זו יוצרים פוטנציאל של אזורי חולשה באיכויות שונות. מסת הסלע רגישה למים הגורמים להתנפחות החרסית. לחץ ההתנפחות של החרסית נע בין 0.33-0.57 ק"ג/סמ"ר ויכול להגיע מעל 2.51 ק"ג/סמ"ר.

קירטון עם ערכים ממוצעים של חוזק ללחיצה חד כיוונית נבחן עבור מהירויות חיתוך רגעיות של מכונות מינהור מסוג Roadheader. הבדיקות נתנו את התוצאות הבאות: המכונה הבינונית MK2B חתכה 65-90 מ"ק/שעה והמכונה החזקה יותר MK3 חתכה 100-125 מ"ק/שעה.

פרמטרים גיאוטכניים של תצורת כפר שאול השייכת ליחידה זו מוצגים בטבלה מס' 2.

טבלה מס' 2. פרמטרים גיאוטכניים של תצורת כפר שאול, ביחידה III. ערכים כלליים בסביבת ירושלים.

פרמטרים גיאוטכניים	כפר שאול (חואר ואבן גיר)
קרבוט (%)	95-99
צפיפות מירבית (t/m^3)	2.34-2.45
אחוז נקבוביות (%)	2.96-13.29
חדירות (מילידרסי)	0.09-0.27
כוח מתיחה (גלעין 2") MPa	6-16
כוח מתיחה (גלעין 2 ס"מ) MPa	5-23
חוזק פטיש שמידט (דוגמת שדה) MPa	112-147
עיוות (%)	0.85-1.93
אלסטיות MPa	2160-4940
רגישות למים (יחס כוח יבש/רווי)	גדול מ- 1.5 (גבוה)
עומס (יסודות) MPa	0.4 (נמוך)
חוזק נקודה חד צירית (פטיש שמידט) MPa	6-86
חוזק חד צירית (גלעינים) MPa	10-60

מתוך: Israeli, 1977

MPa = Mega Pascal

יחידה IV. צור וקירטון מצורר.

היחידה כוללת את תצורת מישאש (Kumi) הבנויה מצור חום מסיבי עם קירטון מצורר ומספר שכבות של פוספוריט וכן את הקירטון המצורר והצור החום הנמצא בחלקה העליון של תצורת מנוחה (Kum). הצור בנוי מגבישי קוורץ זעירים בדרגת קושיט הגבוהה יותר מזכוכית. הוא מופיע בשטח כשכבות לא רציפות או כתרכיזים יחידים הגורמים לקשיים בקדיחה ובחפירה.

יחידה V. חואר וקירטון.

חואר וקירטון מרכיבים את מסת הסלע העיקרית של תצורת מוצא (Kumo) וחלקים מתצורת מנוחה (Kum). במקומות באזור ירושלים, חלקה העליון של תצורת בית מאיר (Kubm), המונחת מתחת לתצורת מוצא, דומה לתצורת מוצא. עדשות חרסית ושכבות של אבן גיר קיימים במקומות בתצורת מוצא. מסת הסלע של יחידה זו רגישה למים ומתפרקת במהירות. גלישות מעגליות (circular slides) וזרמי בוץ (mudflow) יכולים לקרות. התכונות הגיאוטכניות של כל אחד מסוגי הסלעים מוצגות בטבלאות שונות בספר.

תופעה מיוחדת ליחידה זו, הקיימת באזור ירושלים, היא אופן הופעתה באזור המעבר שבין תצורת עמינדב ותצורת מוצא שמתחתיה. בלוקים של הדולומיט המסיבי של תצורת עמינדב שקעו לתוך החואר הרך יותר של תצורת מוצא ונמצאו כשהם נעוצים בתוך החואר. המגע בין שתי התצורות, הנראה ברור מאד במחשופים, אינו נראה כך באזור המעבר במקומות שהוא קיים.

יחידה VI. חומר לא מלוכד וכיסוי עליון.

יחידה VI בנויה מחרסיות, חולות קרבונאטים, חלוקים ושברי סלע. החרסית באופן כללי היא מונטמורילוניט האופיינית לקרקע טרה רוסה, הנוצרת מהתפרקות במקום של אבן גיר. מינרלי חרסית אחרים כמו קאוליניט ואיליט נמצאים בקרקעות רנדזינה המתפתחות על קירטון. תכונות המרכיבים העיקריים של מסת הסלע של יחידה זו מופיעים בטבלאות 3,4,5

יחידה זו נמצאת בטרסות ובמילוי הוואדיות ומהווה גם כיסוי עליון במקומות רבים. בדרך כלל חמר זה מוסר מהתשתית לפני הבניה. במקומות, כמו סביב העיר העתיקה של ירושלים, יחידה זו מופיעה כשפכים בלתי מלוכדים ממקור ארכיאולוגי. במקומות מסוימים היחידה יכולה להיות בלתי יציבה עד כדי סיכון. טבלה מס' 4 מראה את התכונות הגיאוטכניות של קרקע ואלוביום השייכת ליחידה זו.

טבלה מס' 3. תכונות גיאוטכניות מייצגות של סלעים מתצורת מנוחה. ביחידה V

מתוך: Arkin & Michaeli, 1988a, 1989b, 1992, Arkin et al., 1989

תכונות גיאוטכניות	חרסית	קירטון	קירטון חוארי
משקל סגולי G_s	2.59-2.68	2.62-2.65	2.63-2.65
צפיפות יבשה γ_d ק"ג/ס"מ ³		1802-1945	1566-1795
מדד הפלסטיות % PI	13.6-31		
גבול הפלסטיות % PL	17.6-24.6		
גבול הנזילות % LL	31-56		
חוזק ללחיצה חד צירית MPa Sc		15-21	8.1-12.3
חוזק למתיחה MPa St		2.71-5.2	1.97-2.48
מהירות גל קול v מ"/שנייה.		2659-3314	2243-2828

טבלה מס' 4. תכונות גיאוטכניות מייצגות של דוגמאות של קירטון חרסיתי ביחידה VI מתוך: Arkin & Michaeli, 1988a, 1989b, 1992, Arkin et al., 1989

תכונות גיאוטכניות	2AG/	AG/1
משקל סגולי Gs	2.63	2.59
גבול הפלסטיות PL	18	
גבול הנזילות LL	30	
גבול ההתכווצות SL	22	
מדד הפלסטיות PI	11	
התנפחות חופשית FS	47	112
תכולת קרבונט %	89	68
קוהזיה c ק"ג/ס"מ ²	0.22	0.35
זווית החיכוך Φ°	32	25

טבלה מס' 5. תכונות גיאוטכניות מייצגות של דוגמאות קרקע ואלוביום. מתוך: Arkin & Michaeli, 1988a, 1989b, 1992, Arkin et al., 1989

תכונות גיאוטכניות	AG/4	AG/7	AG/19
משקל סגולי Gs	2.56	2.60	2.56
גבול הפלסטיות PL	24	19	39
גבול הנזילות LL	40	31	65
גבול ההתכווצות SL	25	20	13
מדד הפלסטיות PI	16	12	26
התנפחות חופשית FS	73	58	95
תכולת קרבונט %	69	74	13

3. עבודות תשתית נבחרות באזור ירושלים

3.1 מנהרות וגשרים

לקראת סוף המאה העשרים נערכו באזור ירושלים מספר סקרים גיאולוגיים וגיאוטכניים לקראת כריית מנהרות, בניית גשרים וסלילת כבישים ראשיים (כביש הטבעת סביב ירושלים). מנהרות גילה והר הצופים, וגשר גילה הנן דוגמאות טובות לעבודות של פיתוח התשתית בירושלים הדורשות נתונים מדויקים ככל האפשר לצורך תכנון יציב, בטוח, אסתטי וכלכלי.

הסלעים המרכיבים את האתרים הנזכרים הם סלעים סדימנטריים של גיר, דולומיט, קירטון וחואר מגיל קרטיקון תיכון - עליון השייכים לחבורות יהודה והר הצופים. חתך כללי של סלעים אלו מופיע באיור מס' 4. סלעים אלה בונים חלק מהצלע המזרחית של קמר יהודה הנוטה בשיפוע של כ- 10° כלפי בקע הירדן (איורים מס' 3 ו-5). שיפועים חזקים יותר קיימים ליד שברים או קמטים מקומיים.

3.2 פרויקט גילה

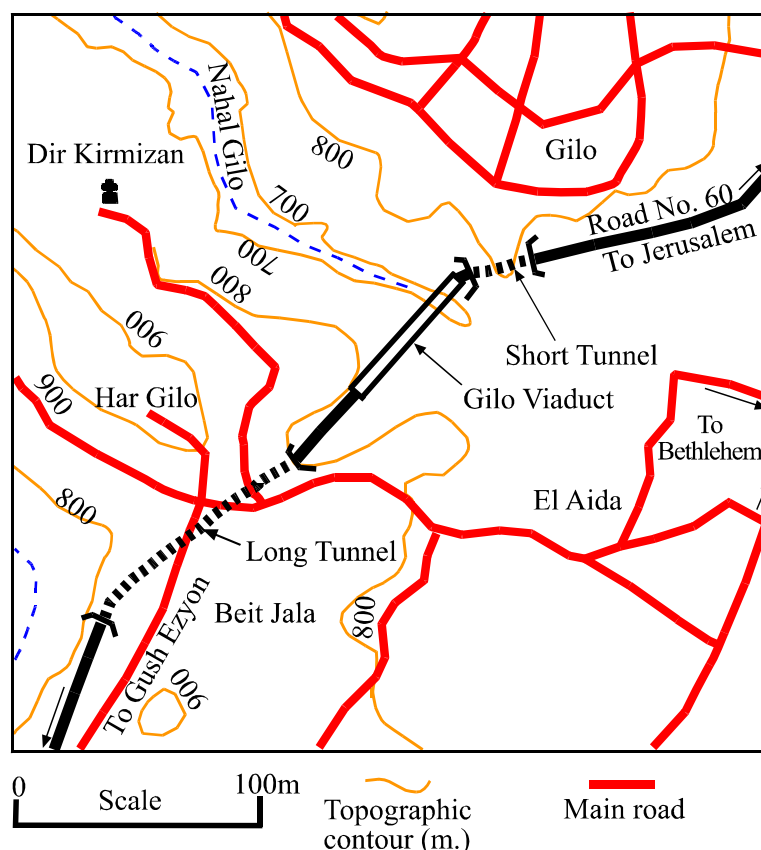
פרויקט גילה (איור מס' 9) הכולל שתי מנהרות (קצרה וארוכה) וגשר המחבר ביניהן, הוא חלק מכביש מספר 60 המחבר את ירושלים עם גוש עציון שמדרום לה. פרויקט זה שהוא פרויקט של הנדסה אזרחית מהווה דוגמא טובה לאירועים שיכולים לקרות בשלבים שונים של ביצוע פרויקט מסוג זה.

תכנון פרויקט גילה החל בשנת 1987. חציבת ובנית המנהרה הקצרה נמשכו כ- 8 חדשים (3/1993 - 7/1992) והארוכה כ- 21 חדשים (5/1995 - 9/1993).

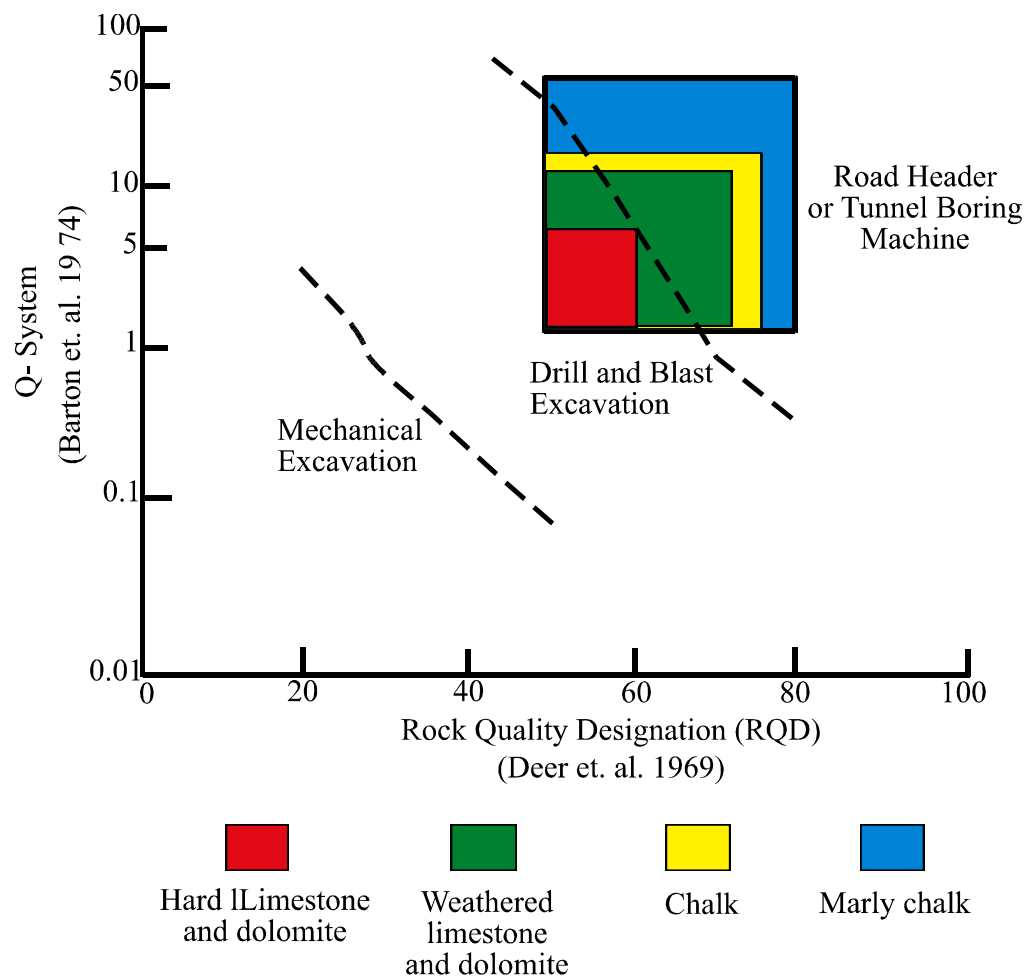
לימוד מסת הסלע עבור שתי המנהרות החל במיפוי גיאולוגי והושלם ע"י קידוחי גלעין. הנתונים שנאספו עובדו בשיטת Q של Barton et al., (1974) ובשיטת דירוג איכות הסלע Rock Quality Designation (RQD) של Deere et al., (1969).

בנוסף, איכות הסלע נלמדה ע"י שימוש ב Rock Mass Rating (RMR) של Bieniawski (1976). שיטות אלה משתמשות בפרמטרים הן תיאורטיים והן בעלי מדידה הלוקחים

בחישוב את מערכת השבירה, מדידת הרציפות, רווחים, דרגת החספוס של מישור השבר וסוג החומר הממלא אותם. הנתונים שהתקבלו יצרו את הבסיס לתכנון והצביעו על שיטות אפשריות לכריית המנהרות המתאימות לליתולוגיות השונות הקיימות בסביבות ירושלים (איור מס' 10).



איור מס' 9. מפת מיקום של פרויקט גילה



איור מס' 10. שיטות מומלצות לכריית מנהרות המתאימות לאיכויות הסלע השונות הקיימות באזור ירושלים.

הסקר הגיאולוגי והגיאוטכני המקיף כלל מיפוי לאורך תוואי המנהרה, לימוד קידוחים, סקר גיאופיזי שכלל התנגדות וראדאר חודר קרקע (Resistivity and Ground Penetration Radar) ובדיקות מעבדה. כל הנזכר נעשה לפני התחלת עבודות חציבת המנהרה.

דוגמאות גלעין מהקידוחים סיפקו את הפרמטרים הפיזיקאליים והמכניים הבאים: (המוצגים בעברית ובאנגלית)

משקל סגולי	Specific gravity (Gs)
צפיפות יבשה	Density (γ_d)
מדד הפלסטיות	Plasticity Index (PI)
נקבוביות	Porosity (n)
חדירות	Permeability (k)
זווית החיכוך	Friction Angle (θ)
קוהזיה	Cohesion (c)

אינדקס ההתכווצות	Shrinkage Index (SI)
חוזק ללחיצה	Compressive Strength (Sc)
חוזק למתיחה	Tensile Strength (St)
מודול האלסטיות	Modulus of Elasticity (E)
יחס פואסון	Poisson Ratio (v)
אחוז דגימה של הגלעין	Core Recovery (%)
דירוג מסת הסלע	Rock Mass Designation (RQD)
איכות מסת הסלע	Rock Mass Quality (Q)
מהירות גל אולטרא סוני.	Ultrasonic Wave Velocity (V)

3.3 מנהרת גילה הקצרה

חלקה הגדול של מנהרת גילה הקצרה עובר בתוך תצורת כפר שאול והיתר בתוך חלקה העליון של תצורת עמינדב שמתחתיה (איורים מס' 11-14). עובייה החשוף של תצורת כפר שאול הוא 50-60 מ'. התצורה מחולקת לשתי יחידות: יחידה תחתונה הבנויה משכבות ברורות של אבן גיר וחואר ויחידה עליונה הבנויה מקירטון מסיבי וחואר כשבחלקה העליון ביותר מספר שכבות של חרסית. מינרלי החרסית הנפוצים בהן הם מונטמורילוניט ואיליט הפזורים בתוכן בצורה אקראית.

בדיקות לחצי ההתנפחות בדפנות המנהרה (ראה בהמשך) נעשו בגלל חדירת מי ביוב מפני הקרקע לתוך המנהרה בעת כרייתה. הביוב הגיע דרך סדקים שעל פני השטח דרך שכבות החואר שבגג תצורת בית מאיר.

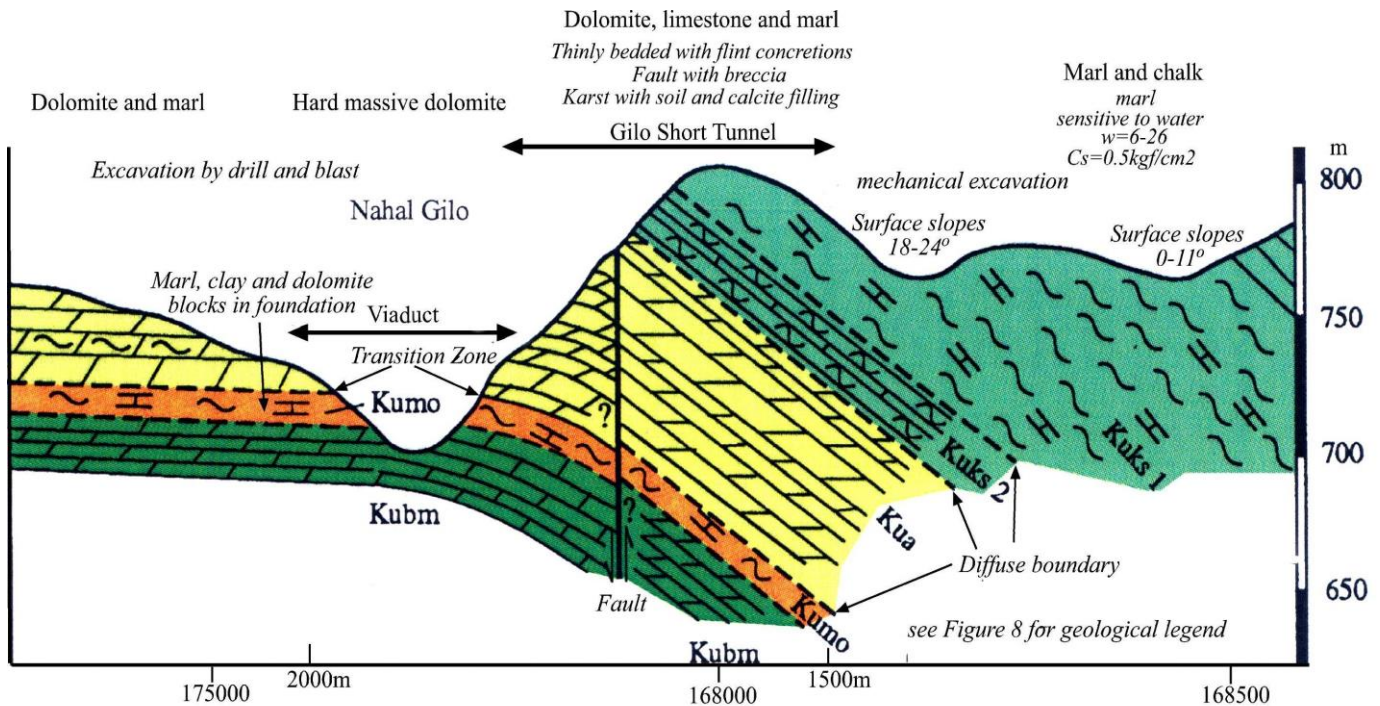
תופעת ההתנפחות זוהתה בתוך מסת הסלע בתחום דרגות רחב מאוד, החל מקירטון עם מעט חרסית שאינו מתנפח כלל דרך קירטון חרסיתי עם לחצי התנפחות מתונים, בתחום הערכים של 0.24-1.4 ק"ג/ס"מ² ועד ללחצי התנפחות גבוהים יותר בערכים שבין 6.2-9.8 ק"ג/ס"מ². קיומה של תופעה זו, של לחצי התנפחות בערכים שונים הפזורים בצורה אקראית בתוך מסת הסלע, היא בשונה ממה שנכתב עד כה בספרות.

ניטור השינויים בלחץ ההתנפחות נמשך עוד תקופה ארוכה לאחר גמר בניית המנהרה. הניטור נעשה כדי לעקוב אחרי השינויים בלחץ ההתנפחות באזור שכבות החואר העשויים להשפיע על קירות המנהרה והתמיכות העשויות ברזל והתזת בטון. הניטור נעשה ע"י התקנה של מדי התכנסות ומדי מתיחות בעומקים של 9 מ' ו- 13 מ' לתוך קירות וגג המנהרה. במדידות אלה לא הובחנו שינויים משמעותיים בלחצי ההתנפחות ולכן לא נדרשו שינויים בסוג התמיכה שבהם השתמשו.

