

# **שונית אלמוגים חוגרת במי נמל אילת במהלך ההולוקן - יצירה, קבורה והעתקה**

עבודת גמר לתואר מוסמך במדעי הטבע

מוגשת על ידי:

**אסנת ברנע**

בהדרכת:

פרופ' אמוץ עגנון

פרופ' מוטי שטיין

ד"ר יוני שקד

27.7.16

כ"א תמוז תשע"ו

החוג לגיאולוגיה

המגמה למדעי כדור הארץ

הפקולטה למדעי הטבע

האוניברסיטה העברית בירושלים

## הכרת תודה

ראשית ברצוני להודות למדריכי פרופ' אמוץ עגנון, פרופ' מוטי שטיין וד"ר יוני שקד. לפרופ' אמוץ עגנון על הליווי המקצועי כשהייתי זקוקה לו, הזמינות וההבנה. תודה על האפשרות ללמוד על מגוון תחומים, על הזכות למפגש עם אנשים מקצועיים, להכיר מערכות וכלי מחקר ולהשתתף בכנסים. לפרופ' מוטי שטיין על ההדרכה הרבה בתהליך הכתיבה, העזרה המקצועית והסבלנות. ליוני שקד על ההדרכה והעצות המועילות בכתיבה מקצועית.

לד"ר איציק בריקנר על העזרה המקצועית עם דוגמאות האלמוגים.

למשה פוליתי, ד"ר בני מדבדב על העצות המקצועיות והזמינות הגבוהה.

לד"ר ג'ון הול על התרומה המקצועית, העצות והציוד המתקדם במרכז ניב.

לחברי שטרוח מזמנם ויצאו איתי לאסוף נתונים: ארז האסול, אלי רם, יוסי לוי סרי, יניב דרבסי, יונתן קינן, עידו סירוטה, איגנה בויאנז'ו ואביתר כהן.

לאמי על התמיכה ועזרה בהגהה.

מעין יהודאי על קבצי חישוב גיל שלה במערכת האורניום תוריום.

שקד אבני שתרמה רבות בעבודות המעבדה (תארוך דוגמאות ה-U-Th).

נטע כהן בר על העצות הטובות בהתנהלות בתואר שני והתאקלמות באוניברסיטה העברית.

תודה גם לחברי הועדה פרופ' בעז לזר וד"ר עדי טורפשטיין על העצות הטובות, ההנחיה, ההתעניינות והערותיהם התורמות.

## תקציר

במסגרת סקר גיאוטכני במפרץ אילת נקדחו גלעיני סדימנט בקרקעית הנמל והתקבלו נתונים על ההיסטוריה הסדימנטרית והטקטונית של אזור נמל אילת במהלך ההולוקן. בבסיס החתך הסדימנטרי של הגלעינים מופיעה יחידת סדימנט סחף יבשתי. מעליה מונחת יחידה עם מאובני אלמוגים המעידים על התפתחות שונית באזור נמל אילת בעומקים של 15.5 מטר ועד 21.5 מטר מתחת למפלס הים. מעל יחידת האלמוגים מונחת יחידת סחף ימית.

האלמוגים שימרו את הרכבם הארגוניטי ואת הטקסטורות המקוריות. רוב האלמוגים שזוהו שייכים למשפחת ה-Faviidae ונמצאו גם מספר אלמוגים השייכים לסוג *Stylophora*. אלמוגים אלו (ונוספים שזוהו במאסף) מאפיינים את הסביבה הרדודה של שונית חוגרת.

קצב ההצטברות האנכית של אלמוגי השונית, 1-2 מטר לאלף שנה. קצבי ההצטברות נמצאים בחלקו התחתון של טווח התפתחויות שוניות חוגרות באוקיינוס ההודי פסיפי. קצב ההצטברות הנמוך יכול לנבוע מכך שהאזור בשונית החוגרת שנחשף בקידוחי נמל אילת רדוד יחסית ולכן, ההתפתחות האנכית מוגבלת.

תארוך דוגמאות שלדי אלמוגים בשיטת פחמן 14 מעיד כי מרבית הגילים נעים בין 3.2-6.5 אלפי שנים לפני ההווה. מעט אלמוגים עתיקים יותר, בין 9.1 שנים לפני ההווה ל-6.5 אלפי שנים. מספר אלמוגים מצומצם שגילם בין 2.0-3.2 אלפי שנים נמצאו ואלמוג בודד תוארך לגיל של 600 שנה.

השונית מתעדת לראשונה את עליית מפלס ים סוף לפני 6.5-9.1 אלפי שנה.

עם עליית מפלס הים בעקבה לפני כ-9000 שנים החלה להתפתח השונית באזור הנמל על גבי מניפת סחף יבשתי. השונית שגשגה בתקופה שבה (3.2-6.5 אלפי שנים) מפלס הים יחסית יציב (ידוע ממחקרים קודמים). לפני כ-3200 שנים סדימנט סחף באזור הנמל קבר את השונית ומנע את התפתחות של האלמוגים למשך כאלף שנים. התפתחות מחודשת חלה במספר אזורים על גבי השונית שפסקה לפני כאלפיים שנים. להערכתנו, פעילות העתק נורמלי הובילה להסטה של השונית יחד עם קבורה שלה תחת סדימנט סחף.

גיל דוגמא יחיד של כ-600 שנים לפני ההווה נמצא, מעיד על התפתחות מקומית מאוחרת לשונית.

הפעילות הטקטונית באזור הנמל (לפני כאלפיים שנים) הינה של מקטע מהעתק אילת הנורמלי המקביל לחוף ומופה במחקר זה במזח הדרומי על ידי סקר בתימטרי. ענף אחד של ההעתק מופה בעבר באזור החוף והמקטע שזוהה במחקר זה עשוי לייצג ענף נוסף של ההעתק הפעיל בתוך מי הנמל.

## **תוכן עניינים**

### **1. רקע**

- 1.1 מפרץ עקבה, מאפיינים כלליים.....1
- 1.1.1 נוף מפרץ עקבה והבתימטריה שלו.....1
- 1.1.2 טרסות ימיות.....2
- 1.1.2.1 מבנה השונית החוגרת.....3
- 1.1.2.2 התפתחות שונית אלמוגים.....4
- 1.2 שחזורי מפלס ים.....5
- 1.2.1 שינוי מפלס הים מתקופת הרביעון התיכון ועד היום בצפון מפרץ עקבה.....6
- 1.3 מערכות ההעתקים בצפון מפרץ עקבה.....6
- 1.3.1 העתק עברונה.....8
- 1.3.2 העתק אילת.....8
- 1.4 סוגיות על הפרק.....9
- 2. מטרות.....10

### **3. שיטות**

- 3.1 אזור המחקר.....10
- 3.2 שקפי אלמוגים.....12
- 3.3 מדידות XRD.....12
- 3.4 תארוך בשיטת פחמן רדיוגני.....13
- 3.5 תארוך בשיטת ארניום תוריום.....15
- 3.6 סקר בתימטרי.....17
- 3.7 תוכנות עיבוד נתונים.....18

### **4. תוצאות**

- 4.1 סטרטיגרפיה וליתולוגיה של הגלעינים.....19
- 4.1.1 הרכב ליתולוגי של היחידה הקלסטית התחתונה.....24
- 4.1.2 הרכב יחידת האלמוגים.....26
- 4.1.3 הרכב ליתולוגי של היחידה הקלסטית העליונה.....26
- 4.1.4 הרכב יחידת המילוי המלאכותי.....27
- 4.2 יחידת האלמוגים.....28

|    |                                    |
|----|------------------------------------|
| 28 | 4.2.1 מבנה מרחבי של יחידת האלמוגים |
| 32 | 4.2.2 כרונולוגיה של יחידת האלמוגים |
| 32 | 4.2.2.1 תוצאות בדיקות XRD          |
| 32 | 4.2.2.2 שקפים פטרוגרפיים           |
| 33 | 4.2.2.3 תארוך בשיטת פחמן 14        |
| 35 | 4.2.2.4 תארוך בשיטת U-Th           |
| 36 | 4.2.3 מיון אלמוגים                 |
| 38 | 4.3 סקר בתימטרי במזח הדרומי        |

## 5. דיון

|    |                                                                             |
|----|-----------------------------------------------------------------------------|
| 40 | 5.1 מבוא                                                                    |
| 40 | 5.2 סביבות ההשקעה של הסדימנטים בנמל אילת                                    |
| 41 | 5.2.1 היחידה הקלסטית התחתונה                                                |
| 41 | 5.2.1.1 תת היחידה העמוקה של היחידה הקלסטית התחתונה                          |
| 42 | 5.2.1.2 תת היחידה העליונה של היחידה הקלסטית התחתונה                         |
| 43 | 5.2.2 יחידת האלמוגים                                                        |
| 43 | 5.2.2.1 הרכב היחידה                                                         |
| 43 | 5.2.2.2 שימור שלדי האלמוגים                                                 |
| 44 | 5.2.2.3 אפיון יחידת האלמוגים כשונית                                         |
| 45 | 5.2.2.4 סביבת התפתחות השונית ומאפייניה                                      |
| 45 | 5.2.2.4.1 מיון האלמוגים ככלי להבנת מאפייני שונית האלמוגים ובית הגידול       |
| 47 | 5.2.2.5 חדירת חומר דטריטי לשונית האלמוגים                                   |
| 48 | 5.2.2.6 השפעת הנחלים על התפתחות השונית                                      |
| 50 | 5.2.3 היחידה הקלסטית העליונה ויחידת המילוי המלאכותי                         |
| 51 | 5.3 היסטורית של התפתחות שונית האלמוגים בנמל אילת                            |
| 55 | 5.3.1 התפתחות שונית האלמוגים בנמל אילת בהשוואה לעקומת מפלס הים של מפרץ עקבה |
| 57 | 5.4 היבטים טקטוניים                                                         |
| 57 | 5.4.1 עדויות לפעילות טקטונית מנתוני הקידוחים                                |
| 60 | 5.4.2 עדויות לפעילות טקטונית מנתונים בתימטריים                              |
| 65 | 6. סיכום - היסטוריה גיאולוגית, סביבות השקעה ופעילות טקטונית באזור נמל אילת  |
| 66 | 6.1 היחידה הקלסטית התחתונה                                                  |
| 66 | 6.2 יחידת האלמוגים                                                          |

|         |                                                                     |
|---------|---------------------------------------------------------------------|
| 68..... | 6.2.1 הסטה נורמלית של העתק אילת לפני כאלפיים שנה.....               |
| 68..... | 6.2.2 ייחודיות גילי האלמוגים.....                                   |
| 68..... | 6.3 היחידה הקלסטית העליונה ויחידת המילוי המלאכותי.....              |
| 70..... | רשימת ספרות.....                                                    |
| 75..... | נספח גרף גילי אורניום תורים.....                                    |
| 76..... | נספח תאור שקפים פטרוגרפיים.....                                     |
| 83..... | נספח תוצאות XRD.....                                                |
| 84..... | נספח תאור תת היחידה העמוקה במזח הדרומי, היחידה הקלסטית התחתונה..... |
| 85..... | נספח חתכים גיאולוגיים.....                                          |

## תוכן איורים

- איור 1.1 : מבנה מפרץ עקבה והבתימטריה של ראש המפרץ. ....1
- איור 1.2 : מפת שוניות האלמוגים המודרניות בים סוף (Wilkinson, 2008). ....2
- איור 1.3 : שרטוט שכמתי של מבנה שונית חוגרת. ....3
- איור 1.4 : טרסות ימיות בצפון מערב מפרץ עקבה. ....4
- איור 1.5 : עקומת מפלס ים החל מהרביעון המאוחר. ....6
- איור 1.6 : מפה בתימטרית ומערכות ההעתקים הראשיות ע"פ Makovsky et al. (2008). ....7
- איור 1.7 : מפה בתימטרית ומערכות ההעתקים הראשיות מפרופילים סייסמיים על פי הדוקטורט של Hartman (2012). ....7
- איור 1.8 : מפה גאולוגית של צפון מפרץ עקבה, עליה מסומנות מספר הערכות בנוגע למיקום העתק אילת בתוך המפרץ (Hartman, 2012). ....9
- איור 3.1 : מפת מפרץ עקבה וים סוף עם סימון אזור המחקר. ....10
- איור 3.2 : מפת לווין של צפון מפרץ עקבה עם סימון אזור נמל אילת. ....11
- איור 3.3 : מפת לווין של אזור נמל אילת. ....11
- איור 3.4 : תמונת בינוקולר ששימש לצילום השקפים. ....12
- איור 3.5 : גרף שכמתי של פיזור נתונים סביב קו מגמה. ....15
- איור 3.6 : שרשרת ההתפרקות של  $^{238}\text{U}$  (Bourdon et al., 2003). ....16
- איור 3.7 : מפת לווין של אזור נמל אילת. בכחול מסומן מסלול הסירה בסקר הסונאר. ....18
- איור 4.1.1 : חתך סטרטגרפי של שורת הקידוחים הרחוקה מהחוף במזח הצפוני. ....20
- איור 4.1.2 : חתך סטרטגרפי של שורת הקידוחים הסמוכה לחוף במזח הצפוני. ....21
- איור 4.1.3 : חתך סטרטגרפי של שורת הקידוחים הרחוקה מהחוף במזח הדרומי. ....22
- איור 4.1.4 : חתך סטרטגרפי של שורת הקידוחים הסמוכה לחוף במזח הדרומי. ....23
- איור 4.1.5 : תמונות של דוגמאות יד מהיחידה הקלסטית התחתונה. ....24
- איור 4.1.6.1-4.1.6.4 : תמונות תחת בינוקולר של תת היחידה העמוקה ביחידה הקלסטית התחתונה. ....25
- איור 4.1.7.1 : דוגמאות אלמוגים מקידוח K-7. ....26
- איור 4.1.7.2 : דוגמאות יד מיחידת האלמוגים. ....26
- איור 4.1.8.1 : דוגמת יד מהיחידה הקלסטית העליונה. ....27
- איור 4.1.8.2 : התפלגות גדלי גרגר בעומקים שונים לקידוח K-6 מהיחידה הקלסטית העליונה. ....27
- איור 4.1.9 : שתי תמונות של דוגמאות מיחידת המילוי המלאכותית. ....28

- איור 4.2.1.1 : גרף תלת ממדי של יחידת האלמוגים בקידוחי המזח הצפוני.....28
- איור 4.2.1.2 : גרף תלת ממדי של יחידת האלמוגים בקידוחי המזח הדרומי.....29
- איור 4.2.2.1 : מפת לוויין עם סימוני קידוחי הנמל וקידוחים קודמים.....30
- איור 4.2.2.2 : מפת איזופך של יחידת האלמוגים.....31
- איור 4.2.3 : חתכים של החלק העליון של שמונת הקידוחים שנלקחו לתארוך פחמן 14 עם הצגת הגילים על גביהם.....34
- איור 4.2.4 : חתכים של החלק העליון של שמונה קידוחים עם הצגת משפחות האלמוגים על גביהם.....37
- איור 4.2.5 : מפת לוויין של אזור המזח הדרומי עם נקודות הדיגום בסונאר.....38
- איור 4.2.6 : גרף השוואה בין ערכי העומק שהתקבלו ממדידות הסונאר לעומק הנמדד בקידוחים.....38
- איור 4.2.7 : מפה בתימטרית ברזולוציות 2 מטר של המזח הדרומי.....39
- 
- איור 5.2.1 : מפת לוויין של אזור הנמל עם סימון נחלים פוטנציאליים למקור סחף.....42
- איור 5.2.2 : מפת המכון הגיאולוגי המציגה את הקידוחים שיחידת האלמוגים נעדרת בהם.....44
- איור 5.2.3 : דוגמת אלמוג *Favia fava*.....46
- איור 5.2.4.1 : גרף השוואה בין גילי פחמן 14 לגילי אורניום תוריום עם תיקון דטרטי של 1.....48
- איור 5.2.4.2 : גרף השוואה בין גילי פחמן 14 לגילי אורניום תוריום עם תיקון דטרטי של 1.8.....48
- איור 5.2.5 : מפה בתימטרית ברזולוציות 2 מטר ואפיקי הנחלים שבאזור.....49
- 
- איור 5.3.1 : גרף גילי האלמוגים מתארוך פחמן 14 כפונקציה של העומק.....51
- איור 5.3.2 : גילי פחמן 14 כפונקציה של העומק עבור כל קידוח.....52
- איור 5.3.3 : קצבי הצטברות אנכיים לכל שתי דוגמאות סמוכות מול הגיל.....53
- איור 5.3.4 : מפה בתימטרית תלת ממדית של אזור המזח הדרומי. היבט ממזרח.....54
- איור 5.3.5 : עקומת מפלס עקבה ממחקרים קודמים יחד עם הצגת נתוני מחקר זה.....56
- 
- איור 5.4.1 : דוגמאות לקידוחים ניצבים לחוף שיתכן שביניהם חלה העתקה.....57
- איור 5.4.2 : מפת לוויין שעל גביה מסומנים הקידוחים ואתר המחקר של Shaked et al. (2004).....58
- איור 5.4.3 : עקומת מפלס עקבה משולבת עם עקומות קצבי התפתחות של שוניות חוגרות מהאוקיינוס ההודי-פסיפי.....59
- איור 5.4.4 : מפת שיפועים של אזור המזח הדרומי.....61
- איור 5.4.5.1 : מפה בתימטרית של המזח הדרומי עם מיקום חתכי רוחב.....62
- איור 5.4.5.2 : חתך רוחב במקביל לחוף במזח הדרומי.....62
- איור 5.4.5.3 : חתך רוחב 1 בניצב לכיוון החוף במזח הדרומי.....63
- איור 5.4.5.4 : חתך רוחב 2 בניצב לכיוון החוף באזור המזח הדרומי.....63
- איור 5.4.6 : מפה בתימטרית של המזח הדרומי שעל גביה סימון משוער למיקום ההעתק.....64

איור 5.4.7 : איור מתוך Makovsky et al. (2008), מדרון צפון מערב מפרץ עקבה.....65

איור 6.1 : שרטוטים סכמתיים של היסטוריית התפתחות השונות.....67

איור 6.2 : שרטוט סכמתי של פעילות שני ענפי העתקי איל באזור הנמל.....68

איור a-z, a1-z1, a2-f2: תמונות מדגמיות של שקפי אלמוגים.....76

איור 7.1,7.2 : חתכים גיאולוגיים.....85

## תוכן טבלאות

טבלה 1 : תוצאות מדידות פחמן 14.....33

טבלה 2 : ריכוז תוצאות תארוך אורניום – תוריום וריכוזי איזוטופים.....35

טבלה 3 : משפחות האלמוגים שזוהו.....36

טבלה 4 : תוצאות אנליזת שקפים פטרוגרפיים.....75

טבלה 5 : תוצאות ריכוז אחוז הארגוניט בדגימות אלמוגים ממדידות XRD.....83

טבלה 6 : אנליזת היחידות העמוקות של היחידה הקלסטית התחתונה תחת בינוקולר.....84

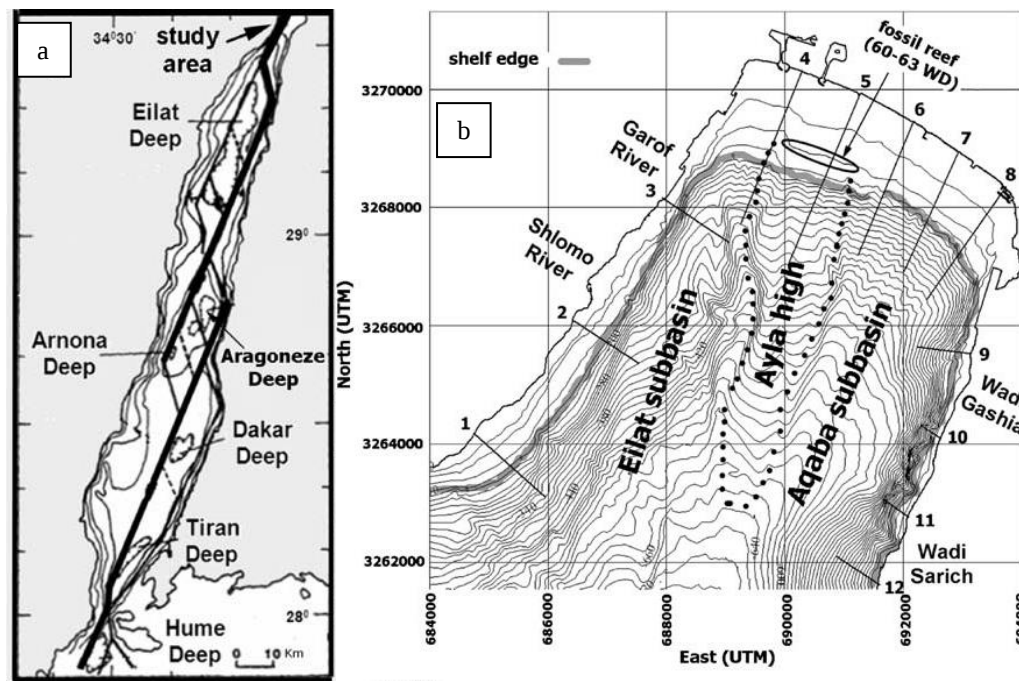
## 1. רקע

### 1.1 מפרץ עקבה, מאפיינים כלליים

השלוחה הצפון מזרחית של ים סוף מכונה מפרץ עקבה/אילת. המפרץ גובל מצפון במדינת ישראל, ממערב בחצי האי סיני וממזרח, ירדן וערב. האקלים השורר באזור חם ויבש, עם משרעת טמפרטורות גבוהה בין היום ללילה. טמפרטורת פני המים הממוצעת בצפון המפרץ נעה בין  $21.8^{\circ}\text{C}$  (פברואר) ועד  $27.8^{\circ}\text{C}$  בקיץ (אוגוסט) (Shaked and Genin, 2014). קצב אידוי מי המפרץ גבוה מקצב ירידת המשקעים (פחות מ-30 מ"מ לשנה ממוצע שנתית). לכן המליחות בים גבוהה, כ-40.3-40.8‰ בממוצע. מפרץ עקבה אוליגוטרופי עקב מיעוט בנגר עילי וכניסת מי שטח דלים בנוטריאנטים מים סוף (Reiss and Hottinger, 1984).

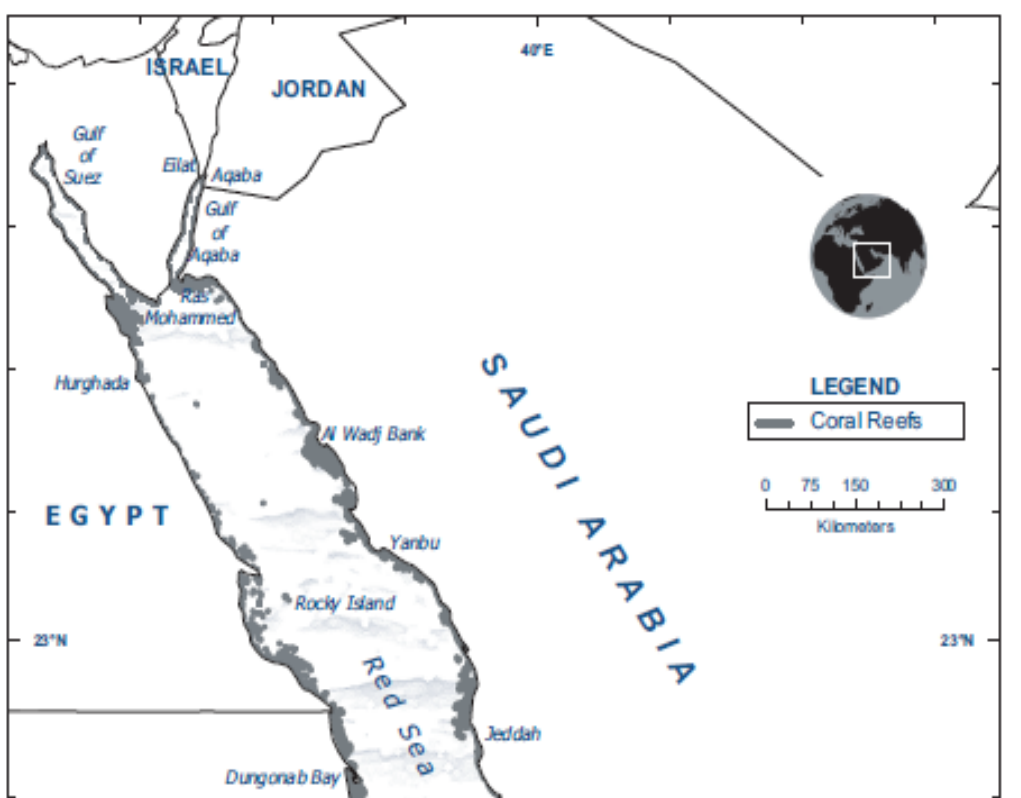
נוף המפרץ נגזר מטקטוניקה מקומית ומוגבל על ידי העתקים. מבנהו א-סימטרי (Tibor et al., 2010; Hall and Ben Avraham, 1978; Ehrhardt et al., 2005). במפרץ שלושה אגני pull apart פעילים ( $20^{\circ}\text{N}$  -  $25^{\circ}\text{E}$ ), מאורכים ומסודרים במבנה מדורג (echelon), ביניהם מיצרים רדודים. הקרקעית מכילה מספר מעמקים (deeps): אילת, דקר, טיראן, ארנונה וארגוזה [איור 1.1a]. הניצבים לאורך המפרץ, במבנה מדורג (Garfunkel, 1970). אורך חלקו הצפוני של מפרץ עקבה [איור 1.1b] כ-8.5 ק"מ ורוחבו 5-8 ק"מ. עומקו המרבי הממוצע 800 מטרים (Tibor et al., 2010).

#### 1.1.1 נוף צפון מפרץ עקבה והבתימטריה שלו



איור 1.1: א- מבנה מפרץ עקבה עם מערכת העתקי הטרנספורם העיקרית וחמשת המעמקים (אילת, ארגוזה וכדומה). ב- מפה בתימטרית של ראש מפרץ עקבה. מוצגים קונטורים כל 20 מטר. הקו העבה הוא נקודת המעבר בין המדף למדרון. תת אגן עקבה, תת אגן אילת ורמת איילה מסומנים (Tibor et al., 2010).

ההרים סביב המפרץ מורכבים מסלעי תשתית פרה-קמברית, סלעים פלוטוניים - מטאמורפיים, שהורמו מעל אלף מטר. דרום הערבה מכוסה בסדימנט מהפלייסטוקן וההולוקן, שעיקרו השקעה נחלית (Garfunkel, 1970). Tibor et al. (2010) חילקו את ראש המפרץ [איור 1.1b] לשלושה גושים: תת אגן אילת, תת אגן עקבה ורמת איילה. האזור המזרחי תלול ועמוק יותר. גבולו הצפוני של המפרץ תחום בחוף בעל נטייה לכיוון צפון מערב. במערב המפרץ רוחב המדף<sup>1</sup> נע בין 400 ל-800 מטר, ולו נטייה ממוצעת של  $3.5^{\circ}$ - $3^{\circ}$ . רוחב המדף קטן בצפון מערב [איור 1b], עד ל-380 מטר. המדרון נשבר בזווית של כ- $55^{\circ}$  נגד כיוון השעון לקו החוף המודרני. המדרון בין דרום ראש המפרץ [איור 1.1b] ל-Elat Deep [איור 1.1a] מתון יחסית בהשוואה לגבולות התלולים במזרח ובמערב. שוניות מודרניות מצויות לאורך כל חופי המפרץ עד עומק של 65 מטרים. השוניות בחוף המזרחי והמערבי של המפרץ [איור 1.2] רציפות כמעט לחלוטין עד קו רוחב  $18^{\circ}$ - $20^{\circ}$ N (Gladstone et al., 2003). במדף הפנימי של חופי העיר אילת, בגבול הצפון מערבי, שוניות מודרניות עד עומק של כ-50 מטר.



איור 1.2 : מפה  
מהדוח של  
Wilkinson  
(2008). במפה צפון  
ים סוף, מפרץ  
עקבה ומפרץ  
סואץ. באפור  
מסומנות השוניות  
המודרניות.

### 1.1.2 טרסות ימיות

בין המבנים התת ימיים שנחקרו, נמצאו טרסות סדימנטריות וטרסות המכילות שוניות מאובנת, במגוון עומקים. העומק משתנה בעיקר כתלות במפלס הים הקדום. הסטת טרסה ממיקומה המקורי, ביחס למפלס הים, יכולה להיות גם תוצר של קרבה להעתק פעיל (Shaked et al., 2004).

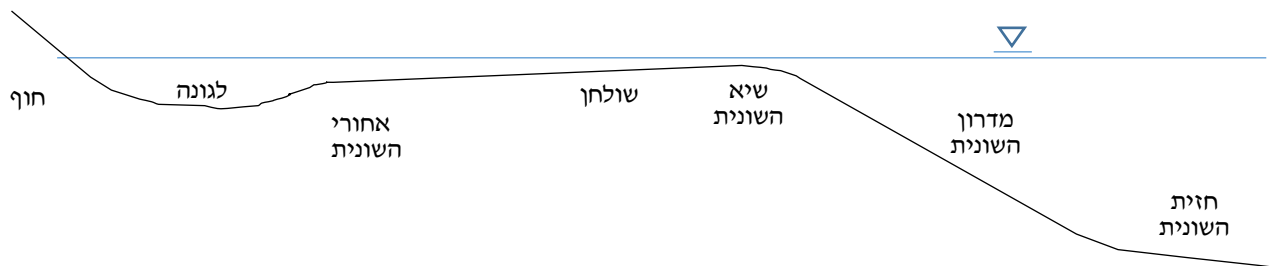
<sup>1</sup> מדף היבשת מוגדר כאזור האופקי (יחסית) במדרגה/בטרסה המסתיים עם תחילת המדרון.

השוניות הקדומות והמודרניות במפרץ עקבה הן שוניות חוגרות (Gladstone et al., 2003).

#### 1.1.2.1 מבנה השונית החוגרת

שוניות חוגרות מתפתחות קרוב לקו החוף ובמקביל לו, על גבי מדף היבשת, במרחק של כמה מאות מטרים מהחוף. השוניות מתפתחות בכפוף לשטח המרחב הפנוי לגדילה.

נהוג לחלק את השונית החוגרת לתת אזורים שלהם הרכב מינים מסוים, התפלגות גדלי גרגר אופיינית וקצב התפתחות שונה של אלמוגים. אחורי השונית ה-back reef, הוא האזור הסמוך לחוף. בין חלק זה של השונית לחוף מתפתחת, לרוב, לגונה [איור 1.3]. לכיוון הים (גובל ב-back reef) מבנה שולחן השונית האופקי יחסית. באזור זה ההתפתחות אנכית עד סמוך לפני הים [איור 1.3]. בקצה השולחן הפונה לכיוון הים אזור שיא השונית (reef crest). השיא מפריד בין שולחן השונית למדרון הקדמי ומתפקד כשובר גלים. המדרון הקדמי של השונית לרוב מחולק למדרון עליון ומדרון תחתון שבהמשכם ה-fore reef, חזית השונית (Mergner, 1971).

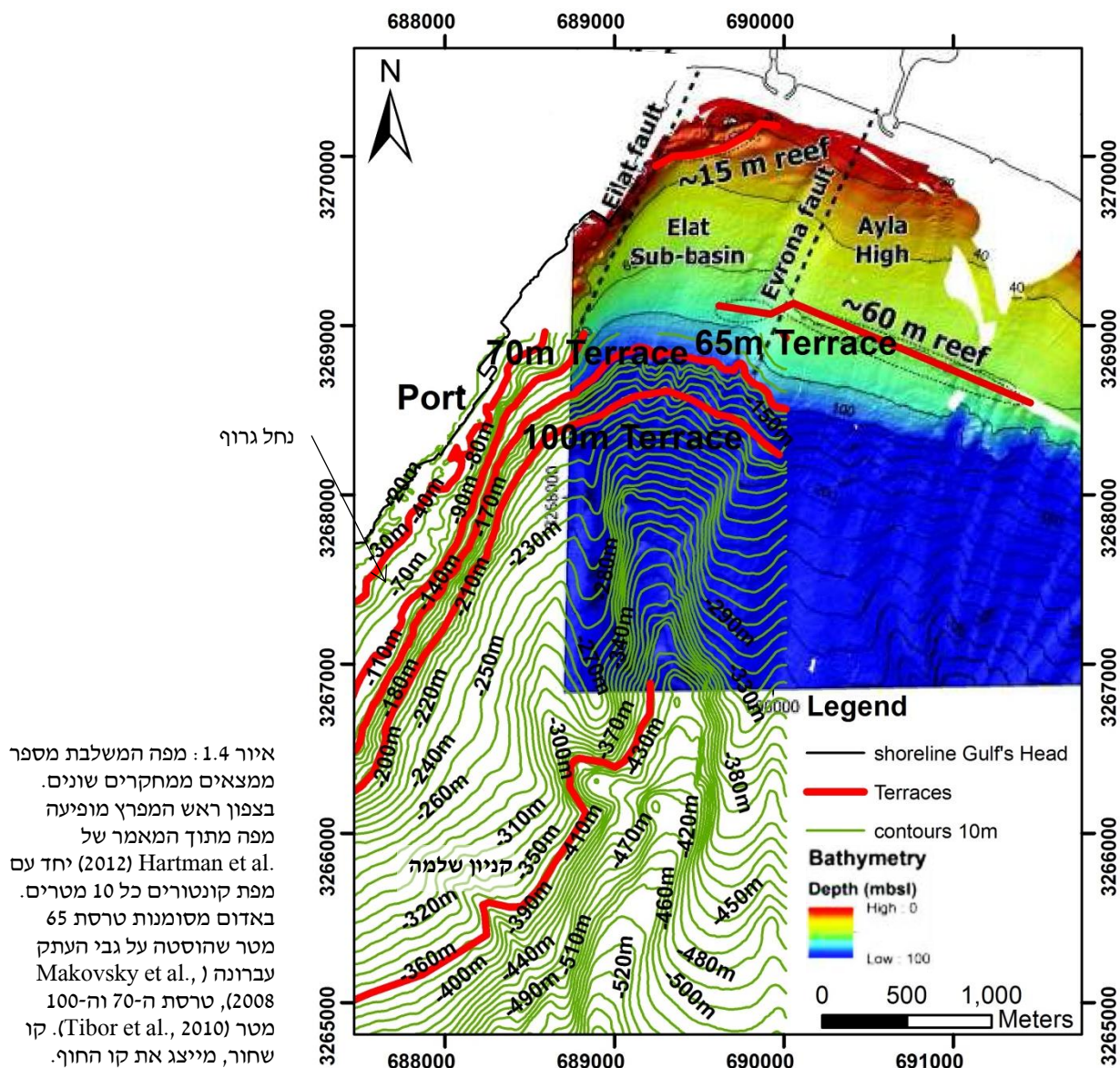


איור 1.3: שרטוט סכמתי של מבנה שונית חוגרת. בסביבה הסמוכה לים מתפתחת לגונה רדודה. שולחן השונית מתפתח לגובה עד סמוך לפני הים. גובה המבנה עשירות מטרים. ההתפרשות מקו החוף ועד קצה חזית השונית נעה בין עשרות למאות מטרים.

שוניות האלמוגים מקנות מידע על מפלס הים, טקטוניקה מקומית, משטר זרמים, טמפרטורה והרכב הכימי של המים בזמן שחיו ומתו. הן משמשות כסמן גיאוכימי, פלאו-תרמי, פלאו-אוקיינוגרפי ואאוסטטי<sup>2</sup> חשוב לסביבה הקדומה (Edwards et al., 1987). לדוגמה, Makovsky et al. (2008) ו-Hartman et al. (2012) חקרו שרידים של מערכות שוניות עמוקות המשתרעות בטווח של כ-15 ו-60 מטר מתחת למפלס הים הנוכחי, לאורך הגבול הצפון מערבי של מפרץ עקבה [איור 1.4]. שרידים אלו מקבילים לחוף המודרני בצפון המפרץ. טרסה ימית נוספת, כמעט רציפה, ממוקמת מהגבול הצפון מערבי למערב רמת איילה, בעומק של 90-110 מטר [איור 1.4]. טרסה אחרת, נפרדת, בעומק של 150-180 מטר. טרסה זו מסתיימת לאורך מדרון שכיוונו צפון מזרח, דרומה מקניון שלמה [איור 1.4]. בקניון אילת, מספר טרסות תלולות בעומק של 350-450 מטר. בחופי עקבה וסיני מצויות טרסות אלמוגים מורמות, אך נעדרות באזור אילת (Shaked et al., 2002). Gvirtzman (1994) מצא מספר טרסות בדרום סיני שגובהן 28-35 מטר מעל מפלס הים הנוכחי. כולן מהרביעון התיכון וההולוקן. בעקבה,

<sup>2</sup> שינוי מפלס ים אאוסטטי- שינוי מפלס הודות לשינוי נפח המים באוקיינוסים או שינוי מבנה האגן. תהליך גלובלי.

בעבודת התזה של Bar (2014), נחקרו מספר טרסות אלמוגים מאותו טווח שנים, בגבהים של 1-40 מטרים מעל מפלס הים הנוכחי.



#### 1.1.2.2 התפתחות שונית אלמוגים

שוניות אלמוגים מייצרות עד 10 ק"ג קלציום קרבונט למ"ר בשנה וקצב הגידול השנתי הממוצע נע בין 2-7 מ"מ לשנה. הקצב המקסימאלי הוא 30 מ"מ לשנה, כאשר מרביתו מושקע בהתפתחות אופקית ולא אנכית (Kennedy and Woodrofe, 2002). בקצה שולחן השונית, ב-reef crest, מתרחשת גדילה נמרצת, לכיוון הים ואילו בשולחן השונית, הגדילה האיטית ביותר (Davies and Marshall, 1980). מבין מגוון השוניות, הסוג שונית חוגרת בעלת קצב הגדילה הגבוה ביותר (Montaggioni and Braithwaite, 2009).

גדילת שוניות האלמוגים מושפעת מגורמים גיאולוגיים כמו פעילות טקטונית. לדוגמא, העתקה נורמלית שמובילה להרמה או הסטה מטה של בלוק שעליו שונית, יכולה להשפיע משמעותית על ההתפתחות של האלמוגים. שונית שהורמה וכעת המרחב הפנוי לגדילה אנכית מצומצם, יכול לעכב ואף להוביל להפסקה לצמיתות של התפתחות האלמוגים. גורמים גיאולוגיים כדוגמת טופוגרפית הקרקעית, סוג המצע רמת ליכוד המצע ורמת הסדימנטציה (Aronson and Precht, 1995) יכולים גם הם להיות רכיבים דומיננטיים בהתפתחות האלמוגים. מצע שאינו אידאלי להתפתחות לדוגמא, או הרחפה ממושכת של סדימנט שפוגעת בכמות קרינת השמש שחודרת למים יכולה לפגוע מאוד בהתפתחות האלמוגים (Montaggioni and Braithwaite, 2009).

ההתפתחות גם מושפעת ממגוון האורגניזמים באזור. לדוגמא, אורגניזמים קודחים יכולים לגרום לנזק רב לשלד האלמוג ולפגוע בהתפתחות. בנוסף, אלמנטים פסיקאליים-אוקיינוגרפיים משפיעים על קצב ההתפתחות כמו, משטר הזרמים. זרמים חזקים יכולים להקשות על התפתחות ואף להוביל לנזק מכאני. מנגד, זרמים המכילים נוטריינטים רבים יכולים לעודד את ההתפתחות. טמפרטורה מתאימה גם כן משפיעה על קצב ההתפתחות יחד עם מידת העכירות של המים (Storlazzi et al., 2003).

ההתפתחות הראשונית העקרית של שונית חוגרת בעיקר היא אנכית. זו התפתחות כתמית של בלטי אלמוגים (Knolls). לאחר שהאלמוגים גדלו עד סמוך לפני הים, מרבית ההתפתחות אופקית, עיקרה לכיוון הים ותלויה ישירות באנרגיית הגלים. בשלב התפתחות זה, בלטי אלמוגים מתאחים, תוך עיבוי המסגרת הקדמית ליצירת מבנה רציף (Cabioch et al., 1999 ; Shaked et al., 2005).

## 1.2 שחזורי מפלס ים

מפלס ים מקומי יחסי מוגדר כגובה פני הים ביחס לנקודת ציון יבשתית. לאורך הזמן הגאולוגי (ולאחרונה ברביעון) מפלס הים ירד ועלה. שינויים במיקום היחסי של הים ופני השטח מעידים על שילוב של שינויים איזוסטטיים<sup>3</sup> ושינויים אוסטטיים. לשינויים העולמיים במפלס המוחלט נוספים שינויים מקומיים. שינויי מפלס אלו הם בעיקר תגובה איזוסטטית לשינויים בחלוקת העומס על קרום כדור"א (לדוגמא, בלשון ים רדודה וצרה חלה ירידה קלה בקרקעית עם הצפה ימית בהשוואה להשפעה של הצפה בים עמוק ורחב). כאשר ידועות ההשפעות האוסטטיות ניתן להחסירן מסך השינוי, ולקבל את השינויים האזוריים, כמו אלו שמקורם בפעילות טקטונית. את מפלס הים היחסי אפשר לגלות באמצעות שוניות אלמוגים (המפלס היה גבוה מגג השונית בזמן חייה), שורשי צמחים יבשתיים (המפלס נמוך היה משורשי הצמחים), מיקום אתרים ארכיאולוגיים (האתר נבנה מעל מפלס הים) ועוד. גם יחידת סלע שהושקעה בסביבת מים מתוקים שמעליה מופיע סדימנט ימי, יכולה להעיד על שינוי במפלס הים, במקרה זה טרנסגרסיה. שיכוב הפוך, יעיד על גרסיה. בנוסף להבנת רצף הארועים מתוך נתונים גאולוגיים, יש לתארך דוגמאות מהאזור הנחקר על מנת לקבל מידע מדויק יותר של הזמנים ולהשוות למחקרים אחרים מאותה התקופה (תארוך באמצעות דנדוכרונולוגיה, פחמן 14, מערכת האורניום-תוריום וכדומה) (Lambeck and Chappell, 2001).

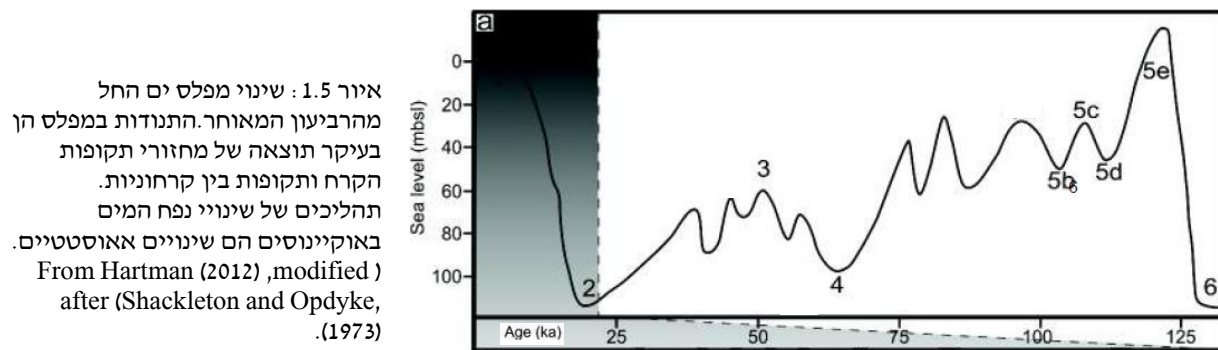
<sup>3</sup> שינויי מפלס ים איזוסטטי- ירידה או הרמה של גובה הקרקעית, משפיע ישירות על גובה המפלס. תהליך מקומי.