מסת הסלע של התצורה הוערכה כבעלת הנתונים הבאים: $RMR = 40-60$, $\gamma = 0.75-12.5$,
 Q. נתונים אלה מגדירים את הסלע כבעל איכות ירודה עד בינונית.

תצורת עמינדב הנמצאת מתחת לתצורת כפר שאול, בנויה מגיר קשה ודולומיט המופיעים בשכבות שעוביין נע לרוב בין 0.50-1.00 מ'. עובי התצורה 50-90 מ'. תופעות קרסט וסידוק קיימים בה באופן מקומי. ערכי מסת הסלע לדולומיט הקשה של התצורה הוערכו כך:

$RMR=60-80$, $Q=14-16$. ערכי הדולומיט הסדוק והבלוי מוערכים כנמוכים יותר.



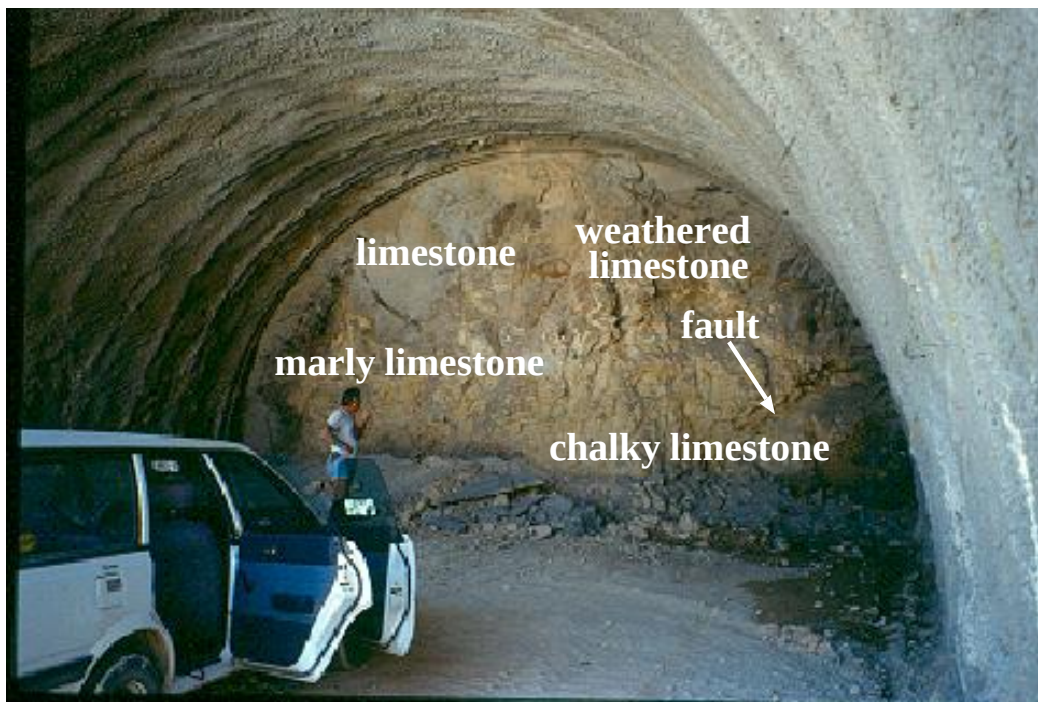
איור מס' 11. חתך גיאוטכני לאורך מנהרת גילה הקצרה. שמות התצורות מופיעות באיור מס' 4.



איור מס' 12. מראה של הכניסה הצפונית של מנהרת גילה הקצרה בתצורת כפר שאול בזמן הבניה.



איור מס' 13. הכניסה הדרומית של מנהרת גילה הקצרה בתצורת עמינדב.



איור מס' 14. פני הסלע הנכרה במנהרת גילה הקצרה בתוך היחידה. התחתונה של תצורת כפר שאול (גיר וקירטון).

3.4 מנהרת גילה הארוכה

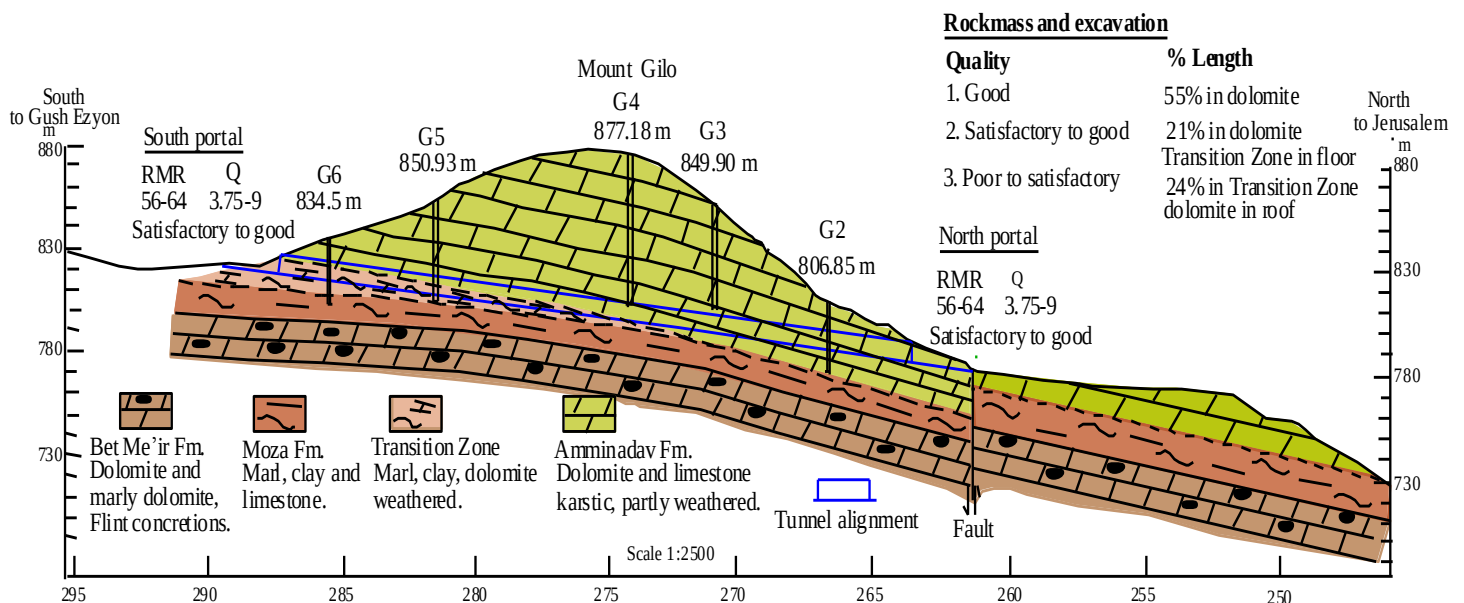
מנהרת גילה הארוכה (איור מס' 15) כרויה ברובה הגדול בתוך תצורת עמינדב. במקומות קיימות בתצורה תופעות קרסטיות בצורת סדקים פתוחים וחללים המלאים ברוב המקרים בקרקע חרסיתית חומה עם שברי סלעים בתוכה (איור מס' 16). בחלקה התחתון של התצורה קיימת רצועה של מבני התמוטטות ובלוקים של דולומיט, בחלקם בלויים, השקועים בתוך החוואר של תצורת מוצא שמתחת. רצועה זו שעובייה 5-10 מ' (איורים מס' 18, 19) כונתה כאן בשם "אזור המעבר". תפוצתה המרחבית היא גדולה ואיננה ממוקדת רק באתר המנהרה. "אזור המעבר" ניתן להבחנה בקלות בשדה במקומות בהם המגע הברור, הקיים בדרך כלל בין שתי התצורות הנזכרות, אינו ברור. במקומות אלו ניתן להבחין בהתמוטטות. כריית המנהרה ב"אזור המעבר" נעשתה בלוי קידוחי מחקר אופקיים לצורך בדיקת מסת הסלע להמשך הכרייה.

ערכי מסת הסלע לאורך תוואי המנהרה קשים לחיזוי מאחר והסלע אינו אחיד לכל אורכה וקיימים בו שינויים מהירים, החל מסלעים קשים של דולומיט דרך סלעים רכים יותר של דולומיט "חולי" עד לסלעים רכים של חוואר וחרסית. כלל איכות מסת הסלע לאורך כל תוואי המנהרה הוערכה ב- $Q = 5-24$. תחום מספרים אלה מתאים להגדרת מסת סלע מסבירה ועד טובה. אולם, איכות זו נמצאה נמוכה יותר במקומות אחרים בתוך "אזור המעבר".

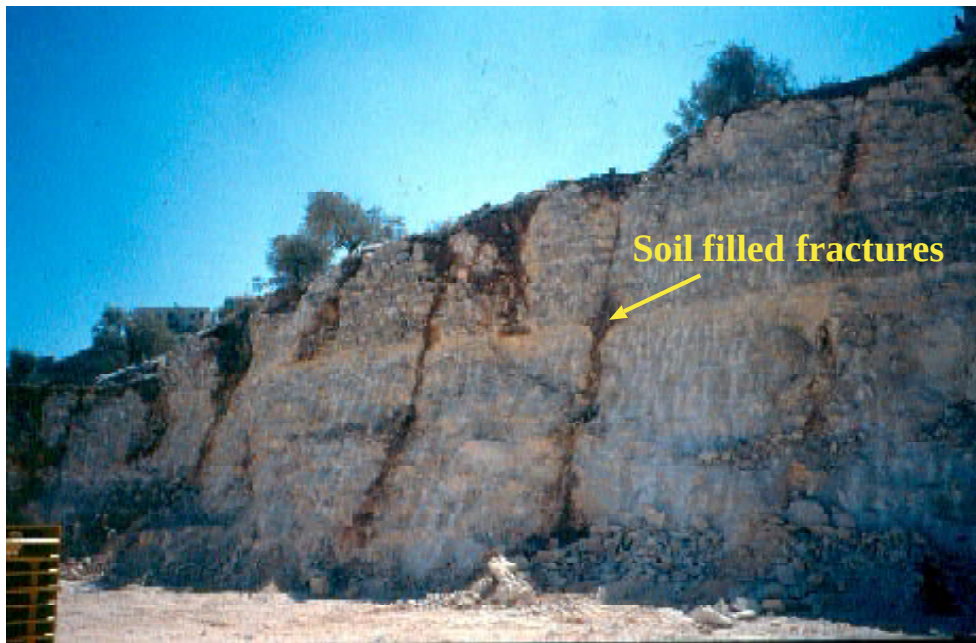
בדיקות של גזירה ישירה (Direct Shear) שנעשו בדולומיט ה"חולי" מצאו את זווית החיכוך הפנימית (Φ) בערך של 33° ואת הקוהזיה בערך של 27 KPa. בדיקות גרנולומטריות שנעשו בדולומיט זה הראו שגודל הגרגר נע בתחום שבין סילט לחול.

זווית החיכוך הפנימית (Φ) בדולומיט המסיבי היתה קרובה ל- 45° והקוהזיה קרובה ל-

35 MPa. החוזק החד צירי של הדולומיט המסיבי היה 100-200 MPa



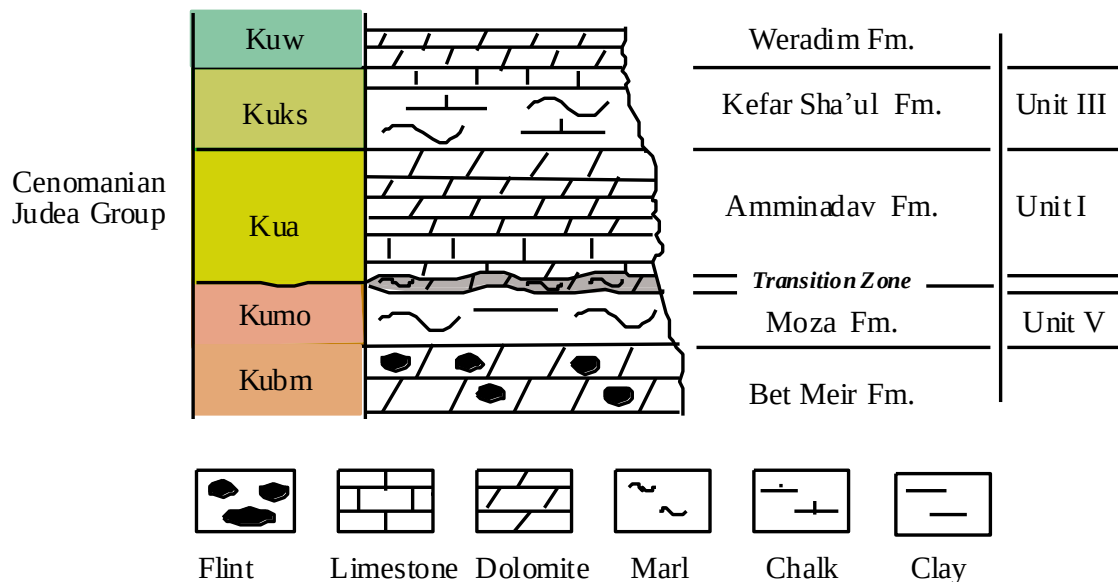
איור מס' 15. חתך גיאוטכני לאורך מנהרת גילה הארוכה.



איור מס' 16. סדקים קרסטיים בכניסה הצפונית של מנהרת גילה הארוכה.



איור מס' 17. פתחה הצפוני של מנהרת גילה הארוכה בתחילת העבודות.



איור מס' 18. חתך גיאולוגי עמודי במעבר מתצורת מוצא לתצורת עמינדב
המראה את מיקומו של "אזור המעבר".



איור מס' 19. בלוק של דולומיט ב"אזור המעבר".

סדקים פתוחים וחללים קרסטיים גדולים מלאים בקרקע טרה רוסה, שהיא בעיקרה מונטמורילוניט מנופח, מופיעים במקומות לאורך מסלול המנהרה. ערכי איכות מסת הסלע הוערכו ב $Q = 0.004-0.06$ וערכי RMR ב- 90-10. שילוב זה של חומר רך עם חללים בסלע מסיבי גרם לבעיה בהגדרה הגיאומכנית של מסת הסלע.

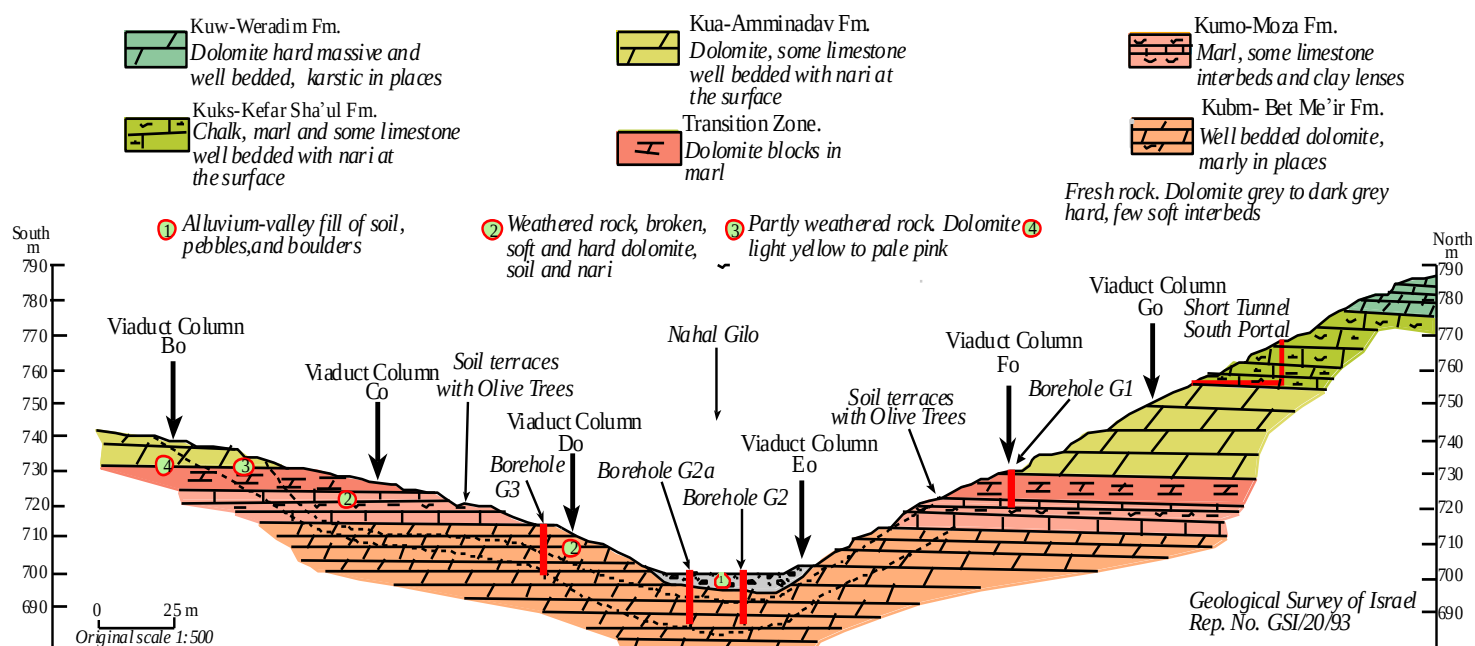
שיטת העבודה בשתי המנהרות היתה קדיחה ופיצוץ. ההתקדמות באזורים רכים נעשתה עם מכונת Boom cutter. קצב ההתקדמות בראש המנהרה היה 2-5 מ'/יום. התמיכות לכל אורכן של שתי המנהרות היו קשתות פלדה והתזת בטון. הרווח בין כל שתי קשתות נע בין 0.5 מ' ל- 2 מ', בהתאם לאיכות הסלע.

ערכי ה-Q וה-RMR של מסת הסלע הדולומיטית הוגדרו כסבירים עד טובים בחלק משתי המנהרות בשלב התכנון והוגדרו כפחות טובים בעת שהגיעו בזמן העבודה ל"אזור המעבר". באזור הזה הוגדל מספר התמיכות של קשתות הפלדה והרווחים ביניהן צומצמו.

הלקח החשוב שיש ללמוד מקיומו של "אזור המעבר" הוא שבמקומות בהם קיימים שינויים ליתולוגיים מקומיים מהירים ו"אזור המעבר" נמצא על פני השטח ובתת-הקרקע יש לצמצם ככל האפשר את אי-הודאות על מימדי התופעה וכיוון השתרעותה. בכל מקום אשר תכונות מסת הסלע אינם ידועים מספיק מעבודות השדה או מקידוחים יש צורך ללמוד את הדוקומנטציה של פרויקטים אחרים שבוצעו בתנאים גיאולוגיים דומים. צריך להגדיל באופן משמעותי את מספר קידוחי המחקר לאורך תוואי המנהרה המוצע כדי להיות מוכן לעבודת המינהור טוב ככל האפשר.

3.5 גשר גילה

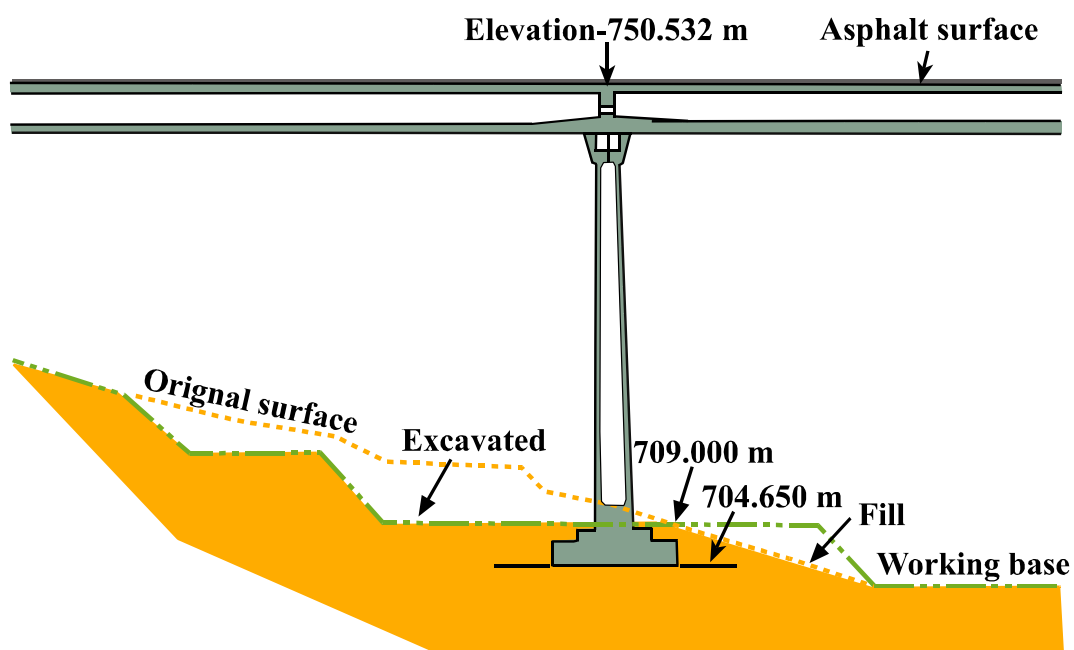
גשר גילה מעל נחל גילה מחבר את שתי מנהרות גילה (הקצרה והארוכה). אורכו 350 מ' גבהו המכסימלי מעל קרקעית האפיק הוא 50 מ' (איורים מס' 20, 21, 22). הגשר נשען על 5 עמודים ו-2 עוגנים המחברים את הגשר בכל צד אל ההר. איור 22 מראה את אחד העמודים. בסיסו של כל עמוד וקצות הגשר קבלו תשומת לב מיוחדת מאחר ואלו נקודות רגישות במבנה הגשר ויציבותו.



איור מס' 20. חתך גיאולוגי לאורך תוואי גשר גילה.



איור מס' 21. גשר גילה בזמן הבניה עם חמשת עמודי התמך.



איור מס' 22. העמוד Do של גשר גילה.



איור מס' 23. בור הבסיס של העמוד Do.



איור מס' 24. קדיחת קידוחי תצפית והזרקת מלט,
(Grouting) בבור הבסיס של העמוד Do.

כל תנועה בבסיס העמודים יכולה ליצור תנועות גדולות בראשיהם. לכן, כדי למנוע זעזועים כאלה נכרו בסלע הקשה, לאורך תוואי הגשר, 5 בורות מרובעים (כ-12 x 12 מ' כל אחד) ובהם נבנו בסיסי העמודים (איורים מס' 22, 23, 24). תחתיתו של כל בור נוקתה מהאבנים כדי לחשוף את הסלע, על מנת להגדיר את טיבו ולאתר את נוכחותם של סדקים וקרסט. לאחר מיפוי מדויק של תחתית הבור יצקו לתוכו רצפת בטון. לאחר התקשות הבטון נערכו דרכי הבדיקות הבאות למטרת בחינה נוספת של תנאי הסלע (איור מס' 24):

א. בדיקות ראדאר חודר קרקע.

ב. קידוחי גלעין לסלע שמתחת לבסיס הרצפה לעומק של מספר מטרים.

איור מס' 25 מציג חתך טיפוסי של מסת הסלע בבור Fo שעליה מונחת רצפת הבטון ואת הבדיקות השונות שנערכו בדוגמאות הגלעין. איור מס' 26 מציג צילום של גלעיני הקידוח D3 שנקדח בבור Do.

תוצאות הבדיקות הנזכרות שנעשו בבור Do סוכמו במפה מפורטת של תחתית הבור (איור מס' 27) אשר אפשרה גם להנחות את עבודות הזרקת המלט (grouting) שנעשו מאוחר יותר, כדי לייצב עוד יותר את מסת הסלע שמתחת לבסיס העמוד ולבדוק את התוצאות.

STRATIGRAPHY				LITHOLOGY	GEOTECHNICAL PROPERTIES											Remarks
AGE	FORMATION	UNITS	DEPTH (m)		CORE %	R.Q.D. %	GROUT %	Gs	γ_d kg m ⁻³	V m/s	k md	n %	St MPa	Sc MPa		
UPPER CRETACEOUS	AMMINADAV		0												35 cm thick cement floor. Limy dolomite white to gray; broken core; fossil relicts, solution holes; fractures with calcite infillings. Total loss of circulation.	
								2621	6007				7.41	90.12	Limy dolomite white to gray; fossil relicts, solution holes; fractures dipping 45° with calcite infillings; broken core in places. Total loss of circulation.	
								2722	6557				183.4		50 cm broken core, limy dolomite. Dolomite white to gray; massive, hard; fossil relicts, solution holes; fractures dipping 45° and 70° - 80° with calcite; fractures network with grout. Total loss of circulation.	
								2697	6357				90.8			
			5					2679	6020				2.04	57.2	Dolomite white to gray; massive, hard; solution holes and karstic holes, fossil relicts; fractures dipping 30° - 40° and 60° - 70° with calcite and grout infillings. Total loss of circulation.	
								2693	6214				3.38	130.9		
								2659	5175				6.96	38.0		
								2554	5081				2.81	85.2		
								2721	6488				6.76	210.7		

איור. מס' 25. קידוח Fo1 בבור הבסיס של העמוד Fo בגשר גילה.

גשר גילה - קידוח F1, מ 0.0 מ' - 3.0 מ'

גשר גילה - קידוח F1, חוזר, מ 0.0 מ' - 3.50 מ'



גשר גילה - קידוח F1, חוזר, מ 3.50 מ' - 7.50 מ'



גשר גילה - קידוח F2, מ 0.0 מ' - 3.30 מ'

גשר גילה - קידוח F2, חוזר, מ 0.0 מ' - 2.80 מ'



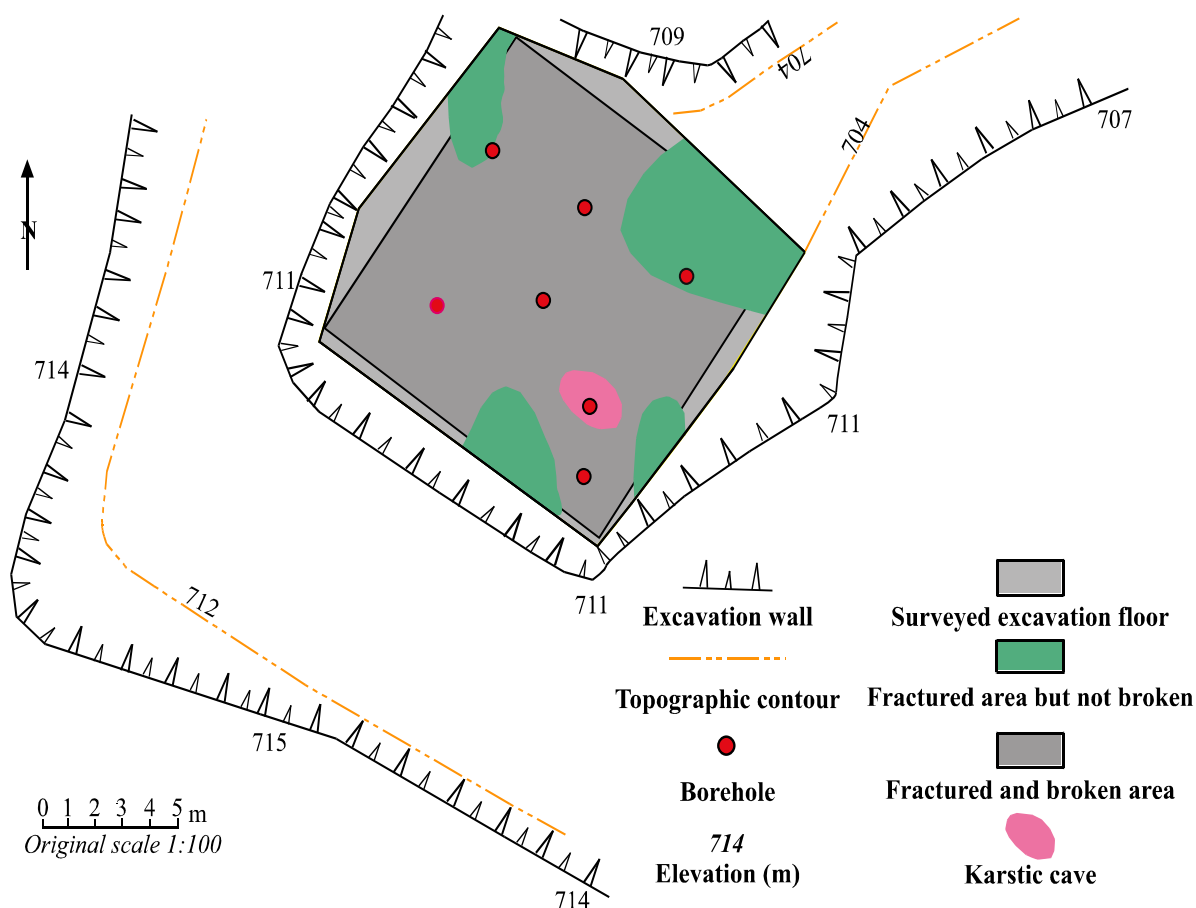
גשר גילה - קידוח F2, חוזר, מ 3.30 מ' - 6.00 מ'

גשר גילה - קידוח F3, חוזר, מ 0.0 מ' - 1.85 מ'



איור מס' 26. גשר גילה. גלעיני הקידוחים F1, F2, F3

בבור הבסיס של העמוד Fo.



איור מס' 27. בור הבסיס של העמוד Do. מפת סדקים ואזורי קרסט.

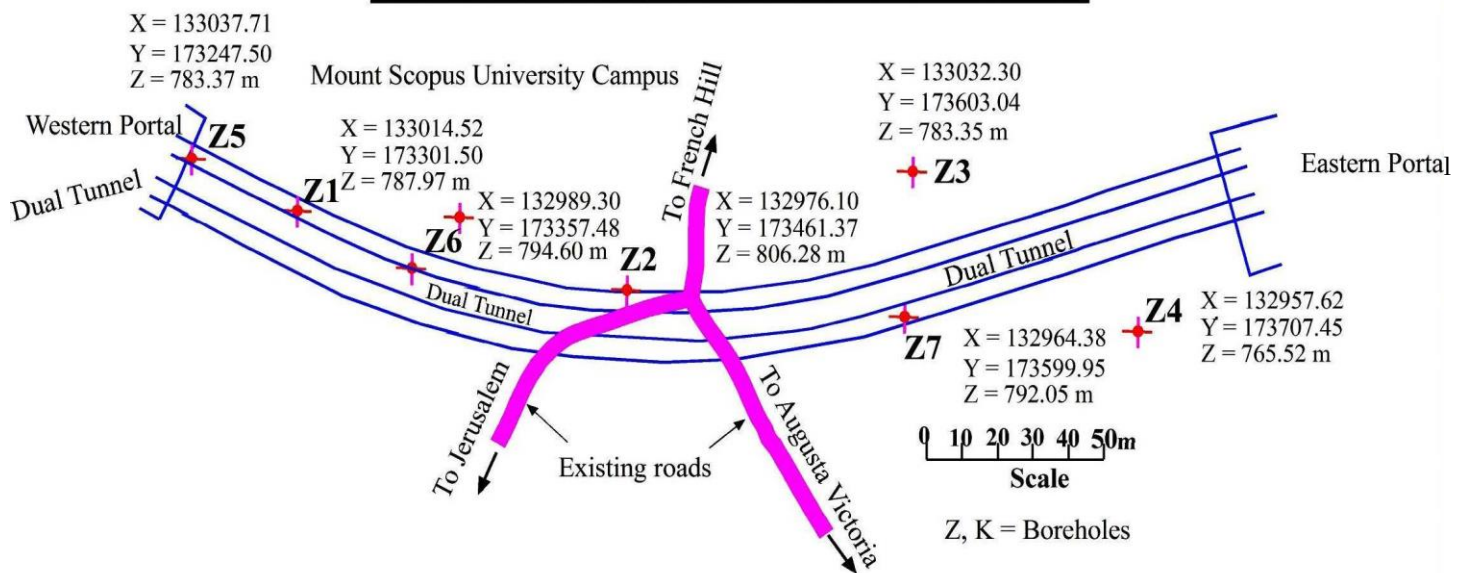
3.6 מנהרת הר הצופים

פרויקט "מנהרת הר הצופים" מהווה דוגמא לעבודת מינהור בסוגי סלע השונים מאלו שתוארו למעלה. הפרויקט כולל שתי מנהרות סמוכות, מקבילות, העוברות דרך הרכס המחבר את הר הצופים עם הר הזיתים והן מאפשרות גישה קלה מירושלים לעיר מעלה אדומים וחזרה. הרכס שכוונו צפון-דרום נמצא ברומים של 750-840 מ' מעל פני הים התיכון ובנוי מסלעים קרבונאטים. ברכס עובר קו פרשת המים העילי הארצי המפריד בין אגני הניקוז של הים התיכון וים המלח.

צלעותיו המערביות של הרכס הנן בשפוע של כ- 12° והמזרחיות תלולות יותר ושיפועיהן נעים בין 12° ל- 15° . ממוצע הגשמים ממערב לקו פרשת המים עשוי להגיע ל- 500 מ"מ בשנה ואף יותר. לעומת זאת בצדו המזרחי, לאחר מספר קילומטרים בלבד לתוך מדבר יהודה, הממוצע השנתי יורד באופן מהיר אל פחות מ- 200 מ"מ. בחורפים מסוימים מכסה שלג את ראש הרכס למשך מספר ימים. מי הגשמים כמעט ואינם מחלחלים באתר המנהרה והנגר העילי זורם גם הוא עם חלחול מינימאלי. מפלס מי התהום האזורי נמצא בעומק של כמה מאות מטרים מתחת למפלס המנהרות (איור מס' 34). לפיכך, המים העיליים ומי התהום לא היוו בעיה בעת כריית המנהרות.

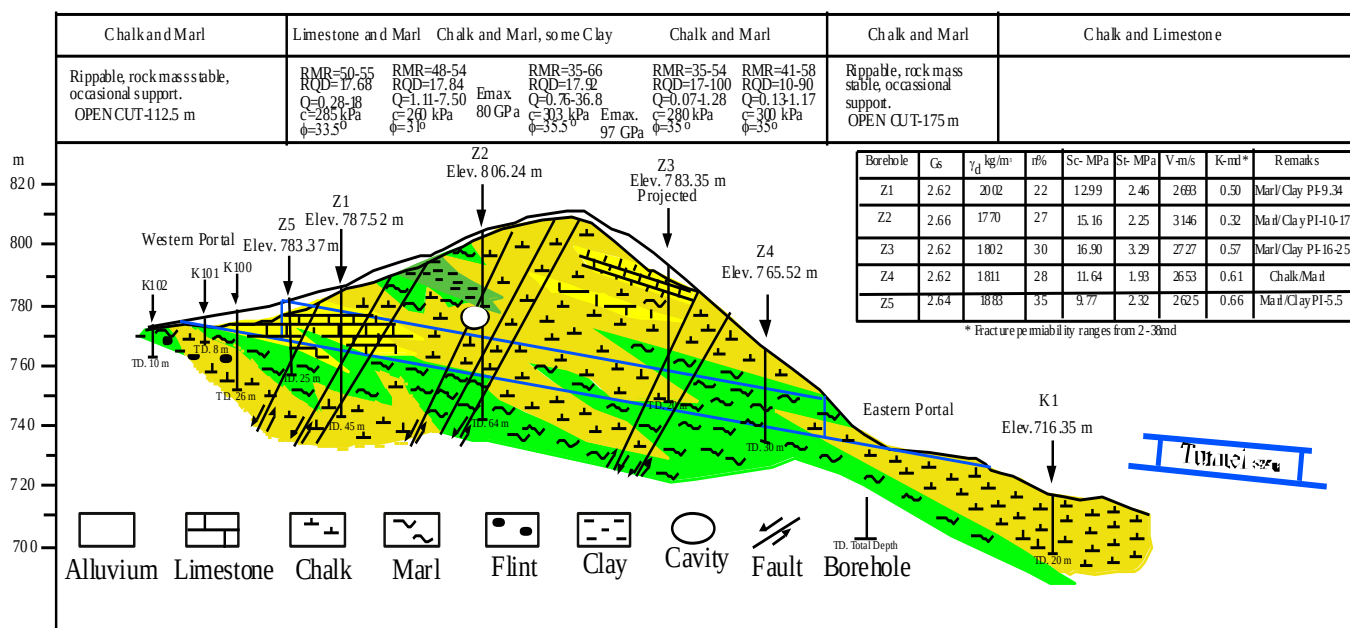
פתחן המערבי של המנהרות נמצא בין קמפוס אוניברסיטת הר הצופים לבית החולים אגוסטה ויקטוריה (איור מס' 28). כוונן הכללי הוא מזרח-מערב הכרייה היתה בסלעי קירטון, חואר ומעט חרסית של תצורת מנוחה מגיל סנון (איורים מס' 4,5,6). התצורה נוטה בזווית של 5° - 10° לכיוון דרום מזרח ובונה חלק מהצלע המזרחית של קמר יהודה. גג ובסיס התצורה, בנויים בעיקר מקירטון מסיבי ואילו חלקה האמצעי מכילה עדשות חואר וחרסית. מסת הסלע לאורך תוואי המנהרות מאופיינת בשינויי פציאס לטרליים מקירטון לחואר עם כמויות משתנות של חרסית, דבר שהקשה לפענח את ממצאי הקידוחים וליצור קורלציה ביניהם. כדי להתגבר על בעיה זו נערכו בדיקות מיקרופליאונטולוגיות מפורטות על מדגמי הסלע בכל קידוח. בדיקות אלו פתרו את בעיית הקורלציה ואיפשרו לאפיין את מסת הסלע בין הקדוחים.

לימוד התוואי החל במאי 1993 ע"י מיפוי גיאולוגי וניתוח גיאוטכני של הסלעים באתר. בהמשך, נקדחו 5 קידוחי מחקר כדי לקבל גלעינים שלמים ומדגמי סלע לבדיקות. הקדיחה בוצעה במכונות קידוח הידראוליות עם מחזור של מים נקיים. הגלעינים שהתקבלו היו בקוטר של 67 מ"מ. שני קידוחים נוספים שנקדחו לאחר מכן נקדחו בלחץ אויר במכונת קידוח סיבובית מסוג Failing 1250 וזאת כדי לקבל גלעינים של סלע בלתי מופר בקוטר של 80 מ"מ עם תכולת מים טבעיים. דבר זה היה חשוב כדי לאמוד את לחץ ההתנפחות בחומר החרסיתי. איור מס' 29 מציג נתונים מקידוח טיפוזי (Z4). כלל הנתונים סוכמו בחתך הגיאוטכני שלאורך קו המנהרות כמופיע באיור מס' 30.



איור 28. מיקום מנהרת הר הצופים וקידוחי המחקר.

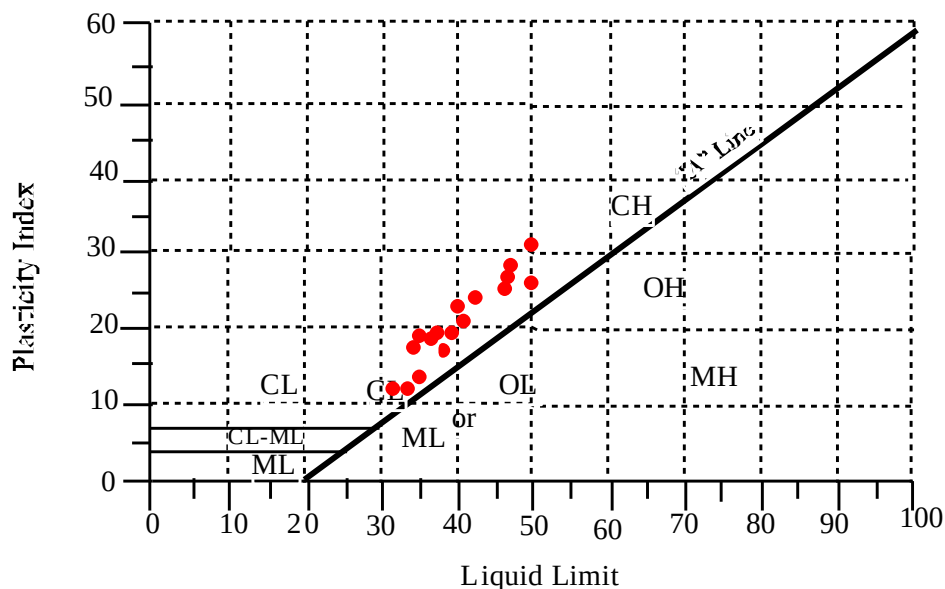
GEOTECHNICAL PROPERTIES																	STRATIGRAPHY								
REMARKS	Q	c MPa	φ °	Sc MPa	Is MPa	St MPa	n %	CaCO ₃ % Insoluble Residue	PI	LL %	PL %	SL %	ν Poisson	E MPa	k md	V m/s	γ _d Kg/m ³	Gs	R.Q.D %	CORR %	LITHOLOGY	DEPTH	UNITS	FORMATION	AGE
Nari, chalk white.	0.13																								
Chalk white; fractures 60°, 70°, 90° dip with calcite and limonite.	0.83-1.17			8.02		1.71	39.56								4.55	2283	1678	2.61							
Marly chalk white; fractures 50°, 80°, dip with limonite.				7.07		1.47	39.28								1.59	2231	1596	2.63							
Chalk white; fractures 60°, dip with some limonite.				6.89		1.53	40.89								1.24	2279	1573	2.64							
Marly chalk light brown massive; fractures 20°, 40°, 50°, dip, limonite, rare manganese; silecnides.	0.4-0.6			8.29		1.67	34.91								1.24	2328	1661	2.63							
Chalk white; fractures 30°, 50°, 60°, 90°, dip, some limonite, fossil relics.	1-1.5			8.09		1.57	38.91								2.51	2343	1508	2.64							
				17.47		1.89	24.71								0.37	2812	2043	2.62							
				14.23		2.02	17.33								0.17	3117	2027	2.61							
	1-1.5			8.09		1.70	40.09								0.48	2241	1610	2.59							
Chalk marly light grey. Marl dark grey, bituminous, limonite. Chalk white, massive.	1.5			12.65		2.00	37.35								0.21	2314	1858	2.58							
	0.83			18.18		3.01	22.02								0.08	3070	2049	2.61							
	0.94			12.58		2.13	22.33								16.36	3220	2097	2.63							
Chalk marly, white, light grey; pink; fractures 0°, 50°, 80°, dip, limonite.	0.58-0.67			11.18		2.19	28.51								0.57	2829	1816	2.65							
Chalk white; fractures 80°, dip, calcite 2 mm wide, silecnides.	0.58			18.65		2.20	21.23								0.17	3426	2028	2.66							
	0.58																								



איור מס' 30. חתך גיאוטכני לאורך תוואי מנהרת הר הצופים.

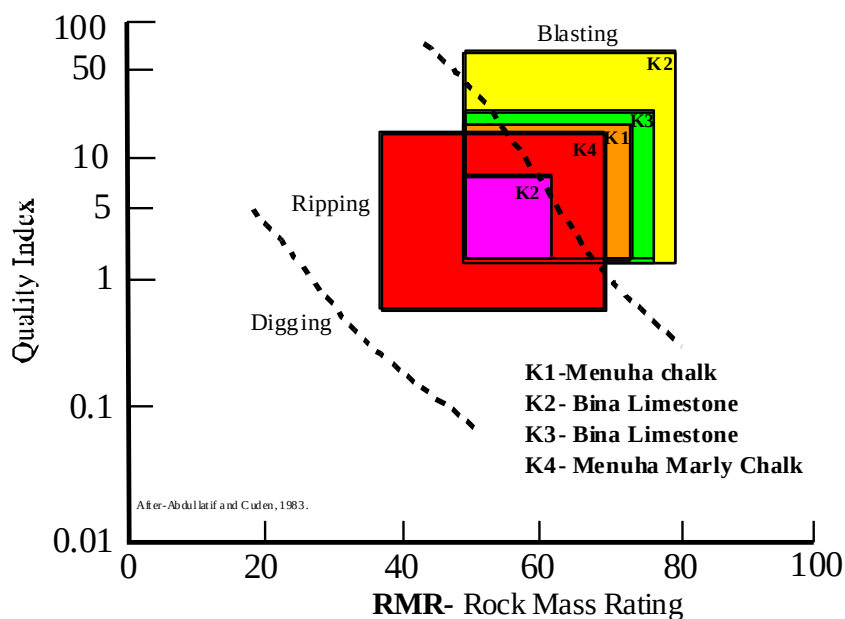
מדדי הפלסטיות של סוגי הסלע המכילים חרסית סוכמו באיור מס' 31

קידוחים נוספים, שכונו באות K, נקדחו לאורך הדרכים המובילות אל המנהרות מצדן המזרחי והמערבי כדי לספק נתונים עבור בנית קירות התמך בקירטון.