### 1.2.2 שינויי מפלס הים מתקופת הרביעון התיכון ועד היום בצפון מפרץ עקבה

מתוך עקומת מפלס הים הגלובלי עולה כי, בתקופה הקרחונית המקסימאלית האחרונה לפני 21 אלפי שנים, גובה פני הים היה נמוך בכ-103 מטר מהמפלס המודרני [איור 1.5].

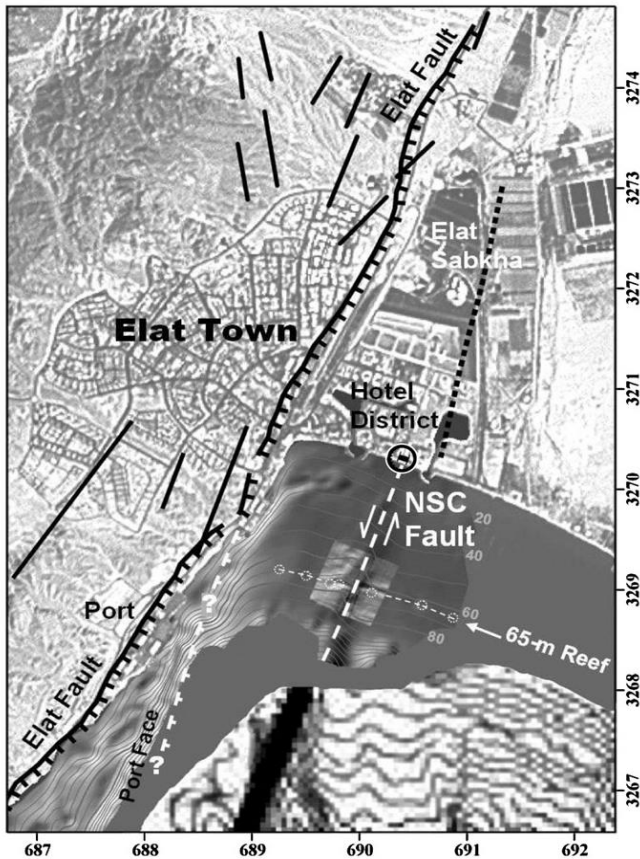
לאחר התקופה הקרחונית האחרונה, מפלס הים עלה במהירות, עד לפני 6-7 אלפי שנים והתייצב על גובה מפלס הים המודרני. רוב השונות המודרניות החלו להתפתח בסיום תקופת הקרח האחרונה, עם העלייה החדה בגובה מפלס הים ועליית טמפרטורת המים (Broecker, 2002).

במפרץ עקבה שינויי המפלס המקומיים שונים במעט מהשינוי העולמי. בדומה לשינוי הגלובלי, לאחר התקופה הקרחונית האחרונה מפלס הים עלה במהירות, עד לפני 6-7 אלפי שנים. בתקופה זו התייצב, יחסית, ופעילות טקטונית בצפון מפרץ עקבה הייתה בעלת אופי מקומי בעיקר (Shaked et al., 2002). מפלס המים היה גבוה מזה המודרני. בשיאו היה כ-1.2 מטרים גבוה מהנוכחי. מפלס המים הגבוה נמשך מספיק זמן שאפשר היווצרות טרסות אלמוגים. עם ירידתו (לפני כ-4000 שנים), לגובה המפלס הנוכחי, נחשפו חלק מהטרסות (Shaked et al., 2004). מחקרים רבים עוסקים בשינויים מקומיים במפלס הים בצפון מפרץ עקבה בתקופות אלו ביניהם, (1987) Reches et al., (2004,2002,2011) Hartman et al. Shaked et al., (2012) Weil, (2008) Tibor et al., (2010) Makovsky et al.



### 1.3 מערכות ההעתקים בצפון מפרץ עקבה

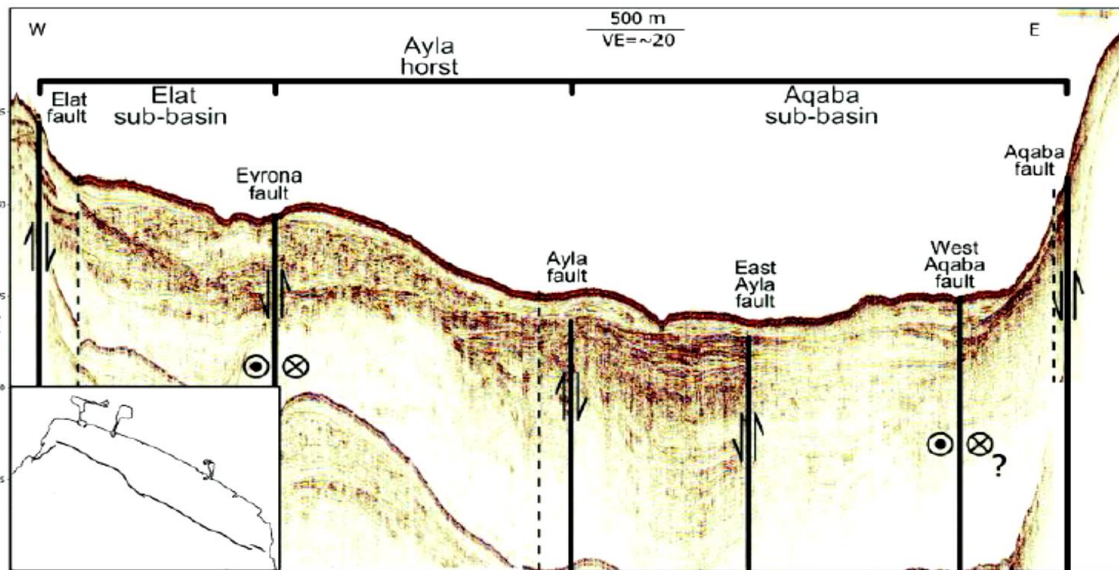
ממאמרם של Tibor et al. (2010) עולה כי, מבנה ההעתקים באזור ראש המפרץ לבין הערבה, אינו מובן לחלוטין. להלן מספר דוגמאות: Makovsky et al. (2008) טענו לשתי מערכות העתקים מרכזיות [איור 1.6]. האחת, מערכת העתקי הגבול - העתקים שלהם רכיב דומיננטי של הסטה נורמלית. מערכת ההעתקים יוצרת מבנה מדורג שכיוונו בין 320°-50°, תת מקביל לקו החוף המערבי בצפון מפרץ עקבה. המערכת השנייה, מערכת העתקי עברונה שלהם דומיננטיות של strike slip. תאוריה זו תואמת מחקר קודם להם של Garfunkel et al. (1981). החוקרים הניחו כי גם בתוך מפרץ עקבה סוג ההעתקה העיקרי הוא strike slip שמאלי.



איור 1.6: מפה בתימטרית של צפון מערב ראש מפרץ אילת. קונטורים של 10 מטרים מוצגים. מערכות ההעתקים העיקריות באזור על פי Makovsky et al. (2008).

חוות דעת שונה מופיעה בדוקטורט של Medvedev (2013). בעבודתו הסיק שמערכות ההעתקים העיקריות כוללות את העתקי גבולות האגן ממזרח וממערב שהם נורמלים והעתקים משניים התחומים בין העתקי הגבול. ההעתקים המשניים נורמליים (בניגוד לדעת קודמיו) עם רכיב של הסטה אופקית שקשורים בדפורמציות ומבנים משניים בתוך האגן.

מאידך גיסא, בעבודת הדוקטורט של Hartman (2012) טען שישנן שש מערכות העתקים עיקריות [איור 1.7], כיוון צפון-מזרח – דרום-דרום מערב. המערכות מחלקות את המפרץ לשלושה גושים: אילת, עקבה ורמת איילה. כמו כן, נמצא העתק ממזרח למערב בתת אגן עקבה. מערכות העתקים העיקריות מוצגות באיור 1.7.



איור 1.7: איחוד של פרופילים סייסמיים מצפון מפרץ עקבה. האגן מחולק ע"פ שלושת המתחמים העיקריים, תת אגן אילת, תת אגן עקבה והורסט איילה. שש מערכות ההעתקים העיקריות, שכיוון צפון-דרום של ראש המפרץ מסומנות (Hartman et al., 2012).

### 1.3.1 העתק עברונה

העתק עברונה בדרום בקעת הערבה, כ-35 ק"מ מצפון לאילת (Garfunkel et al., 1981). העתק זה פעיל גם כיום ותנועתו העיקרית אופקית [איור 1.7] (Le Beon et al., 2008 ; Masson et al., 2015). ההעתק חותך את הסבחה של אילת [איור 1.8], באזור המלוות. במזרח אזור המלוות, רצועת הסטה אופקית לאורך כמה מאות מטרים (Hartman, 2012). Makovsky et al. (2008) הניחו שהעתק עברונה שייך למערכת ההעתקים החוצים את המדרון הצפוני במפרץ עקבה, NSC<sup>4</sup> [איור 1.6]. העתקים אלו תת מקבילים ויוצרים מבנה מדורג שמאלי. לדעתם, ההעתק היבשתי אינו רציף עם הסגמנט שבתוך האגן. הסגמנט הימי תוחם את תת אגן אילת ממזרח. להעתק זה נרשמה תנועת strike slip שמאלית בקצב ממוצע של  $2.7 \pm 1.5$  מ"מ/שנה במהלך ההולוקן. להעתק גם תנועה נורמלית, מרבית הפעילות כהעתק נורמלי התרחשה במהלך ההולוקן, בממוצע קצב של 1 מ"מ לשנה. מעריכים כי הפעילות גברה עם הזמן (Hartman, 2012). נראה כי העתק זה מכיל לפחות מחצית מההסטה של טרנספורם ים המלח במהלך ההולוקן (Makovsky et al. 2008). Hartman et al. (2012) העריכו כי, 15-25 ק"מ צפונית מהעיר אילת, מתפרש העתק עברונה לקומפלקס של Transtension<sup>5</sup>. באזור זה היו רעידות אדמה רבות, בהעתקים נורמליים בגבולות ובהעתקי הסטה אלכסוניים בתוך השטח (Masson et al., 2015).

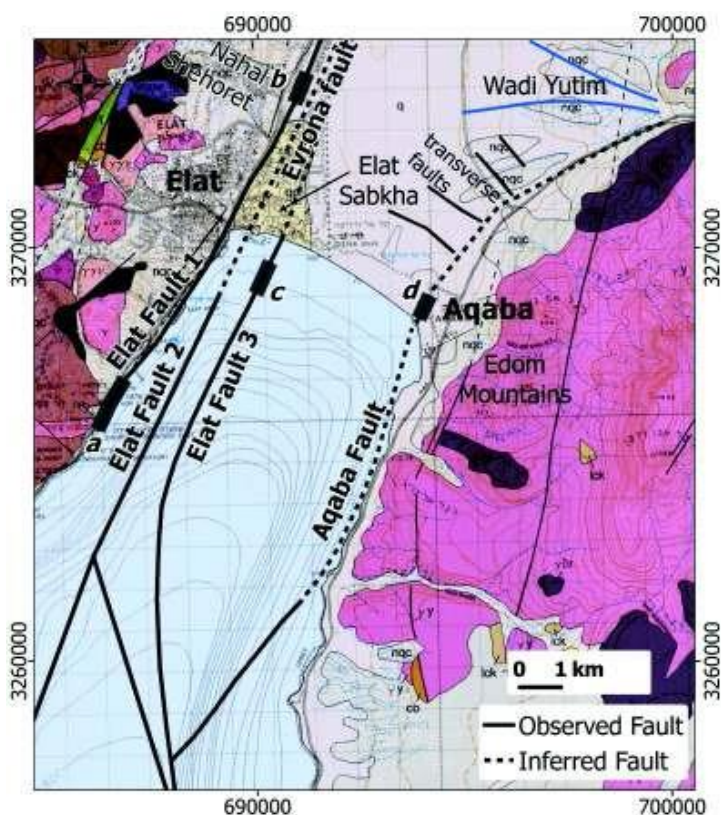
### 1.3.2 העתק אילת

מיקום העתק אילת בתוך האגן הימי שנוי במחלוקת. Garfunkel (1970) טען שהעתק יורד מאזור הסבחה [איור 1.8, Elat Fault 1]. להערכתו, זהו העתק נורמלי עם רכיב strike slip בולט. Makovsky et al. (2008) ו-Shaked et al. (2004), תמכו בהשערה למיקום ההעתק. האחרונים הוסיפו שרעידות אדמה שפעלו הובילו להרס וקבורה של אלמוגים לאורך החוף המערבי. הם הניחו שבלוק הוסט 4-1.8 מטר מאוחר מ-2.4 אלף שנים, לאורך ההעתק הנורמלי, שהוא העתק אילת. Reches et al. (1987) וחוקרים נוספים הבחינו בשינוי באזימוט המדרון, בעומק של כ-100 מטר מתחת לפני המים הנוכחי (מ-010° ל-027°). הם מסבירים זאת ע"י חיבור עם העתק הטרנספורם העיקרי בצפון המפרץ [איור 1.8, Elat Fault 2]. להערכתם, העתק אילת בגבול הדרומי מתחבר עם העתק הגבול המערבי באזור Elat Deep. Ben-Avraham and Tibor (1993) מצטרפים להצעה של Reches et al. (1987), העתק 2, ומוסיפים כי ההעתק משנה כיוון. הם אינם מקבלים את הטענה שהעתק אילת הוא המשך של העתק הגבול המערבי בדרומו. לשניהם אמנם כיוון דומה אך, העתק הגבול מערבי לו.

<sup>4</sup> Northern Slope Crossing - NCS.

<sup>5</sup> Transtension - כח גזירה של מתיחה והסטה מוביל ליצירת העתקים נורמליים, גרביים והעתקי strike slip.

על פי Ehrhardt et al. (2005), מתעקל ההעתק [איור 1.8, Elat Fault 3], לדעתם העתק אילת הוא המשכו הישיר של העתק עברונה. ההעתק הממשיך באופן רציף דרומה לתוך Elat Deep, הוא המשך ישיר לטרנספורם ים המלח המהווה את גבול האגן המערבי.



גם Hartman (2012) בעבודת הדוקטורט העלה את עניין מורכבותו של העתק אילת. ממצאיו מראים שההסטה השמאלית בהולוקן הייתה בקצב של 2-5 מ"מ לשנה בממוצע אזור. קצב ההסטה האנכית של העתק אילת  $1 \pm 0.2$  מ"מ לשנה. קצב זה תאם לזה של עברונה ולפיכך, הניח כי זהו המשכו הישיר של טרנספורם ים המלח.

איור 1.8: מפה גאולוגית של צפון מפרץ עקבה. מערכות העתקים ראשיות ידועות, מסומנות בקו שחור. העתקים שמיקומם משוער מסומנים בקווים. ההעתק המערבי על היבשה וצמוד לגבול המערבי של המפרץ מופה ע"י Garfunkel (1970), מסומן באיור כ-Elat Fault 1. מספר "צלקות" של העתקים נורמליים מצפון לסבחה של אילת בנחל שחורת לאורך העתק עברונה. העתק הטרנספורם הראשי ממשיך לתוך הסבחה של אילת ומדרים למבנה רומבי של העתקת transverse, מסומן ב-Elat fault 2 (הערכתם של Ben Avraham and Tibor (1993). על פי Reches et al. (1987) העתק אילת הוא המשכו הישיר של העתק עברונה, מסומן ב-Elat fault 3 (Hartman, 2012).

## 1.4 סוגיות על הפרק

מיפוי ההעתקים הראשיים בצפון מפרץ אילת השתנה בעשורים האחרונים. כפי שהוצג לעיל, Reches et al. (1987) ונוספים מיקמו את סגמנט העתק אילת הימי שונה מסימונם של Ehrhardt et al. (2005) ו-Makovsky (2008) et al. [איור 1.6] וכולי. עד כה מיפוי העתק הגבול הצפון מערבי של המפרץ מבוסס על מידע מקומי ואינטרפלציות בין נתונים מוגבלים. בעקבות קידוחים באזור הנמל באילת [נספח דוח איזוטופ] יחד עם סקר בתימטרי שנערך בסביבת הנמל, נוצרה הזדמנות לבחון מחדש חלק מהשאלות הפתוחות לגבי ההסטוריה הטקטונית של צפון המפרץ.

הנתונים החדשים מספקים מידע לגבי פעילות טקטונית באזור ומפלס הים בצפון מפרץ אילת בהולוקן. הודות לממצאים החדשים הערכנו מיקום מדויק להעתק אילת בתוך מי המפרץ באזור המזרח הדרומי בנמל.

## 2. מטרות המחקר

- שחזור סביבות ההשקעה הסדימנטריות באזור נמל אילת והמורפולוגיה של התשתית הסדימנטרית בנמל.
- שחזור הפעילות הטקטונית בנמל אילת.

חשיבות המחקר היא לימוד אופן התפתחות שוניות אלמוגים כתגובה לשינויים במפלס הים יחד עם תגובת אלמוגים לשטפונות וקבורתם תחת סדימנט.

חשיבות נוספת, מיפוי העתקים פעילים באזור מיושב.

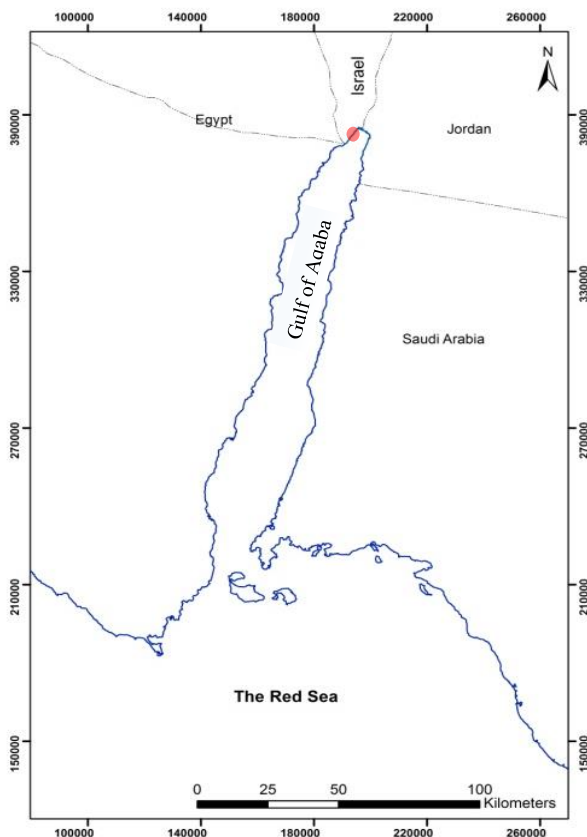
## 3. שיטות

### 3.1 אזור המחקר

אזור המחקר בצפון מערב מפרץ עקבה [איור 3.1] קרוב לחוף של נמל העיר אילת.

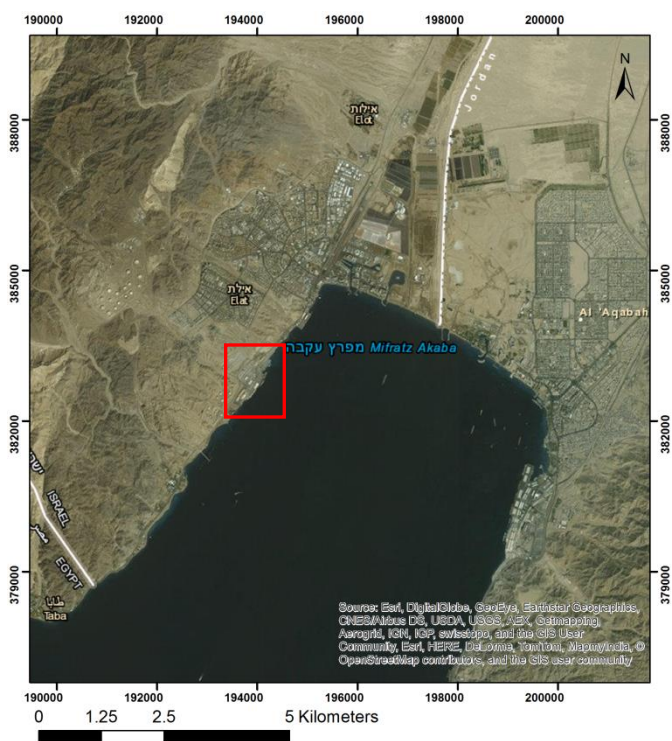
באיור 3.2 מוצגת מפת ראש מפרץ עקבה. במלבן אדום מסומן אזור נמל אילת. מצפון לאזור המחקר, העיר אילת.

אזור העובדה כולל את הסביבה הימית הסמוכה לנמל אילת, מעל לקילומטר במקביל לחוף וכ-100 מטר מהחוף [איור 3.3]. העבודה מתמקדת בסביבת המזחים של הנמל, המזח הצפוני והמזח הדרומי, המכונה גם "מזח הפוספט". שם נערכו קידוחי הנמל, המצויים באוריינטציה של צפון-מזרח לדרום מערב בנוסף לסקר בתימטרי שנערך באזור זה.

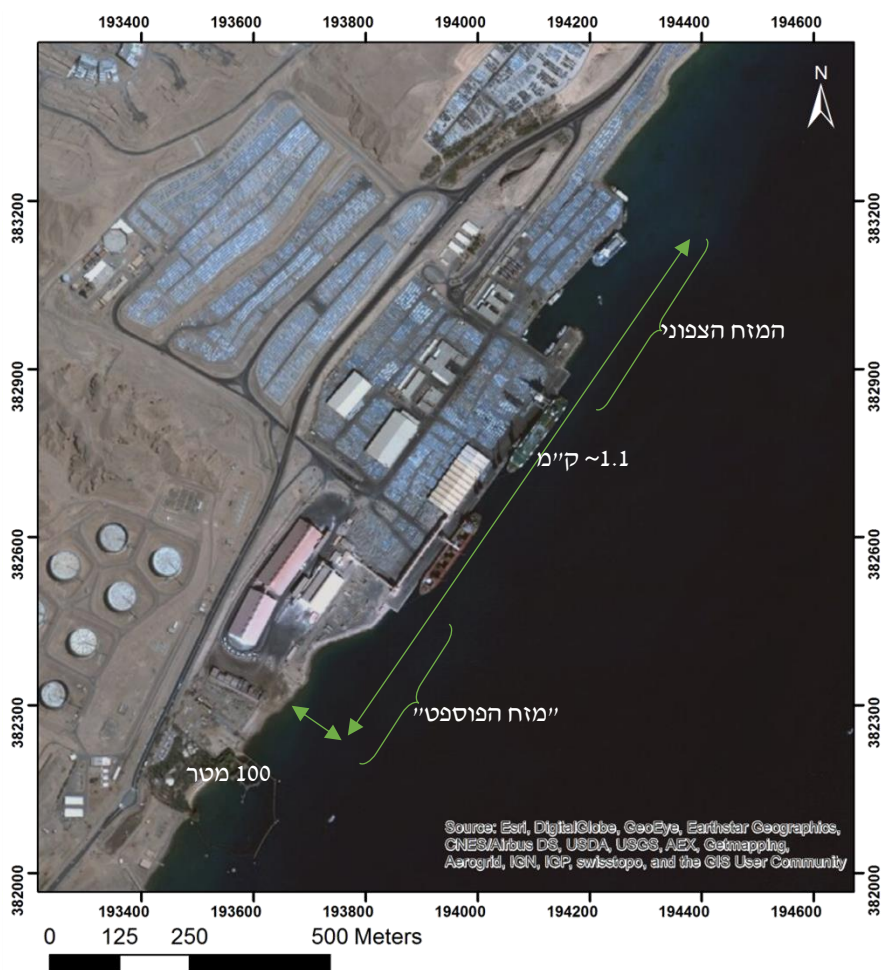


איור 3.1 : מפה של מפרץ עקבה, ה"זרוע" הצפון מזרחית של ים סוף. בעיגול אדום מסומנת סביבת העבודה, ראש המפרץ.

נ"צ של אזור המחקר (רשת ישראל החדשה) 382300-383200, 193700-194400.



איור 3.2 : מפת לוויין של צפון מפרץ עקבה. במלבן אדום מסומן אזור נמל אילת.



איור 3.3 : מפת לוויין של אזור נמל אילת, צפון מערב מפרץ עקבה. מיקומי המזח הצפוני והדרומי (מזח הפוספט) מסומנים.

### 3.2 שקפי אלמוגים

שקפי אלמוגים נועדו לזיהוי טקסטורות עדינות בשלדי מאובני אלמוגים באמצעות בינוקולר. טקסטורות כאלה מאפשרות הגדרת מאפיינים דיאגנטיים של החלפות באלמוגים מאובנים, כמו ארגוניט משני. כך נמנע מלדגום אלמוגים שגילם לא משקף את גיל השקעת שלד האלמוג.

מעבר לזיהוי ארגוניט משני, זיהוי החלפות ארגוניט לקלציט פוסל דוגמאות לתארוך בשיטת U-Th המניחה מערכת איזוטופית סגורה.

29 דוגמאות אלמוגים נבחרו לשם הכנה של שקפים. דוגמאות האלמוגים נחתכו במסור, הודבקו ושוּיפו על גבי זכוכית נושאת (גודלן 26 מ"מ×46 מ"מ). ההדבקה בעזרת resin Epoxy ביחס של 1:5 עם Hardner וליטוש (180, 320 ו-600 Grit בהתאמה) על גבי Buehler metaserv grinder polisher. השקפים הסופיים בעובי של כ-0.03 מ"מ.



איור 3.4 : בינוקולר של חברת Olympus מדגם 2-BH BHT/BHTU ומצלמת DP25

אנליזה של הדוגמאות: תחת בינוקולר של חברת Olympus מדגם 2-BH BHT/BHTU נבדקו השקפים וצולמו תמונות במצלמת Olympus DP25 [איור 3.4]. הניתוח הסתמך בעיקר על האנליזות של שקפי אלמוגים מעבודתה של Enmar (2000). מטרה עיקרית בבדיקה, כפי שצוין לעיל, היא לבדוק את רמת השימור של שלדי האלמוגים – האם השלד המקורי של האלמוגים נשמר. נבדקו מאפיינים של ארגוניט ביוגני כדוגמת, התפתחות סיבי שלד ממרכזי קלסיפיקציה ומבנים דמויי אדרה של דג. הבחנה בארגוניט משני אפשרית בזכות מבנה הגבישים (ששונה מסיבי הארגוניט המקורי של האלמוג). גבישים גסים, דמויי מחטים, מתפתחים בחללים ולעיתים מחליפים את השלד המקורי. כמו כן, טקסטורה של שלד מופרע מעידה על החלפות.

בנוסף לעדויות להחלפות כימיות, סוג המטריקס, משפחות הפורמיניפרים, צדפות ואצות גירניות גם כן נבדקו. אלו יכולים להעיד על בית הגידול כמו, העומק בו התפתחו האלמוגים.

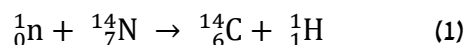
### 3.3 מדידות XRD

יחד עם אנליזות של שקפי אלמוגים, דוגמאות נלקחו לבדיקה מינרלוגית, שמטרתה לוודא שאכן הרכיב העיקרי של שלדי האלמוגים הינו ארגוניט שהושקע ממי הים ושאינן החלפות לקלציט שישבשו את הגיל המתקבל מהאנליזות. שברי אלמוגים שנאספו מתוך הקידוחים (אותן דוגמאות נלקחו גם לתארוכים) בנמל נכתשו לאבקה, בכמות העולה על 1 גרם, יחד עם אתנול. הדוגמאות יובשו בתנור ב-60° ונשלחו לאבחון מינרלוגי במכשיר X-ray Powder Diffraction (XRD) במכון הגיאולוגי.

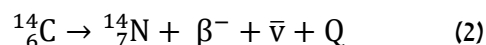
### 3.4 תארוך בשיטת פחמן רדיוגני

דוגמאות אלמוגים מקידוחי נמל אילת נלקחו לשם תיארוך בשיטת פחמן רדיוגני. השיטה מתבססת על פירוק של  $^{14}\text{C}$  ל- $^{14}\text{N}$  בזמן מחצית חיים של  $5568 \pm 30$  שנה (Libby, 1946).

$^{14}\text{C}$  הוא תוצר של פגיעת נייטרונים בעלי אנרגיה גבוהה (שמקורם בקרינה קוסמית) באטומי חנקן, תוך שחרור פרוטונים.



ה- $^{14}\text{C}$  שנוצר אינו יציב, ודעיכתו מתרחשת תוך כדי פליטת חלקיקי  $\beta^-$  לקבלת חנקן יציב:



התהליך כולל אובדן אלקטרון ואלקטרון אנטי-נייטרון. האנרגיה הסופית (Q) מתהליך הדעיכה היא, MeV 0.156.

הפחמן הרדיואקטיבי, אשר נוצר באטמוספירה, עובר ריאקציה עם אטומי חמצן חופשיים או מחליף איזוטופ פחמן יציב, לבניית מולקולות  $^{14}\text{CO}$ ,  $^{14}\text{CO}_2$ . הריכוז של המולקולות הללו במאגרים השונים תלוי ברמת השחלוף בין האטמוספירה ליתר המאגרים (הביוספירה וההידרוספירה). שיווי משקל בין המאגרים מתאפשר הודות ליצירה מתמדת של  $^{14}\text{C}$  באטמוספירה, יחד עם דעיכה מתמדת (התפרקות האיזוטופ) בכל מקום בו מצויים האיזוטופים הרדיואקטיביים.

בצמחים נשמר שיווי משקל יציב מאחר והם קולטים דו תחמוצת הפחמן בתהליך הפוטוסינתזה ובאמצעות שורשיהם והאיזוטופ הרדיואקטיבי דועך בגופם. בעלי החיים שניזונים מצמחים אלו, גם הם שומרים על רמה קבועה. אולם, לאחר מותם פוסקת הקליטה של הפחמן והאקטיביות מתחילה לרדת כתוצאה מהדעיכה. המשמעות היא, שמופר שיווי המשקל של ה- $^{14}\text{C}$ . כשידועה רמת האקטיביות של  $^{14}\text{C}$  ביצור החי ( $A_0$ ) ונמדדת הרמה של  $^{14}\text{C}$  ביצור המת (A), ניתן לחשב את הזמן שחלף מאז מותו.

האקטיביות של הפחמן באורגניזם שמת לפני t זמן:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$\lambda$  – זמן מחצית החיים של  $^{14}\text{C}$ . האקטיביות של  $^{14}\text{C}$  האטמוספרי (כפי שנמדד ב-1950) כלומר,  $A_0$  הוא, dpm/g  $13.56 \pm 0.07$  (Mook and van der Plicht, 1999).

ניתן לבדוד את t מהמשוואה, לקבלת משוואת הגיל:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{A_0}{A} \right) \quad (4)$$

בעבודה זו נלקחו 24 שברי אלמוגים מאובנים שבהיבט בדוגמת היד שמרו על הטקסטורות העדינות. דוגמאות אלו הן גם חלק ממאסף הדוגמאות שנבדקו תחת בינוקולר. הדוגמאות (במשקל של כ-50 גרם) נשלחו למעבדת Beta Analytic בפלורידה לבדיקת גיל. הדוגמאות נלקחו מתוך הקידוחים K-1-65-1, K-2-35/40/43, K-6-68-

K-26-, K-25-165/168/171/172, K-16-103/105/107/109, K-14-117/120/123, K-7-26-1/27-1/7.83, 1/80/82, 130/132/139/144.

22 דגימות האלמוגים נמדדו בשיטת מונה חלקיקי  $\beta^-$  (Gas proportional counting). שתי הדוגמאות האחרות (K-25-171, K-16-109) נמדדו בשיטת ספקטרומטר מאסות מואצות (AMS).

תחילה עברו הדוגמאות הליך של טיפול ראשוני שמטרתו להיפטר מרכיבים משניים של פחמן. הטיפול הראשוני כלל כתישה של הדוגמאות וטבילה במים מזוקקים. לאחר מכן, הדוגמאות נשטפו ב-HCl בכדי לשלול נוכחות קרבונטים ונשטפו ב-NaOH להורדת חומצות אורגניות. לאחר השטיפה בחומר בסיסי, נשטפו שוב בחומצה, על מנת ליצור סביבה ניטרלית ואז יובשו. הריכוזים הכימיים, הטמפרטורה, זמני החשיפה וכדומה תלויי דוגמא (Beta Analytic, 2015).

בשיטת Gas proportional counting, לאחר שלבי ההכנה הראשוניים, הדוגמא נשרפה לקבלת  $\text{CO}_2$ . בתהליך יוניזציה של פירוק  $^{14}\text{C}$ , באמצעות זרם חשמלי, שוחררו חלקיקי  $\beta^-$ . הפולס חשמלי שהתקבל משמש מדד לכמות ההתפרקויות.

בשיטת AMS ריכוז ה- $^{14}\text{C}$  נמדד ביחס לנוכחות האיזוטופים  $^{12}\text{C}$  ו- $^{13}\text{C}$ . לאחר הכנות מקדימות, הדוגמאות הוכנסו למאיץ חלקיקים שבו אנרגיות קינטיות גבוהות מאוד (פעולה שנועדה לאפשר הפרדה וזיהוי של איזוטופ ששכיחותו נמוכה מאיזוטופ שמסתו דומה מאוד לו וריכוזו גבוה). בהמשך, נערכה אנליזת מסות, לשם מדידות היחסים. על ידי תהליך של יוניזציה המכשיר הפריד את היונים על בסיס יחסי מסה מול מטען.

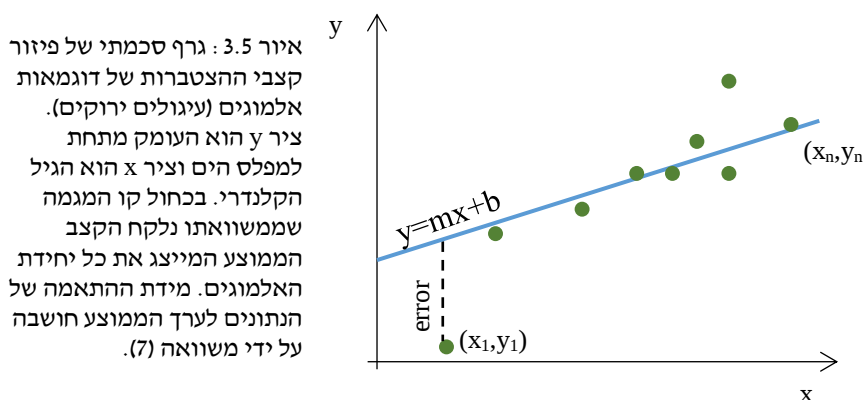
לאחר קבלת התוצאות, נתוני האקטיביות הוצבו במשוואת הגיל (משוואה 4). הגיל שהתקבל מהחישובים מכונה Measured age [נספח דוח פחמן 14] לפי סטנדרט NIST ו-SRM 4990C. לגיל זה נערכו תיקוני פרקציונציה איזוטופית. הפרקציונציה האיזוטופית של  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  היא תוצר של שינויי היחס שלהם כתוצאה מתהליכים ביוכימיים (Taylor, 1997). האקטיביות של הפחמן מתוקנת על פי הפרקציונציה שמסומנת ב- $\delta^{13}\text{C}$  לפי סטנדרט

$$\delta^{13}\text{C} = \left[ \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{standart}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{standart}}} \right] \times 10^3 \text{ , PDB-1 בפר מיל:}$$

הגיל לאחר תיקוני  $\delta^{13}\text{C}$  מכונה על ידי מעבדות בטא, Conventional Radiocarbon Age. היות והתארוך הוא לחומר ארגוניטי ששקע ממי מפרץ עקבה, נדרש תיקון לזמן השהות במאגר. האוקיינוסים מהווים מאגר משמעותי של  $^{14}\text{C}$ , מי השטח מקבלים פחמן 14 מהאטמוספירה וממי עומק, יוצא מכך שהגיל המתקבל מבוגר. אי לכך, נדרש תיקון לגיל דוגמאות ימיות שיתאים לגיל שמתקבל מדוגמאות שמקור הפחמן 14 שלהן הוא רק אטמוספרי. מלבד ההבדל בגיל הנובע מזמני שהות פחמן 14 באוקיינוס, גם הבדלים נוספים בזמני השהות שהם מקומיים יש לקחת בחשבון. התיקון המקומי מסומן ב-Delta±R [נספח דוח פחמן 14]. הערך שנלקח במעבדות בטא, Delta-R=121±30 שנה. בסיום התיקונים, הגילים תורגמו לגיל קלנדרי, 2 Sigma calibrated results.

כיול גילי הפחמן על ידי מעבדות בטא לגילים קלנדריים התבסס על מסד הנתונים (Heaton et al., 2009; Reimer et al., 2009). חישובים לשם קליברציה נלקחו מ- (Talma and Vogel, 1993).

בכדי ללמוד על התפתחות האלמוגים עם הזמן, חושבו קצבי הצטברות. הקצב חושב מהגילים הקלנדריים כפונקציה של עומקי הדוגמאות. ראשית נבדק האם קצב ממוצע עבור כל יחידת האלמוגים הוא ערך נכון לשימוש. על מנת לוודא שהקצב מייצג היטב את התפתחות כל האלמוגים שתוארכו, חושבה מידת פיזור הקצב של הדוגמאות השונות מהממוצע, על ידי חישוב ריבוע השגיאה עבור כל דגימה מול ערכי משוואת קו רגרסיה (S.E - Squared error of regression line), משוואה (5). כמו כן, חושבה מידת הסטייה של ערכי ה-y מקו המגמה או מערכי ה-x, משוואה (6) [איור 3.5]. מתוצאות משוואות (5) ו-(6), חושב האחוז (מסך כל קצבי הדוגמאות) המוצג היטב על ידי ממוצע הקצב לכל יחידת האלמוגים, משוואה (7).



חישוב מידת פיזור הנתונים :

$$S.E = [y_1 - (mx_1 + b)]^2 + [y_2 - (mx_2 + b)]^2 + \dots + [y_n - (mx_n + b)]^2 \quad (5)$$

מידת השונות מערך ה-y הממוצע :

$$S.E(\bar{y}) = (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2 \quad (6)$$

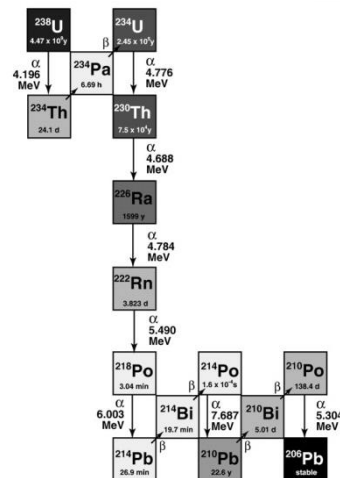
אחוז הערכים שמוגדרים היטב על ידי קו המגמה :

$$1 - \frac{S.E}{S.E(\bar{y})} \quad (7)$$

### 3.5 תארוך בשיטת אורניום - תוריום

שבע עשרה דוגמאות אלמוגים מקידוחי נמל אילת נלקחו לשם תיארוך בשיטת U-Th. הדוגמאות נלקחו מהקידוחים : K-1-65-1/2, K-2-35/40/43, K-6-68-1/2/80, K-7-26-1/2, K-14-117/120, K-16-105/107/109, K-25-165/171/172, K-26-139/155. דוגמאות האלמוגים שנמדדו הן מאותם שברי אלמוגים שתוארכו בשיטת פחמן 14.

שיטת התיארוך בסדרת אורניום-תוריום מאפשרת קביעת גילים אבסולוטיים ל-600 אלפי השנים האחרונות. השיטה מתבססת על תיארוך בסדרת ההתפרקויות של  $^{238}\text{U}$  [איור 3.6]. האיזוטופים החשובים בתיארוך אלמוגים הם איזוטופ האב  $^{238}\text{U}$ , תוצר הביניים  $^{234}\text{U}$  והתוצר  $^{230}\text{Th}$ .



איור 3.6 : שרשרת ההתפרקויות של  $^{238}\text{U}$  עד לקבלת  $^{206}\text{Pb}$  יציב (Bourdon et al., 2003).

בחומרים עתיקים האיזוטופים מצויים בשיווי משקל סקולרי כלומר, קצב ההתפרקות של איזוטופ האב שווה לזה של בנותיו. אולם, תהליכים המובילים לפרקציונציה משנים את היחסים בין  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  ו- $^{230}\text{Th}$  ליצירת "שעון" רדיוגני. הפרקציונציה יכולה להיות תוצר של האפניות הגבוהה של תוריום לחלקיקים והסרתו מגוף המים. כתוצאה מכך ישנה הפרדה כימית בין האורניום המצוי במים (כיון האורניל) לתוריום. בעקבות תהליך הפרקציונציה, בבניית השלד הקרבונטי של האלמוג ממי הים נכנס רק אורניום. להלן משוואת יחסי האקטיביות (Broecker, 1963) לחישוב גיל האלמוג :

$$\left[ \frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right]_A = (1 - e^{-\lambda_{230}t}) + \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \times \left( \left[ \frac{^{234}\text{U}^0}{^{238}\text{U}} \right]_A - 1 \right) (e^{-\lambda_{234}t} - e^{-\lambda_{230}t}) + \left( \frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right)_{\text{initial}} e^{-\lambda_{230}t} \quad (8)$$

$$\lambda_{230} = 9.1577 \times 10^{-6}, \text{ קבועי הדעיכה, } \lambda \text{ הם יחסי האקטיביות בהווה. } \left[ \frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right]_A \text{ ו- } \left[ \frac{^{234}\text{U}^0}{^{238}\text{U}} \right]_A$$

Le Roux and)  $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10}$ ,  $\lambda_{234} = 2.8263 \times 10^{-6}$ ,  $\lambda_{232} = 4.9475 \times 10^{-11}$  (Glendenin, 1963; Jaffey et al., 1971; Cheng et al., 2000).

ממשוואת האקטיביות של  $^{230}\text{Th}$  (משוואה 8) ניתן לתארך אלמוגים בהתבססות על ההנחות הבאות :

1. יחס ה- $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  ההתחלתי קרוב מאוד לאפס.
2. המערכת סגורה לאורניום וכן לכל איזוטופי הבת בין  $^{238}\text{U}$  ל- $^{230}\text{Th}$ .
3. היחס בין  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ההתחלתי ידוע.

הכנות ראשוניות : כ-50 גרם מכל דגימה נכתשו לאבקה ונשקלו במאזניים אנליטיות. האבקות עברו המסה ב- $7\text{N HNO}_3$  והוסף ספייק, תמיסה המכילה  $^{236}\text{U}$ - $^{229}\text{Th}$  בריכוז ידוע. הדוגמאות יובשו והומסו בשנית ב- $\text{HNO}_3$ . בשלב הבא הדוגמאות הוכנסו לקולונות, לאחר ניקויים במים מזוקקים פעמיים והעברה של חומצת  $6\text{N HCL}$ . לאחר הניקיון הועברו הדוגמאות דרך 2 מ"ל של Bio Rad AG mesh resin בקולונה. בהמשך, הוחדרה לקולונה תמיסת ההכנה  $7\text{N HNO}_3$ . הדוגמאות נאספו לשם למיצוי. ה- $\text{Th}$  מוצה באמצעות  $6\text{N HCL}$  וה- $\text{U}$  על ידי  $\text{HBr}$ .  $1\text{N}$  הדוגמאות יובשו והומסו מחדש ב- $0.1\text{N HNO}_3$ .