איור מס' 31. אתר מנהרת הר הצופים. גרף פלסטיות של

חרסית בתצורת מנוחה החוארית-קירטונית.



איור מס' 32. שיטת עבודה מוצעת לכריית מנהרה

לפי מיון מסת הסלע.

לקירטון הקשה יש חוזק לחיצה של 11.7-33.2 MPa וחוזק למתיחה של 2.12-4.5 MPa .
לקירטון הרך יש חוזק לחיצה של 10.9-22.6 MPa וחוזק למתיחה של 1.48-1.96 MPa
לאבן הגיר בתוך התצורה יש חוזק לחיצה של 30.8-77.3 MPa החרסיות מורכבות
מסמקטיט, הרגיש למים, ומעט קאוליניט. במקומות שקיימות חרסיות מקדם הפלסטיות נע
בתחום של 11-26 (איור מס' 30) ולחץ ההתנפחות יכול להגיע אף למימדים של 0.246 MPa.

המיון של כלל נתוני מסת הסלע מציג Q בתחום של 0.35-3.8 ובמקומות הוא מגיע גם ל-
11.3. ה- RMR נע בין 35-66 שמשמעותו מסת סלע גרועה עד טובה. מבנה התמיכה שבו
השתמשו כלל קשתות פלדה והתזת בטון.

ניסויי מעבדה שנעשו בדוגמאות קירטון וגיר רך כדי לקבוע את שיטת הכרייה המתאימה
ביותר המליצו על מכונת Roadheader tunneling. לדוגמאות שנבדקו היה חוזק ממוצע של
18.9 MPa המאפשר מהירות קדיחה ממוצעת של 65.90 מ³/שעה במאמץ בינוני של המכונה
או 100-125 מ³/שעה במאמץ גבוה של המכונה. תוצאות הבצוע בעת כריית המנהרה תאמו יפה
את ממצאי המחקר שקדם לביצוע. שיטת הכרייה המוצעת בהתייחס לטיב ומסת הסלע מוצגת
באיור מס' 32.

4. אספקת המים

4.1 כללי

האקלים באזור ירושלים כולל חורף גשום וקיץ יבש לכן יש לדאוג באזור זה לאספקת מים בעונת היובש.

אספקת המים העיקרית לירושלים בתקופה הקדומה נעשתה, ממעיין הגיחון לרגלי עיר דוד שבמעלה נחל קדרון (איור מס' 37) ומעין רוגל שבקרבתו.

מים נוספים סופקו לעיר ממי גשמים ושיטפונות שנאגרו בבריכות ובבורות מים. החל מתקופת הבית השני (המאה השנייה לפני הספירה), נוספו מים לעיר באמצעות שתי אמות מים (תחתונה ועליונה) שהובילו בגרביטציה מי מעיינות איתנים הנמצאים כ- 11.5 – 18.5 ק"מ בקו אויר מדרום לירושלים. במשך רוב שנות ההיסטוריה פעלה בעיקר האמה התחתונה. עם סיום השלטון העותמני בסוף שנת 1917 פסקה גם אמה זו להזרים מים לירושלים (ראה פרק: אמות המים, בהמשך).

מיד עם תחילת המנדט הבריטי (1917-1948) סיפק הצבא הבריטי מים לירושלים בצינור ע"י שאיבה מבריכת ארובה (ראה פרק: אמות המים, בהמשך). כמה שנים לאחר מכן השלימה ממשלת המנדט הבריטי את בניית תחנות השאיבה בבריכות שלמה (1923) ובשלושה מעיינות בואדי אל קילט ממזרח לירושלים: עין פארה (1928), עין פאוואר (1931) ועין קילט (1935). בשנת 1936 נסתיימה הנחתו של צינור מים בקוטר של 18" ובאורך של 60 ק"מ ממעינות הירקון שבמישור החוף. מאז שנת 1948 הניחה מדינת ישראל עוד 3 קווי מים לירושלים המקבלים את מימיהם מקידוחים ממערב להרי יהודה השואבים משני תת-האקויפרים של חבורת יהודה ועוד היד נטויה.

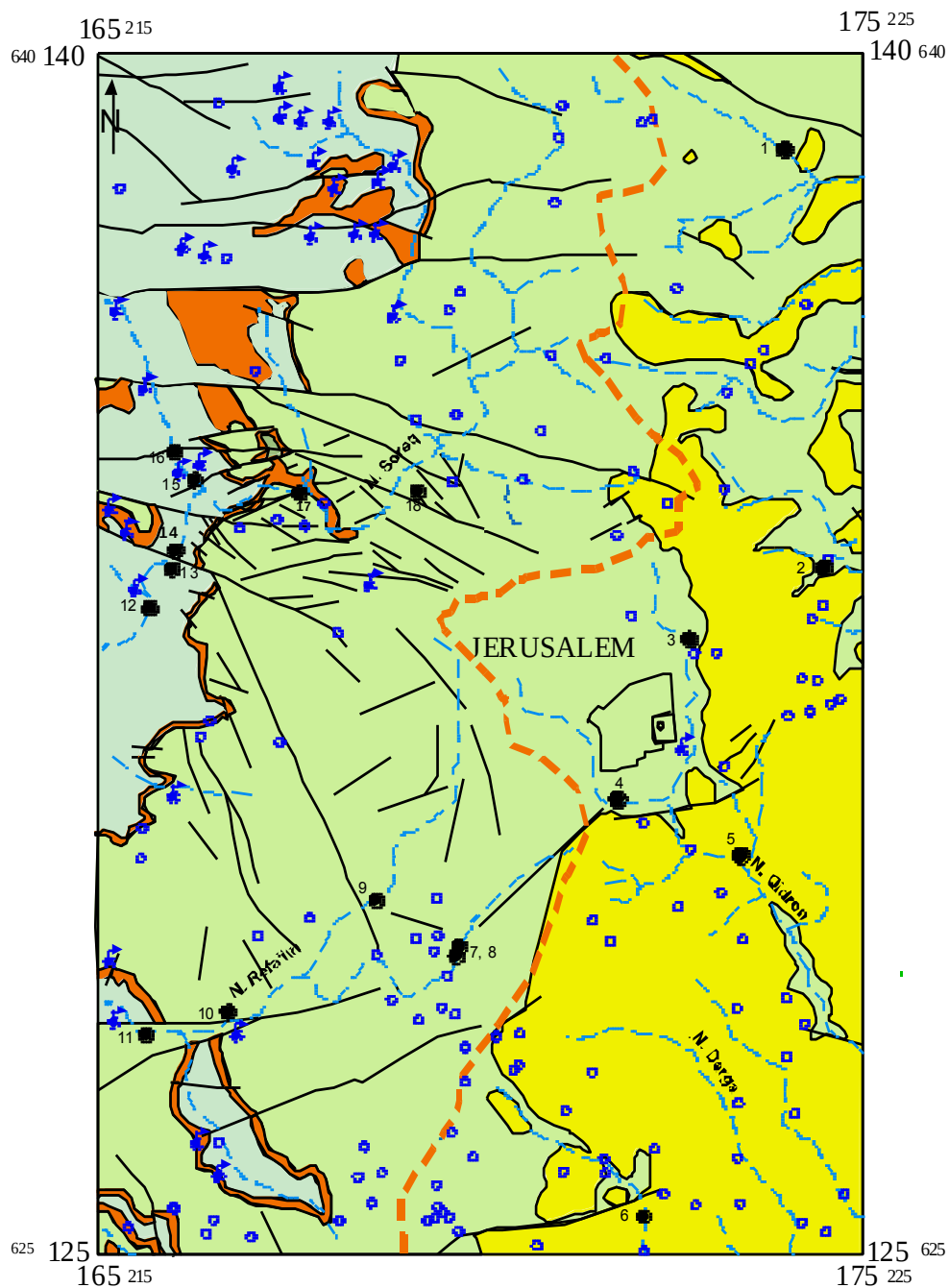
בחורפים גשומים מאד, כאשר מפלס המים בכנרת היה גבוה, קבלה ירושלים כ-5% ויותר מאספקת המים שלה ממי המוביל הארצי. בחמישים השנים האחרונות נשאבו מי תהום בירושלים וסביבתה מתת-האקוויפר התחתון של חבורת יהודה באמצעות קידוחים הממוקמים בעיקר ממערב לעיר (איורים מס': 33, 34, 35). ספיקות קידוחים אלה נעו בין 58 מ³/שעה ל-334 מ³/שעה. כמות המים שנשאבה מהם לא ספקה את כל התצרוכת העירונית והיוותה תוספת בלבד לאספקת המים המגיעה מאזור החוף ורגלי ההרים. עם הזמן חלק מהקידוחים הושבת עקב זיהום.

תאגיד המים "הגיחון" מספק מים זורמים לכל חלקי העיר ומטפל בסילוק השפכים.

מי תהום בירושלים וסביבתה מצויים באקויפר חבורת יהודה. האקויפר באזור זה הנו פריאטי, סדוק וקרסטי. באזור רגלי ההרים שממערב להרי יהודה, האקויפר ברובו הגדול הנו כלוא. האקויפר מורכב מסלעי גיר ודולומיט עם מעט שכבות ביניים דקות של חואר וחרסית. תיאור הסלעים והסדר הסטרוטיגראפי של מרבית התצורות מופיע באיור מס' 4. תצורת מוצא הבנויה מחואר, חרסית ומעט אבני גיר וכן הפציאס החוארי של תצורת בית מאיר שמתחתיה מחלקים את האקויפר לשני תת-אקויפרים: עליון ותחתון (שכנאי 1980) כמופיע באיור מס' 33. במספר אזורים תצורת כפר שאל החוארית מחלקת את תת-האקויפר העליון לשני תת-אקויפרים משניים (שכנאי 1980). שכבות החואר הדקות בתצורת שורק מחלקות את תת-האקויפר התחתון לעוד מספר תת-אקויפרים משניים. עוביו של כל אחד משני תת-האקויפרים הראשיים הוא כ- 500 מ' אולם תת-האקויפר העליון הוא דק יותר ברוב המקומות עקב הארוזיה שהסירה חלקים ממנו.

מספר רב של מעיינות שעונים נובעים במקומות שונים מתת-האקויפר העליון במגעו עם תצורת מוצא, המשמשת כאקוויקלוד. כן קיימות נביעות בתצורת שורק בעקבות המגע חואר/דולומיט.

זרימת מי התהום באזור מנותבת על ידי המבנה הסטרוקטוראלי של קמר יהודה. נתוני מפלס וכלור שנאספו ביותר מעשרים קידוחי מים (טבלה מס' 6) אשר חדרו לתת-האקויפר התחתון של חבורת יהודה בירושלים וסביבתה, אפשרו לבנות מפת מפלסים ומפה איזוכלורית (איורים מס' 34, 35, 36). ממפות אלו עולה שמי תהום מגיעים אל האזור מצפון - מזרח לאורך מבנה סינקלינלי ומתפצלים בו לשני כיוונים, האחד ממשיך לדרום-מערב והשני פונה מזרחה לעבר ים המלח. קו פיצול הזרימה הוא קו פרשת מי התהום. קו זה עובר בתת-הקרקע בירושלים כ- 300 מ' מערבית לבניי האומה וממשיך לדרום-מערב לנקודה הנמצאת 950 מ' מערבית לבנין הכנסת ומשם לנקודה הנמצאת 750 מ' מערבית למוזיאון ישראל, ממשיך מתחת לכביש המערבי העוקף את קמפוס האוניברסיטה העברית בגבעת רם ומגיע לנקודה הנמצאת כ- 1500 מ' מזרחה לגן החיות התנ"כי. משם הקו ממשיך בכיוון כללי לדרום מערב. יש לציין שקו זה אינו עובר במרכז ציר קמר יהודה אלא נדד מזרחה ממנו לתוך העיר ירושלים כתוצאה מאירועים גיאולוגיים שונים.



- | | | |
|--------------------------------|----------------|------------------------------|
| Lower Judea Group Subaquifer | Moza Formation | Upper Judea Group Subaquifer |
| Senonian sediments and younger | Main fault | Surface water divide |
| 11 Borehole (see Table 9) | Spring | Cistern or dug well |
| | | Nahal (Wadi) |

איור מס' 33. מפה הידרוגיאולוגית המציגה תת-אקוויפרים קידוחים,

מעיינות וחלק מבורות המים.

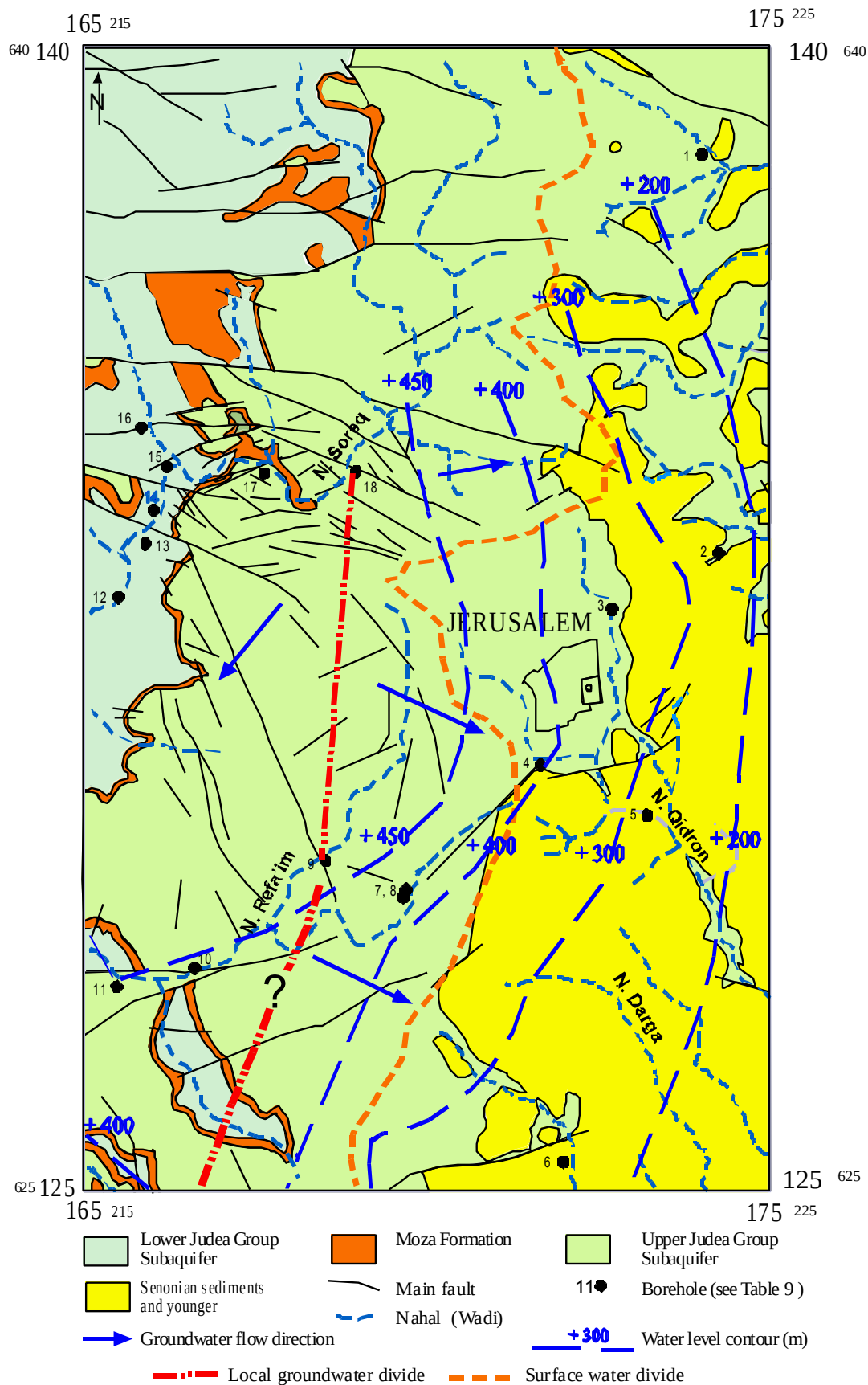
מתוך: 1. המפה הגיאולוגית של ירושלים 1:50,000 בהוצאת המכון הגיאולוגי

2. ארכיון קידוחי המים במכון הגיאולוגי.

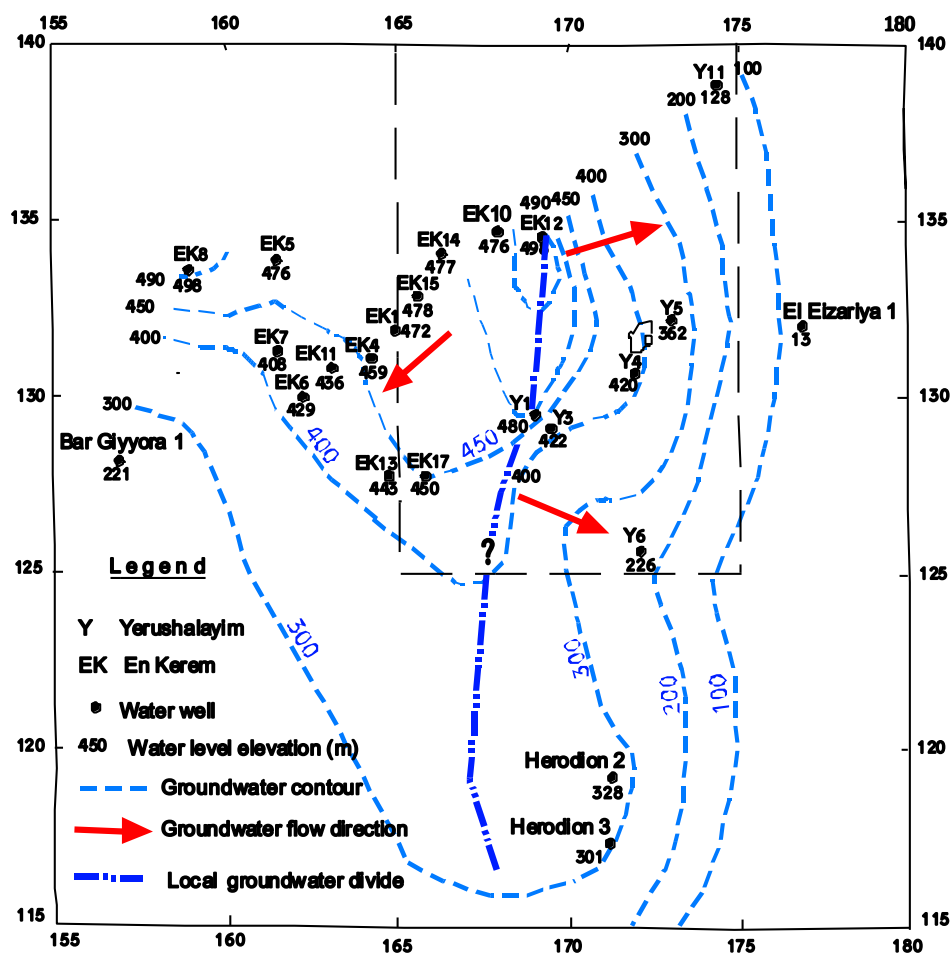
טבלה מס' 6 רום מי התהום (מרץ 1984) Cl ו NO_3 (אפריל-מאי 1985)

בתת האקויפר התחתון של חבורת יהודה

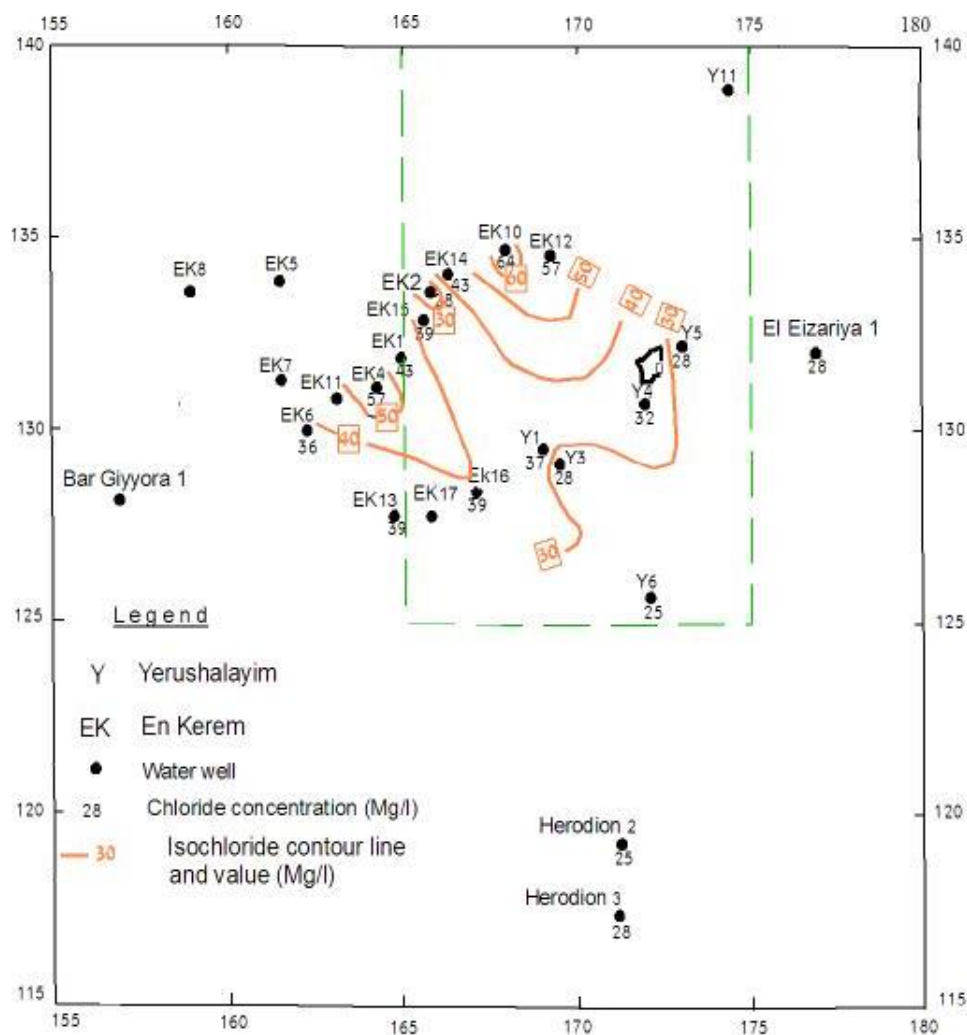
מספר הקידוח באיורים מס' 32 33	שם הקידוח	קואורדינטות	רום מי התהום (+מ') מרץ 1984	Cl (מג/ל) אפריל-מאי 1985	NO_3 (מג/ל) מאי 1985
1	ירושלים 11	17411/13876			
2	ירושלים 7	17445/13340			
3	ירושלים 5	17291/13271	362	28	15.3
4	ירושלים 4	17170/13070	420	32	14.4
5	ירושלים 14	13745/13000			
6	ירושלים 6	17217/12559	223 (2/84)	25	
7	ירושלים 2	16980/12877			
8	ירושלים 3	16980/12877	422	28	10.8
9	ירושלים 1	16880/12950	480	37	15.2
10	עין כרם 16	16685/12805		39	18.3
11	עין כרם 17	16571/12777	450		
12	עין כרם 15	16552/13282	478	39	17
13	עין כרם 2	16608/13363	482 (4/83)	28	14.4
14	עין כרם 14	16623/13402	477	43	
15	עין כרם 9	16641/13475		28	
16	עין כרם 18	16610/13515			
17	עין כרם 10	16782/13466	486	39	
18	עין כרם 12	16910/13456	498	57	
באיורים מס' 34, 35	אל עזריה 1	17660/13200	13 (2/84)	28	
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 5	16146/13379	476		
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 7	16160/13166	408		
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 8	15902/13372	498		
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 11	16305/13085	436		
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 1	16490/13193	472	43	
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 4	16416/13117	459	57	15
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 6	16226/13006	429	36	
באיורים מס' 34, 35	עין כרם 13	16465/12791	443	39	
באיורים מס' 34, 35	הרודיון 2	17092/11933	328	25	



איור מס' 34. מפת מפלסים של תת-האקויפר התחתון של חבורת יהודה בירושלים (מרץ 1984). מבוסס על: איור מס' 33 וטבלה מס' 6.



איור מס' 35. מפת מפלסים של תת-האקויפר התחתון של חבורת יהודה בירושלים וסביבתה (מרץ 1984)
הקו המקווקו מתאר את גבולות איור מס' 34.



איור מס' 36. מפה איזוכלורית (מג/ל) של תת-האקויפר התחתון של חבורת יהודה בירושלים וסביבתה (אפריל-מאי 1985).

רום מי התהום בתת-האקויפר התחתון ליד קו פרשת מי התהום הנזכרת היה בשנת 1984 בין 420 מ' ל- 490 מ' מעל מפלס הים התיכון הרום פחת לכיוון מזרח: 226 מ' בקידוח ירושלים 6 (מרץ 1984) ו- 13 מ' בקידוח אל עיזריה 1 (מרץ 1984). עומק מי התהום מתחת לפני הקרקע ליד קו פרשת מי התהום הנזכר הוא לרוב בין 100 מ' ל- 200 מ'. עומק זה אינו יציב במשך כל ימות השנה ומתנודד (בקידוחים השונים) ב- 3 מ' עד 20 מ'.

האנליזות הכימיות המוצגות בטבלה מס' 7 והמפה האיזוכלורית (איור מס' 36) מצביעים על מים באיכות גבוהה. הערכים הנמוכים של ריכוזי הקטיונים והאניונים במים מצביעים על מים שמקורם בגשם ולעתים בשלג באזור המילוי החוזר. אחוז המילוי החוזר הוא כ- 30% מממוצע הגשמים השנתיים העומד על 500 מ"מ. (Ecker, 2000).

טבלה מס' 7. אנליזות כימיות של מים (מג/ל) מתת-האקויפרים התחתון

והעליון של חבורת יהודה באזור ירושלים.

NO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl	K	Na	Mg	Ca	מקור המים, (תת- האקויפר) ומקור המידע
23.0	18.15	21.0	43.0	1.8	23.0	29.4	77.0	קידוח עין כרם 15 (תחתון) השרות ההידרולוגי 26/9/93
1.3	405.1	7.5	42.9	2.1	20.5	44.7	87.5	מעין עין סעדים (עליון) חברת מקורות 14/12/95

4.3 מקורות המים בנחל קדרון.

הגיחון (איור מס' 37) הנו מעין איתן הנובע על גדתו המערבית של נחל קדרון ברום של 636 מ' מעל פני הים התיכון בנצ. 17253/13129. הוא היה המקור לאספקת המים הקבועה לעיר בימי קדם. המעיין נובע מתוך מערה בחלקה התחתון של תצורת בינה, מגיל טורון.. ספיקתו הממוצעת, כפי שנמצאה במדידות של השנים האחרונות, הינה כ - 1500 מ³/יום. בעשרות השנים האחרונות זרימת המעיין היתה בפעילות רעשניות שנמשכו לפי עדות אחת כ- 40 דקות כל אחת, כאשר בחורף קרו כ- 4-5 פעימות כאלה ביום ובקיץ 1-2 פעימות. לפי עדויות אחרות משנים אחרות משכי הפעימות ותדירותן היו אחרים. בשנים האחרונות פסקה התופעה. ההסבר שניתן לתופעה הוא שמי התהום זורמים בתת-הקרקע אל בריכה קרסטית בעלת מוצא צר ומעוקל. למוצא זה צורה ותכונות של סיפון. עם התמלאות הבריכה והמוצא הצר המים זורמים החוצה על ידי אפקט הסיפון ומרוקנים את הבריכה ברעש. עם התמלאות הבריכה מחדש. חוזרת התופעה. זוהי תופעה הידועה גם ממעינות קרסטיים אחרים.

בעבר, המעיין היה מקור המים העיקרי של ירושלים, אם כי לא היחיד. בתקופת המלך חזקיהו (המאה השמינית לפנה"ס) נחצבה ניקבה פתלתלה (איור מס' 37) 513 מ' אורכה אשר הסיטה את מי המעיין שזרמו לנחל קדרון אל בריכת אגירה (ברכת אל חמרה) בתוך חומות העיר דאז כדי למנוע מים מצבאו של סנחריב מלך אשור שצר על העיר. (702 לפני הספירה).

בִּיד איוב (איור מס' 37), נצ. 17240/13054, הנה באר בחצר מסגד שעומקה 38 מ' אשר ספקה מים לכפר הערבי סילואן שלידה. חלקה העליון מדופן באבנים וחלקה התחתון חצוב בסלע הטורוני. (תצורת בינה). בשנים גשומות יש והבאר עולה על גדותיה למספר ימים והמים זורמים במורד נחל קדרון.

עין דוגל, היה מעין קטן בנחל קדרון בסביבות הגיחון שנבע בתקופת המקרא מתוך סלעי הטורון הסדוקים. המעיין מוזכר בתנ"ך 4 פעמים: פעמיים בעת חלוקת הארץ לשבטים (יהושע

פרק ט"ו, פסוק ז ופרק י"ח פסוק ט"ז) ופעמיים בהקשר לאירועים שונים שקרו לדוד המלך. (שמואל ב פרק י"ז פסוק י"ז, מלכים א פרק א' פסוק ט'). מקומו המדויק אינו ידוע אולם לפי המוזכר בשמואל ב ובמלכים א הוא היה בקרבת עיר דוד ובטווח שמיעה ממנה.

כיום המעיין אינו קיים. לפי מקורות היסטוריים (יוסף בן מתתיהו, קדמוניות היהודים, ט 225) רעידת אדמה חזקה שפקדה את האזור גרמה למפולות קרקע וסלעים אשר סתמו כנראה את הנביעה. ביר איוב מיוחסת למקום הנביעה של עין רוגל המקראי.

4.4 בורות מים ובריכות

עד תחילת המאה ה-20, קבלה ירושלים את מימיה ממעינות, מי גשמים ומי שיטפונות אשר נאגרו בבורות מים ובריכות וכן ממים שהובאו ממעינות רחוקים באמצעות אמות מים.

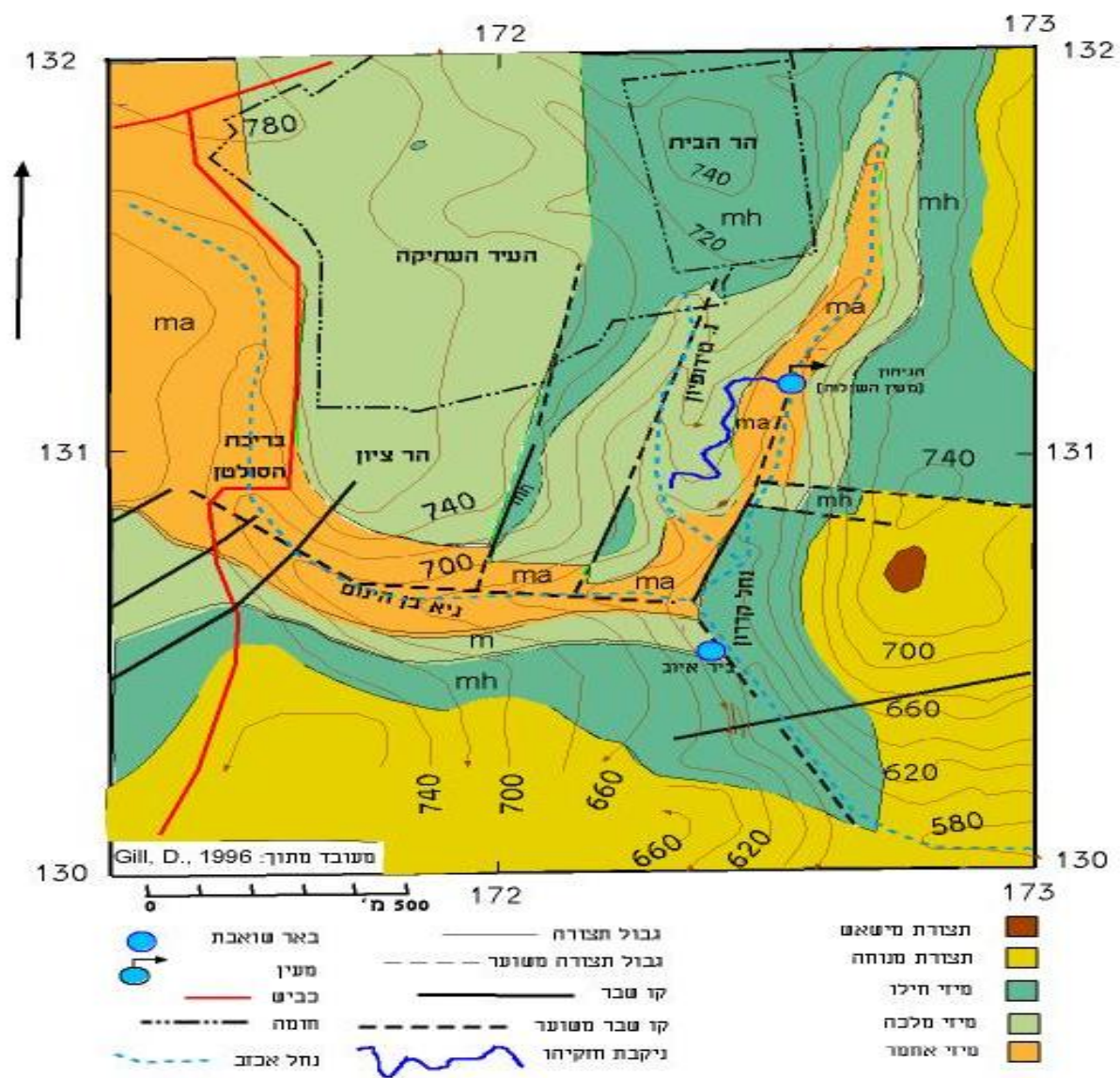
בתקופת המלך הורדוס (4-37 לפנה"ס) נחצבו בתחומי העיר העתיקה של ימינו ומחוצה לה כ- 15 בריכות ומאגרי מים כדי לאגור בתוכם מי גשמים, מי אמות מים ומי שיטפונות (Avitsur, 1992). כיום, בריכות אלה אינן בשימוש וחלקן מלאות בחלוקי אבנים או מכוסות בקרקע. טבלה מס' 8 מציגה בריכות שונות מתקופת הבית הראשון והשני ומתקופת הורדוס אשר אינן בשימוש כיום.

לקראת סוף תקופת השלטון העותמני בארץ (1517-1917) היו בירושלים כ- 6000 בורות מים בנפח אגירה כולל של כ 500,000 מ³ (Avitsur 1992).

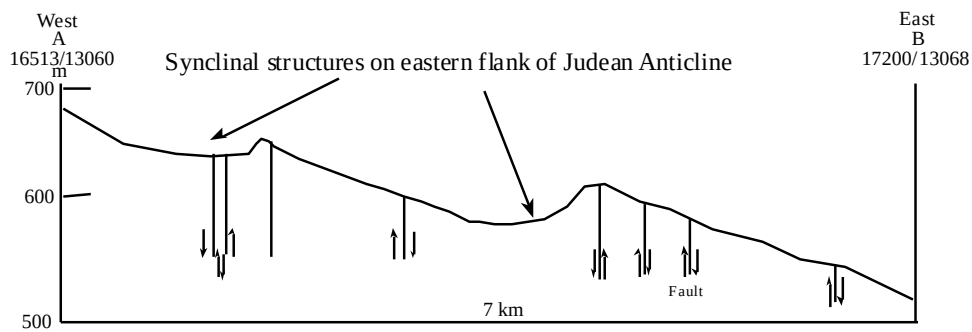
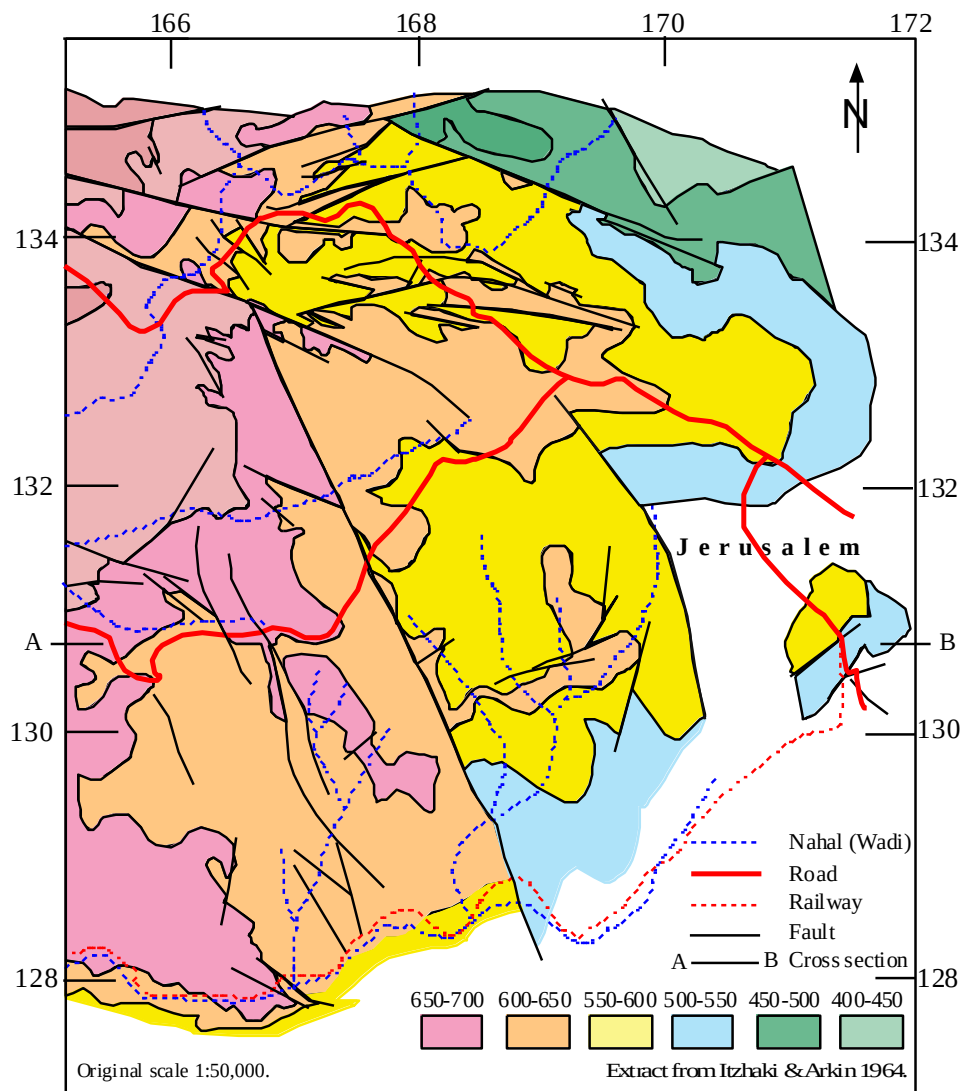
בשנת 1948 היו ברובע היהודי שבעיר העתיקה 1053 בורות מים בנפח אגירה כולל של כ- 1,000,000 מ³.

כמות המים היומית לצריכה ביתית לנפש המוקצבת כיום ע"י תאגיד המים הגיחון בירושלים היא כ- 500 ליטר. צריכת המים בשנת 1948 היתה ללא ספק נמוכה בהרבה ממספר זה.

המפה ההידרוגיאולוגית (איור מס' 33) מראה את מיקומם של הרבה מבורות המים כיום. בורות המים נחצבו במקומות שבהם נזקקו למים ללא שום התייחסות לסוג הסלע והתאמתו לאגירת מים. בורות רבים טויחו מבפנים כדי למנוע את חלחול המים מהם. על הר הבית נמצאים כיום 34 בורות מים. שלושת הגדולים ביותר נמצאים ליד מסגד אל אקצה ונפחם הוא 12,000 מ³, 8,000 מ³ ו- 5,000 מ³ (Hecker, 1965)



איור מס' 37. מפה גיאולוגית של אזור הר הבית. Gill, D., 1996.



איור מס' 38. מפה סטרוקטוראלית (מ') וחתך סטרוקטוראלי
 בירושלים וסביבתה לפי תצורת מוצא (Kumo).

טבלה מס' 8. בריכות ומאגרי מים היסטוריים שאינם בשימוש כיום.

שם המאגר	מימדי המאגר	תקופת הקמת המאגר	הערות
בריכת עליונה	עומק 23 מ'	בית ראשון	בעיר העתיקה.
שדה כובס		בית ראשון	ליד עין רוגל.
בריכת אל חמרה			ידועה גם כ"בריכת סילואם". ניזונה בעבר ממעיין הגיחון.
בריכת מרים		בית שני	
בריכת הסולטאן	נפח 73,920 מ ³ (Avitsur, 1992)	הרודיאנית	בגיא בן-הינום. הבריכת הגדולה ביותר. ממוקמת על מיזי אחמר.
בריכת ממילא	60-65 x 6.5 מ' x 97	הרודיאנית	במעלה גיא בן-הינום. ניזונה ממי שיטפונות ומאמת המים העליונה. בשימוש עד 1948.
בריכת ישראל	110 x 38 x 26 מ'	הרודיאנית	בעיר העתיקה.
בריכת בית חיסדא	45 x 6 x 11 מ'		בעיר העתיקה. ידועה גם כ"בריכת פרובטיקה".
בריכת אמגדלון	95 x 44 x 6-7.5 מ'	הרודיאנית	בעיר העתיקה. ידועה גם כ"המגדל של בריכת חזקיהו". קבלה מים בגרביטציה מבריכת ממילא.
בריכת הסטרוטיון		הרודיאנית	התגלתה במאה ה-19.

מאז ימי הבית השני (המאה השנייה לפנה"ס) ועד סוף התקופה העותמנית (סוף 1917) פעלה מדרום לירושלים מערכת אמות מים שהזרימה בגרביטציה מים לירושלים (איור מס' 39). המים נאספו ממעינות איתנים מדרום לירושלים, הנובעים מחלקו התחתון של תת-האקויפר העליון במגעו עם תצורת מוצא. שלוש בריכות הקרויות "בריכות שלמה" (שמן המקומי הוא "בריכות אל בוריק") תיפקדו כמאגר המים המרכזי של המערכת. הבריכות ממוקמות כ- 11.5 ק"מ בקו אוויר דרומית מהר הבית ברומים של 765 מ', 785 מ' ו- 800 מ' ומהן זרמו המים בגרביטציה לירושלים. הבריכות מכילות כ- 180,000 מ³ מים באיכות שתייה וקשורות זו לזו באופן הידראולי (Mazar, 1989). הבריכות ניזונות ממי שיטפונות, ממעינות סמוכים, ומשתי אמות מים הרודיאניות: "ביאר" ו"ארובה", המזרימות אליהן מים בגרביטציה ממעינות שמדרום להן.