לאחר ההכנות הדוגמאות נמדדו במכשיר Multi collector (MC) inductively coupled plasma spectrometry (ICPMS) של חברת (NU Instruments (UK). במכשיר הושרה שדה מגנטי שבעזרתו הופרדו מסות איזוטופיות שונות. האותות מכל מסה נקלטו בחיישני Faraday ו-Ion counting. מדידות האורניום והתוריום נערכו בהרצות נפרדות.

הסטנדרט לבדיקת מדידות המכשיר NBL112a. הסטנדרט בעל יחס אטומי ידוע של  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  השווה ל- $5.28 - 5.3 \times 10^{-5} \pm 0.004$  ( $n=21, \pm 2\sigma$ ) (לאותה שנה).

### 3.6 סקר בתימטרי

סקר בתימטרי מבוסס על שיטת מחקר גיאופיזית שאינה פולשנית, לקבלת תמונה של קרקעית האוקיינוס.

ישנן שתי קבוצות של גלים סייסמיים המיוצרים מלאכותית בסקר (פולסים), גלי גוף וגלי שטח. תת חלוקה של גלי הגוף היא, גלי P וגלי S. גלי לחיצה - P waves, הינם הגלים הראשוניים. החלקיקים בתווך בו נע הגל מוסטים בכיוון התקדמות הגל. גלי גזירה - S waves, הגלים שמתקבלים לאחר גלי P, נעים על ידי גזירה טהורה של חלקיקי המדיום בו נעים בניצב לכיוון תנועת הגלים.

במעבר גלים בין יחידות בעלות תכונות פיסיקליות שונות, לרוב חל שינוי במהירות הסייסמית. אזור המעבר בין יחידות שבהן המהירות שונה, קרוי רפלקטור. כתוצאה מפגיעת קרן ברפלקטור, חלק מהאנרגיה מוחזרת ומתקבלים גלים הקרויים גלי רפלקציה. הגלים שנשברים ומועברים ליחידה האחרת מכונים גלי רפרקציה. בסקר בתימטרי גלי הרפלקציה הם שנמדדים. גלי הגוף שנקלטים הם גלי גוף מסוג P (גלי S לא נעים בתווך נוזלי ולכן, בסקר ימי לא נקלטים).

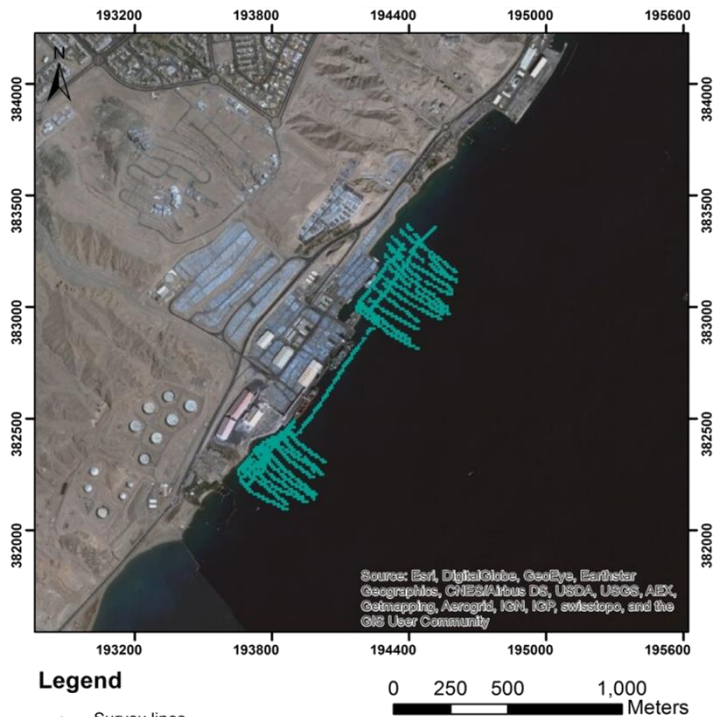
גלי הרפלקציה מוחזרים בזווית התואמת בגודלה את זווית פגיעת הקרניים ברפלקטור (הזווית בין הקרן לנורמל לרפלקטור, מכונה incident angle). סך הזמן שלוקח לגלי הרפלקציה להגיע לרפלקטור ולחזור מכונה ה-Two way travel time של גל הרפלקציה ומחושב כך:

$$t_{\text{Reflection}} = \frac{(x^2 + 4z^2)^{1/2}}{v_1} \quad (9)$$

x - המרחק האופקי, z - עומק, v - מהירות גלי P במים (1500 m/sec). הסקר במחקר זה נערך על ידי סונאר של חברת FURUNO, המכונה גם Fish finder דגם FCV-582L, המובנה בסירת המכון הבין אוניברסיטאי.

המכשיר משמש לשם זיהוי רפלקטורים חזקים, המעידים על נוכחות דגים וכן על המעבר בין מי הים לקרקעית. טווח התדירויות של הסונאר 50-200 kHz. ככל שהתדירות נמוכה יותר כך האלומה רחבה יותר. לפיכך, תדירות של 50 kHz נועדה לזיהוי כללי של תנאי הקרקעית ותדירות גבוהה מעלה את הרזולוציה ונועדה לזיהוי עצמם קטנים כדוגמת דגים.

ב-11 יוני 2015, בסירה מטעם המכון הבין אוניברסיטאי באילת, נערכה הפלגה באזור נמל אילת. הסירה הושטה במהירות של כ-3 קשר במקביל ומאונך לחוף במספר קווים [איור 3.7] בסביבת הקידוחים, כארבע שעות. שינויי מפלס הים במחזוריות של גאות ושפל בשעות המחקר 9:20-12:02, נע בין (-2) סנטימטר ועד (+30) סנטימטר כלומר, טווח שינוי של 33 סנטימטר (ISRAMAR, 2015).



איור 3.7 : מפת לוויין של אזור נמל אילת. בכחול מסומן מסלול הסירה.

### 3.7 תוכנות עיבוד נתונים

בתוכנת ArcMap 10.3.1 הוכנו מפות וגרפים : על גבי מפות לוויין ומפה גיאולוגית של המכון הגיאולוגי מוקמו הקידוחים, מסלול הסקר הבתימטרי, אפיקי נחלים באזור נמל אילת ומיקום אזורי מחקר קודמים רלוונטיים. הופקה גם מפת שיפועים, מפות בתימטריות, מפת איזופך ויוצרו חתכי רוחב.

מפת איזופך ליחידת האלמוגים היא תוצר של אינטרפולצית Inverse Distance Weighted (IDW) ב-ArcMap. אינטרפולצית IDW מספקת מפה המורכבת מתאים. האינטרפולציה נערכת על ידי חישוב ערך לתא מתוך הנתונים הקיימים, נקודות שערכן ידוע, והתחשבות במרחק שלהן מהתא. המשקל שניתן לכל נקודה פרופורציונאלי למרחק מערך התא, למידע נוסף Shepard (1968)). תיקונים לאינטרפולציה נעשו ידנית. מפה תלת ממדית של הבתימטריה במזרח הדרומי הופקה על ידי תוכנת Global Mapper v16.0.

כמו כן, בתוכנת SketchUp גרסה 2014 עובדו נתוני הקידוחים והוכנו חתכים סטרטגרפיים.

גרפים נערכו באקסל. בתוכנת Grapher 9 הוכנו גרפים תלת ממדיים של עובי יחידת האלמוגים בקידוחים השונים כפונקציה של מיקומם המרחבי.

## 4. תוצאות

### 4.1 סטרטיגרפיה וליתולוגיה של הגלעינים

החתכים הסדימנטריים המיוצגים על ידי הקידוחים בנמל אילת מחולקים לארבע יחידות סטרטגרפיות: יחידה קלסטית תחתונה, יחידת אלמוגים, יחידה קלסטית עליונה ויחידת מילוי המלאכותי.

היחידה הקלסטית התחתונה - יחידת חלוקים המכילה כמויות משתנות של סילט וחול חום אדמדם או צהבהב. החלוקים במגוון גדלים וליתולוגיות (כמו גרניט ואבן חול). גג היחידה מצוי בעומק של 15-26 מטר מתחת למפלס פני הים. היחידה מורכבת משתי תתי יחידות חלוקים נפרדות, הנבדלות זו מזו בגדלי הגרגר. לא ניתן לקבוע גבול תחתון ליחידה זו היות שהסדימנט נחשף עד תחתית הקידוח, בעומק של כ-70 מטר מתחת לפני הים. במזח הדרומי מתרבה כמות החול והסילט שמופיעים בחילופין עם חרסיות - תתי השכבות העמוקות במזח הדרומי. עובי השכבות העמוקות במזח הדרומי הוא בין 2.7 ועד 7.3 מטר. היחידות אינן רציפות במרחב ומתחלפות ביניהן. מעליהן המופע שנצפה במזח הצפוני, חלוקים עם סילט וחול.

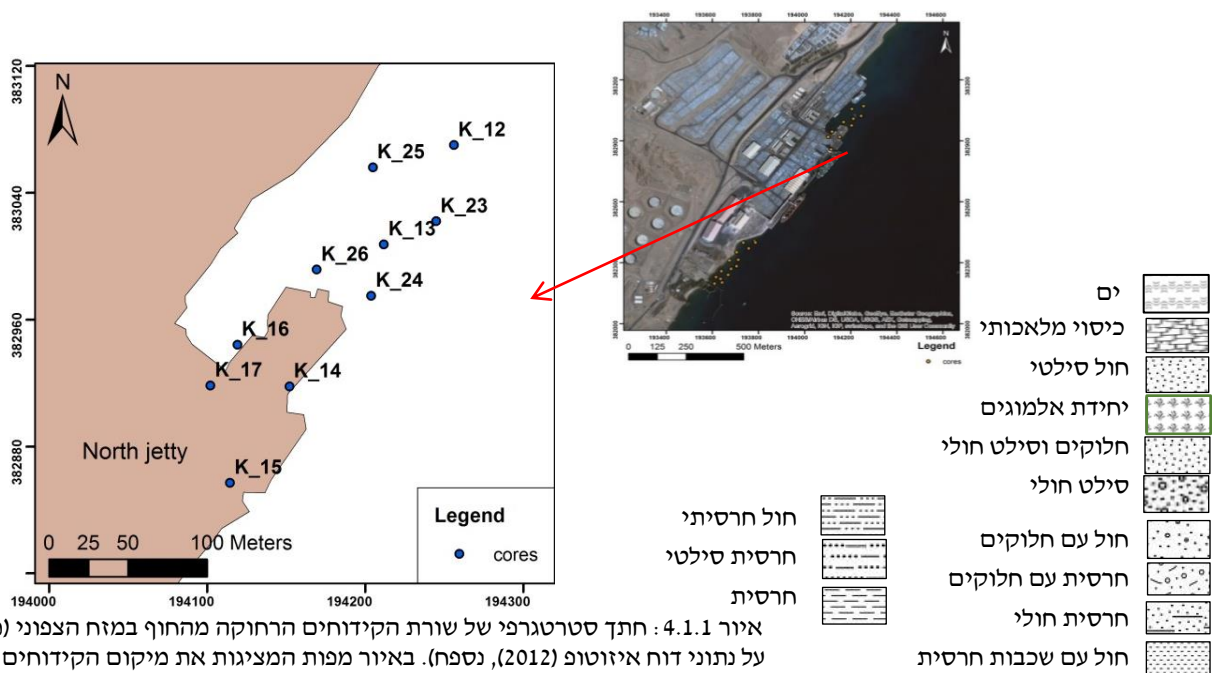
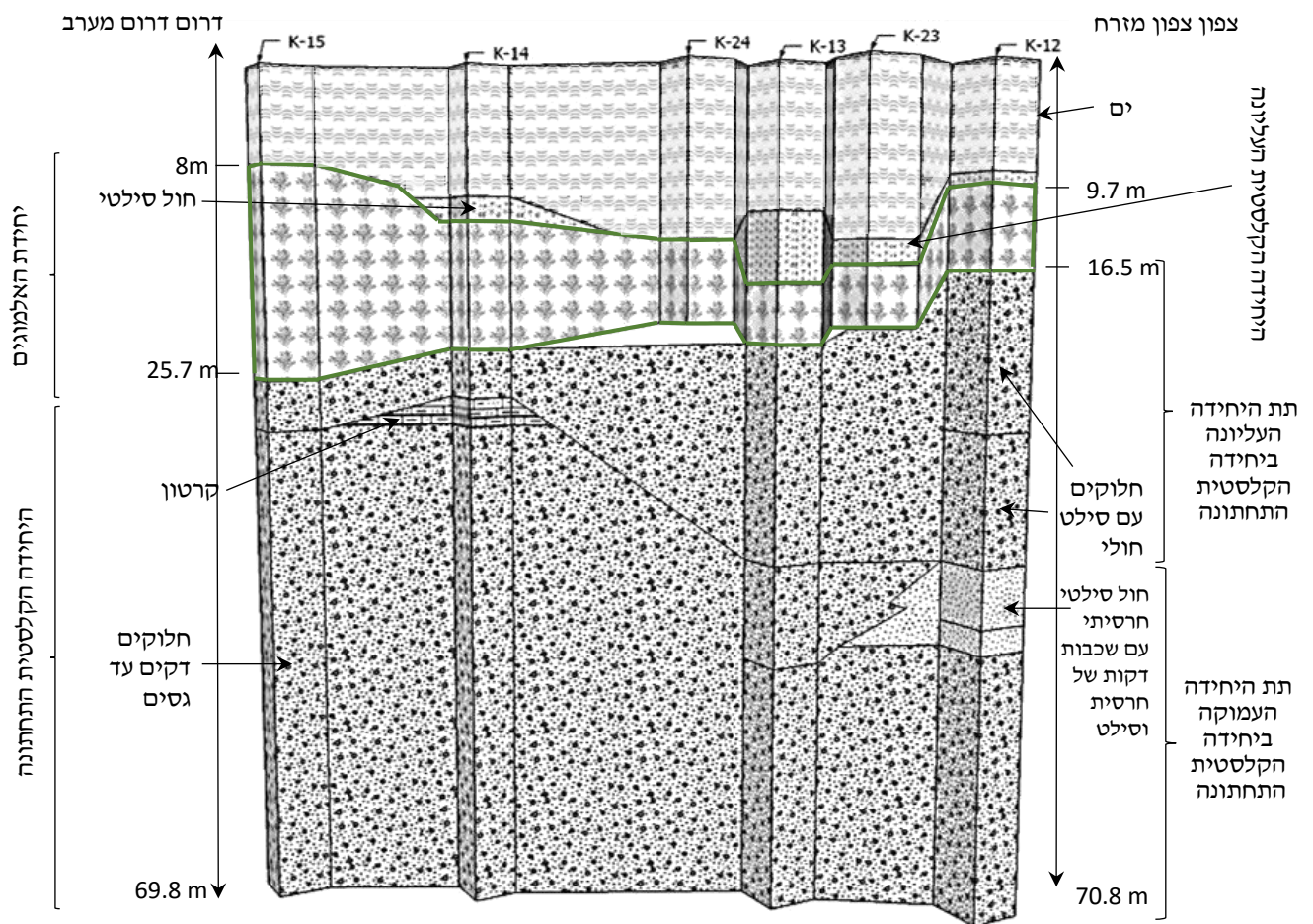
יחידת האלמוגים - היחידה מונחת על גבי היחידה הקלסטית התחתונה. יחידת האלמוגים מורכבת בעיקר משברי שלדי אלמוגים ושלדי אורגניזמים נוספים יחד עם מטריקס חולי דק. עובי היחידה נע בין 0.5 מטר (קידוח K-11) ועד עובי של כ-18 מטרים (K-15).

היחידה הקלסטית העליונה - חול סילטי אדמדם צהבהב שאינו רציף במרחב. עובי היחידה משתנה במרחב, במזח הדרומי העובי נע בין 0.5-16.5 מטר ובמזח הצפוני בין 1-5.9 מטר [איורים 4.1.1-4.1.4]. היחידה במזח הצפוני חסרה בקידוחים רבים. היכן שהיחידה נעדרת בחתך יתכן ולא הצטברה או שהוסרה בפעילות בניית הנמל.

יחידת המילוי המלאכותי - תערובת של חלוקים, בולדרים וחול. סביר שיחידת המילוי הונחה באזור בעקבות בניית הנמל. עובי היחידה נע בין 0.4-3 מטר (קידוחים K-1, K-2, K-6, K-8, K-17).

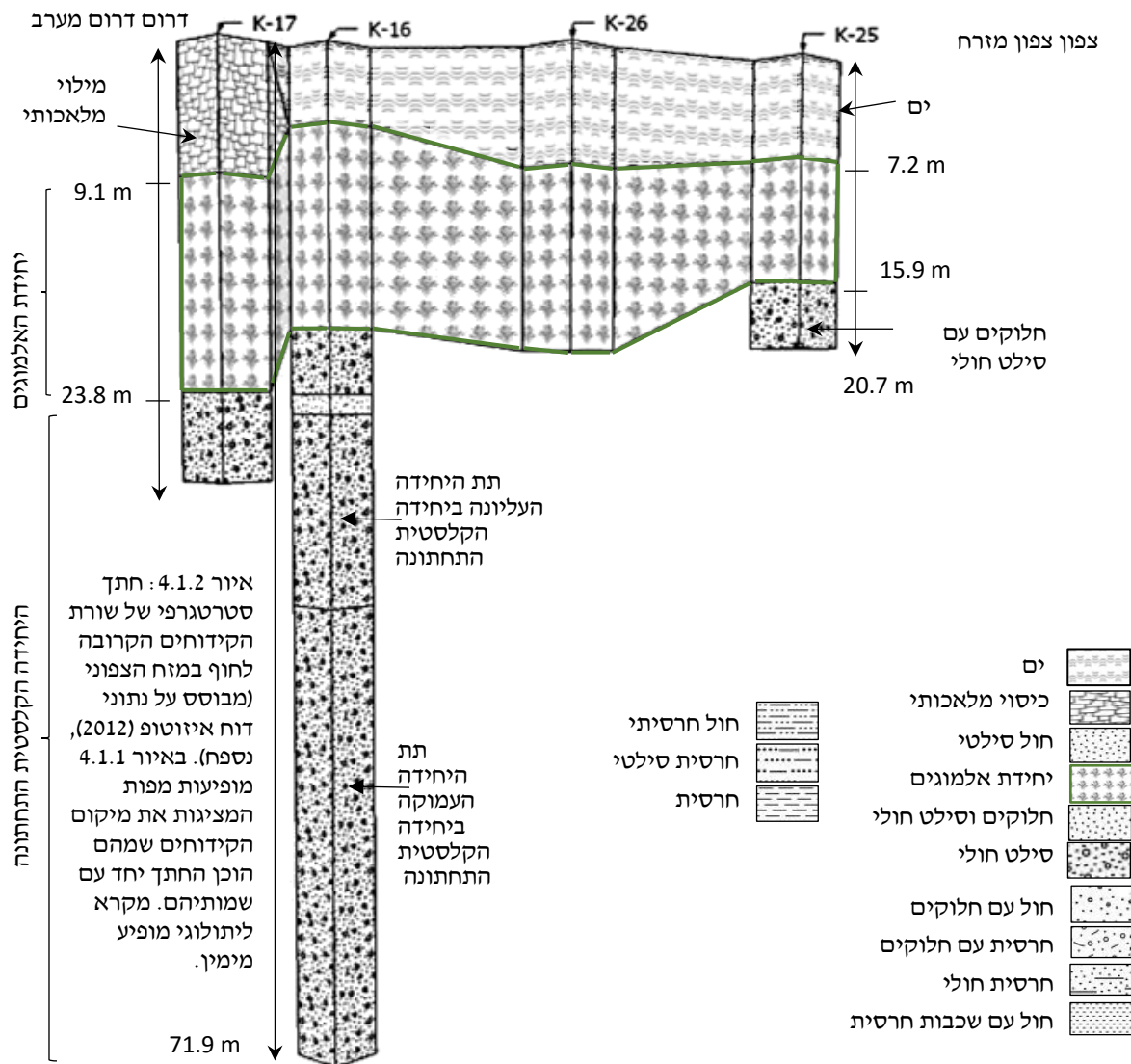
איורים 4.1.4-4.1.1 מתארים ארבעה חתכים סטרטיגרפיים המבוססים על נתוני הקידוחים. הקידוחים שנבחרו לבניית החתכים יוצרים ארבע רצועות מקבילות לחוף, בכל מזח שני חתכים - חתך סמוך לחוף (מערבי) ורחוק מהחוף (מזרחי).

החתך הסטרטיגרפי A מתאר את שורת הקידוחים הרחוקה מהחוף (המזרחית) במזח הצפוני. היחידה הקלסטית התחתונה בנויה משתי תתי יחידות, תת היחידה העמוקה ותת היחידה העליונה. היחידה הקלסטית התחתונה משתרעת עד עומק של כ-70 מטר, היכן שהקידוחים העמוקים חודרים. מעליה מונחת יחידת האלמוגים. יחידת האלמוגים רציפה (מופיעה בכל הקידוחים) ומתעבה לכיוון דרום מערב. עובייה משתנה מכ-5 עד כ-15 מטר [איור 4.1.1]. מעל יחידת האלמוגים, היחידה הקלסטית העליונה. היחידה הקלסטית העליונה נעדרת בקידוחים K-15 ו-K-24 [איור 4.1.1], בהם יחידת האלמוגים חשופה לים. יחידת המילוי המלאכותי חסרה.



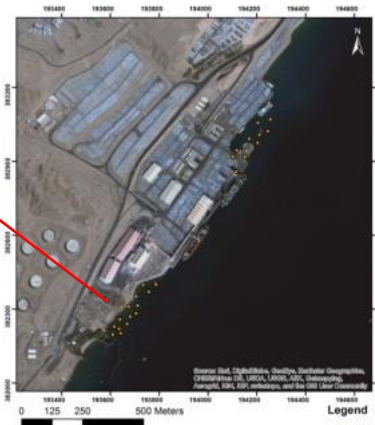
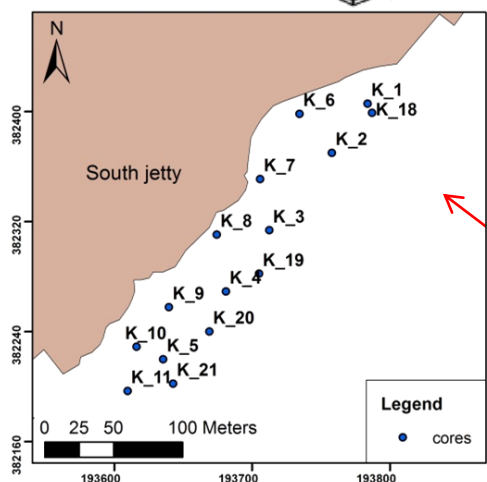
איור 4.1.1: חתך סטרטגרפי של שורת הקידוחים הרחוקה מהחוף במזרח הצפוני (מבוסס על נתוני דוח איזוטופ (2012), נספח). באיור מפות המציגות את מיקום הקידוחים שמהם הוכן החתך יחד עם שמותיהם ומקרא ליתולוגי.

מרבית הקידוחים בשורה הקרובה לחוף במזח הצפוני קצרים, חודרים עד 20 מטר מתחת לפני הים [איור 4.1.2]. שני קידוחים חודרים ליחידה הקלסטית התחתונה (K-16, K-17). על סמך קידוחים אלו נחשפת יחידה שהתפלגות גדלי הגרגר שלה וההרכב הליתולוגי מתאימים לזו של השורה הרחוקה יותר מהחוף [איור 4.1.1], יחידת חלוקים עם חול וסילט. מעל היחידה הקלסטית התחתונה מונחת יחידת האלמוגים, יחידה רציפה (בדומה לחתך הרחוק מהחוף) המתעבה גם כן לכיוון דרום מערב (בכ-6 מטרים). היחידה הקלסטית העליונה נעדרת בקידוחים אלו. מילוי מלאכותי מופיע בקידוח K-17.



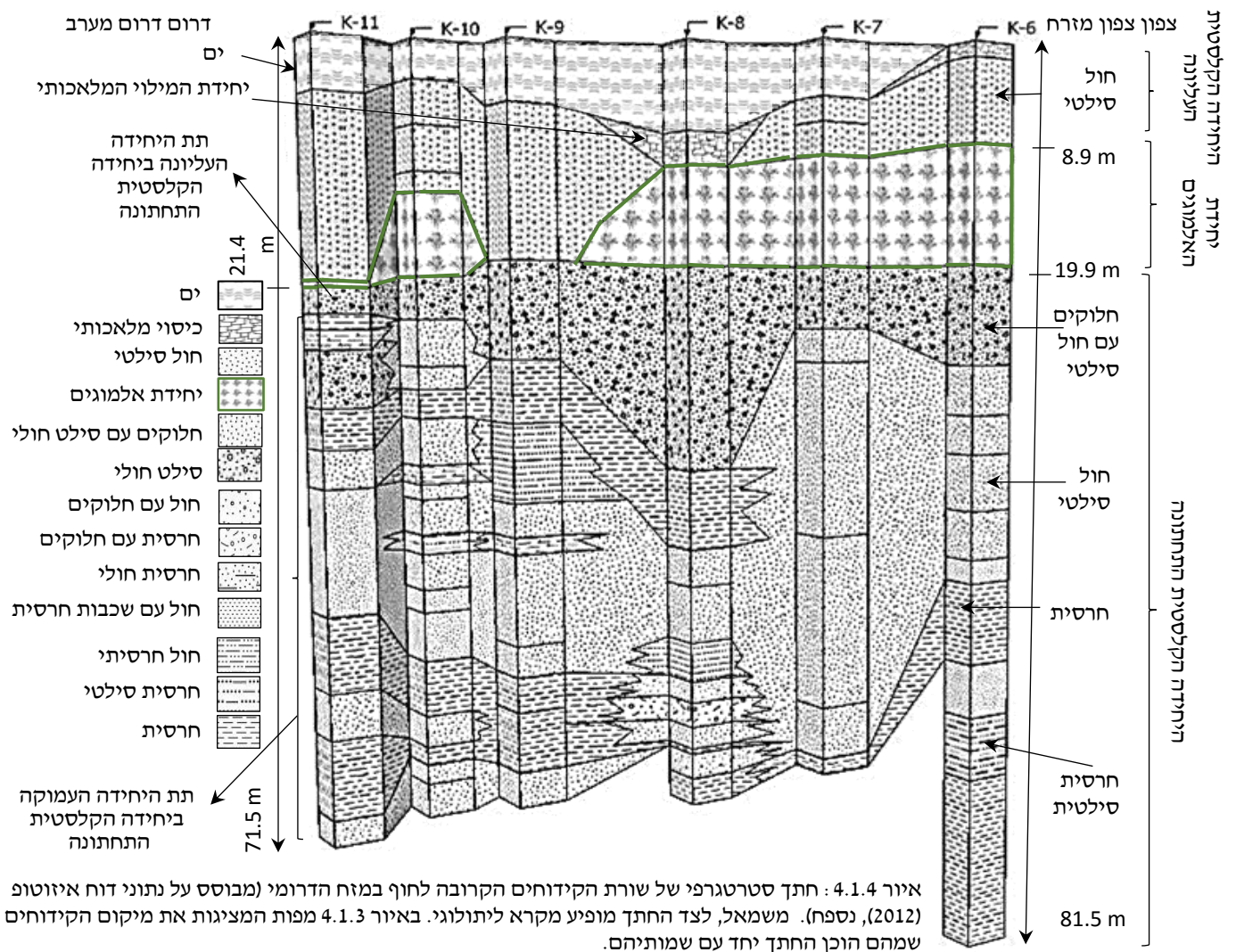
תת היחידה העמוקה ביחידה הקלסטית התחתונה במזח הדרומי [איור 4.1.3] בעלת התפלגות גדלי גרגר שונה מזה של תת היחידה העמוקה הבונה את הקידוחים במזח הצפוני [איור 4.1.1]. בתת היחידה העמוקה במזח הדרומי חילופין בין שכבות של חול, סילט ובין שכבות חרסיתיות שנפוצותן גוברת לכיוון דרום מערב. יחידות החול מתחלפות אחת עם השנייה במרחב ולעיתים מכילות עדשות או שכבות דקות (של עד 20 ס"מ). שכבות החרסית והסילט הן לרוב דקות יחסית, מופיעות כתת שכבות בשכבות אחרות וגם כעדשות [נספח דוח

תת היחידה העליונה של היחידה הקלסטית התחתונה במזח הדרומי [איור 4.1.3] בעלת התפלגות גדלי גרגר דומה לזו של המזח הצפוני [איור 4.1.1], חלוקים עם כמויות משתנות של חול וסילט.



יחידת האלמוגים המונחת על היחידה הקלסטית התחתונה, אינה רציפה [איור 4.1.3]. יחידת האלמוגים חסרה בקידוחים K-3, K-4 (קידוח K-20 קצר יחסית ולכן, יתכן שגם שם נעדרת או שעמוקה יותר מהעומק שאליו הגיע הקידוח). מעל יחידת האלמוגים, היחידה הקלסטית העליונה. יוצאי דופן קידוחים K-1, K-2 שלהם יחידת המילוי המלאכותי מצויה על גבי יחידת האלמוגים.

בדומה לשורה הרחוקה מהחוף במזרח הדרומי [איור 4.1.3], גם בשורת הקידוחים המקבילה לה [איור 4.1.4] תת היחידה העמוקה של היחידה הקלסטית התחתונה מורכבת מחילופים של חול דק עם סילט וחרסיות. מעל תת היחידה העמוקה מונחת תת היחידה העליונה של היחידה הקלסטית התחתונה, המורכבת מחלוקים עם כמויות משתנות של סילט וחול, המתאימה לזו שנצפתה במזרח הצפוני. מעל היחידה הקלסטית התחתונה מונחת יחידת האלמוגים. אלמוגים נחשפו בכל הקידוחים מלבד קידוח K-9. יחידת האלמוגים מדקת לכיוון דרום דרום מערב [איור 4.1.4] ודקה במיוחד בקידוח K-11. מעל האלמוגים, היחידה הקלסטית העליונה. במספר מצומצם של קידוחים (קידוח K-6 ו-K-8) מעל היחידה הקלסטית העליונה, יחידת המילוי מלאכותי של חול עם חלוקים ובולדרים.



להלן מוצג פירוט ההרכב הליתולוגי של היחידות הסטרטיגרפיות השונות.

#### 4.1.1 הרכב ליתולוגי של היחידה הקלסטית התחתונה

היחידה הקלסטית התחתונה מורכבת משתי תתי יחידות, תת היחידה העמוקה ותת היחידה העליונה. במזח הצפוני שתי תתי היחידות מורכבות בעיקר מחלוקים תת מעוגלים גסים ודקים ולעיתים בולדרים (עד 80 ס"מ) בעלי הרכב סלעי מגוון, קונגלומרט עם אבני חול, מגמטיט, מטאבזיט, דיורט, גרניטים, גרנודיוריט ועוד [נספח דוח איזוטופ]. לדוגמא, ביחידה זו בקידוח K-1, אחוז החלוקים בין 30% ועד 70%. זוהו חלוקי אבני חול, גנייס, גרניט ועוד [איור 4.1.5]. המטריקס סילטי חולי. לקידוח K-2 50-60% מהיחידה הם חלוקי גרניט ואבן חול מעוגלים. המיון רע, המטריקס סילטי חולי [נספח דוח איזוטופ].



איור 4.1.5 : תמונות של דוגמאות היחידה הקלסטית התחתונה משני קידוחים. מימין, דוגמא מקידוח K-1 מעומק 16.8-19.4 מטר מתחת לפני הים. המיון רע מאוד, בולדר גרניטי, אורכו כ-10 סנטימטרים ורוחבו עלה על קוטר הקידוח. חלוק קטן יותר, כ-5 סנטימטרים אורכו, מעוגל יחד עם שברים מסלעי תשתית במגוון גדלים. משמאל, קידוח K-2 מעומק 25-27.5 מטר מתחת לפני הים. אבן חול שאורכה כ-10 סנטימטרים וחלוק גרניט שגודלו כ-5 סנטימטרים.

באזור המזח הדרומי תתי היחידות שונות מאוד. תת היחידה העמוקה מכילה שכבות ועדשות של חול, חול סילטי, סילט וחרסיות. פיזור השכבות החרסתיות מול החוליות יחסית אחיד. לחלק מהן מבנה עדשתי ויתכן ובניהן מעבר מאוצבע.

בכדי לאפיין את הסדימנטים הבונים את תת היחידה העמוקה במזח הדרומי של היחידה הקלסטית התחתונה, נבחנו מספר דוגמאות תחת בינוקולר [נספח תיאור תת היחידה העמוקה במזח הדרומי]. היחידות לבנות, צהבהבות, אדמדמות ואפורות. מכילות גרגרי קוורץ, מיקות ופלדספר [איורים 4.1.6.1, 4.1.6.2, 4.1.6.3, 4.1.6.4]. בנוסף למינרלים המגמטיים, תתי השכבות מכילות גם רכיב קרבונטי וגבישי מלח.

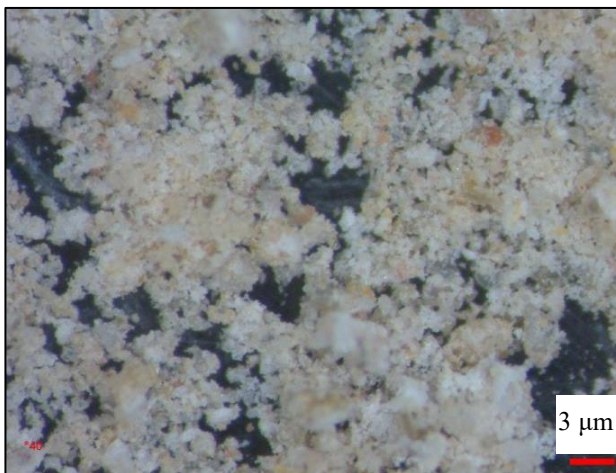
גדלי הגרגר נעים בין חול דק לסילט וחרסית. המיון טוב עד טוב מאוד. מידת העיגוליות בינונית עד טובה. היחידות דחוסות יחסית וחלקן פרירות מאוד. שכבות דקות זוהו בחלקן. בתת היחידה העמוקה של היחידה הקלסטית התחתונה המגוון הביולוגי מצומצם מאוד, זוהו מחטים שקופות למחצה ודקיקות, חלקן גמישות שכנראה מעידות על נוכחות אורגניזמים בלתי מזוהים.



איור 4.1.6.2: תמונה תחת ביניקולר מקידוח K-9, 22.7-24.2 מטר. הגדלה פי 16. בדוגמא פרגמנטים קטנים מאוד. עשיר בקוורץ, יחד עם מטריקס דק במיוחד קלציטי.



איור 4.1.6.1: תמונה תחת ביניקולר מקידוח K-10, 35.6-36.2 מטר. הגדלה פי 10. בדוגמא פרגמנטים רבים מזוותים שמקורם בגרניט יחד עם מטריקס דק במיוחד קלציטי וגבישי מלח.



איור 4.1.6.4: תמונה תחת ביניקולר מקידוח K-3, 48.2-52.2 מטר. הגדלה פי 40. בדוגמא שברי קוורץ, פלדספר ומיקות רבים מזוותים יחד עם מטריקס דק במיוחד קלציטי המכיל גבישי מלח.



איור 4.1.6.3: תמונה תחת ביניקולר מקידוח K-2, 48-49.1 מטר. הגדלה פי 10. בדוגמא חוואר אפרפר צפוף ומשוכב.

גבולה העליון של תת היחידה העמוקה במזח הדרומי, נע בין עומק 24.3 ועד 42.2 מטר מתחת לפני הים [איור 4.1.4, 4.1.3]. מעליה, תת היחידה העליונה שמורכבת מחלוקים סילטים וחול הדומה לזו של המזח הצפוני.

#### 4.1.2 הרכב יחידת האלמוגים

היחידה מורכבת בעיקר משברי אלמוגים בגדלים שונים ומגוון סוגים [איור 4.1.7.2, 4.1.7.1]. האורך המרבי של שבר אלמוג שנאסף כ-9 סנטימטרים. אומנם, חשוב לזכור שהקידוחים שברו וריסקו את האלמוגים ולכן, קשה לקבוע את גודלם המקורי.

בנוסף לשברי האלמוגים, אורגניזמים בוני שונת נוספים התגלו, דוגמת אצות גירניות, פורמיניפרים וצדפות. המטריקס בעיקרו חול סילטי [איור 4.1.7.2], לפעמים נוטה לגודל חרסיתי, עם שברי סלעים במגוון הרכבים (גרניט, גנייס, אבן חול). בחלק מהיחידה המטריקס בנוי מבוצ' מיקריטי.



איור 4.1.7.2: דוגמאות מיחידת האלמוגים. העומקים שממנו נלקחו הדוגמאות הם 3.2-7.9 מטר מתחת לפני הים. מספר סוגי אלמוגים מאסיביים ומשמאל למטה דוגמה מהמטריקס.



איור 4.1.7.1: דוגמאות מיחידת האלמוגים מקידוח K-7, העומק שממנו נלקחה הדוגמה מצוין בתמונה. ניתן לזהות מספר אלמוגים של פוליפ יחידני.

#### 4.1.3 ההרכב הליתולוגי של היחידה הקלסטית העליונה

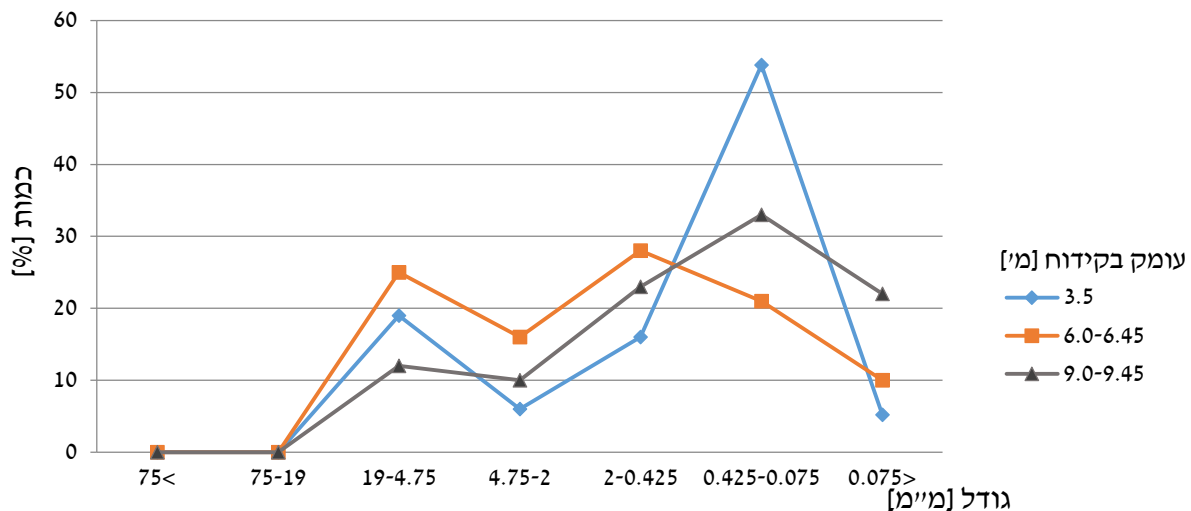
היחידה הקלסטית העליונה הינה יחידת הכיסוי העליון של החתך הטבעי, מונחת מעל יחידת האלמוגים למעט כאשר יחידת האלמוגים חשופה לים (דוגמת קידוח K-15). בקידוחים שעליהם מונחת היחידה המלאכותית, כדוגמת קידוחים K-6, K-17, היחידה הקלסטית העליונה אינה מהווה גבול עליון בחתך.

היחידה הקלסטית העליונה חולית סילטית בצבעי בז', אדום וצהבהב [איור 4.1.8.1]. היחידה מכילה כ-10% חלוקים ממגוון סלעים כדוגמת, גרניט ואבן חול. מעט שברי קונכיות נמצאו ביחידה. בתוך היחידה עדשות סילט.



דוגמאות לבדיקת גדלי גרגר נלקחו ממגוון עומקים ביחידה מתוך קידוחים שונים. למרות הדיגום המגוון נראה כי, ההרכב יחסית זהה. הרכיב העיקרי חול דק מאוד, 85%-60~ [נספח דוח איזוטופ]. במספר קידוחים ישנם חלוקים גסים, כדוגמת K-6 ו-K-9, אחוזם אינו עולה על 20%. יוצא דופן קידוח K-6 [איור 4.1.8.2] שלו סדימנט גס בהשוואה ליתר הקידוחים, שמורכבים כמעט לחלוטין מחול וחול דק מאוד עד סילט.

איור 4.1.8.1: דוגמת יד מקידוח K-7 מעומק 5.8-6.7 מטר מתחת לפני הים. חול סילטי דחוס עם חלוקים.



4.1.8.2: התפלגות גדלי גרגר (באחוזים) בעומק 3.5, 6-6.45, 9-9.45 מטר מתחת לפני הים בקידוח K-6. מימין מקרא. ההתפלגות בימודלית. לא קיימת מגמה ברורה בהתפלגות גדלי הגרגר עם העומק. רכיב החול דומיננטי בשלוש נקודות הדגימה. ב-6-6.45 מטר אחוז החלוקים גבוה בהשוואה לדוגמאות שנמדדו תחת ומעל.

#### 4.1.4 יחידת המילוי המלאכותי

יחידת המילוי המלאכותי נמצאה באזורים מצומצמים בלבד באזור המחקר. היחידה מורכבת מבולדרים של סלעי הסביבה על שברי בטון.

בקידוח K-6 לדוגמא, היחידה מורכבת מבולדרים ממגוון הרכבים מינרלוגיים ומהווה חלק מקיר המזח. ביתר הקידוחים המכילים כיסוי אנתרופוגני, היחידה מורכבת מחול אדמדם צהבהב ומכילה 10-30% חלוקים ממגוון סוגי מסלע.



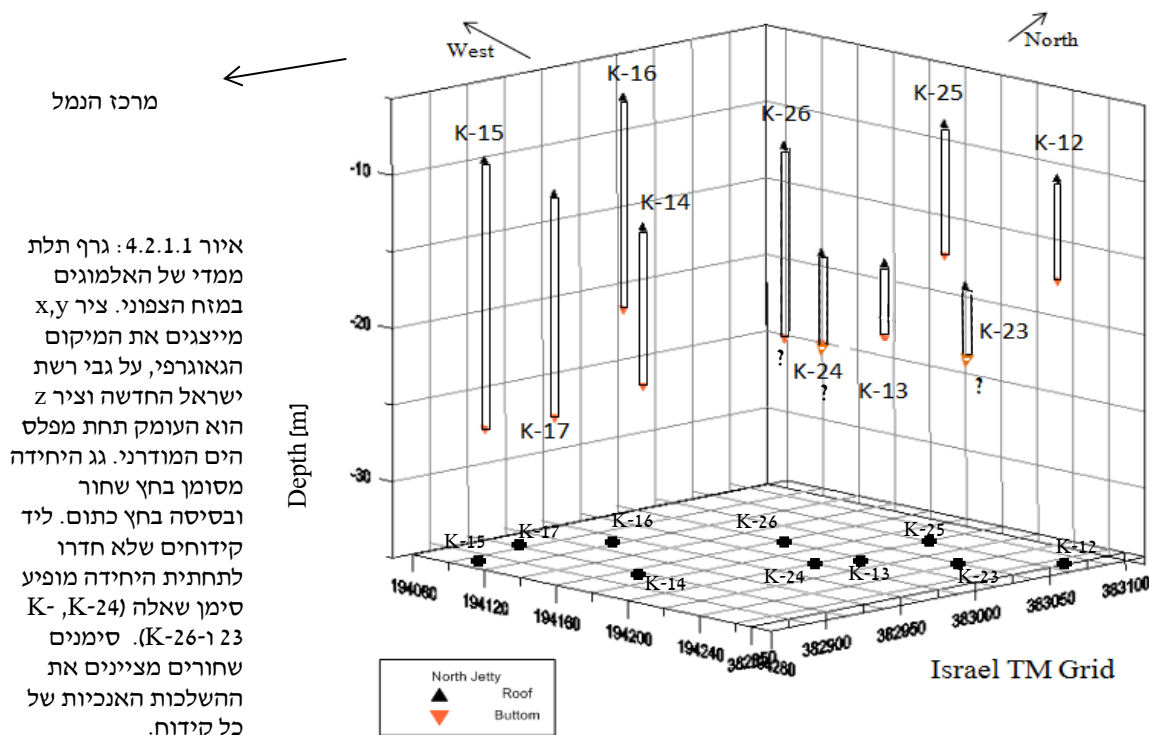
איור 4.1.9: יחידת המילוי המלאכותי שהוספה. מימין, תמונה של דוגמת יד מיחידה זו בקידוח K-2 בעומק 9-10.6 מטר מתחת לפני הים. בתמונה מספר סוגי סלעים, כדוגמת גרניט ואבן חול. המיון רע, החל מחול דק ועד חלקים מזוויתיים שממוצע גודלם כסנטימטר. משמאל, קידוח K-1 דוגמת יד מעומק רדוד של 0-3.2 מטר מתחת לפני הים. היחידה שונה מאוד מזו של K-2. מאזור זה נדגם בולדר גרניטי גדול מאוד שרוחבו עלה על קוטר הקידוח ואורכו כ-6 ס"מ. בנוסף לכך, סביב הבולדר חול דק מאוד.

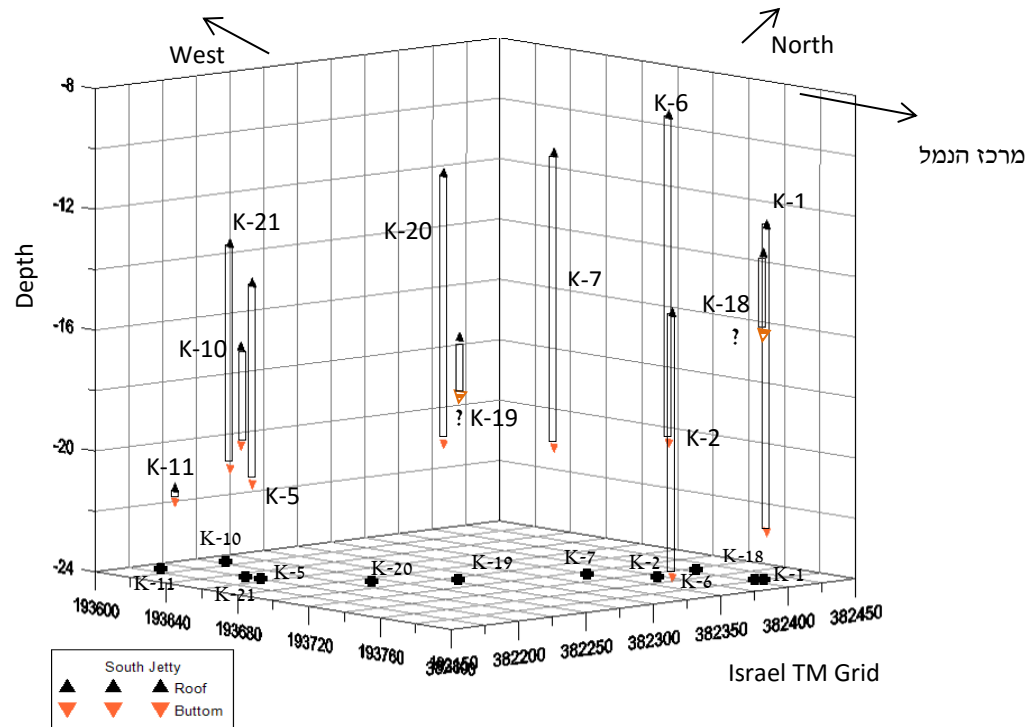
## 4.2 יחידת האלמוגים

### 4.2.1 מבנה מרחבי של יחידת האלמוגים

גג יחידת האלמוגים בקידוחים מופיעה בטווח העומקים 5.5-21.5 מטר מתחת לפני הים. עובייה משתנה במרחב, בין 0.5-18 מטרים.

התפרשות יחידת האלמוגים במרחב הנמל מוצגת באיור 4.2.1.1, 4.2.1.2.





איור 4.2.1.2: גרף תלת ממדי של האלמוגים במזרח הדרומי. ציר x,y מייצגים את המיקום הגאוגרפי, על גבי רשת ישראל החדשה וציר z הוא העומק תחת מפלס הים המודרני. גג היחידה מסומן בחץ שחור ובסיסה בחץ כתום. ליד קידוחים שלא חדרו לתחתית היחידה מופיע סימן שאלה (K-18, K-19). סימני צלב שחורים מציינים את ההשלכות האנכיות של כל קידוח.

יחידת האלמוגים בכל קידוח מוקמה מרחבית תוך התחשבות במיקומה תחת פני הים וההשתרעות האנכית [איור 4.2.1.1]. תופעה בולטת היא התעבות יחידת האלמוגים לכיוון דרום דרום מערב (לדוגמא קידוח K-12 מול קידוח K-15).

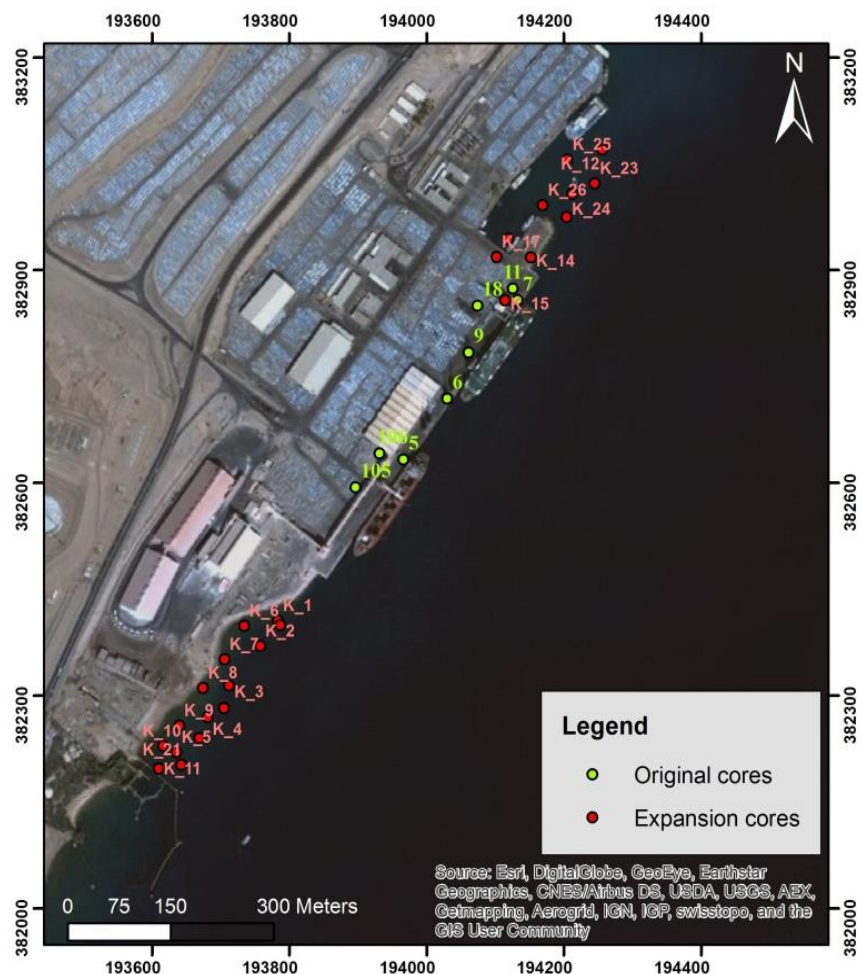
מאיור 4.2.1.1 עולה כי, יחידת האלמוגים בקידוח K-14 עמוקה יחסית (כ-12.6 מטר מתחת למפלס הים) בהשוואה לעומק היחידה בקידוח K-16, שחלקה העליון מצוי בכ-5.5 מטר מתחת למפלס הים. יחידת האלמוגים בקידוחים בשורה הרחוקה מהחוף K-13, K-23, K-24 גם כן עמוקה יחסית (כ-14, 16, 17.7 מטר תחת מפלס הים בהתאמה).

איור 4.2.1.2 מציג את העובי של יחידת האלמוגים לפי הקידוחים השונים במזרח הדרומי. יחידת האלמוגים בקידוחים הרחוקים מהחוף, K-2, K-19, K-11 עמוקה משמעותית בהשוואה לשאר הקידוחים. K-6 לדוגמא, מצוי בעומק של כ-9 מטר מתחת למפלס הים ואילו, K-2 כ-15 מטר מתחת למפלס הים. חלקו העליון של K-19, מופיע ב-16 מטר תחת מפלס הים ואילו, K-7 ב-10 מטרים בלבד.

עובי יחידת האלמוגים במזרח הדרומי מתעבה לכיוון צפון צפון מזרח [איור 4.2.1.2].

בסיכום של עובי יחידת האלמוגים באזור המזרח הצפוני והמזרח הדרומי, נראה שהעובי גדל לכיוון מרכז הנמל. לפיכך, יחידת האלמוגים עבה באזור מרכז הנמל ומדקקת לכיוון השוליים, לקבלת מבנה כיפתי.

דוח קידוחים נוספים, מוקדמים יותר [נספח קידוחים קודמים], בהם נתון עובי היחידות הסטרטגרפיות ותאור כללי, צורפו לשם השלמת התמונה בנוגע למבנה יחידת האלמוגים [איור 4.2.2.1]. מתוך נתוני אלו, חמישה קידוחים מכילים את יחידת האלמוגים ותורמים להבנת המבנה של יחידת האלמוגים, מבנה כיפתי כפי שנראה במפת איזופך איור 4.2.2.2.



איור 4.2.2.1: תמונת לוויין של אזור הנמל. באדום מסומנים קידוחי ההרחבה של הנמל בהם התמקד המחקר ובירוק קידוחים קודמים שנערכו.



## 4.2.2 כרונולוגיה של יחידת האלמוגים

הכרונולוגיה של יחידת האלמוגים נעשתה בשתי שיטות תארוך, שיטת פחמן 14 ושיטת אורניום-תוריום.

### 4.2.2.1 מדידות XRD

האלמוגים שנבחרו בנויים מארגוניט נקי כפי שעולה ממדידות XRD [נספח תוצאות XRD] למעט דוגמא יחידה K-14-127 המכילה כ-10% קלציט.

### 4.2.2.2 שקפים פטרוגרפיים

בנוסף למדידות ה-XRD נבדקו האלמוגים בדיקה פטרוגרפית מתחת למיקרוסקופ.

בכל דוגמאות האלמוגים שנבדקו, 29 במספר, נשמר השלד המקורי המורכב מארגוניט [תיאור השקפים המלא בנספח תאור שקפים פטרוגרפיים]. השלד מורכב מסיבי ארגוניט שהתפתחו ממרכזי קלסיפיקציה מעגליים [בנספח תאור שקפים פטרוגרפיים, איור h,g] (הזיהוי מסתמך על השוואה לשקפים של Weil (2008) ולהבדלים של שקפים אלו לשקפים שבהם חלו החלפות, המתוארים במאמר של Bar-Matthews et al. (1993)).

החללים במרבית דוגמאות שלדי האלמוגים במחקר הנוכחי ריקים [לדוגמא, איור c,d,f בנספח תיאור שקפים פטרוגרפיים]. מטריקס מיקריטי שזוהה בשקפים מרוכז בגבולות החיצוניים של שלדי האלמוג [איור c2, y1 בנספח תיאור שקפים פטרוגרפיים]. הסדימנט שחדר לתוך החללים [כדוגמא איור k,i,u בנספח תיאור שקפים פטרוגרפיים] בעיקרו מטריקס מיקריטי עם שברי סלע קריסטליניים קטנים מאוד (מספר מיקרוני). החללים המלאים במטריקס מעטים מאוד [איור u, p1 בנספח תיאור שקפים פטרוגרפיים] ומבין החללים שהתמלאו בסדימנט, מרביתם בכיסוי חלקי בלבד [איור i1,z בנספח תיאור שקפים פטרוגרפיים].

בכל השקפים נמצא רכיב של צמנט ארגוניטי משני אולם, כמותו ומיקומו שונה. בדוגמאות המכילות ארגוניט משני, הוא מתפתח בתוך החללים של השלד ולא על גבי הספטות [לדוגמא, איור b,s,w,x,y בנספח תיאור שקפים פטרוגרפיים]. אין כל החלפות של השלד הקיים בארגוניט משני. הארגוניט המשני לרוב צמוד לדופן "קורות" השלד, בשורה אחת של גבישים ולא יותר. הגבישים של הארגוניט המשני בעלי מבנה מחטי גס בהשוואה לסיבי השלד המקוריים העדינים. הארגוניט המשני שהתפתח בשקף K-6 bottom, בעל טקסטורה מגוונת, שזוהתה רק בשקף זה. הארגוניט בחללים נראה דחוס יותר ויתכן ועבר איחוי מסוים. לו צורה דמוית מניפה או מברשת [איור c2, d2 בנספח תיאור שקפים פטרוגרפיים].

תוצאות ה-XRD וכן, אנליזת השקפים הפטרוגרפיים מאששות כי השלד הארגוניטי המקורי של האלמוגים נשמר. אי לכך, המערכת נשמרה סגורה ודוגמאות אלמוגים אלו מתאימות לתארוך.

### 4.2.2.3 תארוך בשיטת פחמן 14

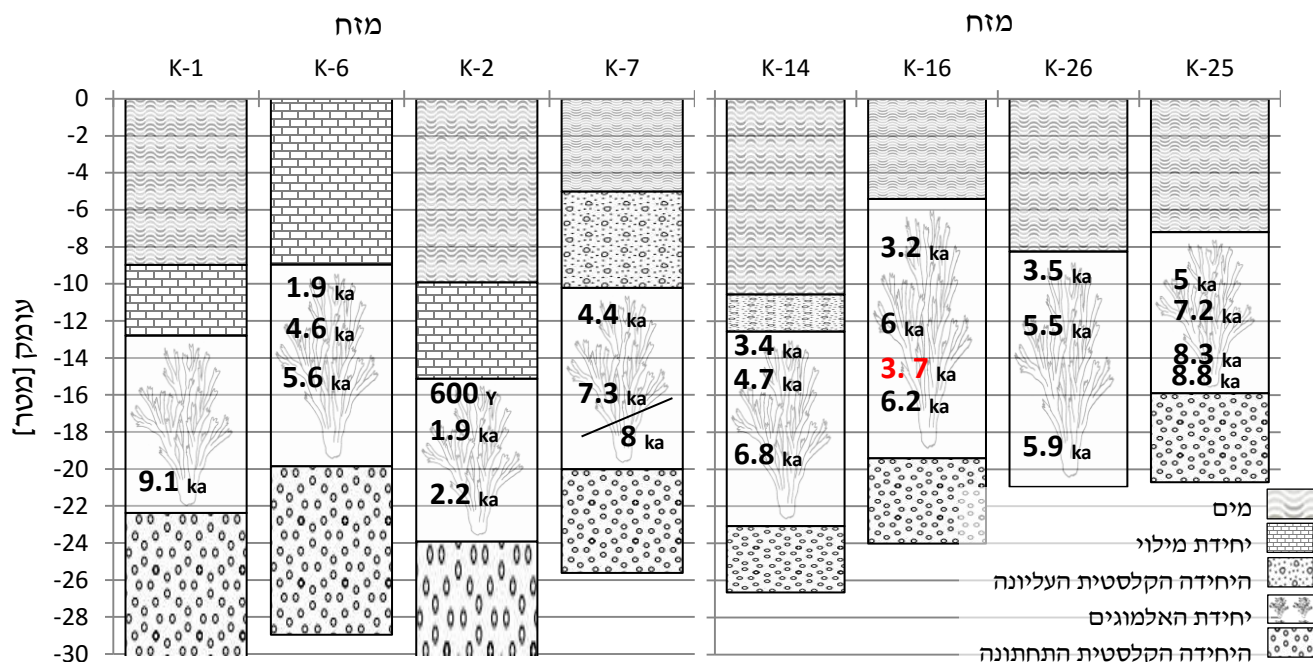
עשרים וארבע דוגמאות אלמוגים נלקחו משמונה קידוחים לתארוך בשיטת פחמן 14. טווח הגילים שהתקבל בין כתשעת אלפים שנים ועד 600~ שנים לפני ההווה של גילי פחמן 14 (שנת 1950) [טבלה 1].

| Core  | Sample | Depth [b.s.l] m | Serial number in the lab | Measured age | $\delta^{13}\text{C}$ (‰) | Conventional age (after fractionation correction) | Calendar age(2σ) |
|-------|--------|-----------------|--------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------------------------------|------------------|
| K-1   | 65-1   | 20.9            | 339097                   | 8200±30      | -0.9                      | 8600±30                                           | 9220-8990        |
| K-2   | 35     | 15.7            | 339098                   | 710±30       | -0.9                      | 1110±30                                           | 640-510          |
| K-2   | 40     | 17.7            | 339099                   | 2030±30      | -3.3                      | 2390±30                                           | 1960-1800        |
| K-2   | 43     | 21.8            | 39100                    | 2250±30      | -0.8                      | 2650±30                                           | 2300-2100        |
| K-6   | 68-1   | 14.2            | 339101                   | 5020±40      | -0.8                      | 5420±40                                           | 5740-5570        |
| K-6   | 80     | 10.2            | 339102                   | 2040±30      | -2.5                      | 2410±30                                           | 1980-1810        |
| K-6   | 82     | 12.8            | 339103                   | 4170±40      | -1.4                      | 4560±40                                           | 4780-4480        |
| K-7   | 26-1   | 16.3            | 339104                   | 6510±40      | -2.1                      | 6890±30                                           | 7400-7210        |
| K-7   | 27-1   | 16.3            | 339105                   | 7270±30      | -1.7                      | 7650±30                                           | 8040-7920        |
| K-7   | 7-7.83 | 12.1            | 339096                   | 4010±30      | -1.7                      | 4390±30                                           | 4490-4270        |
| K-14  | 117    | 13.4            | 341034                   | 3180±30      | +1.4                      | 3610±30                                           | 3440-3300        |
| K-14  | 120    | 15.2            | 341035                   | 4240±30      | +0.8                      | 4660±30                                           | 4830-4630        |
| K-14  | 123    | 19.3            | 341036                   | 6020±30      | +1.7                      | 6460±30                                           | 6900-6710        |
| K-16  | 103    | 8.3             | 341037                   | 300±30       | +2.6                      | 3450±30                                           | 3300-3070        |
| K-16  | 105    | 12.7            | 341038                   | 5370±30      | -0.4                      | 5770±30                                           | 6160-5930        |
| K-16  | 107    | 14.4            | 341039                   | 3490±30      | -1.1                      | 3880±30                                           | 3810-3580        |
| K-16* | 109    | 16.5            | 341040                   | 5540±30      | -1.8                      | 5920±30                                           | 6280-6160        |
| K-25  | 165    | 10.5            | 341041                   | 4500±30      | -1.5                      | 4890±30                                           | 5200-4880        |
| K-25  | 168    | 12.5            | 341042                   | 6420±30      | +1.3                      | 6850±30                                           | 7320-7170        |
| K-25* | 171    | 14.7            | 341043                   | 7630±40      | -1.3                      | 8020±40                                           | 8440-8290        |
| K-25  | 172    | 16.5            | 341044                   | 7960±30      | -0.2                      | 8370±30                                           | 8950-8620        |
| K-26  | 132    | 11.3            | 341046                   | 3420±30      | -2.2                      | 3790±30                                           | 3670-3460        |
| K-26  | 139    | 18.9            | 341047                   | 4790±30      | +1.6                      | 5230±30                                           | 5560-5400        |
| K-26  | 144    | 9.8             | 341048                   | 5250±30      | +1.1                      | 5680±30                                           | 6010-5880        |

טבלה 1: תוצאות המדידות של פחמן 14 מדוגמאות אלמוגים מקידוחי נמל אילת. שמות הקידוחים שמהם נדגמו האלמוגים בעמודות core [מפות באיורים 4.1.1, 4.1.3]. מספר הדוגמא באוניברסיטה העברית ומספר הדוגמא במעבדות בטא [דוח איזוטופ], Sample number in lab ו-Sample בהתאמה. העומקים של הדוגמאות הם במטרים מתחת למפלס הים (below sea level). עמודת הגיל הנמדד (measured age) לפי הסטנדרט NIST ו-SRM 4990C [נספח דוח גילי פחמן 14]. יחסי  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  מוצגים כ- $\delta^{13}\text{C}$  לפי סטנדרט PDB-1 בפר מיל. ה-conventional age הוא הגיל הנמדד מתוקן לפרקציונציה איזוטופית, מחושב לפי ה- $\delta^{13}\text{C}$ . הגיל הקלנדרי מחושב לפי ה-conventional age לזמן ריבואר (מקומי) של 121 שנים. הגיל הקלנדרי מוגדר ביחס להווה שהוא שנת 1950. השגיאה מוצגת ב-2σ. הדוגמאות שנמדדו ב-AMS מסומנות בכוכבית.

עשרים ושתיים דוגמאות נמדדו בשיטת מונה חלקיקי  $\beta$  ושתי דוגמאות בשיטת AMS (K-16-109, K-25-171), מסומנות בטבלה בכוכבית).

גילי פחמן 14 (גיל קלנדרי) שהתקבלו מוצגים על חתכי הקידוחים באיור 4.2.3.



איור 4.2.3 : חתכים של החלק העליון של שמונת הקידוחים מהם נלקחו דוגמאות לתארוך. מימין מופיעים הקידוחים מהמזח הצפוני ומשמאל, הקידוחים מהמזח הדרומי. משמאל לאיור מופיע ציר העומק מתחת למפלס הים. גילי הפחמן 14 שהתקבלו מצוינים על גבי יחידת האלמוגים, על פי מיקומם. באדום, בקידוח K-16 מסומן גיל שאינו מתאים לסדר הכרונולוגי. מקרא ליחידות הסטרטגרפיות מופיע מימין למטה.

הגילים הקלנדריים שהתקבלו משיטת פחמן 14 נעים בין 2-9.1~ אלפי שנים לפני ההווה. מרבית הגילים נמצאים בטווח הזמנים 3.4-6 אלפי שנים. בקידוח K-2, יוצא דופן, התקבל גיל של כ-600 שנים [איור 4.2.3].

הגילים בקידוחים מסודרים ברצף כרונולוגי, למעט קידוח K-16 [באדום, איור 4.2.3]. גיל של 3700~ שנים לפני ההווה התקבל מתחת (עמוק יותר) לגיל של כששת אלפים שנים. הדוגמא שגילה 3700~ שנים חריגה ולכן, לא נעשה בה שימוש בעיבוד הנתונים.

#### 4.2.2.4 תארוך בשיטת U-Th

שבע עשרה דוגמאות אלמוגים נלקחו משמונה קידוחים לתארוך בשיטת אורניום תוריום. הדוגמאות שנלקחו לתארוך בשיטת אורניום תוריום הן מאותם אלמוגים שתוראכו בשיטת פחמן 14 בכדי שיהיה ניתן להשוות בין התוצאות. טווח הגילים שהתקבל מעל עשרת אלפים שנים לפני ההווה ועד 2000~ שנים לפני ההווה. תוצאות התארוך בשיטת אורניום – תוריום מרוכזות בטבלה להלן :

| Core | Sample | Depth [b.s.l] m | Age       | $\delta^{234}\text{U}_{\text{int.}}$ (‰) | $\left[ \frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}} \right]_A$ | $\left[ \frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right]_A$ | $^{232}\text{Th}$ [ppm] | $^{238}\text{U}$ [ppm] |
|------|--------|-----------------|-----------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| K-1  | 65-1   | 20.9            | 10126±130 | 149±3.7                                  | 1.145±4                                                  | 0.102±2                                                   | 0.002±0.2               | 2.40±0.04              |
| K-1  | 65-2   | 20.9            | 10061±160 | 149±3.7                                  | 1.145±4                                                  | 0.101±2                                                   | 0.002±0.2               | 2.30±0.04              |
| K-2  | 43     | 21.8            | 2107±40   | 144.1±3.4                                | 1.143±3                                                  | 0.022±1                                                   | 0.039±1                 | 2.10±0.04              |
| K-6  | 68-1   | 14.2            | 6554±100  | 155.8±3.5                                | 1.153±3                                                  | 0.070±1                                                   | 0.015±0.5               | 2.50±0.04              |
| K-6  | 68-2   | 10.2            | 5448±80   | 150.6±3.9                                | 1.147±4                                                  | 0.056±1                                                   | 0.085±0.3               | 2.50±0.04              |
| K-7  | 26-1   | 16.3            | 7879±135  | 158.6±4.1                                | 1.155±4                                                  | 0.081±1                                                   | 0.014±0.5               | 2.60±0.04              |
| K-7  | 26-2   | 15.7            | 8878±210  | 151.8±3.6                                | 1.148±4                                                  | 0.089±2                                                   | 0.006±0.8               | 2.70±0.05              |
| K-14 | 117    | 13.4            | 3186±50   | 152.7±3.7                                | 1.151±4                                                  | 0.033±1                                                   | 0.118±0.53              | 4.30±0.08              |
| K-14 | 120    | 15.2            | 4129±75   | 152.3±4.1                                | 1.151±4                                                  | 0.043±1                                                   | 0.122±0.3               | 3.40±0.08              |
| K-16 | 105    | 12.7            | 5923±80   | 152.0±4.4                                | 1.149±4                                                  | 0.061±1                                                   | 0.064±0.3               | 2.80±0.06              |
| K-16 | 107    | 14.4            | 5792±100  | 155±4.9                                  | 1.152±5                                                  | 0.059±1                                                   | 0.042±0.2               | 2.50±0.06              |
| K-16 | 109    | 16.5            | 7368±140  | 152±4                                    | 1.149±4                                                  | 0.075±1                                                   | 0.035±0.2               | 2.60±0.05              |
| K-25 | 165    | 10.5            | 4763±90   | 151.1±4.8                                | 1.149±5                                                  | 0.049±1                                                   | 0.095±0.3               | 3.10±0.06              |
| K-25 | 171    | 14.7            | 8440±170  | 152.7±4.2                                | 1.149±4                                                  | 0.085±2                                                   | 0.059±0.2               | 2.50±0.05              |
| K-25 | 172    | 16.5            | 6980±90   | 171.4±3.2                                | 1.168±3                                                  | 0.072±1                                                   | 0.106±0.2               | 2.70±0.05              |
| K-26 | 139    | 18.9            | 5245±70   | 143.0±4.3                                | 1.141±4                                                  | 0.054±1                                                   | 0.055±0.2               | 2.70±0.05              |
| K-26 | 144    | 9.8             | 11181±140 | 157.1±4.1                                | 1.152±4                                                  | 0.112±1                                                   | 0.185±0.6               | 2.9±0.06               |

טבלה 2: ריכוז תוצאות תארוך אורניום – תוריום וריכוזי איזוטופים מדוגמאות אלמוגים מקידוחי נמל אילת. נעשה תיקון דטריתי של Th/U כשהיחס מוערך ל-1.8 לאלמוגים שגילם צעיר מ-5500 שנים ותיקון יחס Th/U של 1 לאלמוגים המבוגרים מ-5500 שנים. בהנחה של שיווי משקל סקולרי בין איזוטופי האורניום והתוריום בחומר הדטריתי. שמות הקידוחים שמהם נדגמו האלמוגים בעמודת core. מיקום הקידוחים על מפות באיור 4.1.1, 4.1.3. מספר הדוגמא באוניברסיטה העברית בעמודת Sample. העומקים של הדוגמאות הם במטרים מתחת למפלס הים (below sea level – b.s.l). גילי האורניום תוריום עם השגיאה מוצגת ב-2σ. השגיאה על הגיל חושבה מתוך השגיאה של  $\delta^{234}\text{U}_{\text{int.}}$  עמודת  $\delta^{234}\text{U}_{\text{int.}}$  היא הסטייה החלקית מערך שיווי המשקל בפר מיל, השגיאה ב-2σ. עמודות  $[^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_A$  ו- $[^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}]_A$ .

לגילים שהתקבלו בשיטת אורניום תוריום נעשה תיקון דטריתי של Th/U כשהיחס מוערך ל-1.8 לאלמוגים הצעירים מ-5500 שנים ותיקון יחס Th/U של 1 לאלמוגים מבוגרים מזה. בהנחה של שיווי משקל סקולרי בין איזוטופי האורניום והתוריום בחומר הדטריתי [גרף גילי אורניום תוריום בנספח].

אחת ההנחות הבסיסיות בתארוך בשיטת אורניום תוריום היא שריכוז ה- $^{230}\text{Th}$  בזמן השקעת השלד הוא אפסי, אי לכך יחסי האקטיביות של  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  שואף לאפס. כמו כן, האלמוג חייב להיות נקי מחומר דטריתי שיכול

לתרום לו אורניום ותוריום. בכדי להעריך אם האלמוג מזוהם באורניום ותוריום ממקור דטריתי, הושוו הגילים שהתקבלו מתארוך פחמן 14, שמוערכים כמהימנים, לגילי האורניום ותוריום (באותן הדוגמאות). התיקון נעשה על פי הערכה של היחס Th/U בחומר הדטריתי ובהנחה שהאיזוטופים של אורניום ותוריום בסדרת הדעיכה של  $^{238}\text{U}$  נמצאים במצב של שיווי משקל סקולרי.

גילי דוגמאות האלמוגים בשיטת אורניום ותוריום עם תיקון דטריתי שמניח Th/U בחומר הדטריתי של 1.8 מתאים לטווח של גילים הצעיר מ-5500~ ותיקון שמניח שהערך של Th/U בחומר הדטריתי הינו 1 מתאים לאלמוגים שגילם עולה על חמש אלפים וחמש מאות שנים לפני ההווה.

### 4.2.3 מיון אלמוגים

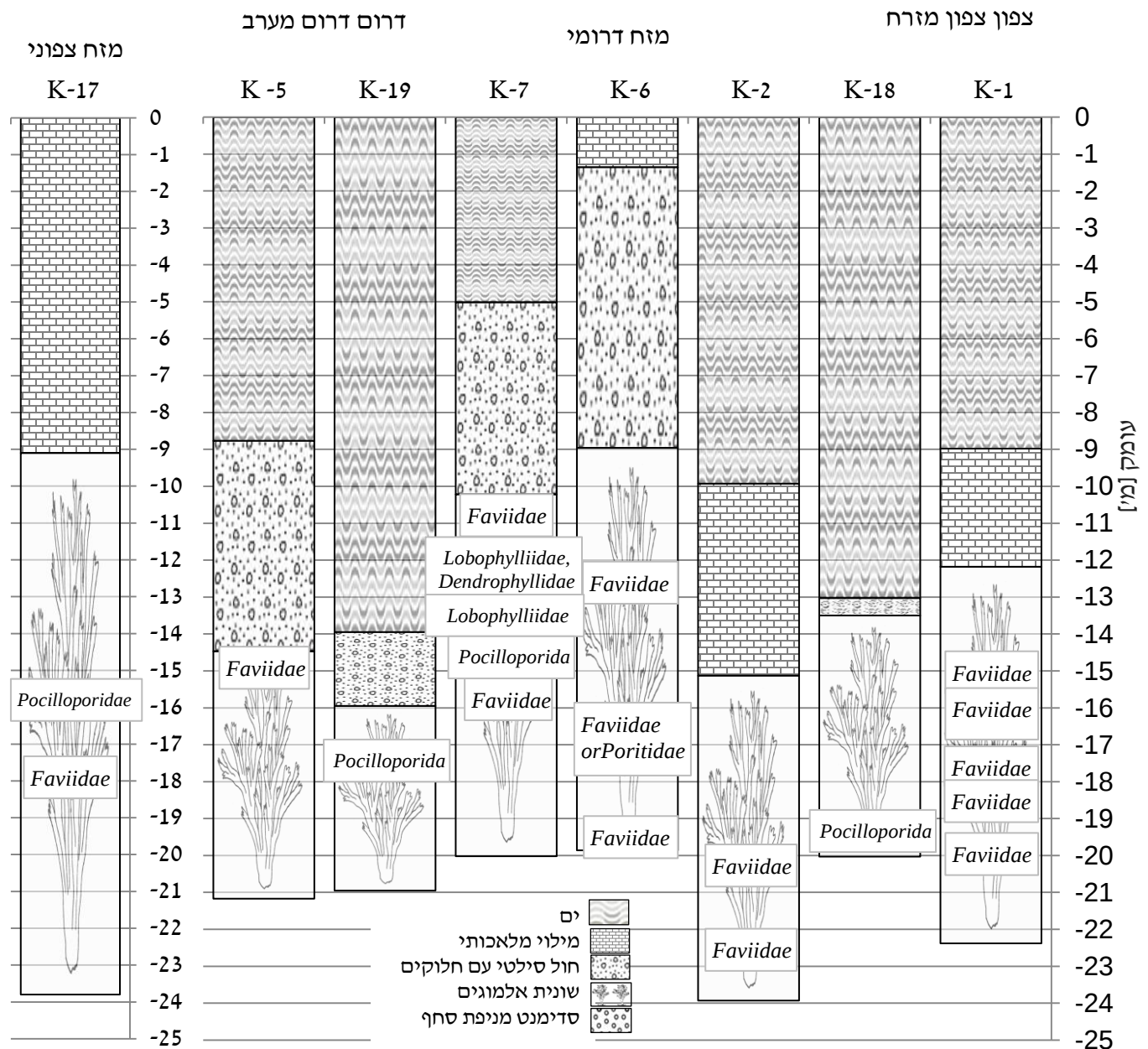
זיהוי האלמוגים נעשה על פי סממנים מורפולוגיים על ידי דוקטור יצחק בריקנר מאוניברסיטת תל אביב. דוגמאות האלמוגים זוהו לרמת המשפחה. שניים מהאלמוגים שזוהו מצויים במזח הצפוני ו-18 במזח הדרומי.

| Core | Depth [m] | Coral classification                                                  |
|------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| K-1  | 3.2 - 3.7 | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-1  | 3.2 - 7   | <i>Faviidae (Favia)</i>                                               |
| K-1  | 4.45 - 6  | <i>Faviidae (Favia fava)</i>                                          |
| K-1  | 3.2 – 7.9 | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-18 | 6.8-7.4   | <i>Pocilloporida (Stylophora)</i>                                     |
| K-2  | 5-6.6     | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-2  | 7-8.6     | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-6  | 3.3-4.4   | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-6  | 7.6-8.6   | <i>Faviidae or Poritidae</i>                                          |
| K-6  | 10.1-11.1 | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-7  | 1 - 1.1   | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-7  | 1 - 2.8   | <i>Lobophylliidae (Lobophyllia),<br/>Dendrophyllidae (Turbinaria)</i> |
| K-7  | 1-1.5     | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-7  | 3.9-4.1   | <i>Lobophylliidae (Lobophyllia)</i>                                   |
| K-7  | 5.8-6.3   | <i>Pocilloporida (Stylophora)</i>                                     |
| K-7  | 6.3-7.8   | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-19 | 1.9-2.4   | <i>Pocilloporida (Stylophora)</i>                                     |
| K -5 | 7.5-8.5   | <i>Faviidae</i>                                                       |
| K-17 | 6.2-7.1   | <i>Pocilloporidae</i>                                                 |
| K-17 | 7.5-8.5   | <i>Faviidae</i>                                                       |

טבלה 3 : פירוט משפחות האלמוגים שזוהו. שמות הקידוחים שמהם נדגמו האלמוגים בעמודת core. מיקום הקידוחים על מפות באיור 4.1.1, 4.1.3. העומקים של הדוגמאות הם במטרים בתוך יחידת האלמוגים. תחת עמודת coral classification מופיעות המשפחות שזוהו. פרטים שזוהו גם לרמת סוג/מין כתובים בסוגריים מימין לשמות המשפחה.

מתוך 20 דוגמאות אלמוגים שזוהו, 70% מהדוגמאות שייכות למשפחת *Faviidae*, 15% למשפחת *Pocilloporida* ומתוכם שלושה לסוג *Stylophora*. יתר הפרטים, נציגים יחידים למשפחה. דוגמא יחידה שהזיהוי שלה אינו ודאי, יתכן ושייכת למשפחת ה-*Poritids* (אלמוג מקידוח K-6, ממין *Goniopora*).

באיור 4.2.4 מוצגים האלמוגים שזוהו במיקומם בחתך הקידוחים. סדר הקידוחים מתאים למיקומם המרחבי [איור 4.1.1, 4.1.3]. האלמוגים השייכים למשפחת *Faviidae* פזורים בכל מרחב העומקים ביחידת האלמוגים.



איור 4.2.4 : חתכים של החלק העליון של שמונה קידוחים (עד יחידת האלמוגים) יחד עם שיבוץ משפחות האלמוגים. משפחות האלמוגים שזוהו מוצגים בעומק בהם נמצאו.

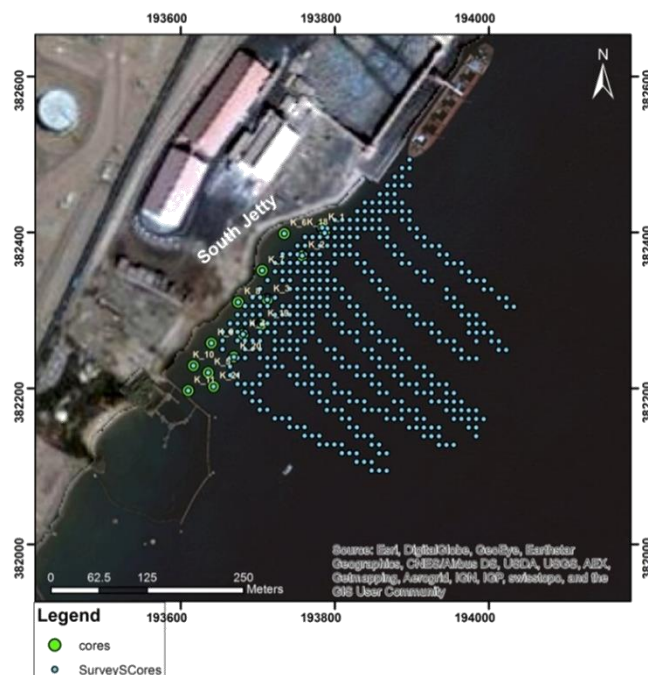
### 4.3 סקר בתימטרי במזח הדרומי

מלבד למאסף הנתונים והאנליזות שנערכו על הקידוחים, סקר בתימטרי באזור המחקר מספק מידע נוסף בלתי תלוי על סטרוקטורת קרקעית המפרץ באזור נמל אילת.

הסקר נערך סביב אזור הנמל, באזור המזח הצפוני והדרומי [איור 3.7]. מדידות עומק באמצעות הסונאר התקבלו באזור המזח הדרומי אולם, לא התקבלו נתוני עומק מהסקר באזור המזח הצפוני.

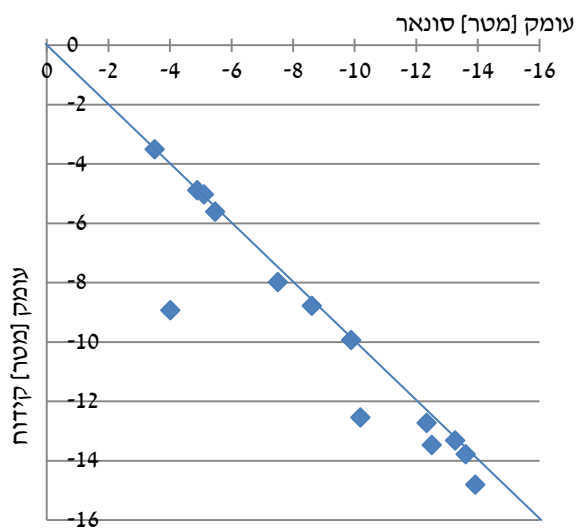
נקודות הדיגום מהסקר מופיעות במפה להלן [איור 4.2.5]. מצורפים לנתונים הבתימטריים עומקי הקרקעית מהקידוחים הגיאוטכניים שנלקחו מדוח איזוטופ (2012). עומקי הקרקעית מנתוני הקידוחים מספקים מידע נוסף באזור הרדוד. כמו כן, עומקי הקרקעית בקידוחים מהווים נתונים להשוואה למידת דיוק ערכי העומקים שהתקבלו בסקר הבתימטרי.

כפי שצוין לעיל, עומקי הקרקעית מהקידוחים הגיאוטכניים הוספו למאגר הנתונים של הסונאר להשוואה למידת דיוק ערכי העומקים. ישנה התאמה טובה בין הנתונים [איור 4.2.6], מלבד בצפון אזור המזח הדרומי, שני הקידוחים הקרובים זה לזה בעלי ערכים חריגים [חץ שחור, איור 4.2.7]. שני עומקים חריגים שהתקבלו במדידות הסונאר רדודים יותר בהשוואה לנתוני הקידוחים, בכ-2 מטר. יתכן והשוני נובע משגיאות מדידה, הסטה של הסירה ששינתה את זווית קליטת הגלים בסונאר ומכך חלה שגיאה בחישוב העומק (החישוב מניח זווית ישרה) וכדומה.

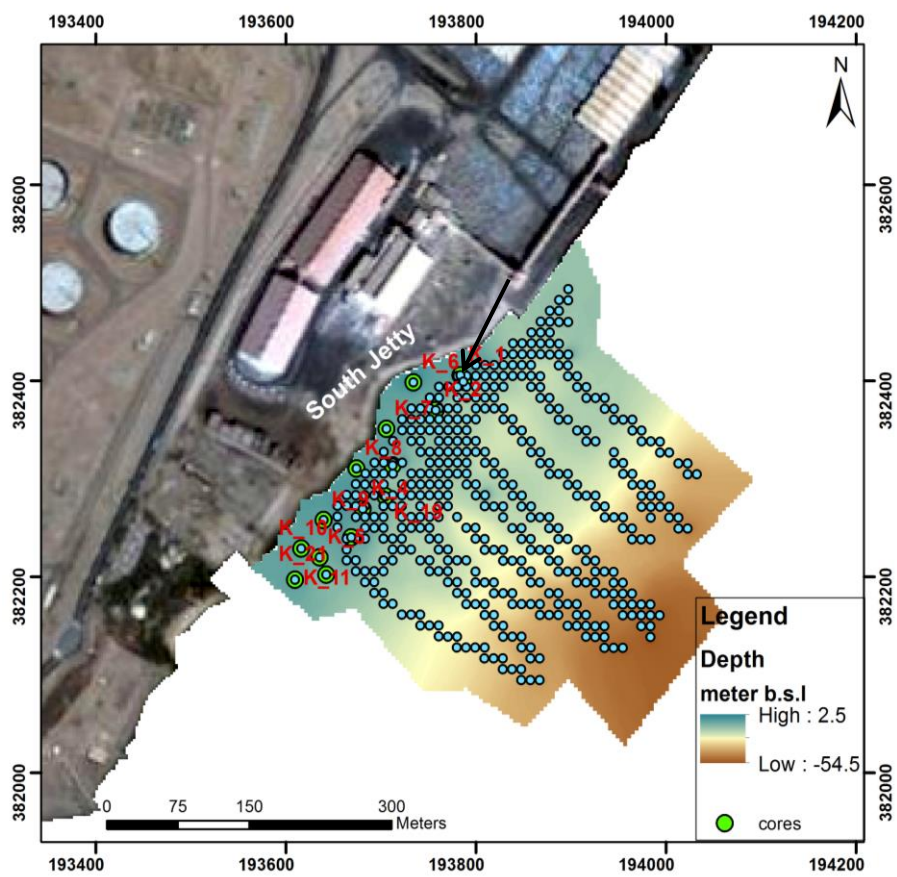


איור 4.2.5: מפת לוין של אזור המזח הדרומי בנמל אילת. נקודות כחולות מציגות את מקומות דיגום העומק על ידי מערכת הסונאר. העיגולים הירוקים הם הקידוחים הגיאוטכניים. נתוני העומק מקידוחים צורפו לנתוני הסונאר לשם הפקת מפה מפורטת.