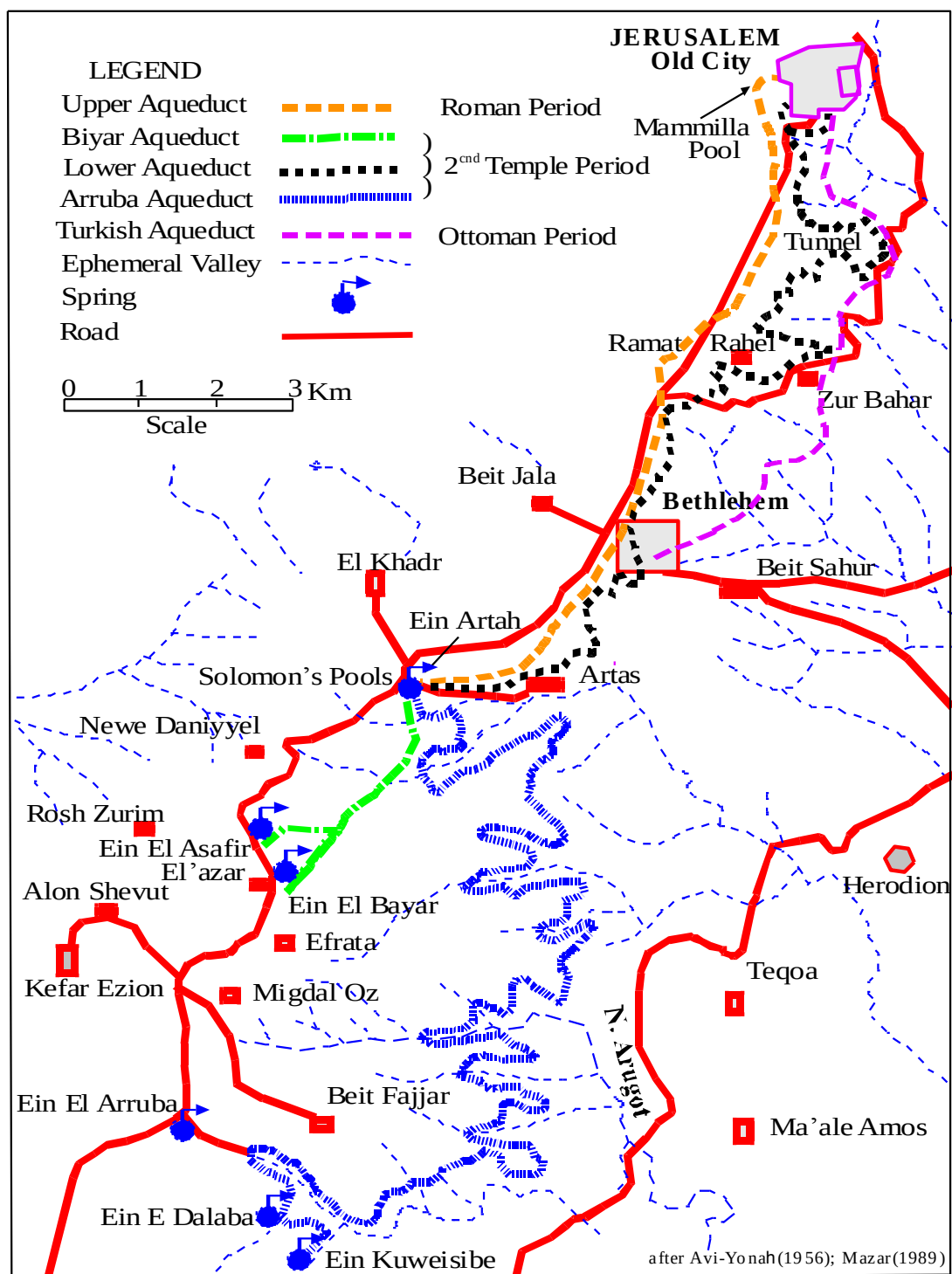
אמת המים "ביאר", 4.7 ק"מ אורכה, מתחילה במעיין אל ביאר ברום של 890 מ' ומגיעה אל הבריכות דרך שתי מנהרות (האחת באורך של 2.8 ק"מ) ושתי תעלות.

אמת המים "ארובה", באורך של 39 ק"מ, מתפתלת מאד בטופוגרפיה ומספקת מים לבריכה האמצעית ממספר מעיינות ברומים של 820 מ' ו- 840 מ'. האמה כוללת במסלולה גם בריכת אגירה בנפח של 20,000 מ³ ("בריכת ארובה") שנבנתה ע"י המושל הרומי פונטיס פילטוס (38-26 לספה"נ).

המים הוזרמו לירושלים מבריכות שלמה ע"י שתי אמות מים: תחתונה ועליונה.

אמת המים התחתונה נבנתה בתקופת שלטון החשמונאים בזמן הבית השני. (המאה השנייה לפני הספירה) תחילתה בעין עיטם, מתחת לבריכה התחתונה של בריכות שלמה ברום של 765 מ' וסיומה בהר הבית, לאחר 21 ק"מ, ברום של 735 מ'. המים לאמה סופקו מהבריכות ומהמעיין הסמוך עין פארוג'. דבר שאיפשר זרימת מים מתמדת באמה במשך כל השנה (Mazar, 1989). האמה מתפתלת בטופוגרפיה ההררית שומרת על שיפוע מבוקר ועוברת דרך גשרים שנבנו למטרה זו ודרך שתי מנהרות. האחת שאורכה 360 מ' נמצאת מתחת לעיר בית לחם והשנייה שאורכה 423 מ' חודרת את רכס ארמון הנציב (ג'בל מוכאבר) מצד אל צד. האמה תוקנה פעמים רבות במשך ההיסטוריה והזרימה מים עד גמר השלטון העותמני. (איורים מס' 39, 40, 41)

אמת המים העליונה נבנתה ע"י המלך הורדוס (4-37 לפנה"ס). תחילתה בבריכה העליונה של בריכות שלמה, ברום של 800 מ', וסיומה בירושלים, לאחר 14 ק"מ, ברום של 760 מ'. כדי לשמור את מפלס המים באמה בגובה הדרוש נבנה גשר, יותר מ- 2 ק"מ אורכו, מצפון לבית לחם מעל לעמק שרקעיתו כ- 40-35 מ' מתחת למפלס הדרוש של אמת המים (Amit, 1994). מאוחר יותר הגשר נהרס בפעולת איבה. מאתים שנה לאחר מכן חידש הלגיון הרומי העשירי את פעולת האמה ע"י בניית סיפון עשוי חוליות אבן שהעביר את המים אל צדו השני של העמק לרום הרצוי ללא בניית גשר לשם כך.



איור מס' 39. מערכת אמות המים הקדומות שסיפקו מים לירושלים.



איור מס' 40. אמת המים התחתונה בצדו הדרומי של הר ציון, שבורה בחלקה
ובתוכה צינור החרס שהונח על ידי העותמנים.

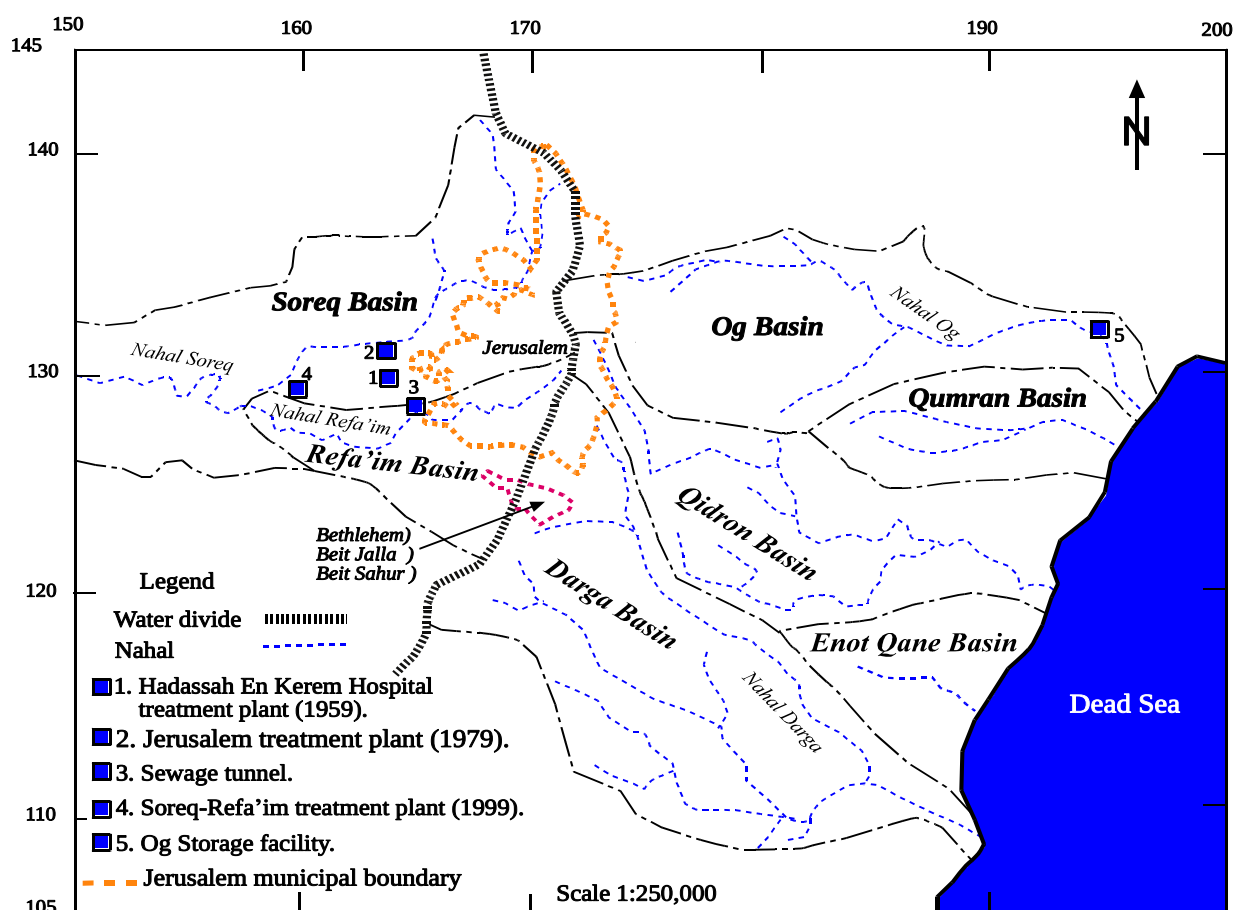


איור מס' 41. אמת המים התחתונה בצדו המערבי של הר ציון ליד
ברכת הסולטאן. צינור חרס עותמני מותקן בתוך האמה.

4.6 ביוב

חמישה אגני ניקוז ראשיים קיימים בירושלים וסביבתה (איור מס' 42). אגני הנחלים: רפאים ושורק מתנקזים מערבה אל הים התיכון ויתר השלושה: אוג, קדרון ודרגה מתנקזים מזרחה אל ים המלח.

פיקוח על זרימת מי השופכין באגני ניקוז אלה החל כבר לפני כ- 100 שנים עוד בתקופה העות'מנית. קטעים מהמערכת העות'מנית הכוללת תעלות מצופות בלבנים וצינורות חרס קיימים עדיין במספר מקומות בירושלים המזרחית. המערכת תוכננה לזרימה בגרביטציה למעט שלושה מקומות בהם נדרשה שאיבה. חלק ממערכת זו, ברובע המוסלמי וברובע הנוצרי שבעיר העתיקה, הוחלפה בשנים האחרונות במערכת חדשה כל זאת לרווחת התושבים. תאגיד הגיחון מפעיל כיום 10 תחנות שאיבה בספיקות שונות כדי לשאוב את השפכים ממקומות נמוכים.



איור מס' 42. אגני הניקוז ומיתקנים לטהור שפכים באזור ירושלים.

המערכת המערבית

שפכי השכונות המערביות והדרומיות של ירושלים וכן בית ג'אלה ומערב בית לחם מסולקים כיום, רובם ככולם, מערבה דרך אגני הניקוז של הנחלים רפאים ושורק ומטופלים במכון טהור השפכים המערבי של ירושלים.

נחל רפאים מנקז את שפכי דרום מערב ירושלים, בית ג'אלה ומערב בית לחם. שפכים אלה מוזרמים כיום, כאמור, למכון הטהור המערבי של ירושלים באמצעות צינור שנתרם ע"י ממשלת גרמניה ומנהרה שאורכה 2.1 ק"מ שמעבירה את השפכים אל מערכת האיסוף והזרימה הסגורה בנחל שורק. לפני חיבורם למערכת הסגורה זרמו השפכים באופן חופשי במורד הוואדי.

נחל שורק מנקז את שפכי מערב ירושלים (איור מס' 42) ומספר ישובים שכנים. בשנת 1959 הוקם בו, ליד עין כרם, מתקן הטהור הראשון באזור לטהור שפכי בית החולים הדסה.

עשרים שנה לאחר מכן, בשנת 1979, הוקם לידו מתקן טהור נוסף, בעל כושר טהור יומי של 13,000 מ³. לטהור שפכי ירושלים. חלק מהשפכים המטוהרים הוזרמו להשקיית מטעים במעלה הוואדי ואילו יתר השפכים המטוהרים הורחקו למורד הוואדי ע"י צינור שאורכו 6 ק"מ ומשם זרמו על פני הסלעים הסדוקים של תת-האקויפר התחתון של חבורת יהודה עד למפגשם עם השפכים הלא מטוהרים שזרמו אז בנחל רפאים. משם המשיכו יחד עד ליציאתם מהרי יהודה. בשנת 1994 הגיעו למתקן כ- 22,000 מ³/יום שפכים (Hazut et al., 1995) שהיו מעבר ליכולת הטהור של המתקן. עודפי השפכים הלא מטוהרים הוזרמו במורד הוואדי על סלעי הגיר והדולומיט הסדוקים של חבורת יהודה. עד כה אין שום ידיעה ברורה לאן זורמים בתת-הקרקע השפכים שחלחלו עד שנת 1999. סביר להניח שקו פרשת המים התת-קרקעית פיצל את זרימתם לשני כיוונים: לעבר ים המלח ולעבר הים התיכון.

הקמתו של מתקן טהור גדול ("מתקן הטהור המערבי") בנחל שורק שיטפל בכל השפכים המנוקזים ע"י שני הוואדיות הנזכרים הושלמה בשנת 1999. מערכת האיסוף והזרימה הסגורה הובילה אל מתקן טהור זה בשנת 2013 80,000 מ³/יום שפכים. המתקן מתוכנן לטהר 135,000 מ³/יום שפכים עד שנת 2030. (Hazut et al., 1995) השפכים המטוהרים מוזרמים בגרביטציה דרך צינור אל מחוץ להרי יהודה לצרכי השקיה.

בשל כניסת תקנות השפכים החדשות (תקנות ענבר, 2011) החל תאגיד הגיחון. לקראת סוף שנת 2013, באמצעות חברת הבת מב"ט (מפעלי ביוב וטהור ירושלים), לשדרג את המכון לאיכות הנדרשת בתקנות.

המערכת כוללת את אגני הניקוז של הנחלים: אוג, קדרון ודרגה ומנקזת שפכים לא מטופלים ממרכז ודרום-מזרח ירושלים, ממזרח בית לחם וממספר כפרים בסביבה (איור מס' 42). בקטעים לאורך הנחלים הזרימה עוברת מעל סלעים של תצורות מנוחה וע'רב הבנויות בעיקר מקירטון ומעט חואר. סלעים אלה משמשים כאקוויקלוד המונע חלחול אל האקויפר שלמטה למעט חלחול הקורה דרך סדקים הקיימים בסלעים אלה.

השפכים מאגן נחל אוג מוזרמים בצינור לאורך אפיק הנחל לעבר מתקן סינון של חמרים גדולים. משם הם ממשיכים בצינור אל מתקן חמצון וממנו אל מאגר בקרבת ים המלח המשמש להשקיה חקלאית באזור.

בימים אלה משלימים הקמת מתקן טהור שפכים חדש מול הכניסה לכביש בקעת הורקניה. הקולחים ישמשו להשקיית מטעי תמרים.

נחל קדרון מנקז את השפכים של מרכז ודרום-מזרח ירושלים, בית סחור ומזרח בית לחם (איור מס' 42). השפכים זורמים מזרחה באפיק הנחל מעל סלעים של תת-האקויפר העליון של חבורת יהודה ועל סלעים של חבורת הר הצופים. בעבר, בעונות גשמים הזרימה הגיעה אל ים המלח. כיום, השפכים מסולקים מהנחל באמצעות צינור אל מאגר נחל אוג ליד ים המלח להשקיית מטעים באזור.

נחל דרגה הנו יבש. שפכי הר חומה, צור בחר ואום צובא שבאגן ההיקוות הזה מטופלים במתקן טהור בשיטת הממבראנות. השפכים המטוהרים ישמשו, החל משנת 2014 להשקיית גנים ציבוריים בירושלים (מ. בלום, שיחה בע"פ, 2013).

- Abels, Z., Arbit, A., 1995. The City of David Water Systems. The Faculty of Printing Techniques, *Hadassah College of Technology, Jerusalem*.
- Aisenstein, B., 1965. Some observations on deconsolidation of limy rocks on steep slopes. *Proc. 6th Int. Conf. Soil Mechanics*. pp. 439-441.
- Aisenstein, B., David, D., Wiseman, G., 1966. Mechanical properties of some marls in Israel. *1st Cong. Rock Mechanics, Lisbon*. pp. 393-397
- Amit, D., 1994. New data for dating the aqueducts of Jerusalem. In: The hundred booklet of Ariel. Part B. pp. 57-64. *Ariel Publishing House Jerusalem (in Hebrew)*.
- Arkin, Y., 1963. Composite section of the Judea Group (Jerusalem area). *Geological Survey of Israel*.
- Arkin, Y., 1967. Jerusalem-Bet Shemesh: Geological cross sections *Geological Survey of Israel Publ.*
- Arkin, Y., 1973. Geological map of Greater Jerusalem on a scale 1:50,000 with explanatory notes. *Atlas of Jerusalem*.
- Arkin, Y., 1976. Geological map of Jerusalem and vicinity. Scale 1:50,000. *Survey of Israel Publ. reprinted in 1985 and 1997*.
- Arkin, Y., 1978. Lithostratigraphic dictionary of geological mapping units in Israel. In: Steps in the Geology of Israel. *Tel Aviv Open University Publ.* 17 p.
- Arkin, Y., 1980. A survey of karst phenomena, western Judea Mountains. *Geological Survey of Israel. Rep. No. MM/5/80*, 30 p. (in Hebrew).
- Arkin, Y., 1980a. Ground subsidence (sinkhole) near the Damascus Gate, Nevi'im-Zanhanim Junction, East Jerusalem. *Geological Survey of Israel. Rep. MM/3/80*, 27 p. (In Hebrew).
- Arkin, Y., 1984. A Sinkhole near the Damascus Gate, Old City of Jerusalem. *3rd Int. Symp., on Land Subsidence, Venice, Proc.* pp. 565-574.
- Arkin, Y., 1986. Geotechnical factors influencing marl slopes in Israel. *Ph.D. Thesis, University of London, UK. Geological Survey of Israel. Rep. GSI/27/86*, 386 p.
- Arkin, Y., 1988. Disintegration of marl slopes in Israel. In: *Environmental Geology and Water Science 11:1. Elsevier*. pp. 5-14.
- Arkin, Y., 1989a. Geotechnical cross section, bridge alignment Road No. 4 Nahal Gilo. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/21/89*. 13 p.
- Arkin, Y., 1989b. Moza-Rupin environmental impact: geology, geotechnics and hydrology. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/58/89*, 32 p.

- Arkin, Y., 1989c. Stability of slopes in Upper Cretaceous chalks in Israel. *Proc. Int. Chalk Symp. Brighton Polytechnic*. 8 p.
- Arkin, Y., 1989d. Preliminary geological and geotechnical survey of proposed tunnel site , Weizmann-Herzl Junction, Road No.4 Jerusalem. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/38/89* 21 p.
- Arkin, Y., 1992. Geotechnical aspects of tunneling in the Jerusalem Area. *11th Conf. Mineral Engng., Nahariyya*.
- Arkin, Y. and Braun, M., Starinsky, A., Hamaoui, M., Raab, M., 1965. Type sections of Upper Cretaceous formations in the Jerusalem-Bet Shemesh area. Strat. Sect. No. 1. *Geological Survey of Israel. Publ.* 42 p.
- Arkin, Y. and Ecker, A., 2007. Geotechnical and Hydrogeological concerns in developing the the Infrastructure around Jerusalem. *Geological Survey of Israel Report GSI/12/2007*. 106 p.
- Arkin, Y. and Hamaoui, M., 1967. The Judea Group (Upper Cretaceous) in central and southern Israel. *Geological Survey of Israel. Bull. No. 42*. 17 p.
- Arkin, Y. and Gavish, E., 1995. Har Gilo Tunnels-geological aspects, civil engineering with a view to the future. *10th National Conf. Of Engineers. Tel Aviv*. Pp. 187-199.(in Hebrew).
- Arkin, Y., Kafri, U., Michaeli, L., Mimran, Y., 1987. Geological and geotechnical survey along Road No. 4 Jerusalem-Gush Ezion, Har Bet Gilo tunnel alignment. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/5/87*. 32 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1988a. Exploratory drilling and geotechnical classification of the rock mass at the site of tunnels, Route N^o. 60. Jerusalem-gush Ezion, Har Gilo Section. *Geological Survey of Israel. Report GSI/40/88*. 81 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1988b. Borehole investigation and engineering geological rockmass classification of tunnel sites, Road N^o. 4. Jerusalem-Gush Ezion, Bet Gilo section. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/40/88*. 86 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1989a. Exploratory drilling for detailed design Gilo tunnels, G6,G7,G8, Route No. 60. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/6/89*. 34 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1989b. Strength and consistency of artificial clay-carbonate mixtures: Simulation of natural sediments. *Engine. Geol.* 26. pp. 201-213 *Elsevier*.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1989c. Exploratory boreholes for detailed planning of Gilo tunnels, G-6, G-7, G-8, Road N^o 60, Jerusalem-Kefar Ezion. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/46/89*, 18 p.

- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1989d. Exploratory geological and geotechnical survey of proposed tunnel, Haft Circle, Moza-Bet Hakerem Junction, Road No. 1 Jerusalem. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/18/89*, 24 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1990. Exploratory boreholes Herzl-Weizmann Junction tunnel, Road No. 4 Jerusalem. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/16/90*, 59 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1992. Geological and geotechnical site investigation of proposed tunnel alignment Herzl-Weizmann Boulevard Junction, western entrance to Jerusalem. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/9/9*, 36 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1993. Tunnel site investigation, summary of geotechnical data (Road No. 60 Jerusalem-Gush Ezion). *Geological Survey of Israel. Tech Rep. TR/GSI/20/93*. 29 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1993a. Monitoring possible deformational movements in the Gilo Short Tunnel. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/32/93*, 49 p.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1994. Geology and geotechnology of the Gilo Short Tunnel. *Geological Survey of Israel. Current Res.* 9:11-15.
- Arkin, Y. and Michaeli, L., 1997. Geological and geotechnical survey of the northern foundation site, Gilo Viaduct. *Geological Survey of Israel. Rep. TR- GSI/12/97*, 43 p.
- Arkin, Y., Michaeli, L. and Liberman, A., 1994. Har Hazofim tunnel additional boreholes Z6 and Z7. *Geological Survey of Israel. Rep. TR- GSI/22/94*, 56 p.
- Arkin, Y., Michaeli, L. and Rosen, A., 1989. Swelling features in the Kefar Sha'ul Formation, Gilo Short Tunnel Jerusalem. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/52/89*, 31 p.
- Arkin, Y., Michaeli, L., Wolfson, N., 1993. university road approaches to the Har Hazofim Tunnel, borehole investigation. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/19/93*, 39 p.
- Arkin, Y., Michaeli, L., Wolfson, N., 1993. Gilo Viaduct borehole investigation. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/20/93*.
- Arkin, Y., Michaeli, L., Wolfson, N., 1993. Har Hazofim Tunnel, University road geological and geotechnical site investigation. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/18/9*, 62 p.
- Arkin, Y., Mimran, Y., 1983. Geology of the rock mass in Israel with relevance to tunneling. Discussions in the use of the underground in Israel. *Ministry of Energy and Infrastructure, Jerusalem*.
- Avitsur, S., 1992. Water Resources in the Land of Israel. *Avshalom Inst. Tel Aviv (in Hebrew)*.
- Avi-Yonah, M., 1956. Ed. The Book of Jerusalem; Its Natural Conditions, History and Development from Origins to Present Day. Vol.1. *The Bialik and Dvir Publ. House, Jerusalem (in Hebrew)*.
- Avnimelech, M., 1962. Dinosaur tracks in the Lower Cenomanian of Jerusalem. *Nature Vol. 196. No. 4851*. 264 p.

- Avnimelech, M., 1963. Discovery of Dinosaur tracks of Lower Cenomanian age in Beit Zeit, west of Jerusalem. *Isr. J. Earth Sci.*, Vol. 12. No. 1. *Proceed.* 80-81.
- Avnimelech, M., 1966. Influence of geological conditions on the development of Jerusalem. *Bull. Amer. School Oriental Res.* No. 181.
- Baida, U., 1983. Follow-up hydrological report in sensitive areas for 1982/83. Be'er Sheva, En Kerem – Jerusalem, Jordan valley, Judea and Samariya (YO"SH), Shuni, Tireli. *Water Planning for Israel (Tahal)* 01/83/52 April. Tel Aviv.
- Baida, U. and Guttman, Y., 1985. Follow-up hydrological report in sensitive areas in the Judea Group Aquifer for 1984/85. Be'er Sheva, En Kerem – Jerusalem, Jordan valley, Judea and Samariya (YO"SH), Shuni, Tireli, Modi'in, Ajur (Lower Aquifer). *Water Planning for Israel (Tahal)* 01/85/65 March. Tel Aviv.
- Baida, U., Zukerman, H., 1992. Jerusalem area. Exploitation and development possibilities of the groundwater resources in the Cenomanian aquifer. Hydrogeological examinations and numerical model. *Water Planning for Israel (Tahal)*, 01/92/10. Tel Aviv.
- Barton, N., Lien, R., Lund, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock. Mech.* Vol. 6. No. 4. pp. 189-236 .
- Bartov, Y. and Arkin, Y., 1975. The geological photomap of Israel, on a scale of 1:500,000. *Geological Survey of Israel. Publ.*
- Bartov, Y., Arkin, Y., Lewy, Z., Mimran, Y., 1981. Regional stratigraphy of Israel: A guide to geological mapping. *Geological Survey of Israel. Publ.* pp. 38-41
- Bell, F. G., 1977. A note on the physical properties of the chalk. *Eng. Geol.* Vol. 11. No. 3. pp. 217-225.
- Bieniawski, Z. T., 1976. Rock mass classification in rock engineering. In: Z.T. Bieniawski (ed.) *Exploration for Rock Engineering, Balkema, Rotterdam.* Vol. 1. pp. 97-106.
- Bieniawski, Z. T., 1980. Rock classification: State of the art and prospects for standardisation. *Transport Research Record* 783. *Nat. Acad. Sci. Washington.*
- Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification: John Wiley & Sons.* 251 p.
- Bishop, A. W. and Blight, G. E., 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique*, Vol. 13. pp. 177-197 .
- Blake, G.S., 1936. The stratigraphy of Israel and its building stones. *Govt. of Palestine Print. and Stationery Office.* 133 p.
- Blankenhorn, M., 1905. Geologie der Naeheren Umgebung von Jerusalem. *Zeitschr.Deutsche Palestina Ver.* Vol.28.
- Clark, A. R., Walker, B. F., 1977. A proposed scheme for classification and nomenclature for use in the engineering description of Middle Eastern sedimentary rocks. *Geotechnique*, Vol. 27. No. 1. pp. 93-99.

- Deere, D. U., Merrit, A. H., Coon, R. F., 1969. Engineering classification of in situ rock. *Tech. Rep. AFWL-TR-67-144, Airforce Weapons Lab., New Mexico.*
- Deere, D. U., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*. Vol. 6. No. 4. pp.189-239.
- Ecker, A., 2000. Contribution of saline waters in the Avedat and Mount Scopus groups aquitard to the Judea Group aquifer in the Yarqon-Be'er Sheva Basin. *Isr. Assoc. Water Resour. Ann. Meet., Akko, May 2000; Abstr.* pp. 3-6.
- Flexer, A., 1968. Stratigraphy and facies development of the Mt. Scopus Group (Senonian-Paleocene) in Israel and adjacent countries. *Isr. J. Earth Sci* Vol.17. pp. 85-114.
- Fink, M., 1963. Hydrologic report on the groundwater horizon in the Jerusalem Corridor. *Water Planning for Israel (Tahal), Tel Aviv, July.*
- Gavish, E., Arkin, Y., Hazor, Y., 1995. Problematics in rockmass classification of underground openings in the lower part of the Amminadav Formation. *Isr. Geol. Soc. Meet. Zikhron. (Abstract).*
- Gavish, E., Hazor, Y., Arkin, Y., 1996. Adaption of imperial classification methods (Q & RMR) for tunneling in bedded rock: lessons from the Gilo Tunnel. *Isr. Geol. Soc. Meet. Elat.*
- Gilat, A., Wolfson, N., Michaeli, L., Arkin, Y., 1992. Eastern ring road geological and geotechnical survey. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/22/92*, 61 p.
- Gill, D., 1996. The Geology of the City of David and its Ancient Subterranean Waterworks. *Excavations at the City of David 1978-1985*, Vol. IV. QEDem, The Hebrew University of Jerusalem.
- Gillot, J. E., 1968. Clay in Engineering Geology. *Elsevier.*
- Grinwald, Z., 1980. Water in Israel. *I.W.W.A. Tel Aviv.*
- Hazut, E., Sivan, E., Adir, S., 1995. Jerusalem and vicinity sewage treatment project. *Water Assoc. Water Engineers (Israel)*. Vol. 20. pp. 22-24 (in Hebrew).
- Hecker, M., 1965. Jerusalem water supply in ancient times. In: *Book of Jerusalem* Vol.1. 191-218.
- Hydrological Service 2007. Data from the water well inventory.
- Israeli, A., 1977. Geological-engineering properties of rocks in the Jerusalem area and geotechnical map on a scale of 1:10,000. *M.Sc. Thesis Hebrew University Jerusalem.*
- Itzhaki, Y., Arkin, Y., 1964. Geological map of Israel (structural), 1:50,000 Jerusalem-Bet Shemesh sheet. *Geological Survey of Israel. Publ.*
- Jad, I., Qumsieh, V., Hosh, L., 1996. Environmental Profile for the West Bank. Vol. 6 Jerusalem District. *Applied Res. Inst. Jerusalem, Bethlehem.*

- Katz, O., 2004. Landslide hazard evaluation of slopes during earthquakes, in the municipality of Jerusalem. *Geological Survey of Israel. Rep. GSI/12/04*. (In Hebrew) 34 p.
- Lerman, S., 1995. Jerusalem sewage. Solutions for sewage treatment in the Western Basin. *Water. Assoc. Water Engineers (Israel)* Vol.20. pp. 27-42. (in Hebrew).
- Maheras, P., Kutiel, H., Gkika, S., 1995. Relations entre les precipitations Malte et les indices de circulation en Mediterranee durant la derniere periode seculaire. *Pub. Assoc. Int. climatol.*, 8, 320-326.
- Mazar, A., 1989. Aqueduct network to Jerusalem. In: Old Aqueducts in Land of Israel. *Yad Ben Zvi Edition*. pp. 169-204. (in Hebrew).
- Mimran, Y., Honigstein, A., Arkin, Y., Rosenfeld, A., Michaeli, L. and Hatzor, Y., 1996. The use of ostracod biostratigraphy in the geotechnical evaluation of the Santonian chalk for the proposed Mount Scopus tunnel. *Geological Survey of Israel. Current Res.*, Vol., 10. *Jerusalem*. pp. 138-142.
- Perath, I., 1984. Stone Building and Building Stone in Israel, a Historical Review. *Geological Survey of Israel*. 97 p.
- Picard, L., 1938. The Geology of new Jerusalem. *Hebrew Uni., Jerusalem Geol. Dept.*, B. 2,1. 12 p.
- Rosen, A., 1989. Preliminary estimates of the swelling problem in the marly chalk of the Kefar Sha'ul Formation, Route No. 60 Jerusalem-Gush Ezion road tunnels at Har Gilo.
- Rosen, A., Arkin, Y., Michaeli, L., 1993. Jerusalem-Mount Scopus Tunnel Rep. No. 4. Deformation measurements while tunneling. *Geological Survey of Israel. Rep. TRGSI/31/93*, 13 p.
- Szechy, K., 1977. The Art of Tunneling. *Hungarian Acc. Sci.* 891 p.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B., 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice. NY. Wiley and Sons.
- Tourtlot, H. A., 1977. Geologic origin and distribution of swelling clays. *Assoc. of Engng. Geol. Bull.*, Vol.11. No. 4. pp. 259-275.
- Vilnay, Z., 1970. Jerusalem, The Capital of Israel, A: the Old City. *Ahiever Press, Jerusalem*.
- Yair, A., 1971. Geomorphological processes on marl slopes Jerusalem *Studies in Geography*. 2, pp. 156-190.

נספחים

I. פרמטרים מדודים של סלעים מהתצורות: עמינדב, ורדים, כפר שאול, בינה, ורדים ומנוחה.

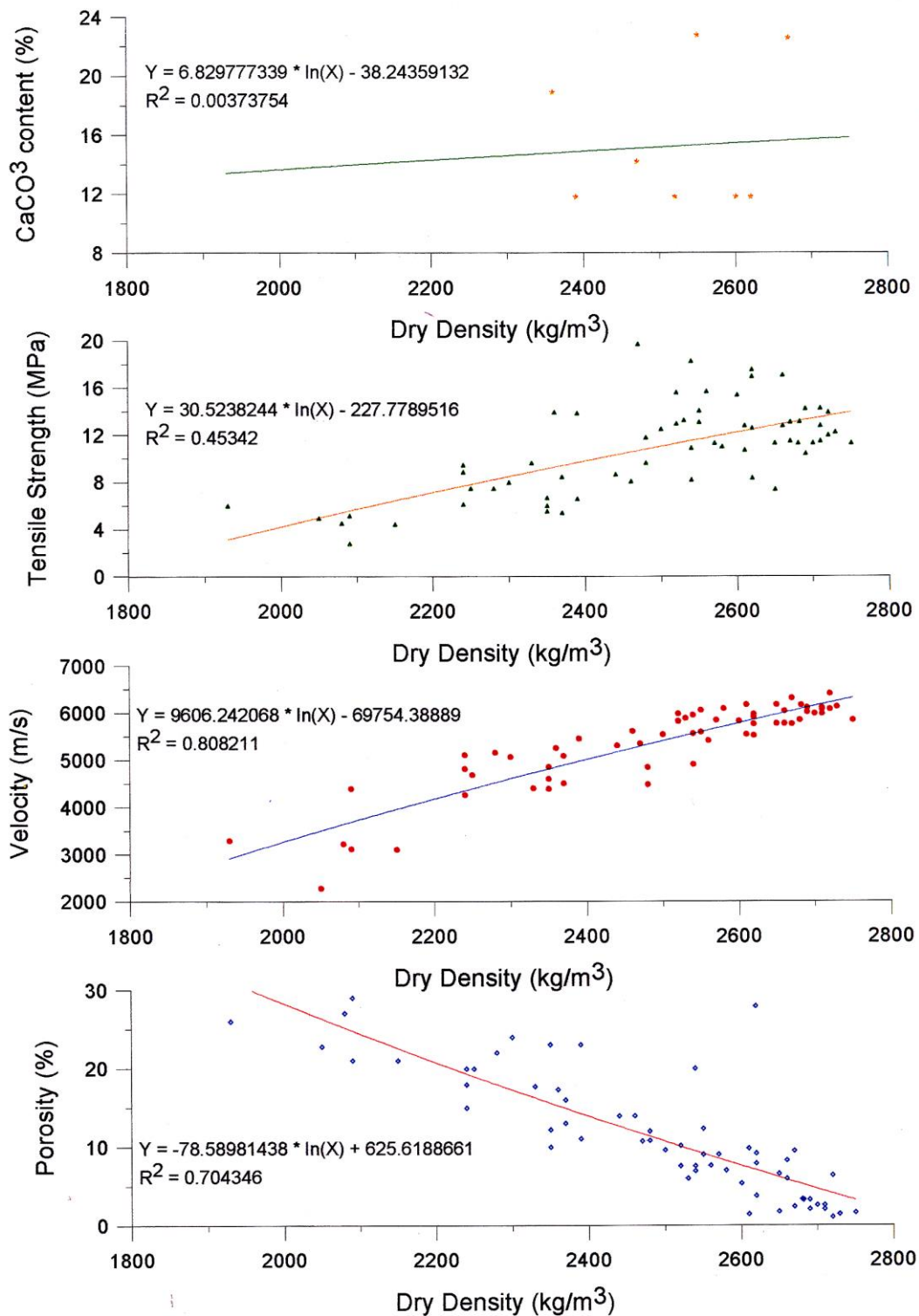
II. מונחון.

III. המחבר דר' יעקב ארקין.

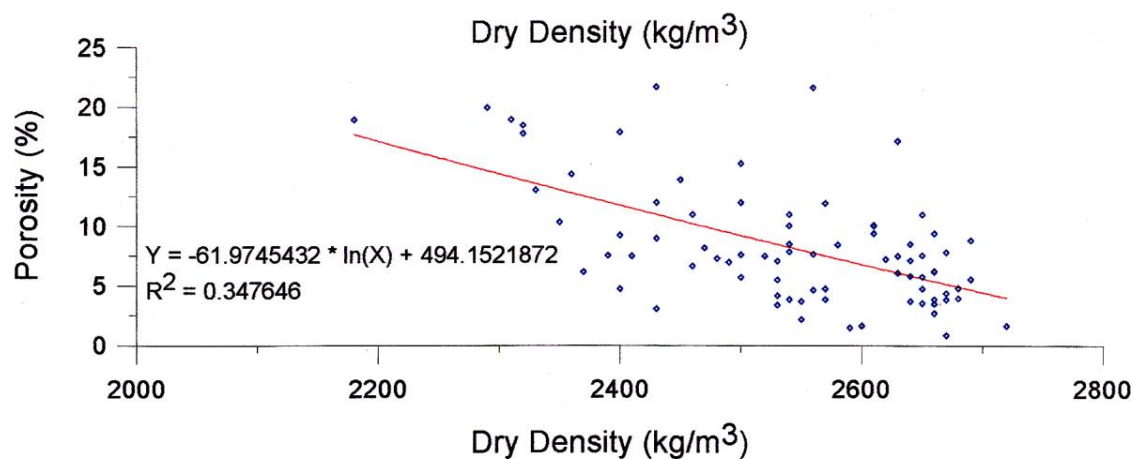
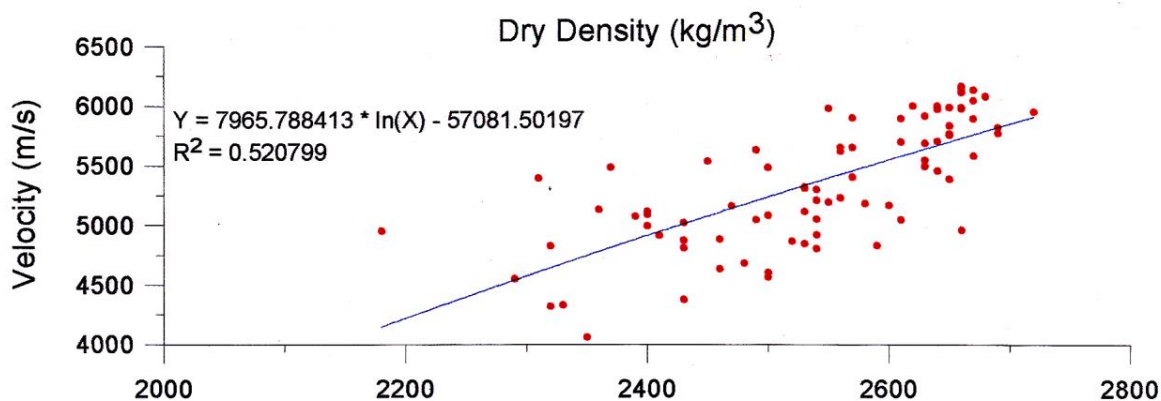
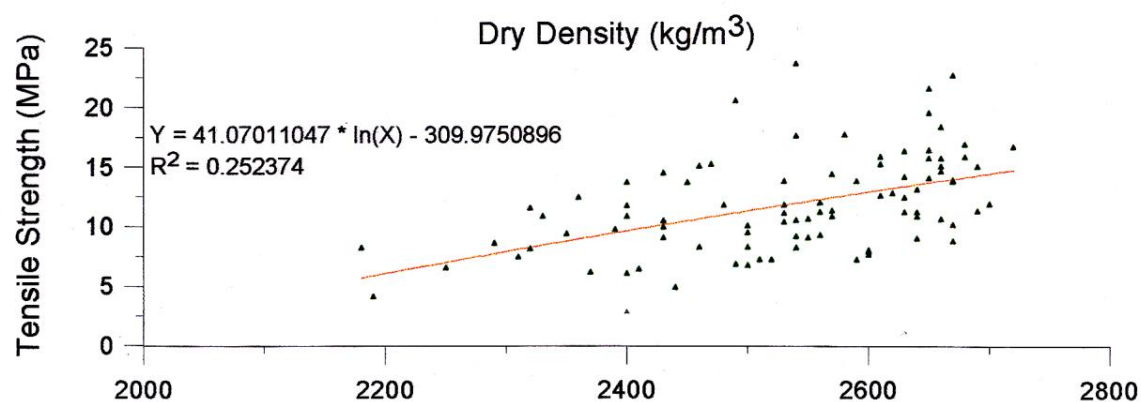
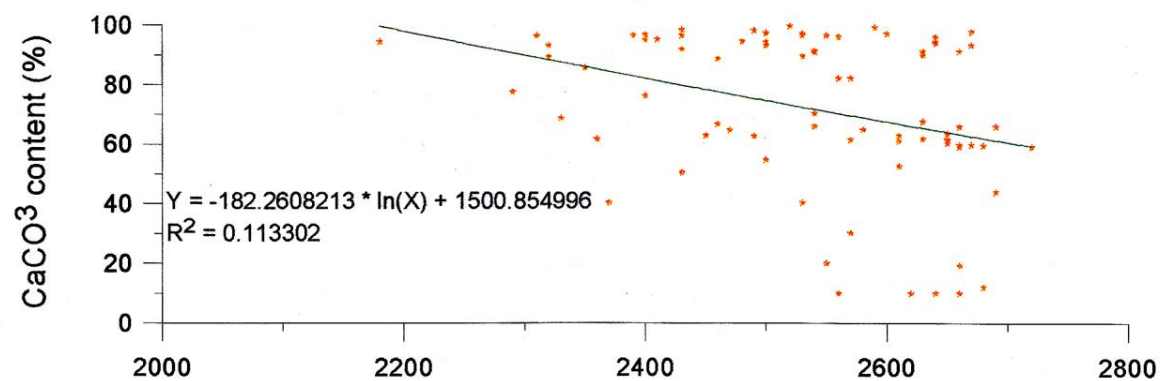
IV. המחבר מר עמוס אקר

נספח מס' I. פרמטרים גיאוטכניים מדודים של סלעים מהתצורות: עמינדב, ורדים,

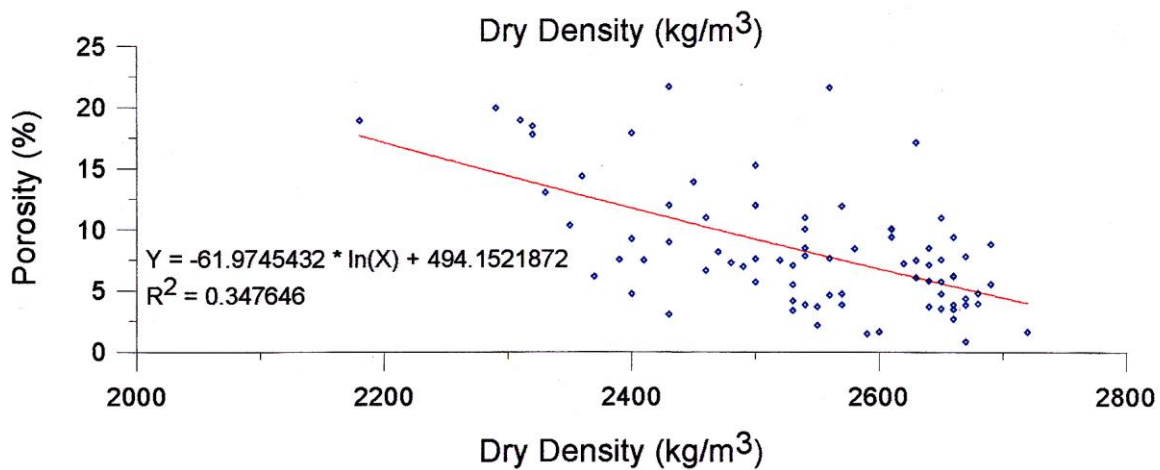
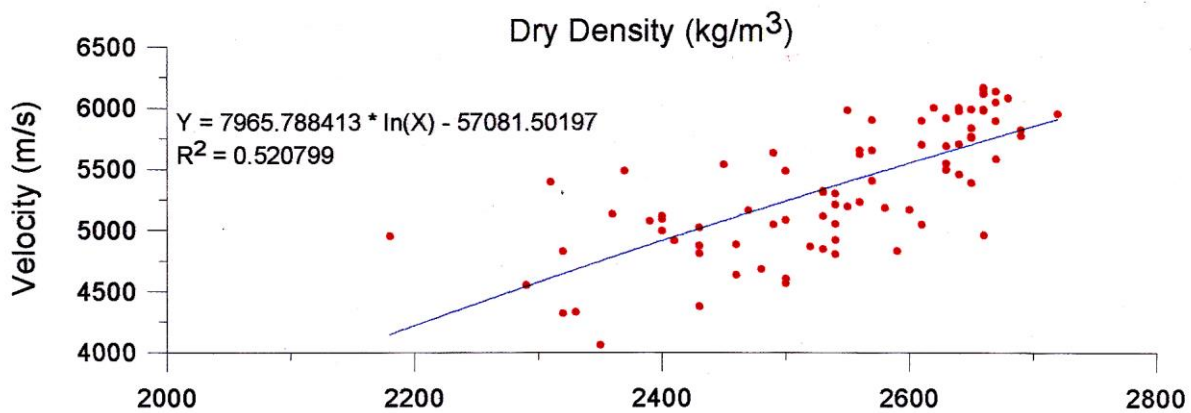
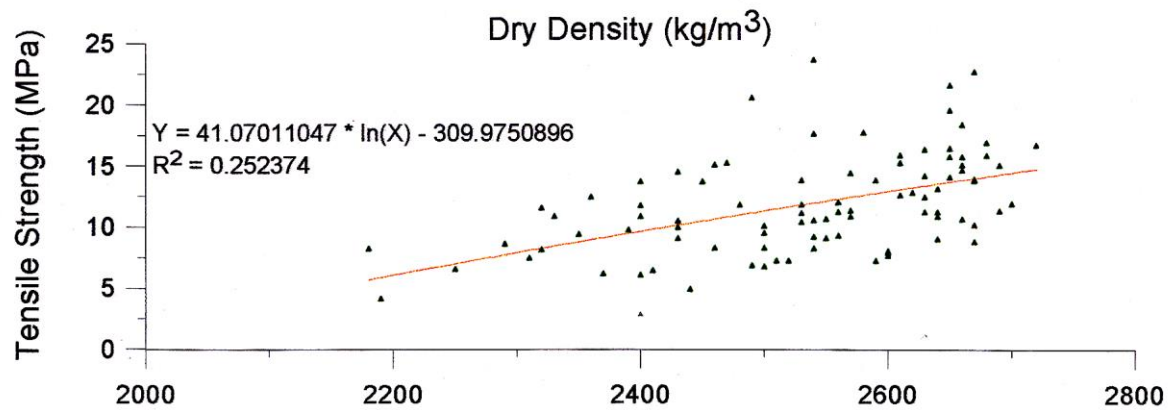
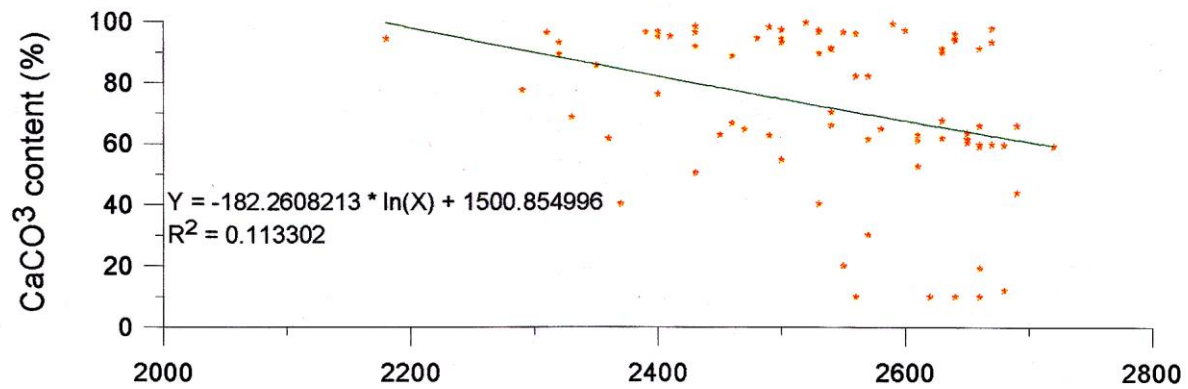
כפר שאול, בינה ומנוחה.



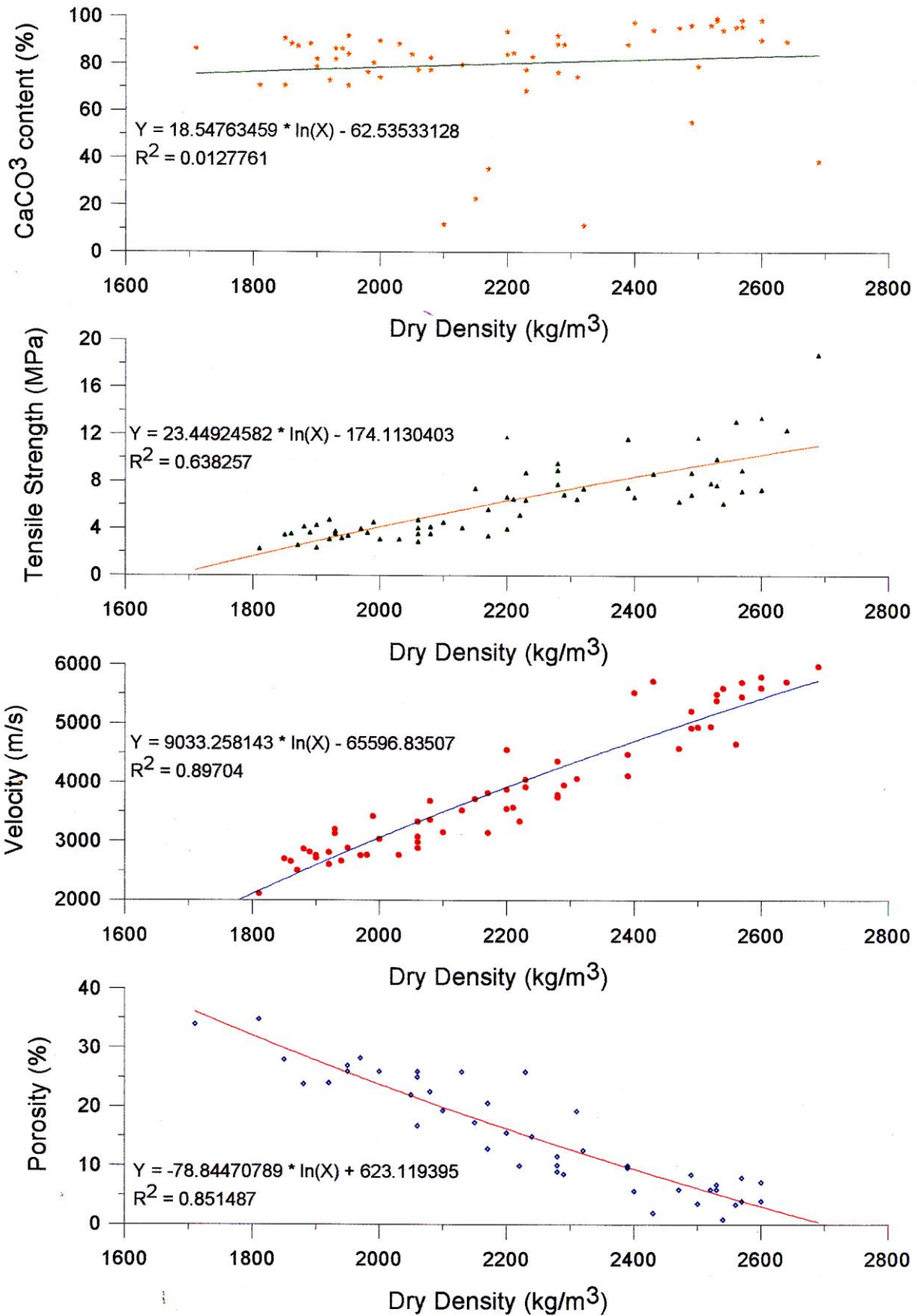
נספח מס' I (המשך) פרמטרים גיאוטכניים מדודים של סלע בתצורת עמינדב.



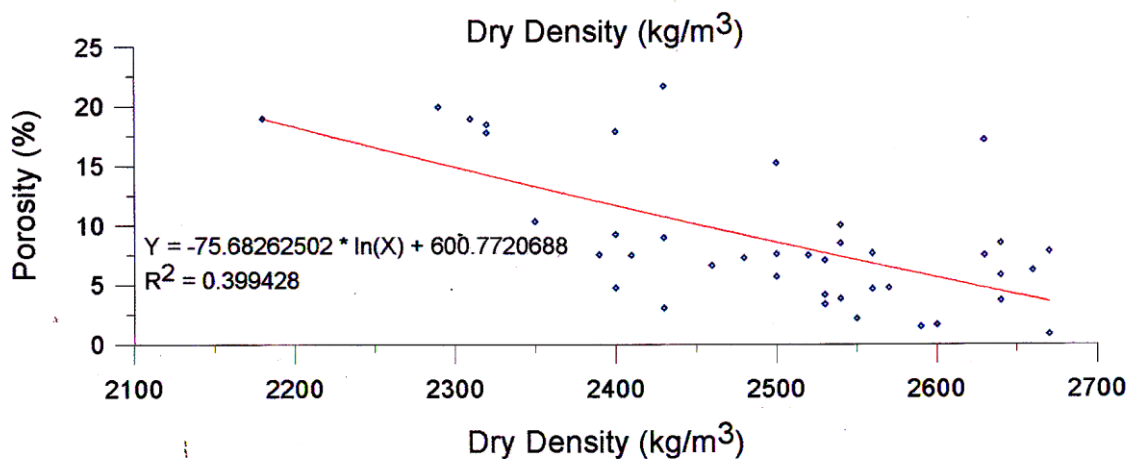
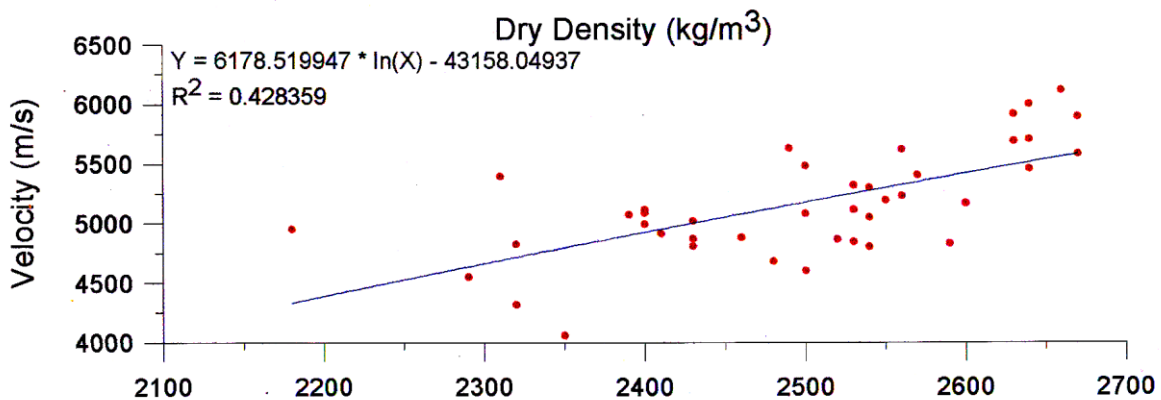
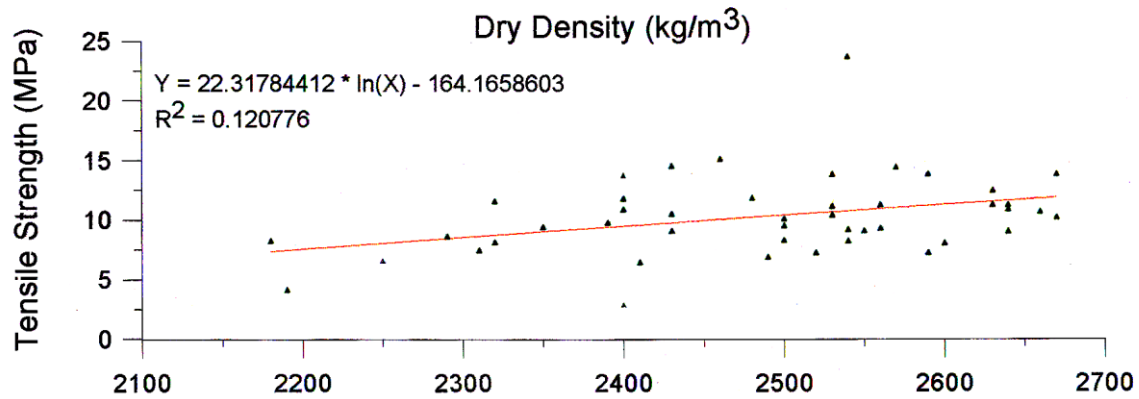
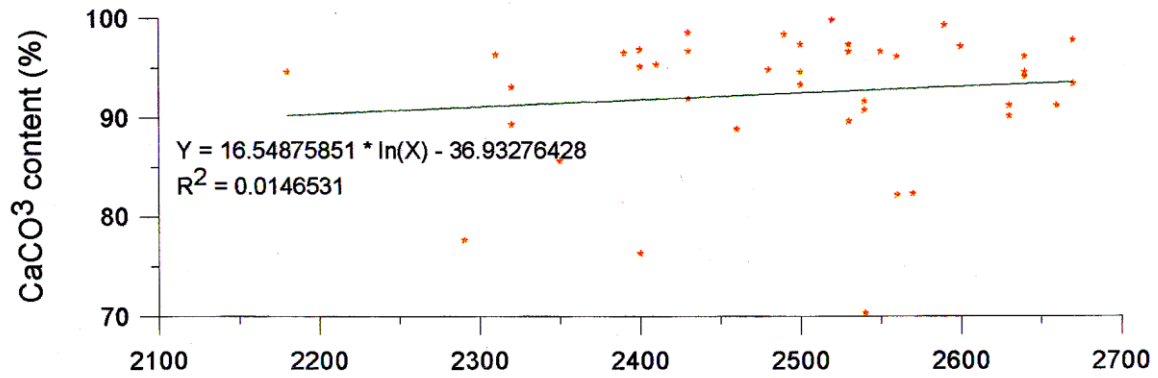
נספח מס' I (המשך) פרמטרים גיאוטכניים מדודים של סלע בתצורת ורדים.



נספח מס' I (המשך) פרמטרים גיאוטכניים מדודים של סלע בתצורת כפר שאול.



נספח מס' I (המשך) פרמטרים גיאוטכניים מדודים של סלע בתצורת בינה
 פרמטרים גיאוטכניים מדודים של סלע בתצורת מנוחה.



נספח מס' II מונחון

אקויפר – סלע נקבובי המכיל מים הניתנים לשאיבה. או לזרימה חופשית

Ku – סימון גיאולוגי לקרטיקון עליון (ראה מקרא באיור מס 4')

KPa – קילו פסקל.

MPa – מגה פסקל.

Q – איכות הסלע Rock Quality (Barton et al., 1974)

RQD – דירוג איכות הסלע. Rock Quality Designation (Deere et al., 1974)

RMR - דירוג מסת הסלע. Rock Mass Rating (Bieniawski 1980)

Φ – זווית החיכוך ($^{\circ}$) Friction Angle

$\emptyset$ – זווית החיכוך הפנימית ($^{\circ}$) Internal Friction Angle

Gs - משקל סגולי

γ_d – צפיפות יבשה

PI – מדד הפלסטיות (%)

PL – גבול הפלסטיות (%)

LL – גבול הנזילות (%)

Sc – חוזק ללחיצה חד צירית (Mpa)

St – חוזק למתיחה (Mpa)

V – מהירות גל קול (מ"/שנייה)

SL – גבול ההתכווצות

FS – התנפחות חופשית

C – קוהזיה (ק"ג/ס"מ²)

ד"ר יעקב ארקין נולד בירושלים בשנת 1935, גדל באוסטרליה ומאז שנת 1959 גר שוב בירושלים, ישראל. בשנת 1957 קיבל תואר B.Sc. בגיאולוגיה באוניברסיטת Western Australia. בשנת 1975 קיבל תואר DIC ו-M.Sc. בגיאולוגיה הנדסית ב- Imperial College of Science and technology, London ובשנת 1986 קיבל תאר Ph.D. בגיאולוגיה הנדסית ב- University of London, U.K.

פעילויותיו השונות כללו עבודות במכון הגיאולוגי הפדראלי של אוסטרליה, ראש צוות ישראלי של עזרה טכנית גיאולוגית באתיופיה מטעם המחלקה לשיתוף בינלאומי (מש"ב) במשרד החוץ, סגן מנהל המכון הגיאולוגי של אתיופיה, מרצה באוניברסיטה של אדיס אבבה, מנהל מחלקת המיפוי במכון הגיאולוגי של ישראל, מרצה חוץ באוניברסיטת בן גוריון בנגב, מדריך חיצוני באוניברסיטת מדינת ניו יורק, Rockland Center for International Studies פרופסור חוקר אורח בשבתון בשנת 1990 באוניברסיטה של קנט במדינת אוהיו, ארצות הברית. בשנת 1991 נבחר ל- "פי בטא דלתא", חברת כבוד עבור תלמידים בינלאומיים באוניברסיטת קנט. בשנת 1998 היה באוניברסיטה של נבדה בלאס וגאס בשבתון במעמד של פרופסור חוקר אורח.

בשנת 1975 ייצג את ישראל בוועדה הבינלאומית למפה הגיאולוגית של העולם, אזור המזרח התיכון. באותה שנה זכה בפרס של ה- British Council. בין השנים 1992-93 כיהן כנשיא החברה הגיאולוגית של ישראל. בשנת 1993 זכה בפרס ארצי של נציבות שרות המדינה עבור מצוינות.

ד"ר יעקב ארקין היה חבר במספר ועדות של פרויקטים לאומיים בהנדסה אזרחית כמו למשל הפרויקט ההידרואלקטרי ים תיכון – ים המלח.

כיום, פעילויותיו כחוקר בכיר במכון הגיאולוגי של ישראל כוללות עבודות מעשיות ומחקריות בנושאים גאוטכניים, פרויקטים בביצוע המעורבים עם גיאולוגיה הנדסית של גשרים, מנהרות ובעיות יציבות, בעיקר סביב ירושלים ומחקרים על סדקים פתוחים ותהליכים גיאולוגיים פעילים, שניהם על הקרקע תוך שימוש בטכניקות של חישה מרחוק כמו נתונים דיגיטאליים והדמיות רדאר מלווין.

כיום הוא אמריטוס ומעורב במחקרים עכשוויים של תזוזת הקרקע בבקעת הירדן והמשמעות הטקטונית.

עמוס אקר נולד בישראל בשנת 1934. קיבל תואר M.Sc. בגיאולוגיה באוניברסיטה העברית בירושלים בשנת 1962. מאז שנת 1960 עובד במכון הגיאולוגי של ישראל בעיקר בנושא ההידרוגיאולוגיה. מחקריו בשטח זה התמקדו באקויפר החוף של ישראל והתבטאו בעבודות מפורטות על הגיאולוגיה וההידרולוגיה של אקויפר הפלייסטוקן. מחקריו האחרים בהידרוגיאולוגיה של ישראל כללו גם את האקויפר הקרבונאטי באזור ירושלים, מדבר יהודה ואגן ירקון-באר שבע ודנו באפשרויות של אספקת מים לאזורים אלה.

עמוס אקר היה חבר במשך 15 שנים בוועדות הקידוחים של נציבות המים וחברת המים מקורות. בשנים האחרונות בנה במכון הגיאולוגי בסיס נתונים ממוחשב של קידוחי המים של ישראל. בשנת 1999 ערך את האטלס של החתכים הגיאולוגיים ומפות תת-הקרקע של אקויפר החוף בישראל.

עמוס אקר עבד כ- 8 שנים בהפסקות כהידרוגיאולוג במספר מדינות מחוץ לישראל. באקוודור היה גיאולוג-ראש צוות קודחים ישראלים של חברת ורד שעסקו בקדיחת קידוחי מים. בארגנטינה וצ'ילה היה הידרוגיאולוג בצוות תכנון חקלאי מטעם המחלקה לשיתוף בינלאומי (מש"ב) של משרד החוץ. באיים הקנאריים הצטרף לאונסקו למשך יותר משנתיים כדי לחקור את התנהגות מי התהום באקויפר הוולקני שבאי טנריפה. בהונדורס היה מנהל פרויקט הידרוגיאולוגי מטעם חברת תה"ל. בבורמה הצטרף ליוניצף לפרוייקט קדיחה של 3000 קידוחים לאספקת מי שתייה נקיים. בפרו יעץ לחברה פרטית בנושא פתוח מקורות מים באזור צחיח. ולאור"ם באיי כף ורדה ובאי צ'ה ג'ו (דרום קוריאה). יעץ לאו"ם (UNDP) כיום הוא חוקר אמריטוס במכון הגיאולוגי של ישראל.