מנתוני הסקר והקידוחים הופקה מפה בתימטרית של אזור המזרח הדרומי של נמל אילת [איור 4.2.7].



איור 4.2.6: גרף השוואה בין ערכי העומק שהתקבלו ממדידות הסונאר מול עומק הקרקעית מנתוני הקידוחים הגיאוטכניים.



איור 4.2.7: מפה בתימטרית ברזולוציית תאים של 2 מטר, מתוך נתוני עומק מהסקר הסייסימי והקידוחים. עיגולים בתכלת מסמנים את מסלול הסקר. אינטרפולציה מסוג IDW. בירוק הקידוחים של המזרח הדרומי. מימין מקרא.

## 5. דיון

### 5.1 מבוא

פרק הדיון עוסק בשחזור הכרונולוגיה וסביבות ההשקעה של שונית האלמוגים שהתפתחה באזור נמל אילת. בפרק משולבות תוצאות מתארוך האלמוגים, מיון אלמוגים, הפטרוגרפיה של האלמוגים וכן נתונים מינרלוגיים וסדימנטריים (גדלי גרגר) של סדימנטים ששקעו באזור הנמל מתחת ומעל ליחידת האלמוגים. הנתונים האלו משולבים עם נתונים בתימטרים. מכלול הנתונים מעיד על סביבות השקעת הסדימנטים, מפלס הים היחסי והתהליכים הטקטוניים בחלוקן באזור נמל אילת.

### 5.2 סביבות השקעה של הסדימנטים בנמל אילת

היחידה הקלסטית התחתונה מורכבת משתי תתי יחידות. תת היחידה העמוקה בקידוחי המזח הדרומי (מתחת ל-30 מטר עומק), השייכת ליחידה הקלסטית התחתונה, מורכבת בעיקר מחול דק מאוד [איור 4.1.4, 4.1.3] בחילופין עם חרסיות וסילט, המעידים על משטר זרימה חלש במיוחד. על פי הערכתי מדובר בסדימנטים הבונים מניפת סחף והקידוחים חושפים את חלקן היבשתי של מניפות אלו. לנוף המפרץ שכנראה לא השתנה בעשרות אלפי השנים האחרונות, הובלו סדימנטים דקים על ידי נחלים (שאפיקיהם כיום מקוטעים בעקבות בנייה). מהשטפונות נותרו מים בשקעים מוגבלים על משטח ההצפה אשר בהם הושקעו יחידות החרסית והסילט. השקעה מאסיבית יותר של סחף גס מצוי בעומקים אלו בקידוחי המזח הצפוני. מעל תת היחידה העמוקה מונחת תת היחידה העליונה של היחידה הקלסטית התחתונה במזח הדרומי [איור 4.1.4, 4.1.3] ובחלקי הקידוחים במזח הצפוני [איור 4.1.1, 4.1.2] של מסלע מסוג חלוקים עם כמויות משתנות של סילט וחול. לפיכך, סביר שאפיקו הפעיל של הנחל שהזרים את הסחף עבר בסביבת המזח הצפוני [איור 4.2.2], האפיק הצפוני לנחל גרופ.

מעל מניפת הסחף מונחת יחידת אלמוגים. נוכחות האלמוגים מעידה על הצפה ימית. האלמוגים התפתחו זה על גבי זה וצברו חתך עבה יחסית. העובי של יחידת האלמוגים נע בין פחות ממטר לכ-20 מטרים.

בשלושה קידוחים (לפחות): K-3, K-4, K-9 במזח הדרומי לא התגלו שרידי שונית; אולי הדברים נכונים גם ב-K-20 (הקידוח רדוד יחסית ולכן קשה לקבוע בוודאות) [איור 4.1.3]. כנראה שבאזור זה אפיקים פעילים הזרימו סדימנט לתוך מי המפרץ ומנעו את התפתחות האלמוגים. קבירת האלמוגים תחת סדימנט והרחפה של חלקו (סוספנסייה), הגבילה את התפתחות האלמוגים (בדומה למתואר במקרים של קבירת אלמוגים תחת סדימנט במאמר Muller-Parker and D'Elia (1997).

מבנה יחידת האלמוגים [איור 4.1.1-4.1.4] הוא כיפתי, שיא התפתחות האלמוגים (עובייה המרבי של היחידה) במרכז הנמל (בין המזח הצפוני למזח הדרומי) ומדקק לצדדים.

עם ומעל יחידת האלמוגים נמצאה בחלק מהקידוחים, היחידה הקלסטית העליונה, חול סילטי עם שברי סלעי תשתית ומעט מאוד שברי צדפות וקונכיות [נספח דוח איזוטופ]. העובי המרבי של היחידה הקלסטית העליונה נחשף בקידוחים הדרומיים [איור 4.1.4, 4.1.3] וכנראה שמעיד על ערוץ פעיל דרומי יחסית לנמל, אשר אינו חופף עם אפיקי מניפות הסחף שהשקיעו את הסדימנט העתיק יותר בקידוחים (היחידה הקלסטית התחתונה). במזרח הדרומי יחידה זו הסמוכה לחוף עבה יותר [איור 4.1.4] בהשוואה ליחידה בשורה המקבילה לה המזרחית יותר [איור 4.1.3]. העובי המרבי של היחידה הקלסטית העליונה במזרח הדרומי סמוך לחוף מעידה על מקור אספקה ממערב - מהחוף. היחידה הקלסטית העליונה מורכבת בעיקר מסדימנט דק גרגר ולכן כנראה אנרגיית המים בסביבת ההשקעה נמוכה יחסית.

התפתחות האלמוגים בשונית נפסקה עם השקעת היחידה הקלסטית העליונה.

בבניית נמל אילת הוספה יחידת מילוי מלאכותי של חול עם בולדרים המכסה חלק מהאלמוגים בקידוחים ספורים בלבד. היחידה משתנה בעובייה בין 0.5 לכ-3 מטר.

### 5.2.1 היחידה הקלסטית התחתונה

היחידה מורכבת בעיקרה מחלוקים מזוותים עד מעוגלים בינונית, ממגוון ליתולוגי (אבני חול, מגמטיט, מטאבזיט, קוורץ, דיורית, גרניטים, גרנודיוריט) ומטריקס של חול סילטי. היחידה הקלסטית התחתונה מורכבת משתי תתי יחידות. בחלקה התחתון של היחידה במזרח הדרומי מופיעה תת יחידה של חול דק, חרסיות וסילט ממגוון הליתולוגיות להלן. בעומקים אלו במזרח הצפוני הסדימנט גס יותר, חלוקים עם כמויות משתנות של חול וסילט. מעל תת היחידה העמוקה, תת יחידה של סדימנט גס (תת היחידה העליונה) במזרח הצפוני והדרומי. השוני בגדלי הגרגר, בין שתי תתי היחידות, נובע משתי תקופות נפרדות של שטפונות. ההרכב הליתולוגי של יחידה זו מעיד על פעילות ניקוז סחף של מחשופים יבשתיים המאפיינים את הרי הסביבה (Garfunkel, 1970).

#### 5.2.1.1 תת היחידה העמוקה של היחידה הקלסטית התחתונה

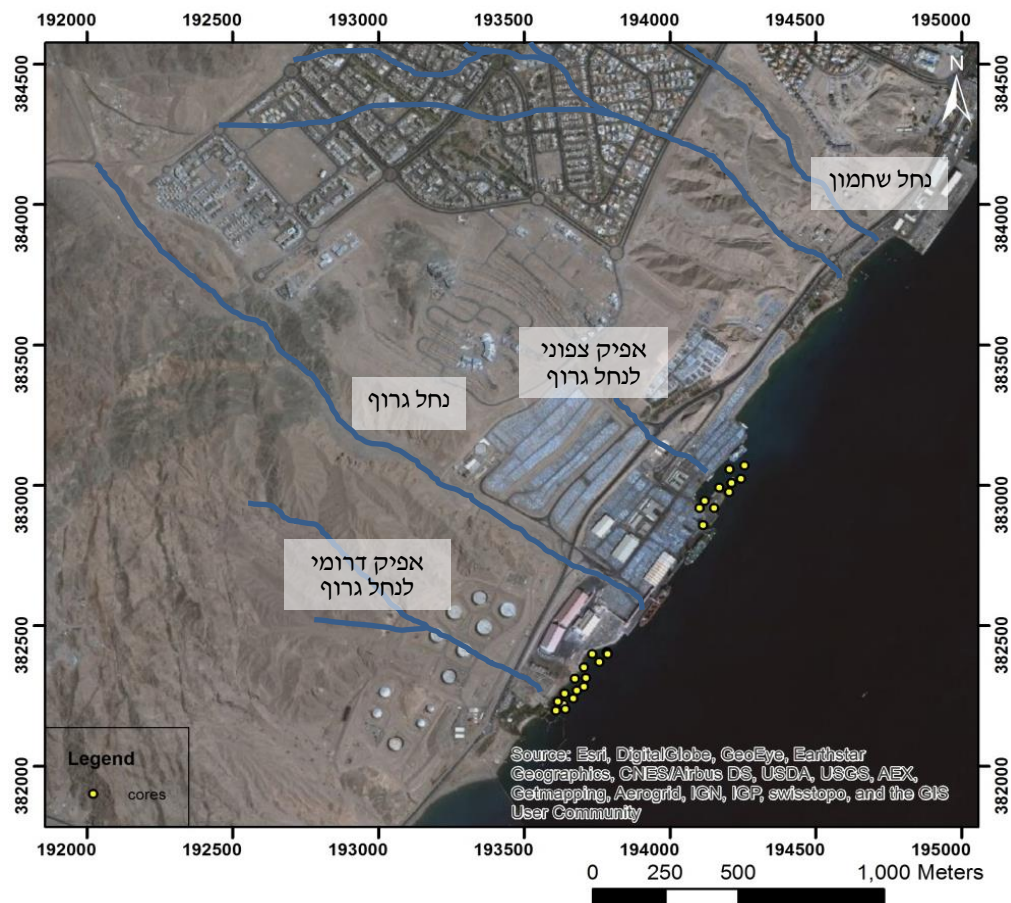
התפלגות גודל הגרגר של תת יחידה זו במזרח הדרומי הינה בין חול דק, לחרסית וסילט [נספח דוח איזוטופ]. כל הדגימות שנבדקו תחת מיקרוסקופ הן קרבונטיות ובעלות רכיב דומיננטי של מינרלי קוורץ, מיקות ופלדספר [נספח תאור תת היחידה העמוקה במזרח הדרומי]. מינרלים אלו מרכיבים את סלעי הגרניט המצויים בהרי הסביבה, מערבית למפרץ. אי לכך, סביר שמקור הסדימנט הוא בסלעי הסביבה. דגימות רבות הכילו סדימנט שאינו בוגר, זוהי עדות לכך שמקור הסדימנט הוא בסלעי הסביבה וההסעה של הסדימנט הייתה קצרה יחסית.

עדשות חרסיות וסילטיות פזורות בחתך, אולי אלו חלוקי בוץ (mudclasts). עדשות אלו יכולות גם להיות תוצאה של חללים שנותרו בהם מים ושקע בהם סדימנט הדק.

מלבד הניתוח הליתולוגי נבדק המגוון הביווגי. זהו מעט מאוד שרידי אורגניזמים, מיקרוסקופיים. לא זוהו כלל פורמיניפריים או שברי אלמוגים. מרבית הפורמיניפריים הם ימיים לכן, העדרותם מחזקת את השערתנו כי מדובר במניפת סחף ולא השקעה ימית של סדימנט דק גרגר.

במזח הצפוני, בעומקים אלו בקידוחים, ההרכב המינרלוגי דומה לזה של המזח הדרומי אם כי, גדלי הגרגר הדומיננטיים הינם חלוקים. סביר שחלקו הארי של הסחף מהשטפון הושקע באזור המזח הצפוני ואזור המזח הדרומי היווה "שוליים" למניפת הסחף, שאפשר השקעת סדימנט דק. אפיק אפשרי שהזרים את השטפונות הוא זה הצפוני לנחל גרוף, באזור הקידוחים של המזח הצפוני [איור 5.2.1].

המטריקס קלציטי, קשה לזהות גבישים. מקור הקלציט יכול גם הוא להיות מסלעי הסביבה באם מכילים כיסוי קרבונטי. סביב הנמל קונגלומרט גרוף. לעיתים יחידות העמוקות קרבונטיות (Garfunkel, 1970) ולכן יכול היה להיות מקור. אפשרות אחרת היא, הקלציט הושקע בסביבה ימית, לאחר שהשכבות הללו הוטבעו במי המפרץ.



איור 5.2.1: מפת לוויין של אזור הנמל. בנקודות צהובות מסומנים הקידוחים. אפיקי נחל מסומנים על גבי המפה בקו כחול, הנחל הצפוני לנחל גרוף מהווה מקור אפשרי לשטפונות.

על תת יחידה זו הושקעה מניפת סחף נוספת, תת היחידה הקלסטית העליונה.

#### 5.2.1.2 תת היחידה העליונה של היחידה הקלסטית התחתונה

בתת היחידה העליונה חלק מהחלוקים גדולים מאוד [איור 4.1.5], תופעה המעידה על מרחק הסעה קצר. אי לכך, סביר שבזמן תקופת ההשקעה, האזור יבשתי.

העובי המרבי של תת היחידה נחשף באזור המזרח הצפוני והיא מדקקת משמעותית לכיוון המזרח הדרומי [איור 4.1.1-4.1.4]. לכן סביר להניח שעיקר ההובלה, הערוץ הפעיל של מניפת הסחף, התרחשה בחלקה הצפוני והתנקזה לאזור המזרח הצפוני. גם התפלגות גדלי הגרגר, המגלה כי הסדימנט הגס ביותר מצוי באזור הצפוני מרכזי של הנמל, תומכת במסקנה זו.

בקידוח K-6 המצוי בצפון המזרח הדרומי, הסדימנט הדק לא עולה על 40% [דוח איזוטופ]. התפלגות גדלי הגרגר בשלוש דוגמאות מעומקים שונים בקידוח K-6 אינה משתנה באופן מובהק ועל כן סביר שתת היחידה העליונה (ביחידה הקלסטית התחתונה) בקידוח זה מייצגת ארוע השקעה אחד. קידוח K-5 בדרום המזרח הדרומי בעל מיון בינוני, ההרכב העיקרי חול, נע בין חול דק לחול דק מאוד חרסיתי וסילטי. תמונה משלימה מתקבלת במזרח הצפוני, הקידוחים הדרומיים יותר K-15, K-16, K-17 בעלי גדלי גרגר גסים בהשוואה לקידוח K-13 הצפוני יותר [נספח דוח איזוטופ]. ההבדלים בהתפלגות גדלי הגרגר מעידים שהמאסה העיקרית שהתנקזה באזור הסיעה את החלוקים הגדולים ושקעה באזור הצפוני של הנמל (היכן שעובי החתך מירבי), סדימנט דק הושקע בשוליים ונחשף בקידוחים K-5 ו-K-13. האפיק הצפוני לנחל גרופ הינו מועמד מתאים לאספקת סדימנט הסחף גם עבור שטפון זה [איור 5.2.1].

## **5.2.2 יחידת האלמוגים**

### *5.2.2.1 הרכב היחידה*

היחידה בנויה משברי אלמוגים בגדלים שונים וממגוון משפחות. בדגימות היחידה בקידוחים השונים נמצאו במוצע 20-25% שברי אלמוגים. אם כי, יתכן שפעולת הקידוח ריסקה רבים מהאלמוגים הנמצאים בחתך. שלדי האלמוג שנשברו ורוסקו מהווים בדגימות חלק מהסדימנט הדק ולכן, התפלגות גדלי הגרגר לא בהכרח משקפת את מבנה היחידה המקורית.

### *5.2.2.2 שימור שלדי האלמוגים (מתוך שקפים פטרוגרפיים)*

דגימות האלמוגים שנבדקו מעידות על שימור טוב מאוד [תוצאות שקפים פטרוגרפיים ונספח תאור שקפים פטרוגרפיים]. במרבית השקפים נמצא רכיב של צמנט ארגוניטי משני אולם כמותו מעטה [נספח תיאור שקפים פטרוגרפיים]. בדוגמאות המכילות ארגוניט משני, גבישי הארגוניט יוצרים שורה אחת של גבישים בחללי השלד [לדוגמא, איור b,s,w,x,y]. לא נמצאו החלפות של השלד הקיים בארגוניט משני.

השימור הטוב מעיד על כך שתנאי הסביבה יחסית קבועים. האלמוגים כנראה לא נחשפו ולא זרמו דרכם מי תהום מתוקים.

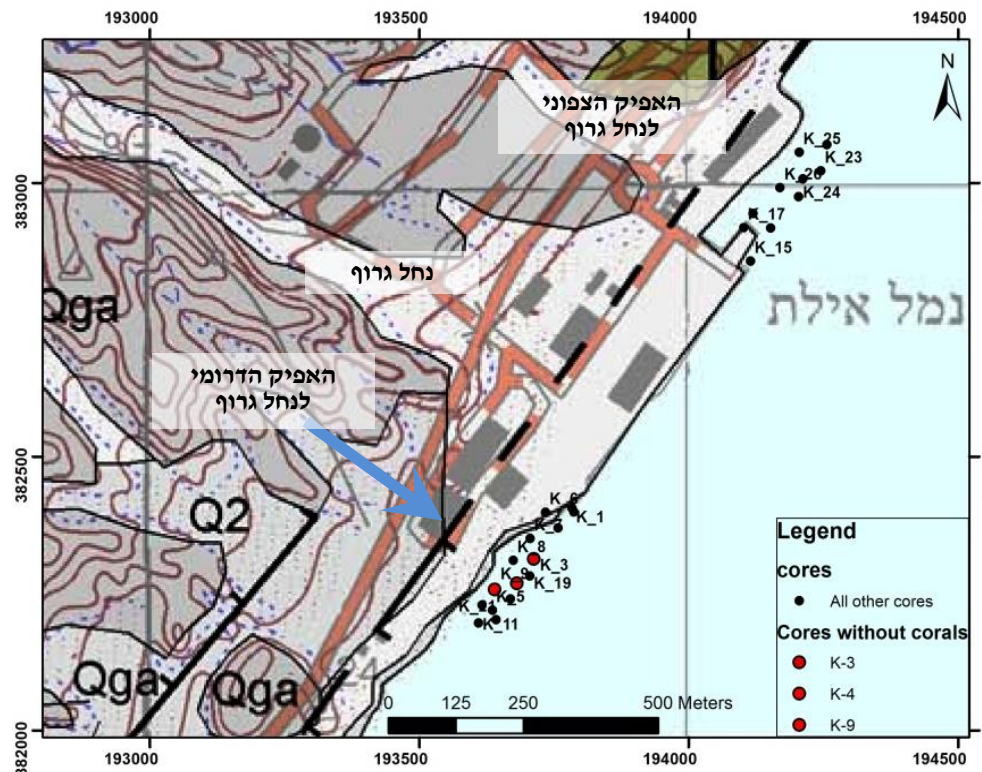
### 5.2.2.3 אפיון יחידת האלמוגים כשונית

האלמוגים ביחידה בגדלים שונים, וברבים מהם הטקסטורה נשמרה [איור 4.1.7.1 ו-4.1.7.2]. עם שברי האלמוגים מופיעות אצות, צדפות ואורגניזמים קודחים. מאסף שכזה מאפיין שונית משגשגת (Montaggioni and Braithwaite, 2009). בנוסף לכך, דגימות האלמוגים שתוארכו בשיטת פחמן 14 ובמערכת האורניום תוריום מציגים סדר כרונולוגי [איור 4.2.3] (מהגיל המבוגר בבסיס היחידה לגיל הצעיר בגג היחידה). סידור זה מהווה עדות לכך שהאלמוגים מצויים במקום התפתחותם וסידורם מתאים לאופן גידולם.

ממצאים נוספים מעידים שזוהי שונית: היחידה התגלתה בכל הקידוחים מלבד בשלושה קידוחים סמוכים זה לזה במזרח הדרומי כלומר, היחידה רציפה. כמו כן, היחידה אינה מורכבת מתת שכבות של חילופי סדימנט טריגני עם אלמוגים, שיכולים היו להעיד על אי רציפות. זאת ועוד, האלמוגים קרובים לקו החוף המודרני ומקבילים לו ולכן סביר שהייתה זו שונית חוגרת שהתפתחה בעומק רדוד (כפי שמאפיין Shaked et al. (2005) שונית חוגרת).

בנוסף, תוצאות מבחני SPT<sup>6</sup> מעידים על כך שמבנה היחידה מייצג שונית שהתפתחה באזור ולא מצבור שברי אלמוגים שהוסעו ונלכדו באזור זה [נספח דוח איזוטופ].

מפת איזופך של יחידת האלמוגים מופיעה באיור 4.2.2.2. מתוך עובי היחידה עולה כי מבנה השונית כיפתי (dome) וחלקו העבה ביותר מצוי בשליש הצפוני של המזח ומדקק לכיוון צפון מזרח ודרום דרום מערב. סביר כי עובי היחידה בגבולות השונית (כמו בקידוח K-11) מינימאלי בעקבות תנאים לא אופטימליים להתפתחות אלמוגים ולכן, הצטברות החתך מעטה. היחידה הקלסטית העליונה מצויה היכן שיחידת האלמוגים דקה או חסרה [איור 5.2.2] ויתכן כי ארועי זרימת סחף כבר החלו בשלבים אלו של התפתחות השונית ועיכבו את גדילתה.



איור 5.2.2: מפה גיאולוגית של אזור נמל אילת של המכון הגיאולוגי (Beyth et al., 2012). על גבי המפה מסומנים גלעיני הקידוח ובאדום שלושת הקידוחים שיחידת האלמוגים נעדרת בהם. אפיק ניקוז נחל (דרומי לנחל גרוף) יתכן שמנע את התפתחותם מסומן בחץ כחול.

<sup>6</sup> Standard Penetration Test - SPT

#### 5.2.2.4.1 מיון האלמוגים ככלי להבנת מאפייני שונית האלמוגים ובית הגידול

זיהוי האלמוגים בשונית ומשפחת האלמוגים הדומיננטית מקנה מידע על מאפייני השונית ובית הגידול האופייני לה.

מתוך מאסף האלמוגים שנדגם בולט כי, השונית באזורי הקידוחים עשירה בעיקר באלמוגים מאסיביים. מרבית האלמוגים, גם אלו שלא זוהו לרמת המשפחות, בעלי מבנה מאסיבי ("אלמוגי מוח"). היתר, דוגמאות של אלמוגים יחידניים (פוליפ יחיד) במבנה עמודי ומעט אלמוגים שיחניים.

מרבית דוגמאות האלמוגים בקידוחי הנמל שייכות למשפחת ה-Faviidae [טבלה 3]. כמות המינים ושכיחות הפרטים השייכים למשפחה זו גבוהה (בהשוואה למשפחות אלמוגים אחרות) במרבית בתי גידול של שוניות אלמוגים באוקיינוס ההודי-פסיפי ובקריביים (Montaggioni and Braithwaite, 2009). מספר מינים מוגבלים לאזורי הגאות והשפל והמדף העליון אולם, מרביתם חיים בשלל סביבות (Veron, 1995).

אחד מפרטי ה-Faviidae מנמל אילת זוהה לרמת הסוג, *Favia* [קידוח K-1, טבלה 3]. זהו סוג בונה שונית נפוץ מאוד. מתוך סקירה של סוגי השוניות המוכרות באזור ההודי פסיפי (Montaggioni and Braithwaite, 2009) עולה כי, אלמוגי *Favia* תמיד מופיעים יחד עם *Acropora* או *Porites*. אולם, אלמוגים השייכים למשפחת ה-*Acropora* כלל לא זוהו במאסף ופרט יחיד חשוד כ-*Porites*, הזיהוי אינו חד משמעי (אלמוג מקידוח K-6, מהסוג *Goniopora*).

ה-Faviidae השכיחים ביותר במאסף האלמוגים בנמל כנראה היו הדומיננטיים באזור זה של השונית. יתר הפרטים שזוהו שייכים למגוון משפחות. כ-15% מהפרטים שייכים למשפחת ה-Pocilloporidae לסוג *Stylophora*. מיני ה-*Stylophora*, בדומה למיני משפחת ה-Faviidae, חיים במגוון סביבות ולכן, נדרש מידע ברמת המין בכדי להעריך עומק ואזור התפתחות בשונית על פי אלמוגים אלו. אלמוגים רבים השייכים לסוג *Stylophora* בשונית המודרנית של אילת חיים באזור הלגונה (Weil, 2008). מיני ה-*Stylophora* מעונפים וחלקם עמידים יחסית לזרמים חזקים ולכן מצויים באותם אזורים של אלמוגים מאסיביים. חלק מהמינים המודרניים חיים במים עמוקים (Montaggioni and Braithwaite, 2009).

שלוש דוגמאות אלמוגים ממשפחת *Pocilloporida* מאזור הנמל זוהו לרמת הסוג *Stylophora*. אחד הפרטים בעל ענפים עבים יחסית ולכן, ייתכן שאלמוג זה היה חי באזור רדוד יחסית החשוף לתנועת הגלים. גם על פי Montaggioni and Braithwaite (2009), *Stylophora* מעונפים רבים מאפיינים את הסביבה הרדודה שלה אנרגית זרימה גבוהה.

באזור תור-ים ובנמל הנפט חקרו Shaked et al. (2002) אלמוגים שגילם מתאים לאלמוגי המחקר הנוכחי. אלמוגים מסוג *Leptastrea* ו-*Favites* מגיל 5380 ו-4960 (בהתאמה) זוהו. מתוך 24 דגימות אלמוגים שנבדקו

מורפולוגית בתור-ים, 22 מהם שייכים למשפחת ה-Faviidae המאסיביים ושניים למשפחה המעונפת ה-Acroporidae, גילם 5400-6800 שנה (Weil, 2008).

במחקרם של Al-Rifa'i and Cherif (1988) זוהו אלמוגי *Platygyra*, *Ehinopora*, *Favia* מאזור עקבה בטרסה שכינו 1, מתקופה החופפת לאלמוגי נמל אילת (לפני כ-ששת אלפים וחמש מאות שנה לפני ההווה). האלמוגים מתור ים ועקבה אופיינים לאזור אחורי של שונית, הכולל את הלגונה (Weil, 2008). משפחת ה-Faviidae נמצאה במאספי האלמוגים החולקניים מתור ים, נמל הנפט ועקבה בדומה למאסף של נמל אילת, אומנם יתר האלמוגים שונים.

בנוסף להשוואה לשוניות העתיקות הסמוכות לסביבת המחקר, שגילן תואם לזה של המחקר הנוכחי, נערכה השוואה לשוניות המודרניות. בים סוף כיום ה-*Stylophora pistillata* הם האלמוגים העיקריים הבונים את גבולות השונית יחד עם *Acropora hyacinthus* (Montaggioni and Braithwaite, 2009).

השונית המודרנית של נמל אילת, על פי Shaked et al. (2002), החלה להתפתח לפני כ-2000 שנה. אלמוגים מהקבוצות שנמצאו בתור-ים ובעקבה נמצאים גם בחלק הצפוני בשונית המודרנית (Weil, 2008). על פי התזה של Weil (2008), באזור הרדוד ובאזור הלגונה של שוניות מפותחות קיימת דומיננטיות של מינים של *Acropora* ו-*Stylophora*.

תכנית הניטור של אילת (Shaked and Genin, 2014) מעלה גם היא שכיחות אלמוגים מודרניים דומה לזו שנמצאה בנמל אילת. בדו"ח תוכנית הניטור מוצגים עשרים האלמוגים הנפוצים (לפי אחוז כיסוי) בשלושה אתרי ניטור בסביבת אילת, הנפוץ ביותר *Acropora* אך גם ניתן למצוא את ה-*Stylophora* וה-Faviidae באחוזים גבוהים. בהשוואה שערכו בין אתרי קדמת השונית לשולחן השונית בתכנית הניטור עולה כי, לפי אחוזי כיסוי של 20 האלמוגים הנפוצים, התאמה טובה יחסית בין אלמוגי שולחן השונית בתכנית הניטור לבין אלמוגי נמל אילת (בשולחן השונית מצאו בתכנית הניטור אחוז גבוה של אלמוגי *Stylophora*, *Lobophyllia*, *Faviidae* יחד עם *Favia* ו-*Turbinaria*, אלמוגים שגם זוהו בנמל).



איור 5.2.3: דוגמת אלמוג ה-*Favia fava* מקידוח K-1, אורכו כ-5 ס"מ.

כפי שצוין לעיל, מרבית האלמוגים בשונית המודרנית שייכים לקבוצת ה-*Acropora* ואילו בשונית הקבורה בנמל, לא זוהה אף לא פרט אחד כזה. מיעוט המינים השיחניים (שביניהם ה-*Acropora* הנעדרים) יכולה לנבוע מהסיבות הבאות: ראשית, אלמוגים שיחניים, שמרביתם שבירים, נעדרים היות וסביבת המחיה בעלת אנרגיה זרימה גבוהה בה אינם שורדים. בנוסף לכך, אלמוגי *Acropora* בעלי מבנה שיחני ולכן, ההסבר הסביר להעדרותם הינה בלייה. אלמוגים שיחניים נוטים פחות להישמר ברקורד הגאולוגי בהשוואה לאלמוגים מאסיביים. זאת ועוד, שלדי האלמוג נשברו

בקידוחים ולכן, יתכן שאלמוגים רבים עדינים יחסית (מעופפים) רוסקו. כמו כן, בתור-ים בהולוקן, ~92% מכלל הדגימות שייכות למשפחת ה-*Faviidae* המאסיביים ו-8.3% שייכות למשפחה המעופפת ה-*Acroporidae* (Weil, 2008) ולכן ייתכן שבתקופה זו *Acroporidae* היו פחות נפוצים ביחס לשכיחותם הגבוהה בשונית המודרנית.

מתוך סקירה של שוניות מוכרות באגן ההודי פסיפי (Montaggioni and Braithwaite, 2009), השונית באזור נמל אילת היא הדומה ביותר לקטגוריה של שוניות מסוג Domal (massive, head) coral assemblage. השוניות האלו בעיקר מורכבת מאלמוגי *Poritids* ו-*Faviidae*. האלמוגים המאפיינים שוניות אלו מצויים בעומקים רדודים ובינוניים, במגוון אזורי, באזורים חשופים יותר ופחות לגלים. האלמוגים מתפתחים בסביבה הפונה לחוף אך גם באזור השטוח של השונית ובמדרון בטווח עומקים של 0-25 מטר. דומיננטיות האלמוגים המאסיביים, שכיחותם הגבוהה של ה-*Faviidae*, מבנה השונית הכיפתי וטווח העומקים (אלמוגי הנמל מצויים עד עומק של כ-28 מטר מתחת לפני הים [קידוח מספר 7 נספח קידוחים קודמים]) מחזקים את הערכה זו. כמו כן, בין המינים ברשימה מצוי גם ה-*Favia fava* שנמצא בקידוח בנמל אילת. אולם, השוניות הללו מכילות אלמוגי *Poritids* בשכיחות גבוהה, כאשר רק אלמוג יחיד ממשפחה זו (בזיהוי לא ודאי) נמצא במאסף הנמל.

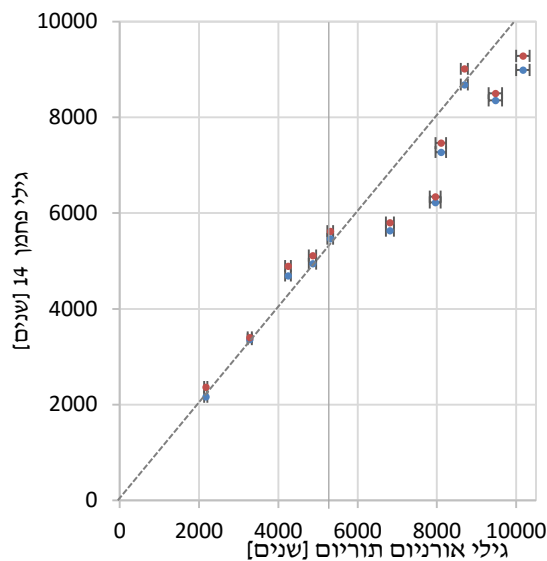
מכל הנתונים לעיל עולה דמיון בין האלמוגים הדומיננטיים באזורים הרדודים של השוניות ההולוקניות במפרץ עקבה ובין השונית המודרנית של אילת לבין השונית הקבורה בנמל אילת. סביבת התפתחות השונית של אלמוגי נמל אילת רדודה עם משטר זרימה חזק יחסית (שמנע התפתחות מרובה של אלמוגים שיחניים). האזור התפתחות של האלמוגים בנמל אילת הוא בין שולחן השונית לחלק העליון במדרון השונית (אחורי השונית).

#### 5.2.2.5 חדירת חומר דטריתי לשונית האלמוגים

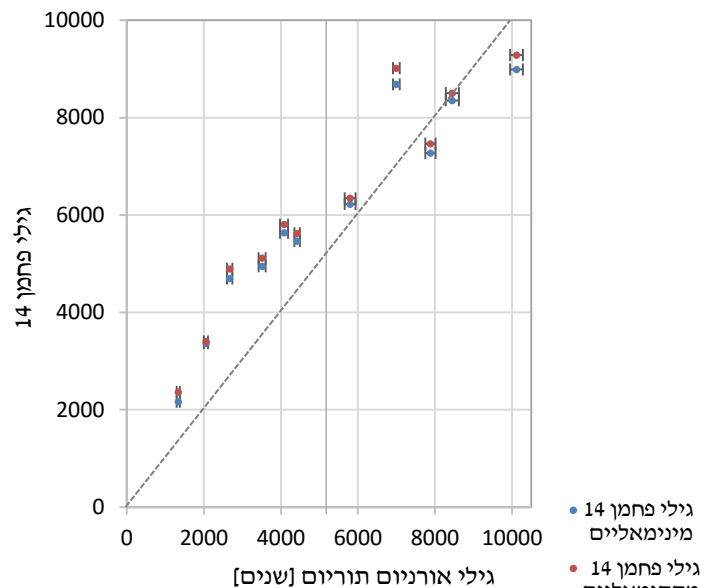
כפי שצוין בפרק התוצאות, גילי הפחמן 14 [טבלה 1] מסודרים כרונולוגית בדומה לגילי האורניום תוריום [טבלה 2] אך, השוואה בין הגילים מעלה פער.

בתור ים (הסמוך לנמל אילת) דגימות אלמוגים משונית תוארכו לגילים הנעים בין 4.7-6.7 אלפי שנים לפני ההווה (Weil, 2008), טווח דומה לזה שנמצא במחקר הנוכחי. ריכוז ה- $^{232}\text{Th}$  שהתקבל מאלמוגי תור ים בטווח של 0.0004-0.0032 ppm. ריכוז ה- $^{232}\text{Th}$  שהתקבל מאלמוגי שמורת האלמוגים של אילת, נמל הנפט ומסביבת המכון הבין אוניברסיטאי למדעי הים באילת (IUI) בטווח של 0.001-0.026 ppm (Shaked et al., 2004). טווח גילי האלמוגים נע בין 4.9-2.4 אלפי שנים לפני ההווה. ריכוז ה- $^{232}\text{Th}$  באלמוגי נמל אילת נע בין 0.002-0.185 ppm [טבלה 2], טווח ריכוזים גדול בהשוואה לטווח שהתקבל באתרים האחרים שבסביבת נמל אילת. הריכוז הגבוה של התוריום בחלק מאלמוגי נמל אילת מעיד על אפשרות של זיהום הדוגמא באורניום ותוריום ממקור דטריתי, זיהום יכול להסביר את סטיות גילי האורניום – תוריום מגילי הפחמן 14.

התיקון לחומר הדטריתי לדוגמאות הצעירות מ-5500 שנה הינו של  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 1.8$  בהנחה של שיווי משקל סקולרי לאיזוטופי האורניום. ערך זה נבחר בעקבות ההתאמה הטובה ביותר של גילי הדוגמאות לגילי פחמן 14 שהתקבלו [איור 5.2.4.2]. התיקון לחומר הדטריתי לאלמוגים בטווח של 5.5-10.5 אלפי שנים,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 1$  בהנחה של שיווי משקל סקולרי לאיזוטופי האורניום [איור 5.2.4.1].



איור 5.2.4.2: השוואה בין גילי פחמן 14 לגילי אורניום תוריום ערך של תיקון דטרטי של Th/U השווה ל-1.8.



איור 5.2.4.1: השוואה בין גילי פחמן 14 לגילי אורניום תוריום עם ערך של תיקון דטרטי של Th/U השווה ל-1.

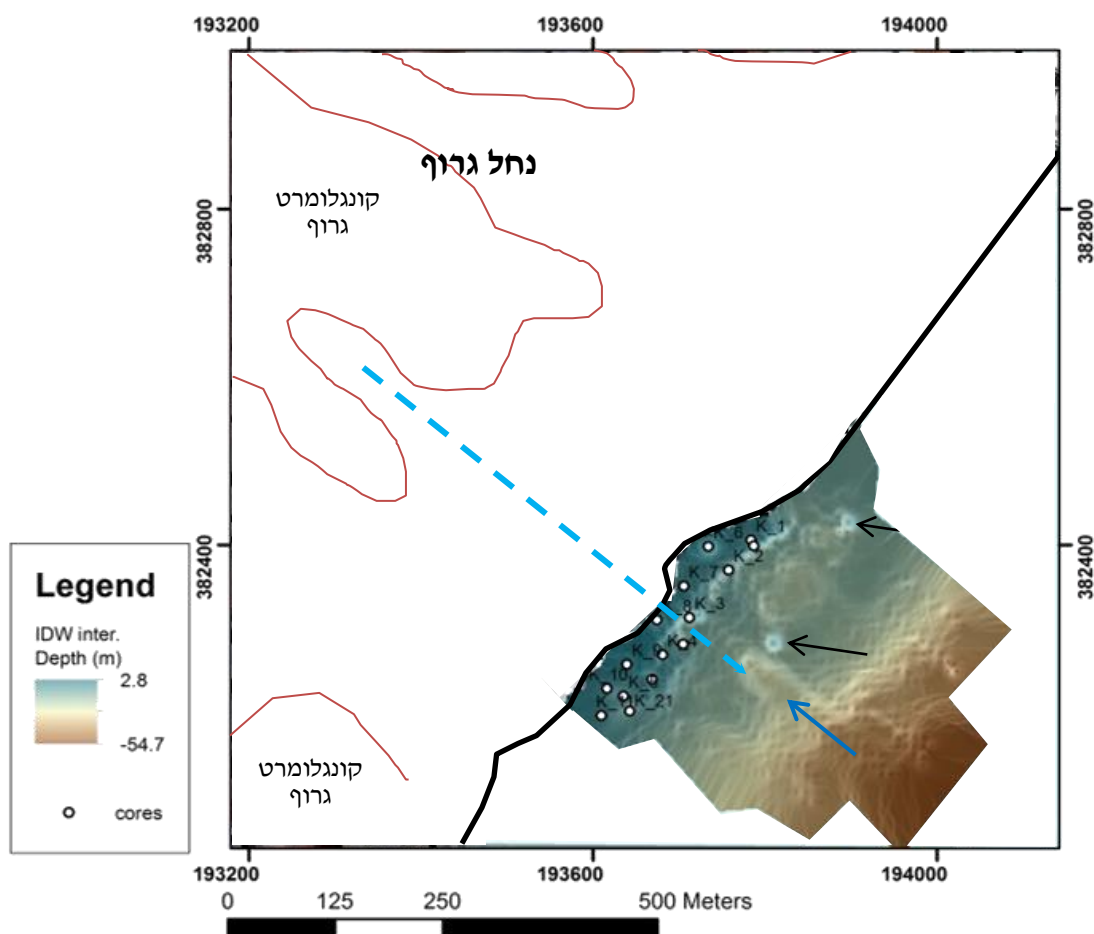
בתיארוך של ספליאוטמים ממערת שורק נעשה תיקון לזיהום דטרטי שמניח כי  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 1.7 \pm 0.7$  של החומר הדטרטי (Bar-Matthews et al., 1997).

לסיכום, מקור הדטרטיס באלמוגים בני 1.1~ ועד 5.5~ אלפי שנים לפני ההווה שונה מזה הנלכד באלמוגים "מבוגרים" מ-5500~ שנה. הדטרטיס המצוי בדוגמאות הצעירות יותר בעל רכיב קרוב יותר לערך של הקרום הסיליקטי בהשוואה לדוגמאות המבוגרות מ-5500~ שנה. השינויים הללו מעידים על תנאים שונים של אספקת חומר דטרטי לאזור הנמל. לדוגמא, שטפונות מהסביבה הקרובה לנמל, בתקופה הצעירה מחמשת אלפים שנה לפני ההווה, הביאו חומרים דטרטיים עם רכיב סיליקטי גבוה יותר. אפשרות אחרת, מקורות האבק השתנו עם הזמן.

#### 5.2.2.6 השפעת נחלים על התפתחות השונית

שלושה אפיקי נחל חשופים כיום באזור הנמל [איור 5.2.2]: אחד מול המזח הצפוני, השני בגבול הצפוני של קידוחי המזח הדרומי (נחל גרופ) והשלישי, מול המזח הדרומי. שיטפונות זרמו בנחלים אלו והזרימו סחף לאזור המפרץ. באיור 4.2.2.2 מופיעים שלושת האפיקים בהקשר של השונית.

ממול לאפיק הדרומי לנחל גרופ נעדרים אלמוגים. סביר מאוד כי אפיק הנחל הוביל סחף פעמים רבות בתקופת ההולוקן ובכך מנע התפתחות של אלמוגים באזור זה. מאחר והשונית מתוארכת מ-9000~ שנים לערך ועד כאלפיים שנה לפני ההווה (על פי תארוכי פחמן 14) [איור 4.2.3], הרי שניתן להגדיר את תקופת זמן זו כתקופה פעילה של הזרמת סחף באפיק הדרומי לנחל גרופ.



איור 5.2.5: מפה בתימטרית ברזולוציה תאים של 2 מטר, מתוך נתוני עומק מהסקר הסייסמי והקידוחים. מקרא משמאל למפה. המפה החופית מבוססת על נתוני מפה גיאולוגית (Beyth et al., 2012). במפה אפיק נחל שיכול להיות מקור לשטפונות (קו מקווקו שהמשכו במפרץ מסומן בחץ כחול) שיתכן שהשפיע על התפתחות סונית האלמוגים. שתי רמות בולטות על הקרקעית (מסומנות בחצים שחורים) כנראה קריאות שגויות, צפיפות הדגימות נמוכה באזור זה [איור 4.2.7].

המשמעות היא שהיחידה הקלסטית העליונה (בשכבותיה התחתונות) חופפת לתקופת התפתחות האלמוגים [קידוחים K-3, K-4 ו-K-9 איור 4.1.3, 4.1.4]. ארועי שטפון חלו גם עם מות האלמוגים, הרי שבקידוחים רבים סדימנט סחף מכסה את יחידת האלמוגים [איור 4.1.3, 4.1.4] (החלק העליון של היחידה הקלסטית העליונה). יש לציין שבקידוחים בהם נמצאה יחידת האלמוגים, היחידה אינה מכילה תני שכבות של סדימנט סחף בתוכה. עדות בלתי תלויה התומכת בפעילות אפיק נחל זה בהולוקן היא המפה הבתימטרית שיוצרה מנתוני סקר הסונאר במזח הדרומי [איור 5.2.5]. במפה נחשפת תעלה תת ימית שכיוונה צפון מערב – דרום מזרח [איור 5.2.5, חץ כחול] המתאימה לאפיק הנחל הדרומי לנחל גרופ היבשתי [איור 5.2.5, מודגש בקווקו כחול].

בחלק הצפוני של המזח הצפוני, עובי יחידת האלמוגים דק יחסית. האלמוגים שבאזור זה סמוכים גם הם לאפיק נחל (האפיק הצפוני לנחל גרופ) [איור 4.2.2.2]. היכן שיחידת האלמוגים דקה ישנו כיסוי עבה של היחידה הקלסטית העליונה (בקידוחים K-12, K-23, K-13, K-14) [איור 4.1.1]. היות והתפתחות מסוימת של אלמוגים התרחשה ויחידת האלמוגים רציפה (אין תת שכבות של סדימנט שמקורו בסחף), הרי שנחל זה היה רדום בחלק מתקופת התפתחות יחידת האלמוגים. מקידוח K-25 הסמוך לקידוחים K-12, K-23, K-13, K-14 נלקחו דוגמאות אלמוגים לתיאור. הגיל הצעיר ביותר של דגימה שנמדדה (גיל פחמן 14) כחמשת אלפים שנה לפני ההווה. כלומר, הזרמת סדימנט הסחף באפיק הנחל הצפוני מאוחרת לחמשת אלפים שנה לפני ההווה.

אפיק הנחל הגדול ביותר בין השלושה, נחל גרופ, כלל לא היה פעיל בתקופה זו של ההולוקן. ממול לנחל זה נצפה החתך העבה ביותר של יחידת האלמוגים [איור 4.2.2.2].

### 5.2.3 היחידה הקלסטית העליונה ויחידת המילוי המלאכותי

היחידה הקלסטית העליונה מונחת על גבי יחידת האלמוגים [איור 4.1.1-4.1.4]. היחידה מכסה חלק מהאלמוגים ומנעה המשך התפתחות שונית האלמוגים.

היחידה הקלסטית העליונה מורכבת מחול סילטי. ליחידה כ-10% חלוקים ממגוון ליתולוגיות כדוגמת, גרניט ואבן חול יחד עם שברי קונכיות. מיון היחידה רע, מכילה סדימנט דק מאוד, חרסיתי וחלוקים שקוטרם מגיע למספר סנטימטרים [איור 4.1.8.1]. אחוז גבוה של חלוקים (כ-20%) נמצא בדגימות קידוח K-6 הסמוך לקו החוף במזח הדרומי [איור 4.1.3]. הרכב היחידה וגדלי הגרגר מעידים על מקור יבשתי קרוב, פרגמנטים מגמטיים שונים שנגזרו מסלעי התשתית הפרה קמברית החשופים באזור אילת.

במספר קידוחים התגלו מעט שברי קונכיות ימיות שיתכן שהוסעו עם הסחף והושקעו מחדש, לדוגמא, קידוח K-3 בו 3-5% שברי קונכיות.

הסדימנטים הבונים את היחידה העליונה הגיעו ממקור יבשתי הסמוך למזח הדרומי. העדות לכך טמונה בקידוחים של המזח הדרומי, להם נפח היחידה מקסימאלי [איור 4.1.3, 4.1.4]. מול המזח הדרומי כיום חשופים אפיקי נחל שמתאימים כספקי הסחף [איור 5.2.2], נחל גרופ או האפיק הדרומי לו. האפיק הדרומי לנחל גרופ היה פעיל בחלק האחרון של יחידת האלמוגים ולכן סביר כי הוא זה שהמשיך את פעילותו גם בתום התפתחות השונית.

מלבד היחידה הקלסטית העליונה, מכסה את האלמוגים במספר קידוחים, יחידה מלאכותית מגוונת בהרכבה, כחלק מבסיס מבנה הנמל. יתכן שבפעילות זאת הוסרו חלק מהיחידות הקודמות.

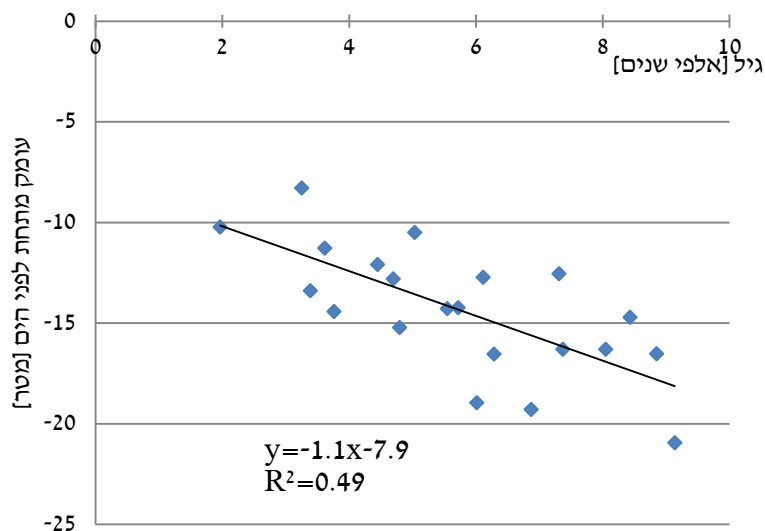
### 5.3 היסטורית התפתחות שונית האלמוגים בנמל אילת

הפרק להלן מבוסס על תארוך גילים בשיטת פחמן 14.

קצב ההצטברות של השונית מהווה כלי להבנה של התאמת האלמוגים לתנאים ששררו בזמן התפתחותם וכלי למעקב אחר שינוי במפלס הים. הקצב מגדיר את מידת התפתחות האורגניזמים והשקעת סדימנט בניכוי קצב ההרס (כתוצאה מגורמים מכניים, ביולוגיים וכימיים), על ידי בדיקת עובי החתך בפרק זמן מסוים.

גילי דוגמאות האלמוגים שתוארכו בשיטת פחמן 14 הוצבו בגרף של הגיל כפונקציה של העומק מתחת לפני הים בו נמצאו [איור 5.3.1]. קו רגרסיה הותאם עבור הערכים, השיפוע מייצג את קצב ההצטברות הממוצע של השונית. חושבה השגיאה של קצב ההצטברות הממוצע [משוואות (5)-(7) בפרק שיטת תארוך פחמן רדיוגני].

קצב ההצטברות האנכי הממוצע של השונית 1.1 מטר לאלף שנה. בבדיקת אחוז השונות של הערכים מקו הרגרסיה (כלומר, שונות הערכים מהערך הממוצע,  $S.E./S.E_{mean}$ ) עולה כי, סך של כ-49% מהדוגמאות מוגדרות על ידי קו הרגרסיה [איור 5.3.1]. מתוך הנתונים הושמטו ערכים חריגים של דוגמאות קידוח K-2.



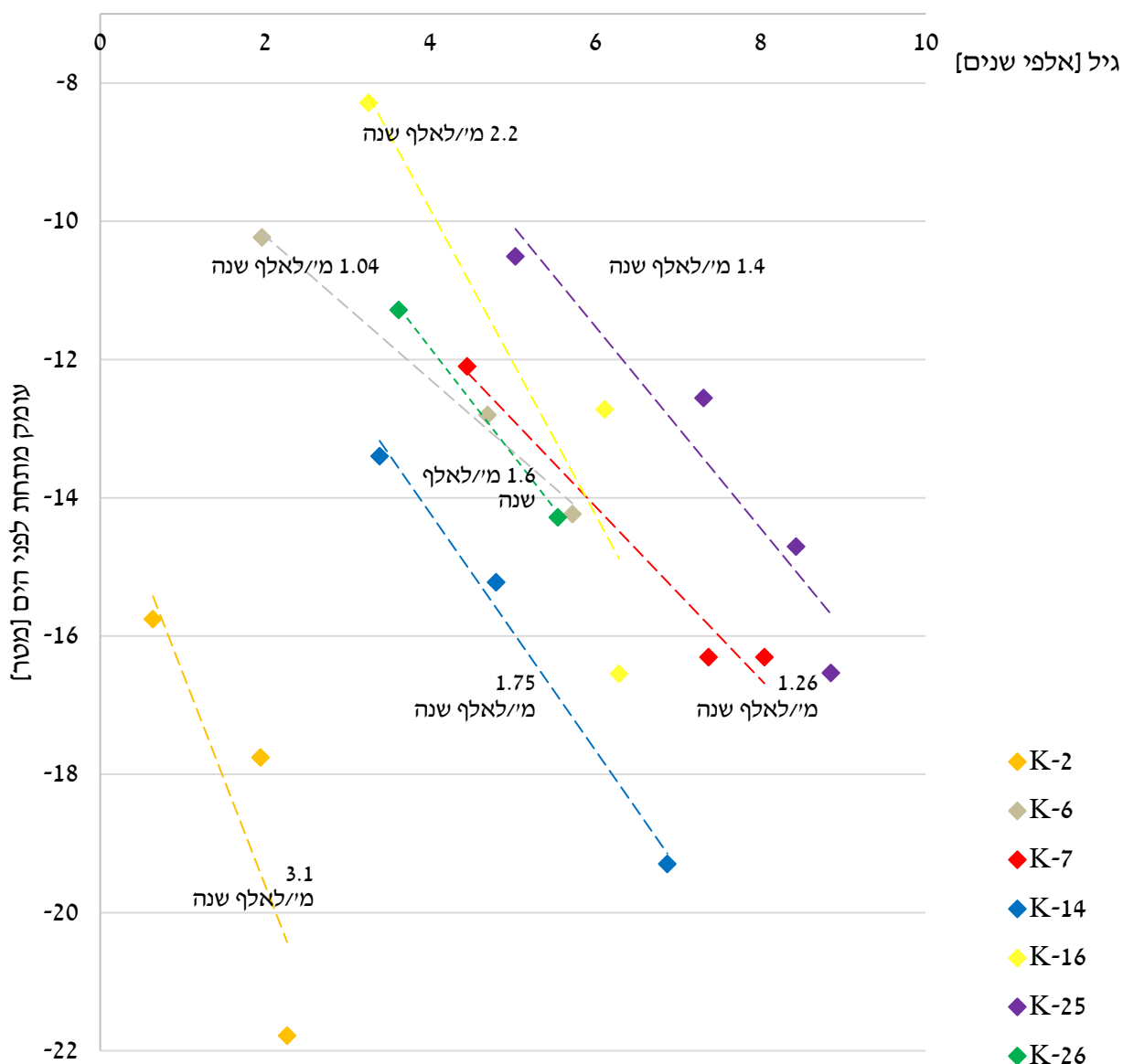
איור 5.3.1 : גרף של הגילים שהתקבלו מתארוך פחמן 14 כפונקציית העומק מתחת לפני הים. בציר X מופיע גיל הדוגמאות, מ-10,000 שנה ועד היום "0". בקו שחור מסומן קו הרגרסיה ולידו משוואתו. קצב חריג של קידוח K-2 הושמט.

קצב ההצטברות האנכי הממוצע לכל השונית אומנם לא מייצג באופן מיטבי את כלל הקידוחים אך, נותן מושג של הקצב המאפיין את השונית ומידת השונות. נתונים אלו מהווים מדד להשוואה לשונות אחרות.

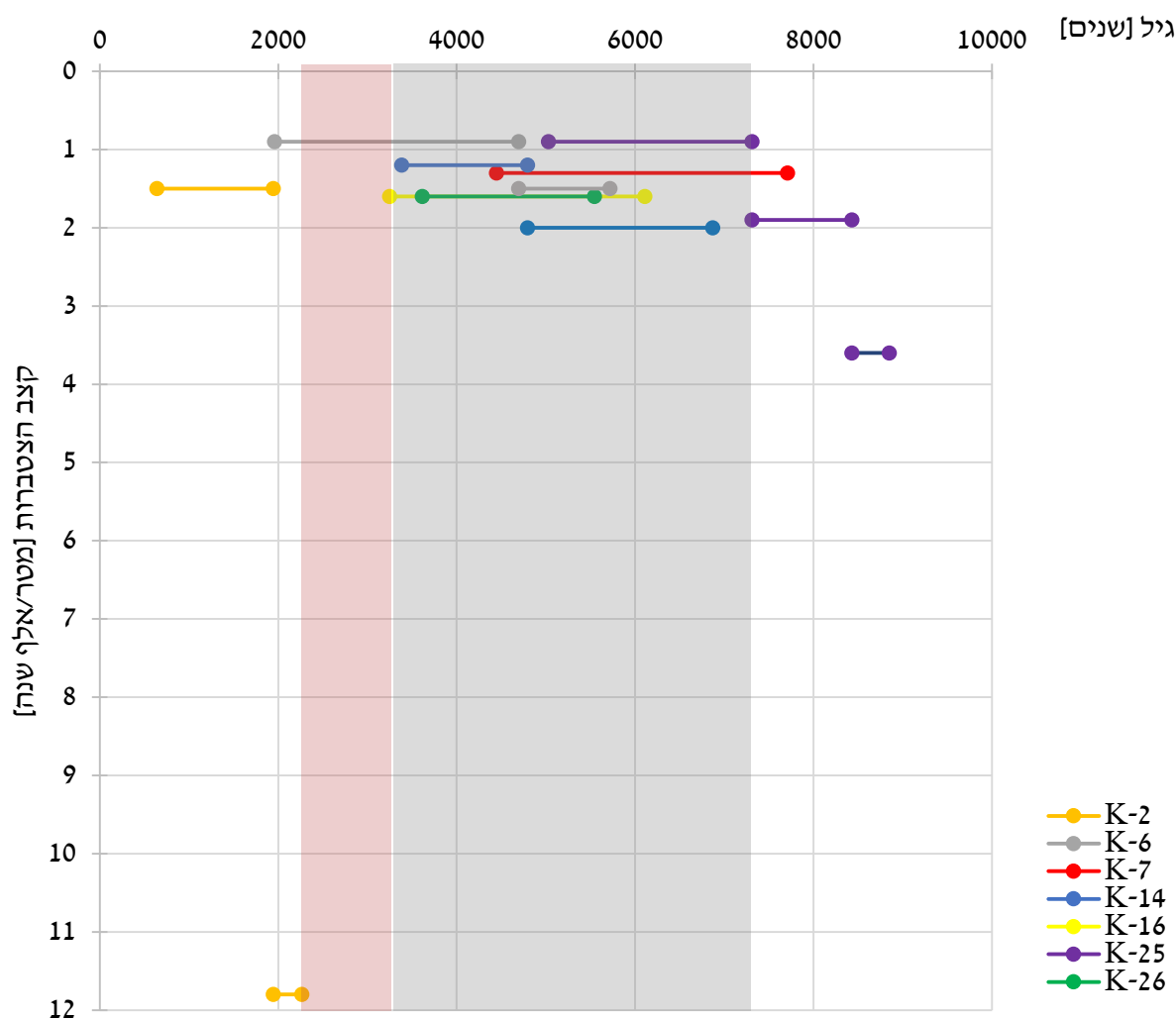
בכדי לאפיין את השונית טוב יותר נבדק קצב ההצטברות האנכי בכל קידוח בנפרד [איור 5.3.2]. הקצב הנבדק הוא ממוצע נתוני כל קידוח. כלומר, נבדק סך עובי הצטברות היחידה (השלד והסדימנט) לפרק הזמן המרבי שנמדד בכל קידוח. קצבי ההצטברות ביחידת האלמוגים בקידוחים K-6, K-7, K-14, K-25, K-26, K-16 בין 1-2.2 מטר לאלף שנה.

יחידת האלמוגים בקידוח K-2 עמוקה בהשוואה ליתר הגלעינים [איור 5.3.2] וכן, קצב ההצטברות הממוצע של היחידה מהיר יחסית, 3.1 מטר לאלף שנה. המאפיינים הייחודיים של קידוח זה כנראה מעידים על התפתחות נפרדת מיתר הקידוחים.

בנוסף לחישוב הקצב הממוצע של ההצטברות לכל קידוח, נבדקו קצבי הצטברות האנכיים בין כל שתי דגימות סמוכות בכל קידוח. חישובי הקצב הללו מציגים נתונים בפרקי זמן קצרים יחסית.



איור 5.3.2 : גילי  $^{14}\text{C}$  כפונקציית העומק מתחת לפני הים בגלעינים. ציר X זמן לפני ההווה, מ-10,000 שנה ועד היום "0". הגלעינים מופרדים זה מזה בצבעים שונים, המקרא מופיע מימין לגרף. נקודה חריגה בקידוח K-26 הושמטה.



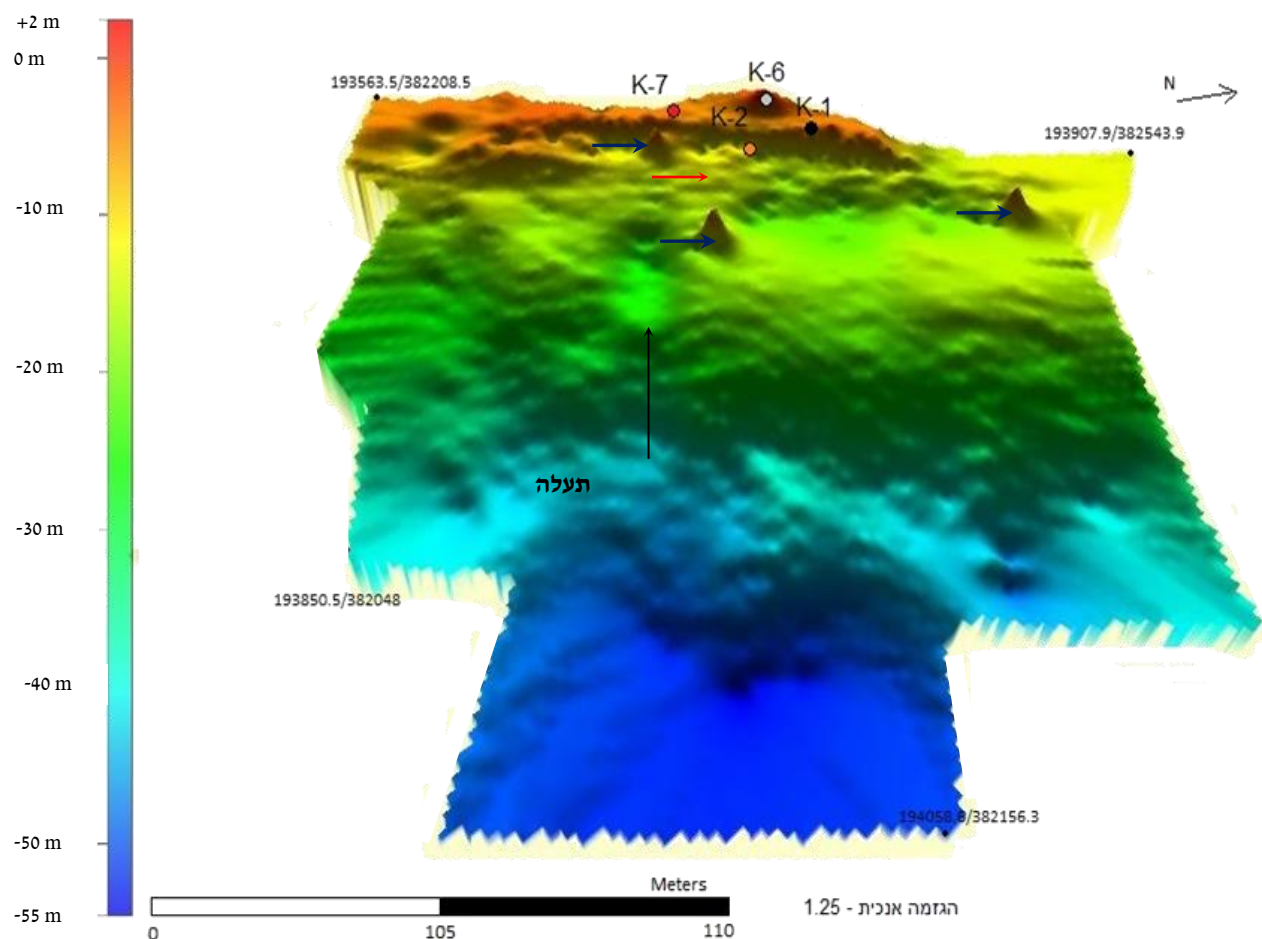
איור 5.3.3: קצבי הצטברות האנכיים של יחידת האלמוגים, לכל שתי דוגמאות סמוכות בקידוח כפונקציה של הגיל, עד ~9000 שנה לפני ההווה. בכל צבע מסומן קידוח אחר, המקרא מימין. בין 6.9-3.2 אלף שנה לפני ההווה (מלבן אפור) מרבית הנתונים. בין 3.2-2.3 אלפי שנה (מלבן אדום) אין נתונים. יוצא דופן קצב הצטברות גבוה בקידוח K-26, בין 6-5.5 אלפי שנים - 10.4 מטר לאלף שנה שהושמט מהגרף. כמו כן, בקידוח K-16 בדגימות העתיקות (6.3-6.1 אלפי שנים) ההבדל בין הגילים הוא בטווח השגיאה כשהבדל עומק ביניהם משמעותי ולכן, קצב ההצטברות הגבוה שהתקבל הושמט (כ-31 מטר לאלף שנה). בקידוח זה לא נשמר הסדר הכרונולוגי. אי לכך, יתכן כי הדגימה העמוקה אינה במקומה המקורי.

מאיור 5.3.3 עולה כי, קצב הגידול בין שתי דגימות סמוכות קטן מ-2 מטר לאלף שנה (יוצא דופן קצב ההתפתחות של קידוח K-2 ו-K-25). החל מלפני ~9000 שנים ועד כ-3200 שנים לפני ההווה טווח קצבי הצטברות בין 0.9-2 מטר לאלף שנה (למעט מקרה יחיד בקידוח K-25).

לאחר תקופה זו בין 3.2-2.3 אלף שנה לפני ההווה חסרים נתונים, אין גילים לחישובי קצב למשך כ-1000 שנה [איור 5.3.3, מלבן אדום].

התפתחות מחודשת של אלמוגים חלה לפני כ-2300 שנים ועד כ-1900 שנים. קצב ההצטברות של הדגימות מצומצם יחסית, 0.9-1.6 מטר לאלף שנה, בהשוואת לתקופה שבין 9-6 אלפי שנים. בניית שלדי האלמוגים

בתקופה זו מעטה (בשני קידוחים בלבד) ומעידה על התפתחות מקומית, יתכן שאלמוגים החלו לבנות שלדס בבלטים על גבי השונית שננטשה (לפני כ-3200 שנה). דוגמא יחידה מקידוח K-2 שגילה 640 שנים לפני ההווה לערך כנראה גם מקומית.



איור 5.3.4 : מפה בתימטרית תלת ממדית של המזח הדרומי בנמל אילת. היבט ממזרח, לכיוון היבשה. הקידוחים שתוארכו מוצגים על גבי החתך. סקלת העומקים, מתחת לפני הים, משמאל למפה. הגזמה אנכית 1.25. שלוש הגבעות החדות (חצים כחולים) מבוססות על מעט מאוד נתונים וכנראה שגויות. קרקעית "גבשושית" מתחת למדרון החד מתאימה לנוף של אלמוגים (חץ אדום). התעלה העמוקה (המשכו הישיר של האפיק הדרומי לנחל גרופ) גם כן בולט במפה כזו.

עדות בלתי תלויה התומכת בהתפתחות מקומית של אלמוגים סביב אלפיים שנה לפני ההווה היא המפה הבתימטרית התלת ממדית שיוצרה מנתוני סקר הסונאר במזח הדרומי [איור 5.3.4]. במפה מסומנים הקידוחים שתוארכו. קידוח K-6 רדוד בהשוואה לסביבתו, לו מבנה של רמה מקומית המתאימה להערכת שזו מהווה התפתחות מקומית (knoll). גם האלמוגים בקידוח K-2, שחשודים כמנותקים מהשונית, עמוקים מהיתר ומופרדים מהם ויכולים להעיד על התפתחות מקומית.

לסיכום, יחידת האלמוגים החלה להתפתחותה לפני כ-9000 שנים ושגשגה (מירב הנתונים) בתקופה 3.2-6.9 אלפי שנים לפני ההווה [מלבן אפור, איור 5.3.3]. קצב הצטברות בין כל שתי דגימות סמוכות בקידוחים השונים נע בין 0.9-2 מטר לאלף שנה. השונית פסקה מלהתפתח לפני כשלושת אלפים ומאתיים שנה שלאחריה התפתחות מקומית סביב אלפיים שנה (גיל יחיד חורג מטווח זה, בקידוח K-2).

### 5.3.1 התפתחות שונית האלמוגים בנמל אילת בהשוואה לעקומת מפלס הים של מפרץ עקבה

גילו של האלמוג העתיק ביותר שנמצא בשוניות הולוקניות חוגרות באזור צפון מפרץ עקבה, עד למחקר הנוכחי, הינו כ-6700 שנים לפני ההווה (Shaked et al., 2004). מחקר זה יחד עם מחקרים נוספים במפרץ עקבה [איור 5.3.5] מעידים על התייצבות מפלס הים בתקופה זו (Weil, 2008). לפני כארבעת אלפים שנים חלה ירידה קלה של כמטר או שניים במפלס הים.

שינויי מפלס הים של מפרץ עקבה ב-6700~ אלפי השנים האחרונות דומים לשינויים במפלס הים במערב אוסטרליה (Eisenhauer et al., 1993). לפיכך, את שינויי מפלס הים הקודמים ל-6700~ שנים ניתן להעריך מתוך שינויי מפלס הים מהמחקר של מערב אוסטרליה [קו כחול מקווקו איור 5.3.5]. לפני כ-9800 שנים מפלס הים היה נמוך בכ-24 מטר מתחת למפלס הים המודרני במערב אוסטרליה. מפלס הים עלה בקצב מהיר מאוד עד לפני כששת אלפים שנים וחצי, אז הגיע לשיא הדומה לזה שהתקבל ממחקרים במפרץ עקבה. לפני ארבעת אלפים ושלש מאות שנה לערך, מפלס הים במערב אוסטרליה החל לרדת עד שהגיע למפלס הים המודרני. שינויי מפלס אלו מתאימים גם לתוצאות ממחקרים בפפואה גינאה החדשה ולחישובים של מודלים נומרים (כדוגמת Edwards et al. (1993) וכן, Stuiver et al. (1998)).

פרק הזמן שבו התפתחות שונית האלמוגים בנמל אילת הייתה בשיאה הוא בין 6700~ ועד 3500~ שנים לפני ההווה, בתקופה בה מפלס הים במפרץ עקבה היה יציב [איור 5.3.5].

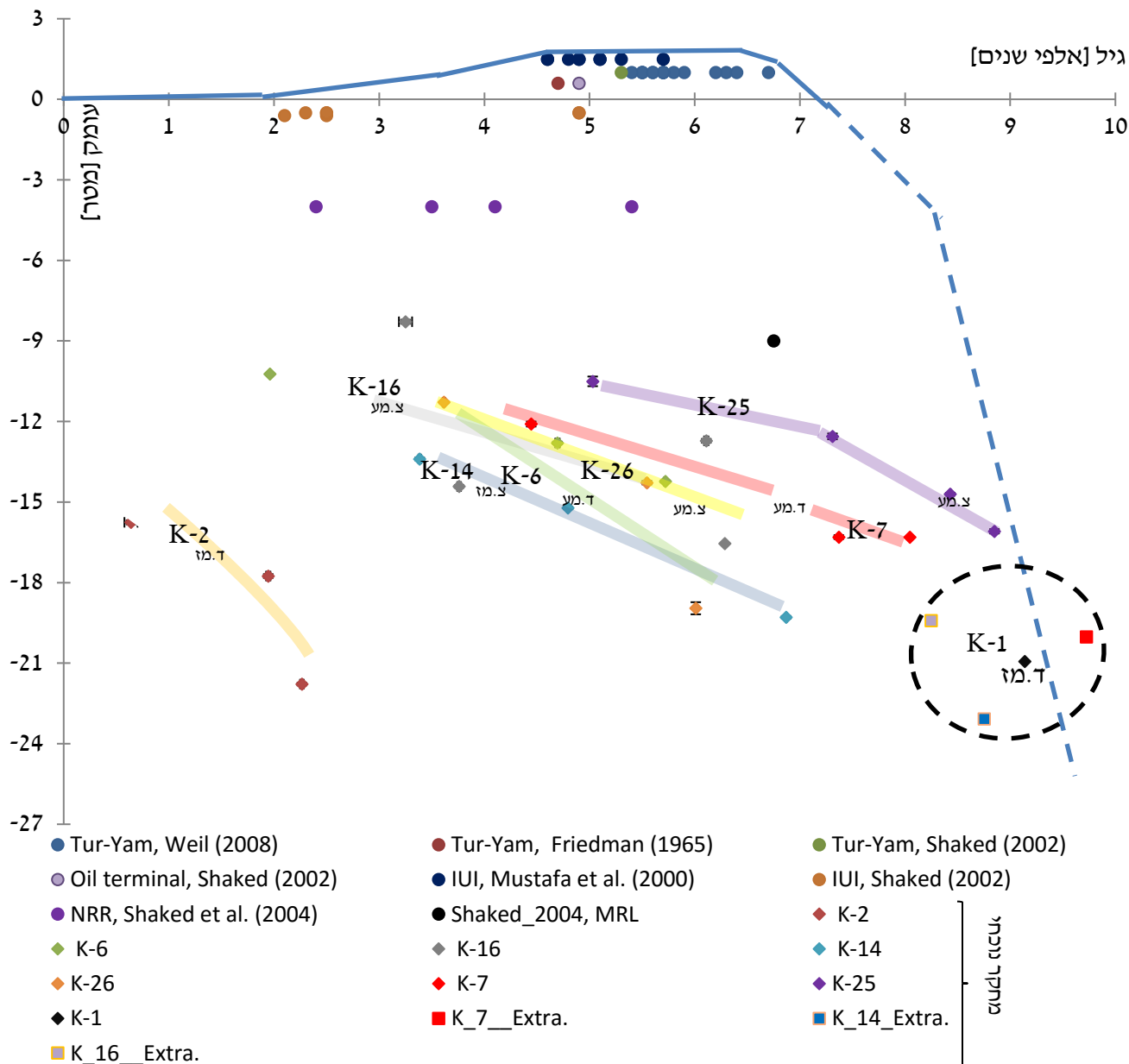
קצב הגידול של השונית בנמל אילת נע בין 0.9 ל-2 מטר לאלף שנה, כאשר רוב האלמוגים מראים קצב גדול של  $1.3 \pm 0.4$  מטרים לאלף שנה [איור 5.3.3]. קצבי התפתחות אנכית דומים חושבו לשוניות אלמוגים חוגרות במקומות אחרים באוקיינוס ההודי והשקט מגילי הולוקן, הטווח נע בין 1 מטר לאלף שנה (ופחות) ועד 7 מטר לאלף שנה, כשמרבית השוניות בקצב גידול של 2-4 מטר לאלף שנה (לדוגמא, מחקרים של Davies and Marshall (1980) במזרח אוסטרליה ומחקרים של Camoin et al. (1997) בדרום מערב האוקיינוס ההודי). כל שונית חוגרת בעלת טווח של קצבי הצטברות, כתלות במיקום בשונית. בקצה שולחן השונית, ב-reef crest, מתרחשת גדילה נמרצת, לכיוון הים ואילו בשולחן השונית, הגדילה האיטית ביותר (Davies and Marshall, 1980). המשמעות היא שקצב ההצטברות של אלמוגי נמל אילת, הנמצא בטווח הנמוך של קצבי הצטברות האופייניים לשוניות חוגרות, רדוד יחסית.

על פי המודל המוצג במאמר של Shaked et al. (2005), תחת תנאי מפלס ים יציב כיוון ההתפתחות המועדף של האלמוגים הוא אנכי. כשאין מקום להתפתחות אנכית, עיקר ההתפתחות הינה אופקית. במצב זה מצטבר חתך אנכי קטן. הקצב הנמוך של התפתחותם האנכית של שלדי אלמוגי נמל אילת יכול להצביע על כך שהשונית בנמל אילת ממוקמת באזור רדוד ושמרבית ההתפתחות הינה אופקית ולא אנכית. אולם, יכולים להיות הסברים נוספים לכך כדוגמת קרקעית שאינה יציבה ותרחיף.

ואכן, התפתחות האלמוגים באזור נמל אילת משתנה כפונקציה של הזמן. עליית מפלס הים והצפת האזור אפשרה התפתחות של האלמוגים. עם עליית מפלס הים המהירה, האלמוגים בנו את שלדם כשמידת התפתחותם מושפעת באופן ישיר מהשינויים החריפים במפלס הים, בין 7-9~ אלפי שנים [איור 5.3.3]. עם התייצבות מפלס הים (לפני כ-6500 שנים), ההתפתחות של שלדי האלמוגים יחסית גבוהה (בהשוואה לשנים הראשונות שלאחר

ההצפה) בעקבות תנאים נוחים וקבועים. אף על פי כן, קצב ההתפתחות של השונית בטווח הנמוך בהשוואה לשוניות חוגרות אחרות. קצב ההצטברות הנמוך יכול להיות תוצר של קרבה לפני הים.

לפני כארבעת אלפים שנים מפלס הים ירד בכמטר או שניים (Shaked et al., 2004). בסמוך לירידת מפלס הים שטפון השקיע סדימנט (היחידה הקלסטית העליונה) על גבי יחידת האלמוגים שמנע התפתחות. התאוששות מקומית חלה על גבי השונית הנטושה וגם היא פסקה לפני כאלפיים שנה, כנראה בעקבות ארוע טקטוני וכיסוי סדימנטרי.

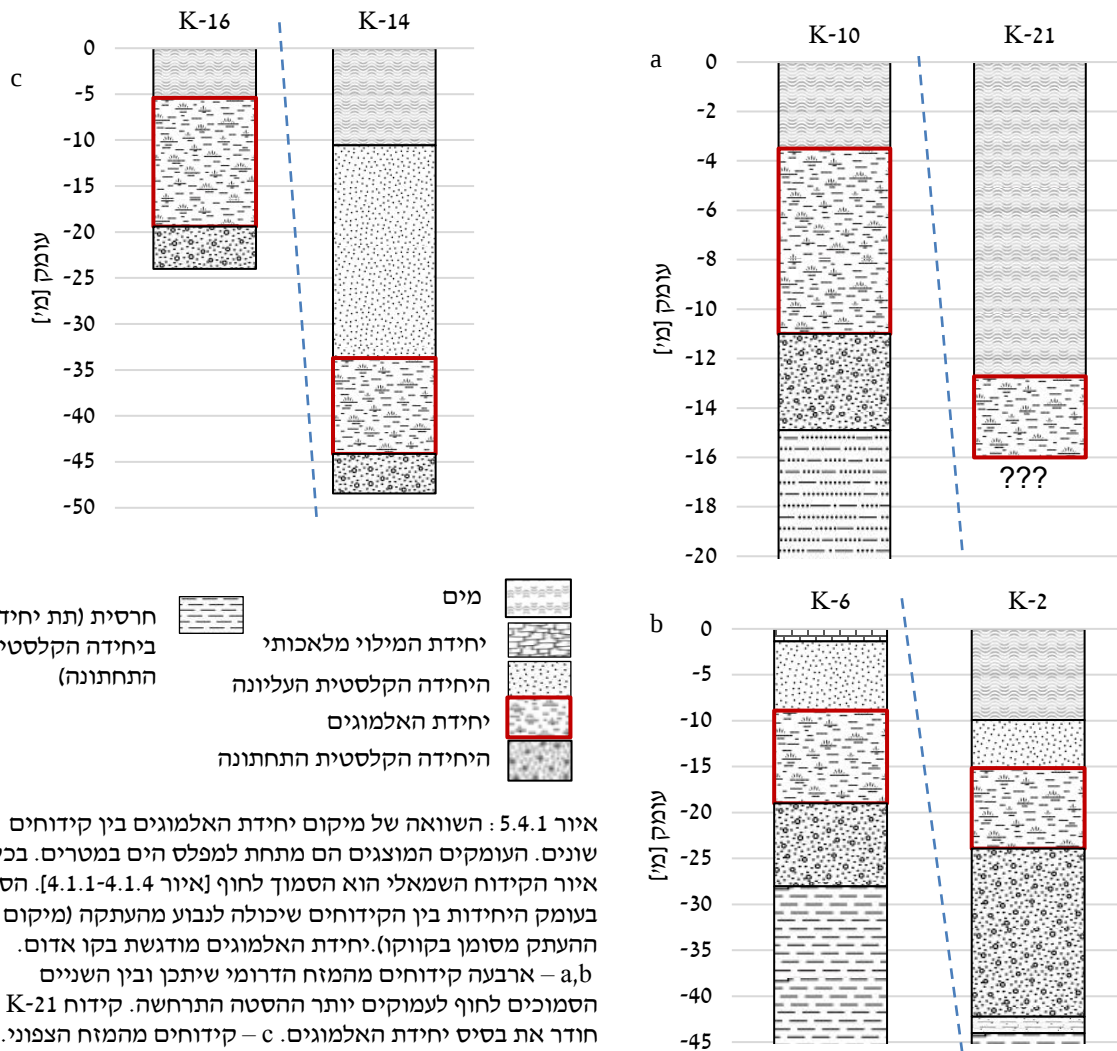


איור 5.3.5: עקומת מפלס הים ב"ראש" מפרץ עקבה בהולוקן מתוך מחקרים קודמים. ציר X שנים (ההווה מסומן ב-0) וציר y מסומן את העומק תחת מפלס הים במפרץ עקבה (0 הוא מפלס הים המודרני). בעיגולים מלאים מסומנים מחקרים קודמים ובמעוינים גילי האלמוגים בעומק שנמצאו מנמל אילת. הקידוחים מופרדים בצבעים שונים. מיקום הקידוח מסומן: מזח צפוני ב-צ. ודרומי ב-ד. על גבי הגרף. קידוח בשורה המזרחית מסומן ב-מז. ובמערבית ב-מע. על גבי הגרף. אקסטרפולציה לגיל תחילת ההתפתחות בקידוחים מסומנת בריבועים ועטופה באליפסה מקווקוות. האקסטרפולציה מבוססת על כך שלא חלו שינויים משמעותיים בקצב ההצטברות עם הזמן. עומק התפתחות האלמוגים מתחת למפלס הים בקידוחי הנמל עמוק מכל יתר המחקרים שמופיעים בגרף יכולים להעיד על הסטה טקטונית. מבוסס על גרף של Weil (2008).

## 5.4 היבטים טקטוניים

### 5.4.1 עדויות לפעילות טקטונית מנתוני הקידוחים

להערכתי לפני כאלפיים שנה חלה תנועה על גבי העתק אילת שהסיטה בלוקים באזור נמל אילת. אזור השונית בנמל הוסט אנכית במספר מטרים. שונית האלמוגים באזור הנמל שפעילה הייתה עד תקופה זו [איור 5.3.3], פסקה מלהתפתח. דגימת אלמוג יחידה מאוחרת לתקופה זו התגלתה, בקידוח K-2 [איור 4.2.3, גיל של כ-שש מאות שנה] שכנראה מעידה על התפתחות מחודשת מקומית המאוחרת לארוע ההסטה הטקטונית.



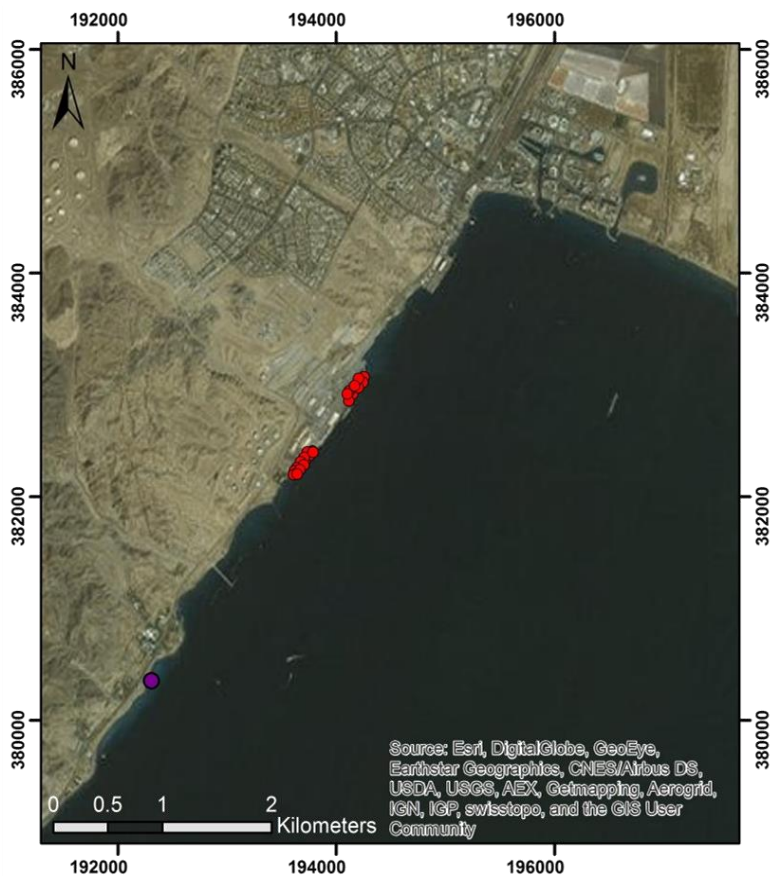
הערכה זו של פעילות ההעתק מבוססת על מספר תצפיות. ראשית, ממיון האלמוגים למשפחות עולה שהאלמוגים הנפוצים במאסף נמל אילת מאפיינים את האזור הרדוד. האלמוג השליט בשוניות תור ים ונמל הנפט ההולוקניות (*Stylophora*), שמייצגים אזור התפתחות של אחורי השונית, זהה. זאת ועוד, נמצאה התאמה טובה בין משפחות האלמוגים בשונית אילת המודרנית, באזור שולחן השונית, לבין נמל אילת.

שנית, לא נמצאו כמעט כלל אלמוגים מעופפים [איור 4.2.4]. כיום גג יחידת השונית מצוי בעומק של 5.5-21.5 מטר מתחת לפני הים. לא זוהו שברים של האלמוגים המעופפים העמידים יחסית לבלייה, ששכיחותם גבוהה מאוד בשונית המודרנית (Shaked and Genin, 2014). יתכן שהסטה של התשתית עליהם התפתחו האלמוגים, מהווה הסבר לנפיצותם הנמוכה. שבירה של חלק נכבד מהאלמוגים וריסוקם עם הפעילות הטקטונית ושטף הסדימנט הנלווה לו, יכולה להביא לאחוז שיחניים נמוך במאסף המת (מלבד פעולת הריסוק של הקידוחים).

בנוסף לכך, יחידות הסלע עמוקות בשורה המזרחית של הקידוחים בהשוואה לזו הסמוכה לחוף [איור 4.1.4]. בקידוחים המזרחיים יותר בסיס וגג היחידות עמוק יותר [איור 5.4.1]. ההבדלים יכולים לנבוע ממבנה המדרון. אולם, העתקה יכולה להחריף את הפרש הגבהים. אם אכן חלה העתקה, הגוש המזרחי יותר הוסט מטה ביחס למערבי.

כמו כן, מידת התפתחותם של שלדי האלמוגים מעידה על כך שהאלמוגים הושפעו מהשינויים במפלס הים [איור 5.3.3]. בזמן התייצבות מפלס הים (בין 4-5 אלפי שנים לפני ההווה) ההתפתחות של האלמוגים בשיאה, תופעה המתאימה לתנאים יציבים. לפני כאלפיים שנים חדלה ההתפתחות של האלמוגים. מפתיע כי רק דוגמא אחת

צעירה מ-2000~ שנה. מבנה השונית עמוק (בין 5.5-21.5~ מטר מתחת לפני הים) ועל כן אזור ההתפתחות האנכי רחב (עומק המים אינו גורם מגביל). תופעה זו כנראה מעידה על ארוע טראומטי שקטע את התפתחותם. במידה והאלמוגים הללו הוסטו אנכית במספר מטרים בתקופה זו, ואחרי ההסטה שטפונות סחף קברו אותה (חלקה העליון של היחידה הקלסטית העליונה), הרי שארוע שכזה יכול לגרום לעיכוב התפתחותם. לחיזוק הערכה זו מובא המחקר של Shaked et al., (2004). ממחקרם עולה כי שונית הולוקנית, יחד עם אתר ארכיאולוגי, באזור שמורת אלמוגים של אילת (כ-2.4 ק"מ מדרום לנמל) [באיור 5.4.2], הוסטו טקטונית עד כ-4 מטר, לפני כ-2300 שנים [הגילים והעומקים של הדוגמאות שמצאו מופיעים באיור 5.3.5]. סביר מאוד כי ארוע זה בשמורת האלמוגים, מקושר לארוע ההסטה בנמל אילת. Shaked et al. (2004) חושדים שהטביעה של השונית לוותה בקבורה תחת סדימנט באזור שמורת אלמוגים של אילת שהובילו למות השונית.



#### Legend

- Shaked\_et\_al\_2004
- Port cores

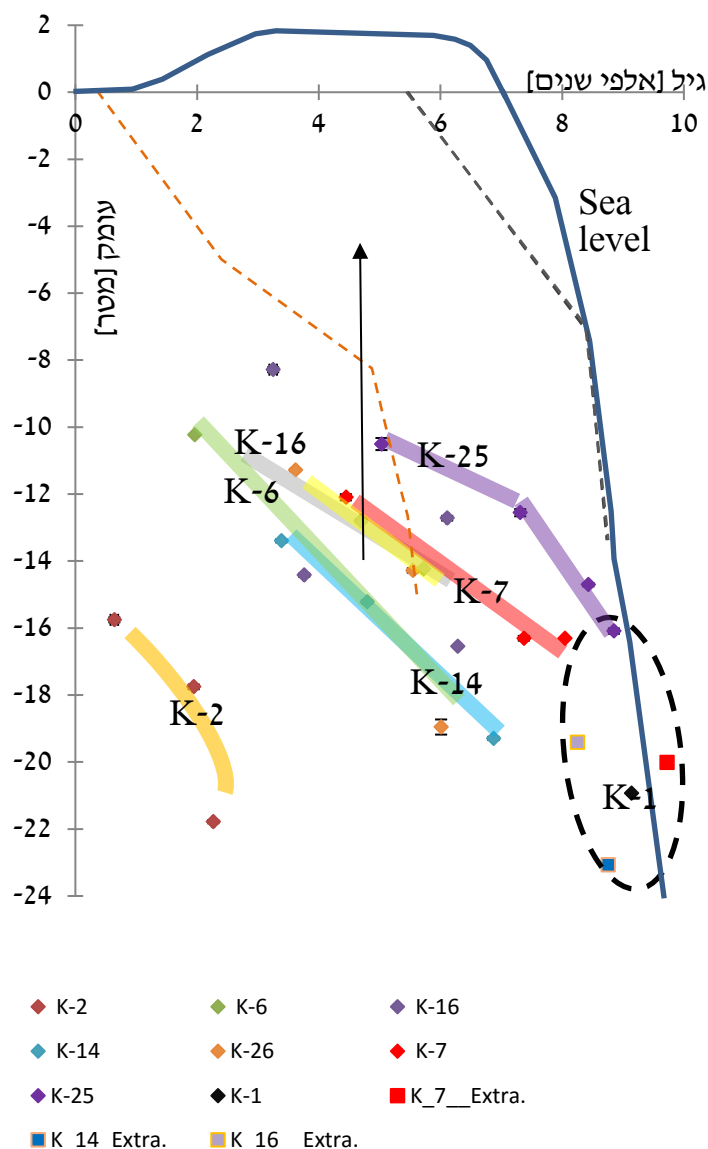
איור 5.4.2: מפה של "ראש" מפרץ עקבה. באדום מסומנים קידוחי הנמל ובסגול אזור הדיגום של שונית האלמוגים והאתר הארכיאולוגי הקבור בשמורת האלמוגים (מתוך מחקר של Shaked et al. (2004)).

עדות נוספת התומכת בתאורית ההסטה היא, קצב ההתפתחות של השונות. כפי שהוצג במאמר של Shaked et al. (2005), כל עוד יש מקום להתפתחות אנכית של האלמוגים, התפתחותם כלפי מעלה היא הדומיננטית. היות וגם בשיא ההתפתחות של האלמוגים (בין 3.4-6.7 אלפי שנים לפני ההווה) הקצב נמוך בהשוואה לשונות חוגרות אחרות יתכן כי הסיבה לכך נובעת מכך שהשטח הפנוי לגדילה מוגבל כלומר, האלמוגים חיים בסביבה רדודה

יחסית. קצב הצטברות איטי מוכר כמאפיין של הסביבה הרדודה (שולחן השונות לדוגמה) בשונות חוגרות (Davies and Marshall, 1980). לפיכך, עומקם הנוכחי יכול להעיד על הסטה.

השוואה לשונות חוגרות במפרץ עקבה שלהן קצב הצטברות נמוך, הדומה לזה של אלמוגי נמל אילת גם כן מחזק את התיאוריה שהאלמוגים בנמל עברו הסטה. שונות הולקניות חוגרות במפרץ עקבה (Montaggioni and Braithwaite, 2009) ובאוקיינוס ההודי-פסיפי מאותן תקופות, שלהן קצב הצטברות דומה, כיום נמצאות כמטר מתחת לפני הים (כדוגמת השונות במחקרם של Camoin et al., 1997), בשונה מהעומק הנוכחי של שונות האלמוגים הקבורה בנמל אילת.

באיור 5.4.3 מסומנת עקומת מפלס הים של מפרץ עקבה וגילי הדוגמאות מנמל אילת כפונקציה של העומק בו נמצאו מתחת למפלס הים (סימוני מעוינים בצבעים שונים). בשני קווים מקווקווים מוצגים קצבי ההצטברות של שתי השונות החריגות ביותר בקצב התפתחותן (המהירה ביותר והאיטית ביותר) באוקיינוס ההודי פסיפי (Montaggioni, 2005). בתוך תחום זה מצויות שונות האוקיינוס ההודי פסיפי שנחקרו. כפי שעולה מהאיור, קידוחי



איור 5.4.3 : למחקרי מפרץ עקבה (איור 5.3.5) צורפו עקומת מפלס הים בעשרת אלפים השנים האחרונות של מפרץ עקבה ושתי העקומות הקיצוניות בהתפתחות אנכית של שונות חוגרות (קווקו אפור וכתום) מהאוקיינוס ההודי-פסיפי (מתוך Montaggioni (2005). מחקרי מפרץ עקבה מסומנים גם הם ובולט שהם לא מצויים בטווח של כל יתר השונות. אם קידוחי המחקר "יורמו" מעט (חץ שחור) שונות האלמוגים תכנס לטווח.

השונות ממחקר נמל אילת אינם נופלים בטווח. נראה כי הסטה כלפי מעלה של דוגמאות האלמוגים תוביל

להתאמתם לטווח (חץ שחור). כלומר, לו האלמוגים היו רדודים יותר אזי, היו "נופלים" בטווח קצבי ההצטברות האופייני של אלמוגים באוקיינוס ההודי פסיפי. זוהי עדות נוספת התומכת בהסטה אנכית של אזור הקידוחים.

עדות נוספת התומכת בטענתנו לפעילות טקטונית מתבטאת בקידוח K-2. קידוח K-2 שלו דוגמאות האלמוגים הצעירות ביותר [איור 4.2.3] נמצא עמוק ביחס ליתר האלמוגים בקידוחים האחרים [איור 5.3.5]. בקידוח זה גם קצב ההצטברות גבוה בהשוואה ליתר האלמוגים (בממוצע 3.1 מטר לאלף שנה ואילו הקצב של יתר הקידוחים נע סביב 1-2 מטר לאלף שנה [איור 5.3.2]). המאפיינים הייחודיים של קידוח K-2 יכולים להעיד על התפתחות מנותקת מיתר אלמוגי השונית. המשמעות היא, שלאחר הסטת הגוש המזרחי והגבלת התפתחות השונית על ידי קבורתו בסדימנט, החלה התפתחות מחודשת מקומית, באזור קידוח K-2.

#### 5.4.2 עדויות לפעילות טקטונית מנתונים בתימטריים

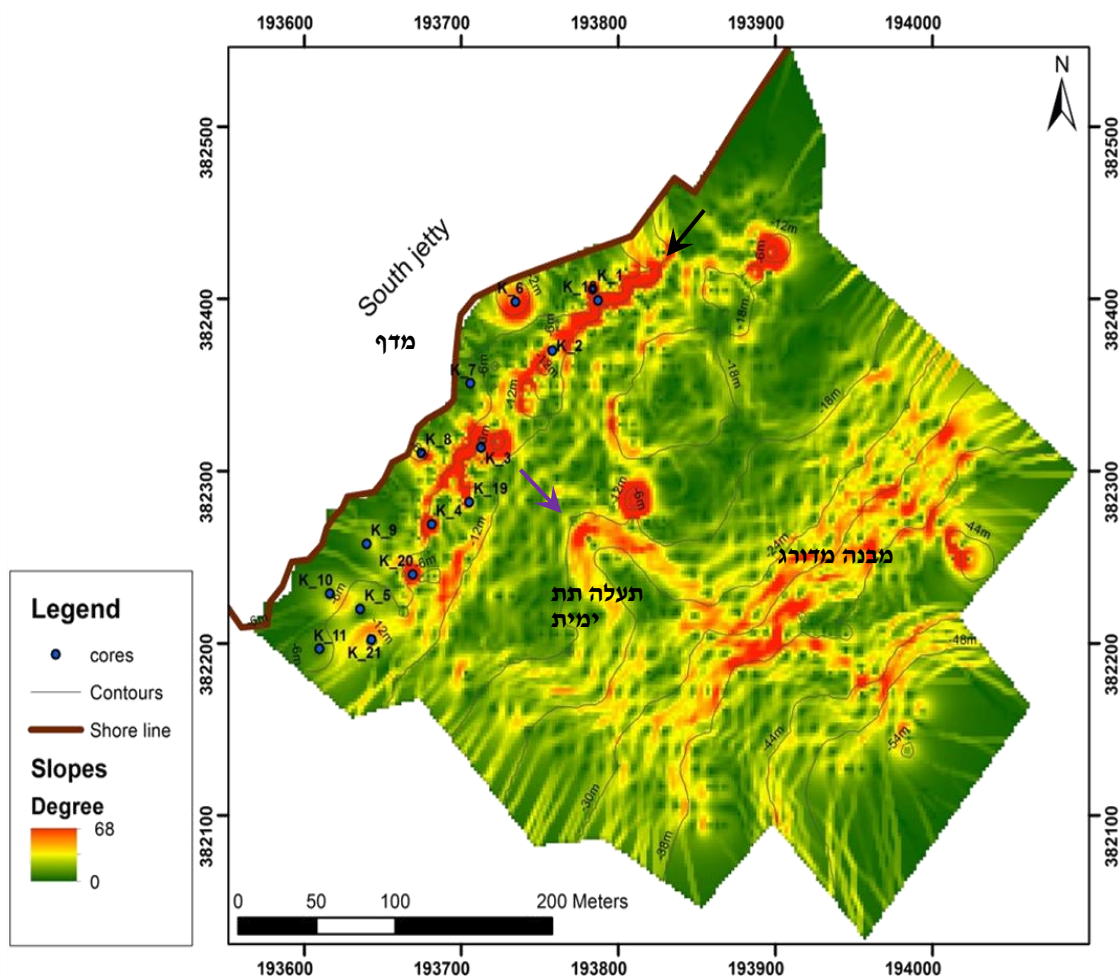
סקר בתימטרי של קרקעית מפרץ עקבה באזור נמל אילת נערך על מנת לקבל מידע נוסף, בלתי תלוי, לקידוחים של אזור נמל אילת. הסקר שבאמצעותו יוצרה מפה בתימטרית, יכול להצביע על טקסטורות ומבניים שלהם חשיבות באנליזת התפתחות האזור.

תוצאות התקבלו מסביבת המזח הדרומי בלבד. באזור המזח הצפוני חשופה יחידת האלמוגים [איור 4.1.1], 4.1.2 [יתכן ומבנה זה של הקרקעית, שאינו אופקי, הוביל לפיזור נרחב של גלי הסונאר ולכן, לא התקבל אות ברור. במזח הדרומי על מרבית האלמוגים מונחת היחידה הקלסטית העליונה [איור 4.1.4, 4.1.3].

באזור הרדוד, במקביל לחוף, צפיפות הדגימות גדולה ולכן, אינטרפולצית מבנה הקרקעית יחסית מדויקת [איור 4.2.7]. עם ההעמקה, לכיוון דרום מזרח, צפיפות הנתונים יורדת [איור 4.2.5] אי לכך, האינטרפולציה שהתקבלה כנראה אינה מייצגת את הקרקעית היטב. אף על פי כן, מבנה מרחבי כללי מתקבל.

איור 5.4.4 מציג מפת שיפועים של אזור הסקר הסייסמי במזח הדרומי. טווח השיפועים רחב ונע מ-0 ועד כ-70 מעלות.

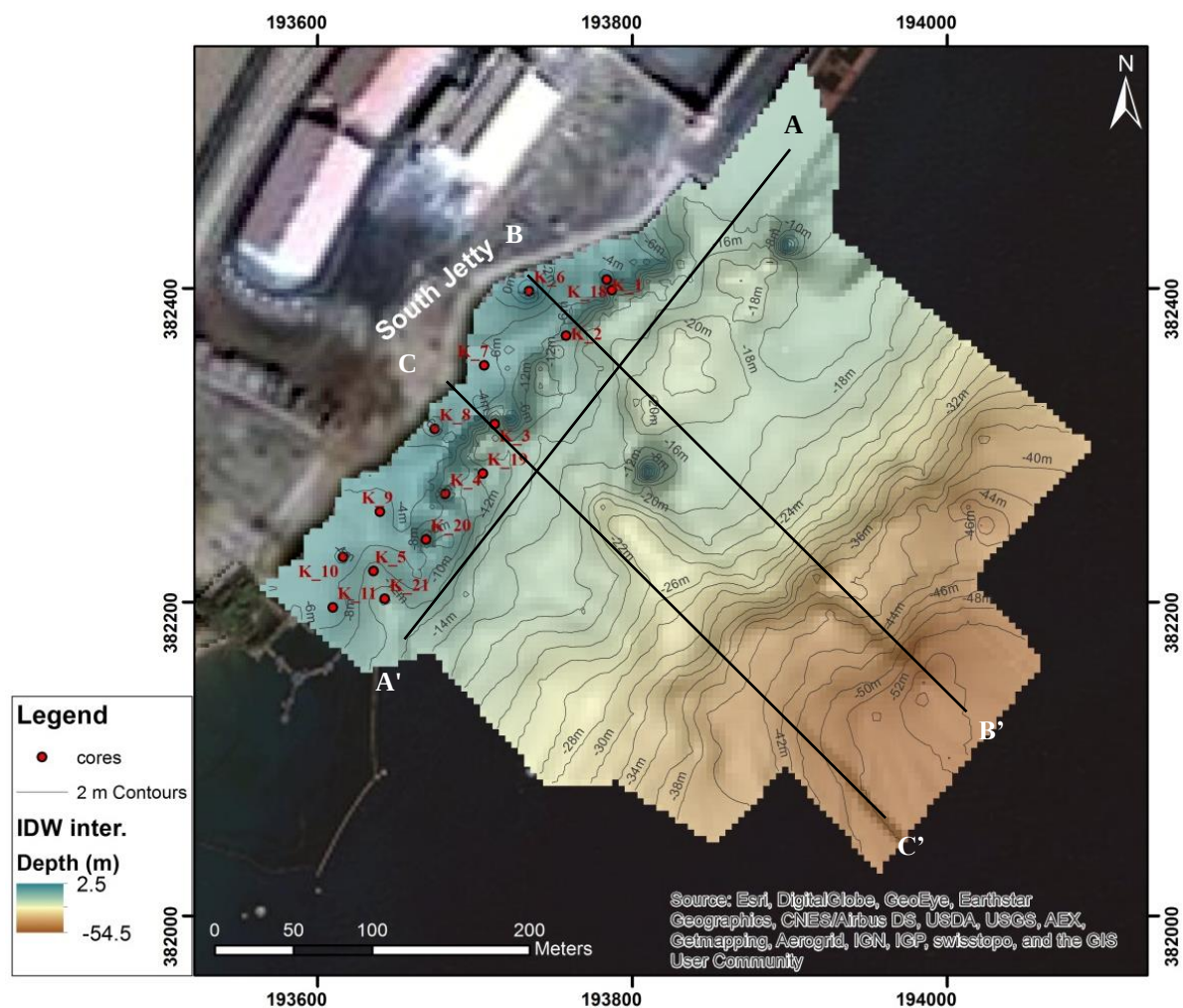
אזור מתון, דמוי מדף, באזור המזח הדרומי במבנה המקביל לקו החוף [חץ שחור, איור 5.4.4]. טווח השיפועים מהחוף ועד אזור זה נע בין  $19^{\circ}$ - $1^{\circ}$ . האזור מתון יחסית למעט מבנים מקומיים שלהם שיפוע חד, סביב קידוח K-6 ו-K-8. רמות אלו יכולות להיות בלטי אלמוגים מודרניים (knolls). האזור המתון "נחתך" על ידי מדרון [איור 5.4.4, חץ שחור] המקנה מבנה מדרגה. חלקו העליון של מדרון זה בכ-4 מטר מתחת למפלס. אורכו של המדרון באזור הצפוני של המזח הדרומי, כ-8.5 מטר בסביבת קידוחי K-1, K-8 [איור 4.1.3] במפת מיקום הקידוחים] ומדקק ל-7 מטר באזור קידוח K-2. אורך המדרון יורד ל-4 מטר לערך באזור קידוח K-20. באזור הדרומי יותר מדקק עוד ועוד. משתנה בתלילותו בין  $51^{\circ}$ - $13^{\circ}$ , שיפועו הממוצע כ- $35^{\circ}$ . המתלול מקביל להעתק אילת היבשתי [איור 1.6] ויכול להיות ביטוי של תזוזה בזמן התפתחות יחידת האלמוגים, או מוקדם להם והיווה מצע שהאלמוגים כיסו ושימרו זכר לצורתו המקורית.



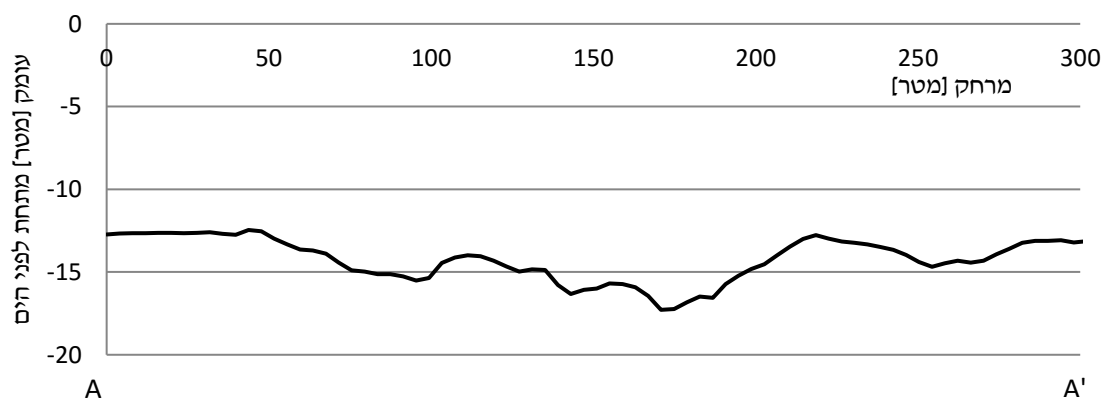
איור 5.4.4 : מפת שיפועים של המזרח הדרומי של נמל אילת. הנתונים ליצירת המפה הם מנתוני הסונאר ומהקידוחים. הקידוחים מוצגים בנקודות כחולות. חץ שחור מציג את מיקום ה"מדורג" המתואר ובחץ סגול התעלה. מקרא משמאל למפה. החל מכ-12 מטר מתחת לפני הים ועד לכ-32 מטר השיפוע מתון יחסית. ממזרח, מדורג נוסף מדורג עד לכ-50 מטר מתחת למפלס הים. אולם, הנתונים העמוקים מ-20 מטר מעטים [איור 4.2.7] אי לכך, סביר כי האנטרפולציה באזור זה אינה טובה כל כך.

בכדי ללמוד על מבנה הקרקעית של אזור הנמל, הוכנו שלושה חתכי רוחב מהמזרח הדרומי, שניים בניצב לחוף (C-C', B-B') ואחד צפון מזרח – דרום מערב, מקביל לקו החוף (A-A') [איור 5.4.5.1].

חתך במקביל לחוף (חתך A-A') חושף את השינויים בקרקעית באזור עמוק מהמדרגה [איור 5.4.5.2]. פני השטח אינם אופקיים, רמות ועמקים שהרוחב שלהם בין מספר מטרים לעשרות ומאות מטרים וגובהם עד כחמישה מטרים. שולי החתך רדודים יחסית בהשוואה לחלקו המרכזי. המבנה "הגבשוש" של הקרקעית יכול להיות תוצר של בלטי אלמוגים, תעלות והצטברויות סחף.



איור 5.4.5.1 : מפה בתימטרית של המזח הדרומי. על המפה מסומנים הקווים שמהם הופקו חתכי רוחב.

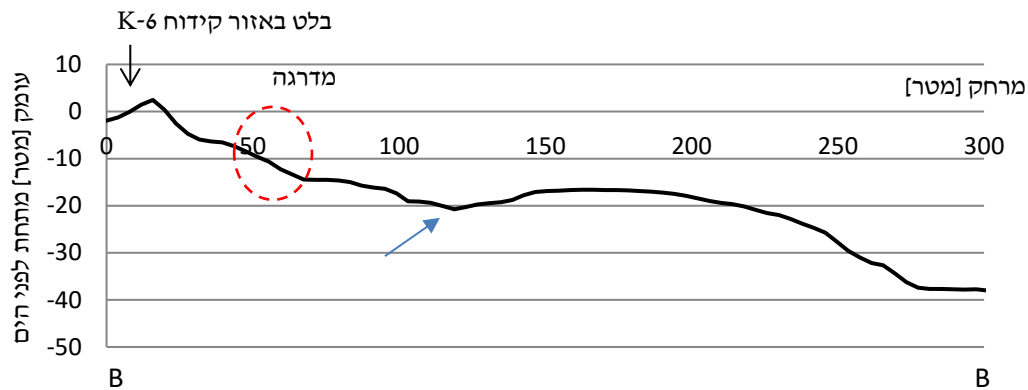


איור 5.4.5.2 : חתך רוחב במקביל לחוף במזח הדרומי (A-A'). החתך מתפרש על אזור של 300 מטרים.

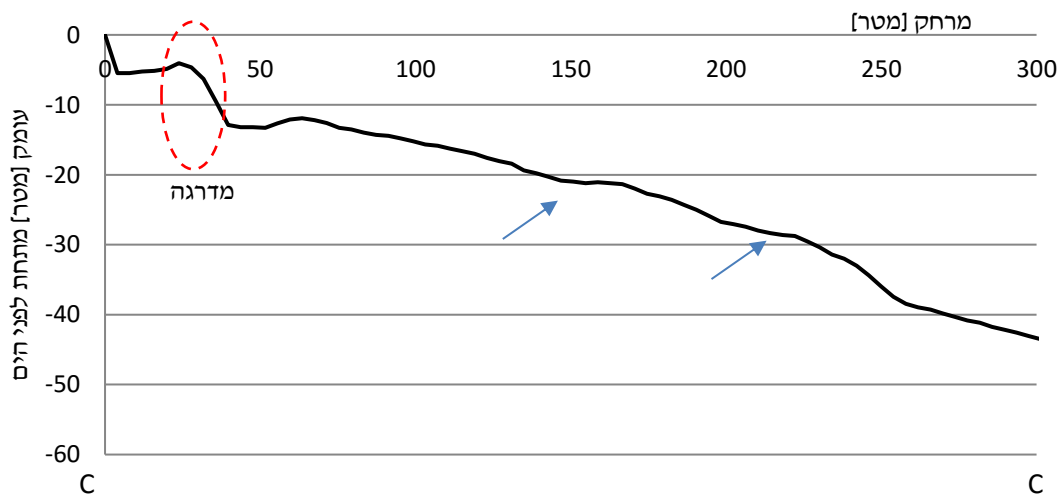
החתכים בניצב לחוף מציגים מדרון שמגיע לכ-40 מטר במרחק של 300 מטר מהחוף. בחתכים אלו מספר מעמקים שיתכן והם חתכים של תעלות בניצב לכיוון הזרימה [איור 5.4.5.3, 5.4.5.4, חצים כחולים]. אזור

המדרגה החשודה כצלקת העתק סביב 50 מטר מהחוף בולטת בשני החתכים [איור 5.4.5.3, 5.4.5.4]. שיפוע המדרגה בחתך C-C' חד בהשוואה לחתך B-B' ואחריו (לכיוון הים) מדרון מתון יותר.

חתך B-B' עובר על גבי הבלט של קידוח K-6. בין 100-150 מטר מקו החוף בחתך B-B' מבנה קמור.



איור 5.4.5.3: חתך רוחב בניצב לכיוון החוף במזרח הדרומי (B-B'). החתך מתפרש על אזור של 300 מטרים, ראשית הצירים מציגה את האזור הסמוך לחוף. האליפסה האדומה המקווקות מציגה את אזור השיפוע התלול בקרקעית החשוד כקיר העתק נורמלי. אזור מוגבה מקומית סביב קידוח K-6 מציג התפתחות אלמוגים רדודה מקומית. אזור עמוק שיכול להיות חתך בתעלה מסומן בחץ כחול.

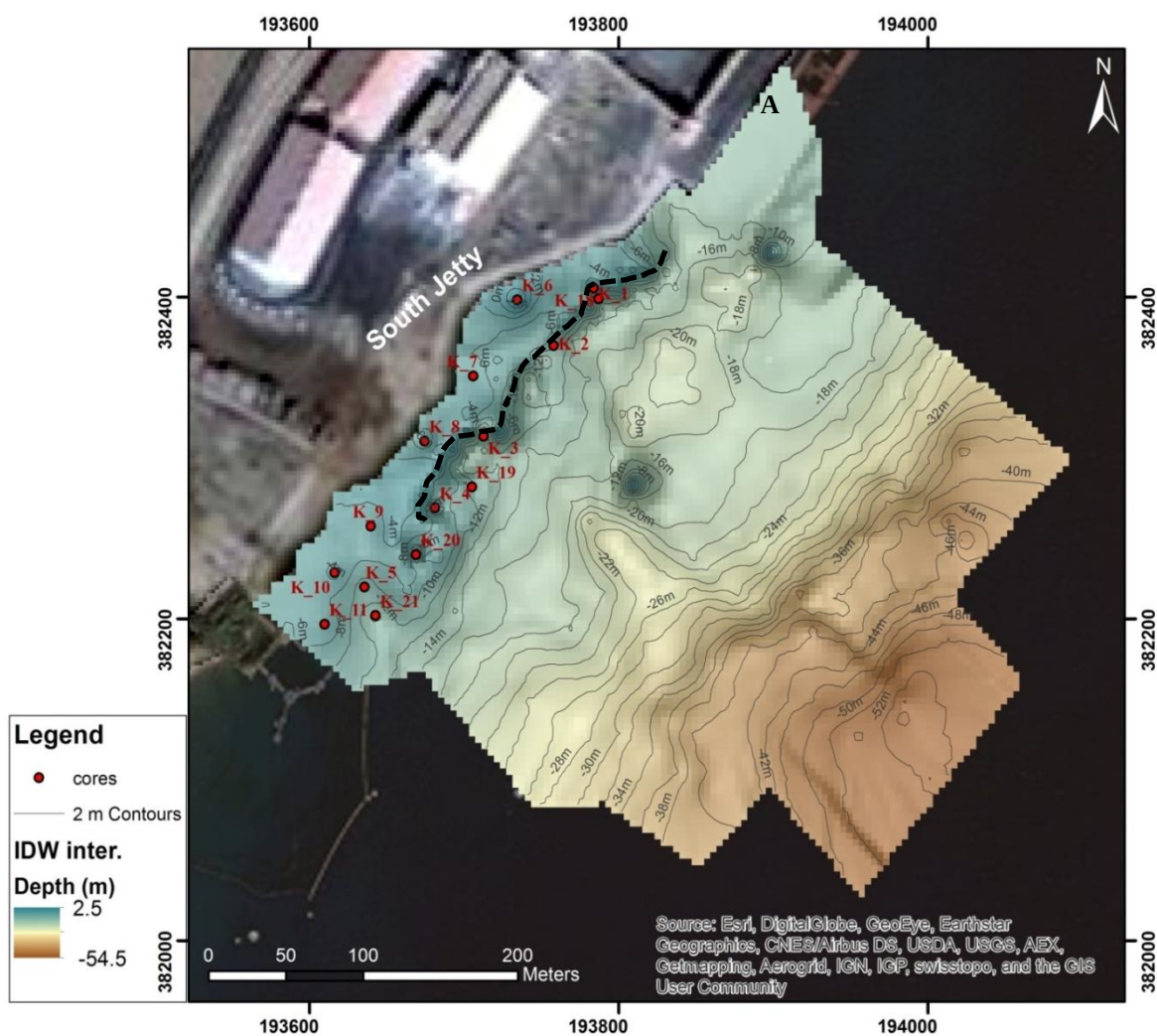


איור 5.4.5.4: חתך רוחב בניצב לכיוון החוף במזרח הדרומי (C-C'). החתך מתפרש על אזור של 300 מטרים, ראשית הצירים מציגה את האזור הסמוך לחוף. האליפסה האדומה המקווקות מציגה אזור החשוד כקיר העתק נורמלי. החתך בתעלה התת ימית [איור 5.4.5.1] ואזור נמוך נוסף מסומנים בחץ כחול.

חתך תלת ממדי של האזור [איור 5.3.4, היבט מתוך מפרץ עקבה לכיוון המזרח הדרומי] מדגיש את המבנה המדורג של קרקעית המפרץ באזור הנמל.

קידוח K-2 מצוי ממזרח למתלול [איור 5.3.4]. יתכן שהתפתחות האלמוגים באזור זה מאוחרת להסטה האנכית שהורידה את הבלוק המזרחי, בו נמצא קידוח K-2 (קידוחים K-1, K-6, K-7 נקדחו על גבי הגוש הרוכב).

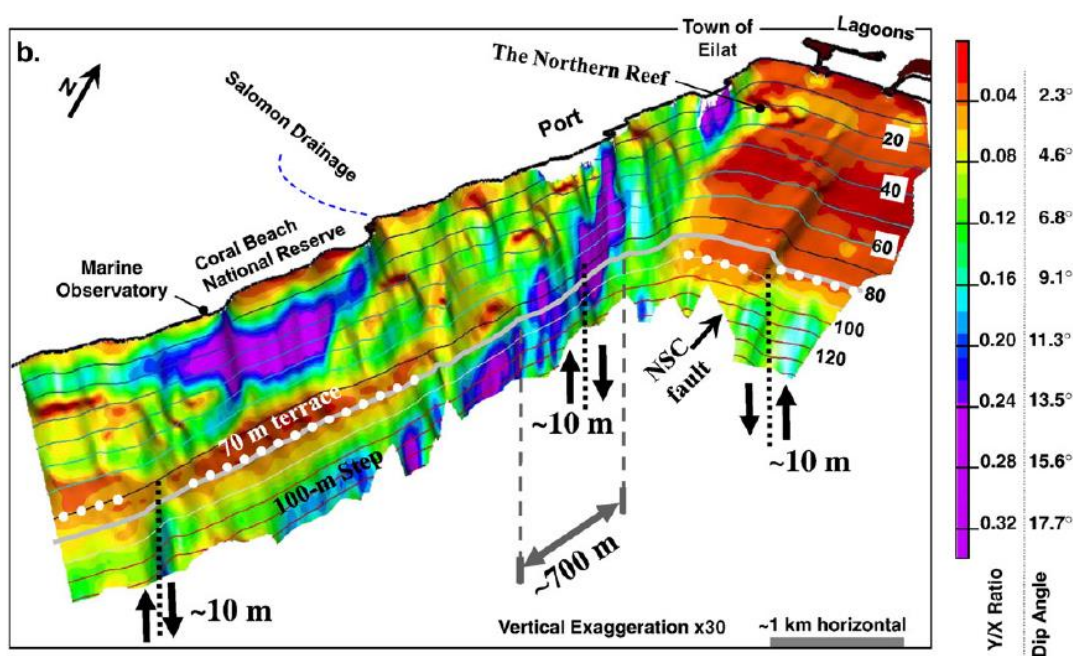
ממפת השיפועים [איור 5.4.4], ממפות האינטרפולציה, החתכים והמפה התלת ממדית [איור 5.3.4] בולט המבנה המדורג בעל המדרון התלול סמוך למזח, שאורכו כ-9 מטרים בסמוך למרכז הנמל. מדרגה זו עמוקה יחסית ורציפה ולכן, להערכתי מדרון זה הינו "צלקת" של העתקה [איור 5.4.6]. ההעתק היה פעיל בתקופת התפתחות השונית והוביל להסטה אנכית, קבורה תחת סדימנט (החלק העליון של היחידה הקלסטית) ומות האלמוגים.



איור 5.4.6: מפה בתימטרית של המזח הדרומי. קונטורים כל מטר. באדום מסומנים הקידוחים. בקווקו השערה למיקום העתק.

במאמרם של Makovsky et al. (2008) טוענים להסטה של כ-10 מטרים באזור הנמל [איור 5.4.7]. טענה זו מתבססת על אי רציפות של טרסת 70 מטרים ומדרון תלול מאוד באזור המדרון שחשוד כ"צלקת" העתק.

העתקה נורמלית והשתפלות הגוש המזרחי תואמת לתוצאות של סקר מחקר זה שנערכו ברזולוציה גבוהה באזור מזרח הדרומי [איור 5.4.6].



איור 5.4.7: איור מתוך Makovsky et al. (2008). בתמיטריה בשלושה ממדים. הצבעים מסמלים את הגרדיאנט עומק יחד עם קונטורים. הגומה אנכית פי 30. טרסות מסומנות באדום ומדרונות תלולים מאוד מוצגים בסגול. הסטה אנכית של מדרגת 100 מטר מוצגת על ידי אי הרציפות של הקונטור, מסומנת בעיגולים לבנים. מרווח של כ-700 מטר במדרגת 100 המטרים באזור הנמל מסומנת באפור.

לסיכום, ממצאים רבים, בלתי תלויים, מעידים על הסטה נורמלית של גוש אחד או יותר באזור נמל אילת לפני כ-2000 שנה. העתקה של מספר מטרים מתאימה לממצאי הקידוחים עם בסיס הנתונים האוקייני. ההעתק שמופה במחקר זה הסיט רק את הקידוחים העמוקים יותר במזרח הדרומי [איור 5.4.6]. יתכן שענף זה של העתק אילת לא היה היחיד שפעל בתקופה זו, שהרי גם הקידוחים הסמוכים לחוף עמוקים יחסית. להערכתנו, מקטע העתק אילת היבשתי פעל גם הוא כך ששתי הסטות מקבילות לחוף פעלו.

## 6. סיכום - היסטוריה גיאולוגית, סביבות השקעה, ופעילות טקטונית באזור נמל

### אילת

במחקר נמצאו ארבע יחידות סטרטגרפיות עיקריות באזור נמל אילת: היחידה הקלסטית התחתונה, יחידת האלמוגים, היחידה הקלסטית העליונה ויחידת מילוי מלאכותי. השינויים בסביבות ההשקעה הם שהובילו לשינויים ביחידות הסטרטגרפיות. בסביבה יבשתית הושקעה היחידה הקלסטית התחתונה. אחריה עליית מפלס והתפתחות יחידת האלמוגים. יחידת האלמוגים פסקה פעילותה זמנית עם השקעת סדימנט סחף (חלקה התחתון של היחידה הקלסטית העליונה). הפסקה סופית בהתפתחות יחידת האלמוגים חלה עם פעילות

טקטונית מקומית שלוותה בהשקעה נוספת של סדימנט (חלקה העליון של היחידה הקלסטית העליונה). בכתמים הונחה יחידת המילוי המלאכותי של הנמל.

## 6.1 היחידה הקלסטית התחתונה

את היחידה הקלסטית התחתונה ניתן לחלק לשתי תתי יחידות [איור 4.1.1-4.1.4]. תתי היחידות בקידוחים מייצגות תקופה יבשתית של ארועי שטפון והשקעת סחף. היחידות עתיקות מ-9000~ שנים לפני ההווה (גבול תחתון של יחידת האלמוגים המונחת מעל).

תת היחידה העמוקה בקידוחים במזח הדרומי מורכבת מחול דק מאוד, סילט וחרסיות. מאידך גיסא, תת היחידה העמוקה במזח הצפוני מורכבת מחלוקים עם כמויות משתנות של חול וסילט. להערכתו, ארוע שטפון בעל אנרגיה גבוהה השקיע את החלוקים הגדולים במזח הצפוני ואילו במזח הדרומי, בגבול מניפת הסחף, הושקעו היחידות העדינות יותר [איור 4.1.3, 4.1.4]. אפיק נחל שיכול היה להוות מקור לסחף סמוך למזח הצפוני [איור 5.2.1], האפיק הצפוני לנחל גרופ.

הקידוחים העמוקים אינם מגיעים לבסיס יחידות אלו ולכן, ממצאים אלו בלבד לא ניתן לקבוע את עובי היחידה הקלסטית התחתונה.

על גבי השקעת הסחף של תת היחידה העמוקה מונחת מניפת סחף נוספת, תת היחידה העליונה [איור 4.1.1-4.1.4], שמאופיינת בחלוקים עם חול וסילט בכמויות משתנות גם במזח הצפוני וגם במזח הדרומי. באזור המזח הצפוני העובי המרבי, הקטן משמעותית לכיוון המזח הדרומי. סביר להניח שמניפת הסחף הוזרמה לכיוון המזח הצפוני. ממצאים אלו תומכים בהשערה כי אפיק הזרימה שהשקיע את תת היחידה העמוקה זרם במסלול דומה לאפיק שהשקיע גם את תת היחידה העליונה. אם אכן אותו אפיק שימש לשני הארועים אזי, סביר שאנרגית הזרימה במאורע שהשקיע את תת היחידה העליונה, הצעיר, הייתה גבוהה ביחס לארוע הקדום לה.

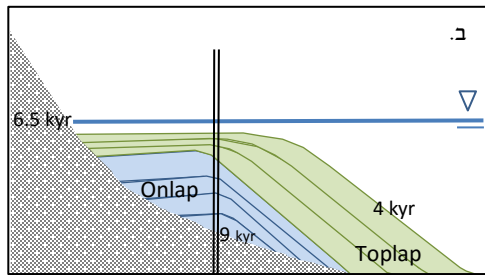
על גבי מישור מניפת הסחף היבשתית מונחת שונית אלמוגים. נוכחות האלמוגים הינה עדות ברורה לטרנסגרסיה של מי המפרץ שהתרחשה לפני כ-9100 שנים או מוקדם יותר.

## 6.2 יחידת האלמוגים

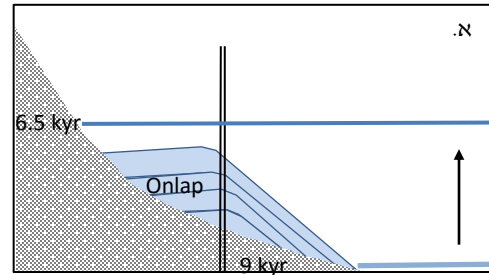
על גבי היחידה הקלסטית התחתונה התפתחה שונית לפני כתשעת אלפים שנים. תקופה זו תואמת לעליית מפלס הים במערב אוסטרליה (Eisenhauer et al., 1993). כך השתנתה הסביבה היבשתית לאזור ימי. מפלס הים המשיך לעלות ושונית האלמוגים המשיכה להתפתח [איור 6.1]. לפני כ-ששת אלפים וחמש מאות שנים מפלס הים התייצב במפרץ עקבה, כמטר מעל המפלס המודרני [איור 5.3.5]. השונית צברה חתך שלד (גידול אנכי) רב בתקופה זו (בין 3.4-6.7 אלפי שנים). לפני כ-4500 שנים המפלס החל לרדת, יחד עם ירידה בקצב הצטברות האלמוגים [איור 5.3.3]. לפני כ-3200 שנה סדימנט סחף כיסה את השונית (החלק התחתון של היחידה הקלסטית התחתונה) ומנע התפתחותה. פער של כאלף שנה ללא התפתחות מחודשת של אלמוגים הוא העדות לכך.

לפני כאלפיים ושלש מאות שנים התחדשה ההתפתחות, לתקופה קצרה (של כ-400 שנה לערך) ופסקה שוב. ארוע נוסף הוביל לעיכוב התפתחותם. פעילות על גבי העתק אילת הוביל להסטה אנכית ולהשקעת שונית האלמוגים בכמה מטרים. הפעילות הטקטונית לוותה בשקיעת סדימנט סחף שקבר את האלמוגים (החלק העליון של היחידה הקלסטית העליונה). קולוניזציה חדשה מבוזרת החלה במאות שנים האחרונות (קידוח K-2).

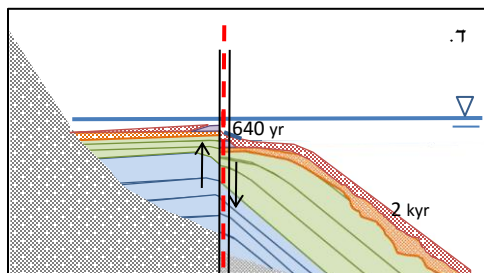
היסטוריית התפתחות שונית האלמוגים בנמל אילת :



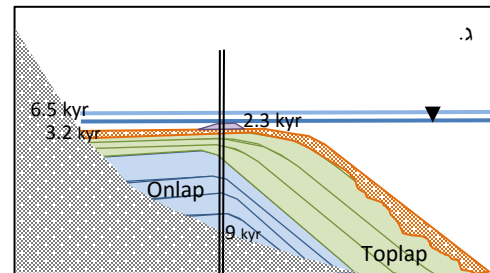
א. לפני כ-9000 שנים ועד כ-6500 שנים מפלס הים במפרץ עקבה עלה ושונית החלה מתפתחת על גבי סדימנט סחף של היחידה הקלסטית התחתונה. כשמפלס הים עלה סוג התפתחות השונית: Onlap.



ב. מפלס הים התייצב (בתקופה שבין 4.3-6.5 אלפי שנים לפני ההווה). תקופת שגשוג של האלמוגים. האלמוגים צברו חתך רב (Toplap), התפתחות לכיוון הים.



ג. לפני כ-4300 שנים מפלס הים החל לרדת (בכמטר) וסדימנט כיסה את האלמוגים לפני כ-3200 שנים (בסיס היחידה הקלסטית התחתונה). ארוע זה עיכב את התפתחותם. התאוששות מסוימת והתפתחות בלטים לאחר המאורע (לפני כ-2300 שנים).



ד. תנועה טקטונית של העתק אילת הסיטה נורמלית את הבלוקים עליהם השונית גדלה לפני כאלפיים שנים והובילה להעמקת היחידה. קבורה תחת סדימנט (החלק העליון של היחידה הקלסטית העליונה) גרם למות השונית. התפתחות מקומית בקידוח K-2 התרחשה לאחר ההסטה.

שבלים בהתפתחות יחידת האלמוגים



היחידה הקלסטית התחתונה



החלק התחתון של היחידה הקלסטית העליונה



החלק העליון של היחידה הקלסטית העליונה



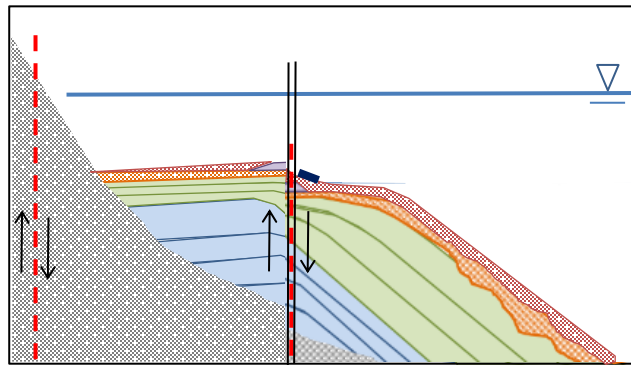
איור 6.1 : שרטוטים סכמתיים, חתכי צד, של היסטוריית התפתחות השונית. העמודים השחורים מייצגים את מיקום הקידוחים (שתי שורות הקידוחים). השונית התפתחה על גבי היחידה הקלסטית התחתונה, על מדרון מפרץ עקבה.

### 6.2.1 הסטה נורמלית של העתק אילת לפני כאלפיים שנה

לפני כאלפיים שנים תנועה על גבי ענף ימי של העתק אילת (שמופה במחקר זה במזח הדרומי) הובילה להסטה נורמלית של בלוקים סמוך לנמל אילת.

אחרי ההסטה הטקטונית הושקע סדימנט סחף (החלק העליון של היחידה הקלסטית העליונה). עדויות להסטה זו נמצאו בקידוחי הנמל ובסקר בתימטרי שנערך במזח הדרומי. אזור השונית הוסט אנכית במספר מטרים. שונית האלמוגים שפעילה הייתה בתקופה זו [איור 5.3.3] פסקה מלהתפתח אחרי קבורתה. רק דגימת גיל יחידה מאוחרת לתקופה זו התגלתה, בקידוח K-2 [איור 4.2.3, גיל של כשש מאות שנה] שכנראה מעידה על התפתחות מחודשת המאוחרת לארוע.

להערכת, שתי הסטות שמקורם בשני ענפים של העתק אילת פעלו (המקטע הימי שמופה במחקר והעתק אילת היבשתי). הטענה נעוצה בעובדה שגם שורת הקידוחים הסמוכה לחוף במזח הדרומי (הקידוחים מעל קיר ההעתק הימי) עמוקה ולכן יתכן שמקטע נוסף של העתק, מערבי להם, פעל גם הוא [איור 6.2].



איור 6.2 : איור סכמתי של הפעילות הטקטונית על גבי העתק אילת. הסגמנט הימי הוביל להסטה נוספת (מלבד הענף הימי שמופה במחקר זה של השונית).

בכדי לחזק את ההערכה לפעילות ההעתקה מומלץ לערוך מפה בתימטרית גם למזח הצפוני ולחקור פעילות על גבי הענף היבשתי של העתק אילת לפני כאלפיים שנה. כמו כן, כדאי לזהות את דוגמאות האלמוגים לרמת המין, יכולים לתת שיוך ברור יותר לעומק המים בהם התפתחו האלמוגים. מומלץ גם לתארך עוד אלמוגים בבסיס ההתיישבות של השונית ולערוך קידוחים נוספים מערבית לקידוחי מחקר זה במטרה לחשוף את האזור הרדוד ביותר של השונית (אולי יחשפו סלעי חוף או אלמוגים שידוע כי מתפתחים רק באזור הרדוד ביותר).

חתכים גיאולוגיים בניצב לנמל במזח הדרומי מצויים בנספח.

### 6.2.2 ייחודיות גילי האלמוגים

בין אלמוגי הנמל נמצאו הגילים העתיקים שתוארכו בהולוקן (בין 6.5-9.1 אלפי שנים לפני ההווה) בצפון מפרץ עקבה. הגיל העתיק ביותר שתוארך קודם למחקר זה, ~6750 שנים לפני ההווה [איור 5.3.5, עיגול שחור, מתוך (Shaked et al., 2004)]. עדויות למפלס הים מתקופה זו היו חסרות ב"ראש" המפרץ, וגילי השונית בנמל מהווים תחום תחתון למפלס הים. האלמוגים מקידוחי הנמל מביאים עדות לעליית מפלס הים במפרץ, שמתאימה לשינוי מפלס הים כפי שנצפו באזורים אחרים בעולם (כדוגמת מערב אוסטרליה).

### 6.3 היחידה הקלסטית העליונה ויחידת המילוי המלאכותי

סדימנט סחף חולי סילטי הושקע בזמן התפתחות יחידת האלמוגים (באזורים בהם לא התפתחו אלמוגים, קידוחים K-3, K-9, K-4 במזח הדרומי והיכן שעובי יחידת האלמוגים דק במזח הצפוני [איור 4.2.2.2]). הסדימנט ששייך ליחידה זו גם שקע על גבי השונית לפני כ-3200 שנים, לאחר ירידת מפלס הים בעקבה מהמקסימום ההולוקני [איור 5.3.5]. הפריסה המרחבית של היחידה מוגבלת אומנם, אך היות ובאזור זה נבנה הנמל ייתכן שחלק מהיחידה הוסר. אף על פי כן, סדימנט זה כנראה היווה מקור לפגיעה בהתפתחות האלמוגים. במידה וההסרה האנתרופוגנית ביחידה מעטה אזי, העובי המרבי של ההשקעה במזח הדרומי מעיד על סחף שהגיע מניקוז דרומי יחסית. הניקוז האפשרי מאפיקים דרומיים לאפיק שהשקיע בבסיס הקידוחים [איור 5.2.1] ומעיד על אבולוציית זרימת הסחף באזור (האפיק הדומיננטי הדרים).

בכתמים הונחה על גבי יחידת האלמוגים והיחידה הקלסטית העליונה יחידה מלאכותית שהיא תערובת שאינה טבעית.

- Al-Rifaiy, I. a., and Cherif, O.H., 1988, The fossil coral reefs of al-Aqaba, Jordan: Facies, v. 18, p. 219–229, doi: 10.1007/BF02536801.
- Aronson, R.B., and Precht, W.F., 1995, Landscape patterns of reef coral diversity: a test of the intermediate disturbance hypothesis: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, v. 192, no. 1, p. 1–14, doi: 10.1016/0022-0981(95)00052-S.
- Bar, N., 2014, Tectonic movements and sea-level changes from Coral reefs terraces along the north-east Gulf of Aqaba, M.Sc thesis, The Hebrew university, Jerusalem (in Hebrew, English abstract).
- Bar-Matthews, M., Ayalona, A., and Kaufmanb, A., 1997, Late Quaternary Paleoclimate in the Eastern Mediterranean Region from Stable Isotope Analysis of Speleothems at Soreq Cave, Israel: *Quaternary Research*, v. 47, no. 2, p. 155–168.
- Bar-Matthews, M., Wasserburg, G., and Chen, J., 1993, Diagenesis of fossil coral skeletons: Correlation between trace elements, textures, and: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 57, no. 2, p. 257–276, doi: 10.1016/0016-7037(93)90429-Z.
- Ben-Avraham, Z., and Tibor, G., 1993, The northern edge of the Gulf of Elat: Tectonophysics, v. 226, no. 1-4, p. 319–331, doi: 10.1016/0040-1951(93)90125-4.
- Le Beon, M., Klinger, Y., Amrat, A.Q., Agnon, A., Dorbath, L., Baer, G., Ruegg, J.C., Charade, O., and Mayyas, O., 2008, Slip rate and locking depth from GPS profiles across the southern Dead Sea Transform: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 113, no. 11, p. 1–19, doi: 10.1029/2007JB005280.
- Beta Analytic, 2015, Beta Analytic Standard Pretreatment Protocols: .
- Beyth, M., Eyal, Y., and Garfunkel, Z., 2012, Elat, Geological map: Geological survey of Israel, , no. 26-1,11, p. 1: 50,000.
- Bourdon, B. Turner, S. Henderson, G. M. and Lundstrom, C.C., 2003, Introduction to U-series Geochemistry: *Mineralogy and Geochemistry*, v. 52, p. 1–21.
- Broecker, S.W., 1963, A Preliminary evolution of Uranium series inequilibrium as Tool for Absolute Age Measurement on Marine Carbonates: *Geophysical research*, v. 68, no. 9, p. 2817–2834.
- Broecker, W.S., 2002, the Glacial World According To Wally: .
- Cabioch, G., Camoin, G.F., and Montaggioni, L.F., 1999, Postglacial growth history of a French Polynesian barrier reef tract, Tahiti, central Pacific: *Sedimentology*, v. 46, no. 6, p. 985–1000, doi: 10.1046/j.1365-3091.1999.00254.x.
- Camoin, G.F., Colonna, M., Montaggioni, L.F., Casanova, J., Faure, G., and Thomassin, B.A., 1997, Holocene sea level changes and reef development in the southwestern Indian Ocean:

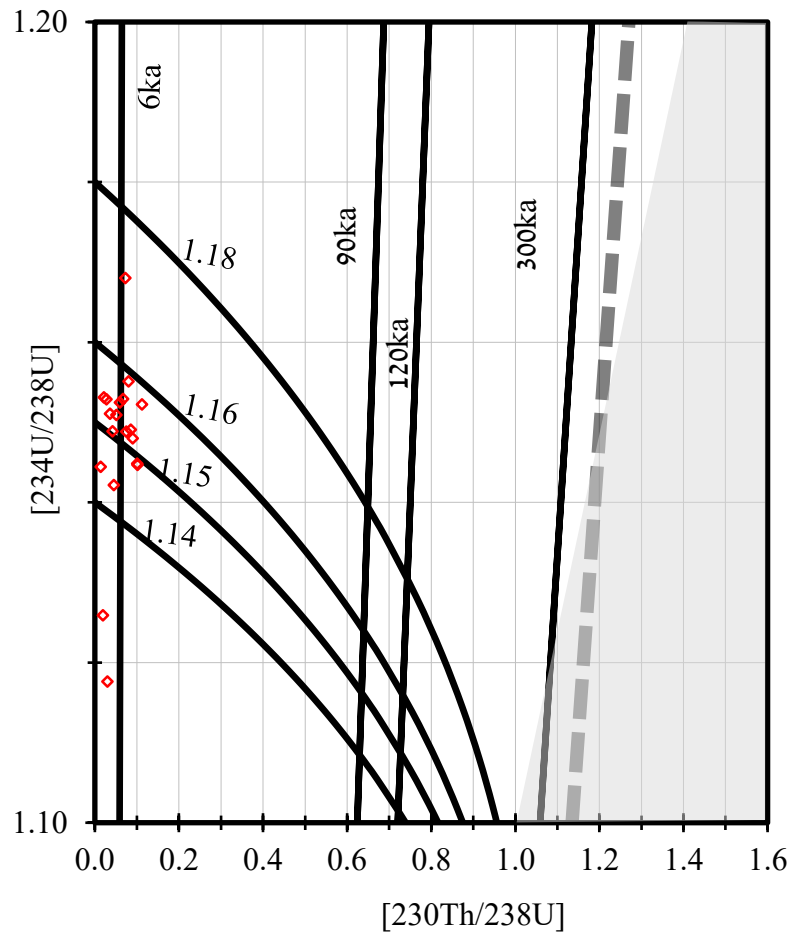
- Coral Reefs, v. 16, no. 4, p. 247–259, doi: 10.1007/s003380050080.
- Cheng, H., Edwards, R.L., Hoff, J., Gallup, C.D., Richards, D. a., and Asmerom, Y., 2000, The half-lives of uranium-234 and thorium-230: Chemical Geology, v. 169, no. 1-2, p. 17–33, doi: 10.1016/S0009-2541(99)00157-6.
- Davies, P.J., and Marshall, J.F., 1980, A model of epicontinental reef growth: Nature, v. 287, p. 37–38, doi: 10.1038/287037a0.
- Edwards, R.L., Beck, J.W., Burr, G.S., Donahue, D.J., Chappell, J.M., Bloom, a L., Druffel, E.R., and Taylor, F.W., 1993, A Large Drop in Atmospheric  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  and Reduced Melting in the Younger Dryas, Documented with  $^{230}\text{Th}$  Ages of Corals.: Science (New York, N.Y.), v. 260, no. 5110, p. 962–968, doi: 10.1126/science.260.5110.962.
- Edwards, R.L., Chen, J.H., and Wasserburg, G.J., 1987, U-238-U-234-Th-230-Th-232 systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years: v. 81, p. 175–192, doi: 10.1016/0012-821X(87)90154-3.
- Ehrhardt, a., Hübscher, C., Ben-Avraham, Z., and Gajewski, D., 2005, Seismic study of pull-apart-induced sedimentation and deformation in the Northern Gulf of Aqaba (Elat): Tectonophysics, v. 396, no. 1-2, p. 59–79, doi: 10.1016/j.tecto.2004.10.011.
- Eisenhauer, a., Wasserburg, G.J., Chen, J.H., Bonani, G., Collins, L.B., Zhu, Z.R., and Wyrwoll, K.H., 1993, Holocene sea-level determination relative to the Australian continent: U/Th (TIMS) and  $^{14}\text{C}$  (AMS) dating of coral cores from the Abrolhos Islands: Earth and Planetary Science Letters, v. 114, no. 4, p. 529–547, doi: 10.1016/0012-821X(93)90081-J.
- Enmar, R., 2000, Submarine diagenesis in reef corals- implications for geochemical parameters: The Hebrew university, Jerusalem (in Hebrew, English abstract), 105 p.
- Garfunkel, Z., 1970, The tectonics of the western margins of the southern Arava (in Hebrew, English abstract), Ph.D thesis, 166, Hebrew university, Jerusalem p.
- Garfunkel, I.Z., Zak, I., and Freund, R., 1981, Active faulting in the Dead Sea rift: Tectonophysics, v. 80, p. 1–26.
- Gladstone, W., Krupp, F., and Younis, M., 2003, Development and management of a network of marine protected areas in the Red Sea and Gulf of Aden region: Ocean & Coastal Management, v. 46, p. 741–761, doi: 10.1016/S0964-5691(03)00065-6.
- Gvirtzman, G., 1994, Fluctuations of sea level during the past 400000 years: the record of Sinai, Egypt (northern Red Sea): Coral Reefs, v. 13, p. 203–214.
- Hall, J., and Ben Avraham, Z., 1978, New Bathymetric map of the Gulf of Elat (Aqaba): Paper presented at the tenth Int. Congr. Sedimentol. Int. Assoc. Sedimentol, v. I, p. 285.
- Hartman, G., 2012, Quaternary Evolution of a Transform Basin: The northern Gulf of Elat/Aqaba, Quaternary evolution of a transform basin: The northern Gulf of Elat/Aqaba, PhD thesis, Tel Aviv university.

- Heaton, T.J., Blackwell, P.G., and Buck, C.E., 2009, A bayesian approach to the estimation of radiocarbon calibration curves: The INTCAL09 methodology: *Radiocarbon*, v. 51, no. August 2015, p. 115 1–116 4.
- ISRAMAR, 2015, Tide forecast at Gulf of Aqaba/Elat coastline: Israel Oceanographic and Limnological Research, p. <http://isramar.ocean.org.il/isramar2009/TideElat/d>.
- Jaffey, A.H., Flynn, K.F., Glendenin, L.E., W.C, B., and Essling, A.M., 1971, Precision Measurement of Half-Lives and Specific Activities of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ : *Phys. Rev.*, v. 4, p. 1889–1907.
- Kennedy, D., and Woodrofe, C.D., 2002, Fringing reef growth and morphology: a review: *Earth-Science Reviews*, v. 57, no. 3-4, p. 255–277, doi: 10.1016/S0012-8252(01)00077-0.
- Lambeck, K., and Chappell, J., 2001, Sea level change through the last glacial cycle.: *Science*, v. 292, no. 5517, p. 679–686, doi: 10.1126/science.1059549.
- Libby, W.F., 1946, Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation: *Physical Review*, v. 69, p. 671–672.
- Makovsky, Y., Wunch, A., Ariely, R., Shaked, Y., Rivlin, A., Shemesh, A., Ben Avraham, Z., and Agnon, A., 2008, Quaternary transform kinematics constrained by sequence stratigraphy and submerged coastline features: The Gulf of Aqaba: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 271, no. 1-4, p. 109–122, doi: 10.1016/j.epsl.2008.03.057.
- Masson, F., Hamiel, Y., Agnon, A., Klinger, Y., and Deprez, A., 2015, Variable behavior of the Dead Sea Fault along the southern Arava segment from GPS measurements: *Comptes Rendus - Geoscience*, p. 1–9, doi: 10.1016/j.crte.2014.11.001.
- Medvedev, B., 2013, Partitioning and wrinkles in 3D: laboratory and subsurface evidence for shear associated with transform, PhD thesis, The Hebrew university, Jerusalem (in Hebrew, English abstract).
- Mergner, H., 1971, Structure, ecology and zonation of Red Sea reefs (in comparison with South Indian and Jamaican reefs): *Symp. Zool. Soc*, p. 141–161.
- Montaggioni, L.F., 2005, History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: Development patterns and controlling factors: *Earth-Science Reviews*, v. 71, no. 1-2, p. 1–75, doi: 10.1016/j.earscirev.2005.01.002.
- Montaggioni, L.F., and Braithwaite, C.J.R., 2009, Quaternary coral reef systems: history, development processes and controlling factors, *in* p. 35,72–75,101,113,,157,173,182,212–216.
- Mook, G.W., and van der Plicht, J., 1999, A Common Polymorphism in the Monocyte Chemoattractant Protein-1 (MCP-1) Gene Regulatory Region Influences MCP-1 Expression and Function of Isolated Human Pancreatic Islets.: *Radiocarbon*, v. 41, no. 3, p. 227–239, doi: 10.1016/j.transproceed.2010.05.039.
- Muller-Parker, G., and D'Elia, C.F., 1997, Interactions between corals and their symbiotic algae:

- Life and Death of Coral Reefs, v. 5, no. Chapter 15, p. 96–113.
- Reches, Z., Erez, J., and Garfunkel, Z., 1987, Sedimentary and tectonic features in the northwestern Gulf of Elat, Israel: Tectonophysics, v. 141, no. 1-3, p. 169–180, doi: 10.1016/0040-1951(87)90183-1.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., et al., 2009, INTCAL 09 and MARINE09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years Cal BP: Radiocarbon, v. 51, no. 4, p. 1111–1150, doi: 10.2458/azu\_js\_rc.51.3569.
- Reiss, Z., and Hottinger, L., 1984, The Gulf of Aqaba: Ecological Micropaleontology.: Ecological Studies, Berlin, Springer-Verlag, v. 50, p. 354.
- Le Roux, L.J., and Glendenin, L.E., 1963, Half-life of  $^{232}\text{Th}$ : Proc Natl Meet on Nuclear Energy Pretoria, South Africa, p. 83–94.
- Shackleton, N.J., and Opdyke, N.D., 1973, Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a  $10^5$  year and  $10^6$  year scale: Quaternary Research, v. 3, no. 1, p. 39–55, doi: 10.1016/0033-5894(73)90052-5.
- Shaked, Y., Agnon, a., Lazar, B., Marco, S., Avner, U., and Stein, M., 2004, Large earthquakes kill coral reefs at the north-west Gulf of Aqaba: Terra Nova, v. 16, no. 3, p. 133–138, doi: 10.1111/j.1365-3121.2004.00541.x.
- Shaked, Y., and Genin, A., 2014, Israel National Monitoring Program at the Gulf of Eilat: Funded by Israel's Ministry of Environmental Protection, Scientific report 2013 (in Hebrew, English abstract),.
- Shaked, Y., Lazar, B., Marco, S., Stein, M., and Agnon, A., 2011, Late Holocene events that shaped the shoreline at the northern Gulf of Aqaba recorded by a buried fossil reef: Israel Journal Of Earth Sciences, v. 58, p. 355–368, doi: 10.1560/IJES.58.3.
- Shaked, Y., Lazar, B., Marco, S., Stein, M., Tchernov, D., and Agnon, A., 2005, Evolution of fringing reefs: Space and time constraints from the Gulf of Aqaba: Coral Reefs, v. 24, no. 1, p. 165–172, doi: 10.1007/s00338-004-0454-2.
- Shaked, Y., Marco, S., Lazar, B., Stein, M., Cohen, C., Sass, E., and Agnon, A., 2002, Late Holocene shorelines at the Gulf of Aqaba: migrating shorelines under conditions of tectonic and sea level stability: Stephan Mueller Special Publication Series, v. 2, p. 105–111, doi: 10.5194/smsps-2-105-2002.
- Shepard, D., 1968, A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data: 23rd ACM national conference, p. 517–524, doi: 10.1145/800186.810616.
- Storlazzi, C.D., Logan, J.B., and Field, M.E., 2003, Quantitative morphology of a fringing reef tract from high-resolution laser bathymetry: Southern Molokai, Hawaii: Bulletin of the

- Geological Society of America, v. 115, no. 11, p. 1344–1355, doi: 10.1130/B25200.1.
- Stuiver, M., Reimer, J.R.P., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., K.A., H., Kromer, B., McCormac, G., van der Pligh, J., and Spurk, M., 1998, INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP: Radiocarbon, v. 40, no. 3, p. 1040–1083, doi: 10.2458/azu\_js\_rc.40.3781.
- Talma, a. S., and Vogel, J.C., 1993, A simplified approach to calibrating  $^{14}\text{C}$  dates: Radiocarbon, v. 35, no. 2, p. 317–322.
- Taylor, C.B., 1997, On the isotopic composition of dissolved carbon in rivers and shallow groundwater: A diagrammatic approach to process identification and more realistic model of the open system: Radiocarbon, v. 39, no. 3, p. 251–268.
- Tibor, G., Niemi, T.M., Ben-Avraham, Z., Al-Zoubi, A., Sade, R. a., Hall, J.K., Hartman, G., Akawi, E., Abueladas, A., and Al-Ruzouq, R., 2010, Active tectonic morphology and submarine deformation of the northern Gulf of Eilat/Aqaba from analyses of multibeam data: Geo-Marine Letters, v. 30, no. 6, p. 561–573, doi: 10.1007/s00367-010-0194-y.
- Veron, J.E.N., 1995, Corals in space & time. The biogeography & evolution of the Scleractinia: .
- Weil, N., 2008, Holocene coral reefs evolution in the Gulf of Aqaba: Terraces, Sea-Levels and Growth patterns: M.Sc Thesis, The Hebrew university, Jerusalem (in Hebrew, English abstract).
- Wilkinson, C., 2008, Status of Coral Reefs of the World: 2008: Global Coral Reef Monitoring Network, p. 69.

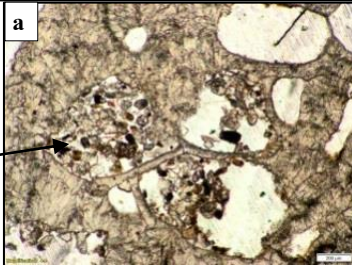
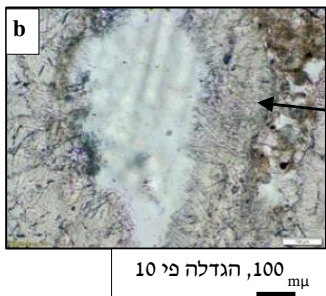
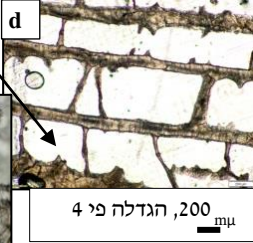
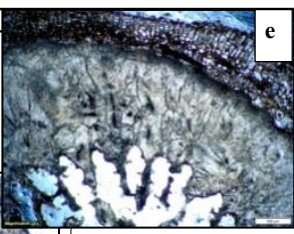
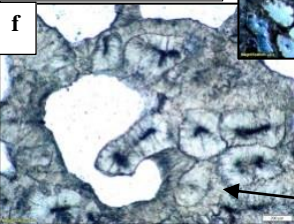
נספח – גרף גילי אורניום תוריום

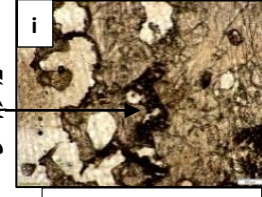
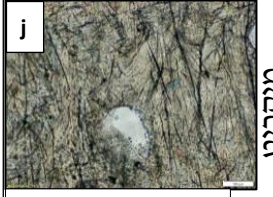
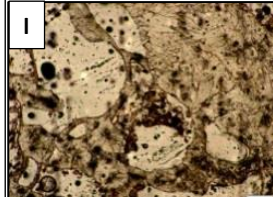
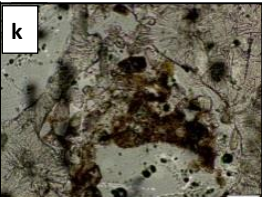
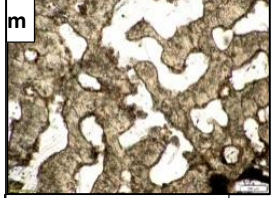
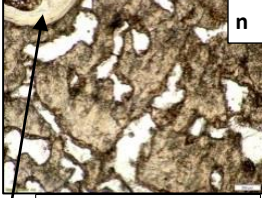


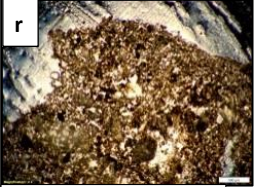
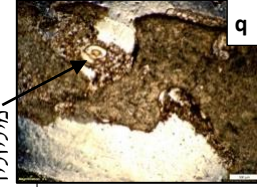
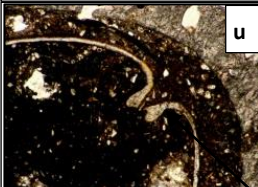
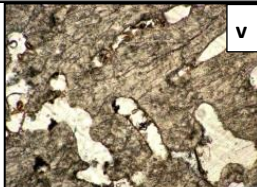
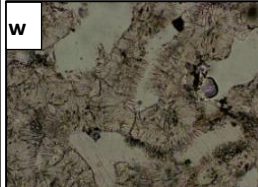
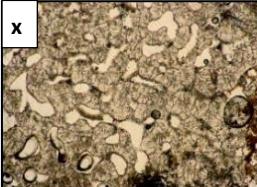
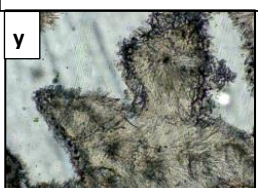
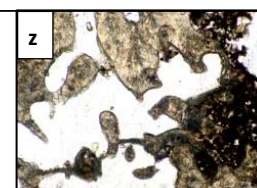
גרף יחסי האקטיביות של  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  כפונקציה של יחסי האקטיביות של  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  מנתוני המחקר (מעויינים אדומים) על גבי גרף האיזוכרונים.

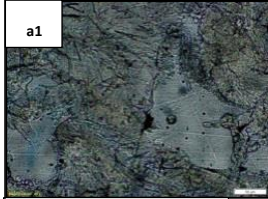
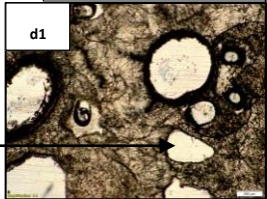
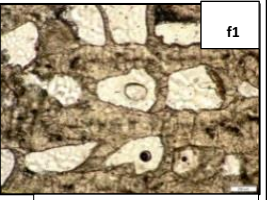
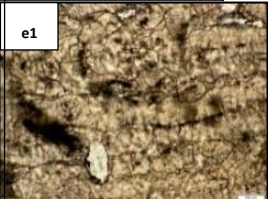
## נספח – תאור שקפים פטרוגרפיים

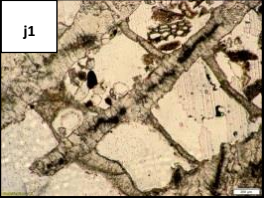
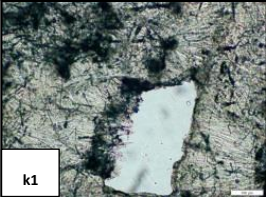
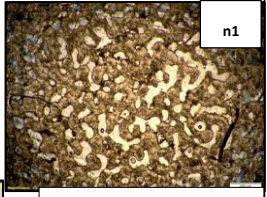
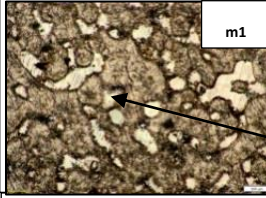
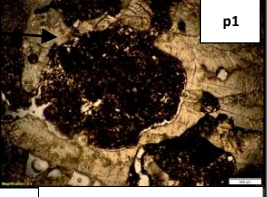
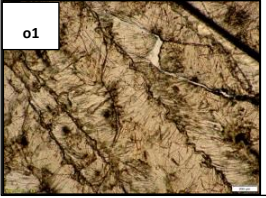
להלן טבלה 4 המרכזת את עיקרי המאפיינים של האלמוגים שזוהו בסדרת השקפים. לצד התיאור מופיעות שתי תמונות מכל שקף. לא כל מאפיין שמתואר מופיע בתמונות.

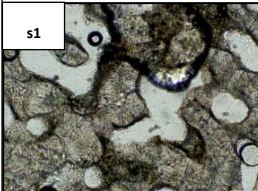
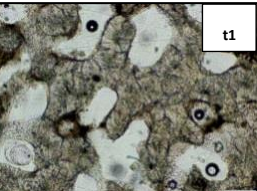
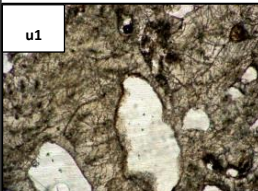
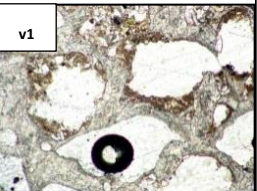
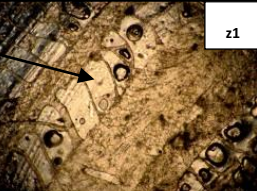
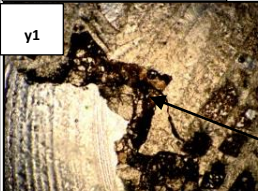
| קידוח | מיקום ביחידה | תיאור                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | תמונות מדגים                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-6   | תיכון        | חתך אלכסוני לכיוון הגדילה. ממרכזי הקלסיפיקציה מתפתח הארגוניט. לארגוניט צורה מאורכת המעידה על חיתוך אלכסוני. חללי השלד מכילים מעט ארגוניט משני [איור b], אולם, מרביתם ריקים לחלוטין ממילוי. הארגוניט המשני לרוב יוצר שורת גבישים אחת בחלל שאינה מלאה. כמות המיקריט גבוהה בחלק העליון של החתך [איור a]. התפלגות גרגרי המטריקס מגודל מיקריטי ועד כ-250 מיקרון, צורתם מזוותת מאוד. בתוך השלד קדיחה והתיישבות של אורגניזם נוסף בעל שלד קשה. |  <p>a</p> <p>מינרלים מגמתיים</p>  <p>b</p> <p>ארגוניט משני</p> <p>500 μm, הגדלה פי 2</p> <p>100 μm, הגדלה פי 10</p> |
| K-1   | חלק עליון    | חתך עם כיוון הגדילה, קורות השלד (הספטות) ברורות מאוד [איור d]. מעט מאוד גידול משני, מחטי וגס יותר מסיבי השלד, מצוי רק בחללים [איור c]. מספר חללים מלאים לחלוטין בסדימנט מיקריטי. בנוסף לחללים הגדולים, חללים קטנים חסרי מבנה מסודר פזורים בשלד.                                                                                                                                                                                        |  <p>d</p> <p>חללים נקיים</p> <p>100 μm, הגדלה פי 10</p>  <p>c</p> <p>ארגוניט משני</p> <p>200 μm, הגדלה פי 4</p>  |
| K-14  | חלק עליון    | חתך בניצב לכיוון הגדילה, מראה את מבנה הפוליפ. בחלק החשוף של השלד "התיישבה" אצה גירנית [איור e] בנוסף לקדיחות רבות ביניהן של צדפות. פורמיניפרים זוהו במטריקס. בחלק מדפנות החללים מוצמד מילוי מיקריטי. סיבים רדיאליים ברורים של השלד מזוהים בכל השקף [איור f]. ארגוניט משני בחלק מהחללים.                                                                                                                                                |  <p>e</p> <p>אצה גירנית</p> <p>200 μm, הגדלה פי 4</p>  <p>f</p> <p>מרכז קלסיפיקציה</p> <p>500 μm, הגדלה פי 2</p> |

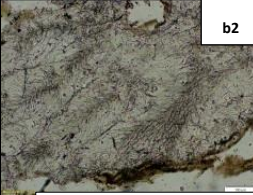
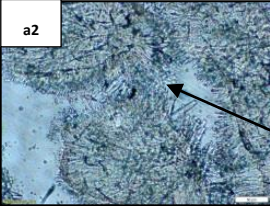
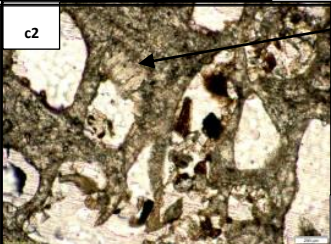
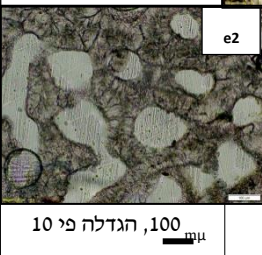
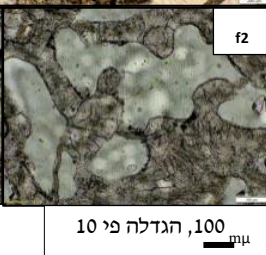
| קידוח | מיקום ביחידה | תיאור                                                                                                                                                                                                                                      | תמונות מדגימות                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-6   | חלק תחתון    | קורות שלד האלמוג נשמרו היטב. סיבי השלד ברורים [איור g]. מעט מאוד גידול משני בחללים [איור h]. מרכזי הקלסיפיקציה נשמרו היטב. סדימנט מגוון מינרלוגית בגדלי גרגר משתנים, יחד עם מיקריט בחללי השלד. שבר של קווצי עור גם כן זוהה.                |   <p>100 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 10</p> <p>100 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 10</p> <p>מרכז קלסיפיקציה</p>                  |
| K-2   | חלק תחתון    | גבולות שלד האלמוג חדים. מחטי ארגוניט משני מכסים באופן בלתי רציף חללים [איור j]. מעט מאוד מיקריט ממלא חללים בסמוך לאזורים החשופים [איור i]. חללים נוספים קטנים, פזורים בשלד, נראים כתוצרי בלייה ו/או קדיחות נוברים.                         |   <p>500 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 2</p> <p>100 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 10</p> <p>מיקריט</p>                            |
| K-12  | חלק עליון    | סיבי שלד האלמוג בולטים. גבולות השלד ברורים, חללים נקיים יחסית מגידולים משניים [איור l]. קדיחת צדפות זוהתה. מילוי מקריטי ושברי סלעים מגמתיים מעוגלים יחסית (עד כ-15 מיקרון) [איור k]. שברי קווצי עור בין גרגרי המילוי.                      |   <p>200 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 4</p> <p>100 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 10</p>                                        |
| K-5   | תיכון        | גבולות שלד האלמוג מטושטשים קצת, סביר שזו תוצאה של נוכחות מיקריט הצמוד לדפנות החללים [איור m שמאל למטה]. קדיחות של צדפות בתוך האלמוג [איור n]. אצה גירנית צמודה לאלמוג. מעט גידול משני.                                                     |   <p>200 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 4</p> <p>500 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 2</p> <p>צדפה קודחת</p>                     |
| K-8   | חלק עליון    | חתך באלכסון לכיוון גדילה. סיבי שלד האלמוג ממרכזי קלסיפיקציה מזהים. קדיחות אורגניזמים בשלד [איור p]. מעט מחטי ארגוניט בחללים. אצה גירנית צמודה לחלקו העליון של השלד. חללים קטנים פזורים בצפיפות גבוהה באזורים מוגבלים בשלד האלמוג [איור o]. |   <p>500 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 2</p> <p>100 <math>\mu</math>m, הגדלה פי 10</p> <p>צדפה קודחת</p> <p>חללים קטנים</p> |

| קידוח | מיקום ביחידה | תיאור                                                                                                                                                                                                                 | תמונות מדגימות                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-7   | חלק עליון    | מילוי מגוון מאוד, הכולל מיקריט, שברי צדפות, פורמיניפרים (מילוליד לדוגמא) [איור q] ואורגניזמים נוספים. שברי סלעים מגמתיים מזוותים [איור r]. מבנה שלד האלמוג ברור. מעט ארגוניט משני בחללים.                             |   <p>הגדלה פי 2, 500 μm</p> <p>הגדלה פי 2, 500 μm</p> <p>מילוליד</p>                         |
| K-7   | חלק עליון    | חתך עם כיוון הגדילה. גבולות קורות השלד ברורים. סיבי השלד נשמרו [איור s], חללים ריקים לרוב [איור t]. מיקריט מועט. מעט מאוד מחטי ארגוניט משני. חללים קטנים אליפטיים פזורים בחלק מהאזורים. אצה גירנית צמודה לשלד.        |   <p>הגדלה פי 100, 100 μm</p> <p>הגדלה פי 500, 500 μm</p> <p>מחטי ארגוניט</p> <p>חלל ריק</p> |
| K-7   | חלק עליון    | שלד מקורי, ארגוניטי. מעט מאוד גידול ארגוניטי משני בחללים [איור v]. השלד מכיל צדפות נוברות [איור u]. מילוי ממויין יחסית טוב, מיקריט וחול דק בעיקר, אין שברי סלע גדולים (עד כ-50 מיקרון).                               |   <p>הגדלה פי 200, 200 μm</p> <p>הגדלה פי 200, 200 μm</p> <p>צדפה שלמה</p>                 |
| K-7   | חלק עליון    | שלד אלמוג ארגוניטי. בחללים רבים ציפוי פנימי של שורת מחטי שלד ארגוניטיים [איור w]. חללים קטנים, אולי תוצרי נבירות ו/או בלייה, פזורים בשלד. מילוי מיקריטי [איור x למטה] המורכב משברי סלעים מגמתיים מעוגלים ושברי צדפות. |   <p>הגדלה פי 10, 100 μm</p> <p>הגדלה פי 4, 200 μm</p>                                   |
| K-7   | חלק תחתון    | חתך באלכסון לכיוון הגדילה. חללים גדולים בעלי שכבת מחטי ארגוניט בגידול משני בטקסטורה דרוזית [איור y], מעט מיקריט [איור z]. מרכזי קלסיפיקציה ברורים לזיהוי.                                                             |   <p>הגדלה פי 10, 100 μm</p> <p>הגדלה פי 2, 500 μm</p>                                   |

| קידוח  | מיקום ביחידה | תיאור                                                                                                                                                                                                                                                                                     | תמונות מדגימות                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-7    | חלק תחתון    | חתך בניצב לכיוון הגדילה. סיבי שלד האופייניים לאלמוג ברורים [איור a1]. שלד האלמוג צפוף יחסית, בעל חללים קטנים [איור b1]. גידול משני בחללים מקשה על זיהוי הגבולות של השלד המקורי. סדימנט מיקריטי, חולי, שברי סלע עד כ-100 מיקרון, שברי צדפות.                                               | <br>50 מיקרון, הגדלה פי 20 <br>200 מיקרון, הגדלה פי 4                               |
| K-6    | חלק עליון    | חתך אלמוג עם כיוון הגדילה. מרכזי קלסיפיקציה ברורים [איור c1] ומהם התפרשות סיבי שלד. חללים אי רגולריים, ייתכן תוצרי קדיחות ו/או בלייה, יתכן שבעת הכנת השקף [איור d1]. סדימנטים קריסטליניים מזוותים, עד כ-250 מיקרון. גידול משני ארגוניטי בחלק מהחללים. אצה גירנית צמודה לשלד בחלקו העליון. | <br>200 מיקרון, הגדלה פי 4 <br>200 מיקרון, הגדלה פי 4<br>חללים בעלי מבנה אי רגולרי |
| K-6    | מרכז         | חתך אלמוג עם כיוון הגדילה. גבולות קורות השלד ברורים [איור f1]. הצטברות ארגוניט משני מחטי, לעיתים ביותר משכבה אחת בחלק התחתון של החללים. חללים קטנים פזורים בתוך השלד, יתכן ותוצאה של בלייה או קדיחות. מילוי מיקריטי מוצמד רק לפינות מסוימות בחללי השלד [איור e1].                         | <br>200 מיקרון, הגדלה פי 4 <br>200 מיקרון, הגדלה פי 4                           |
| K-25-2 | מרכז         | חתך בניצב לכיוון הגדילה. נבירות אורגניזמים בשלד. מבנה שלד מקורי שמור [איור g1]. חללים קטנים חסרי תבנית ברורה [איור h1]. חללים גדולים גם הם בעלי צורה אי רגולרית. ארגוניט משני מועט בחללים. סדימנט מיקריטי, חולי, מעוגל מאוד עד כ-200 מיקרון.                                              | <br>200 מיקרון, הגדלה פי 4 <br>500 מיקרון, הגדלה פי 2                           |

| קידוח | מיקום ביחידה | תיאור                                                                                                                                                                                                                                                                              | תמונות מדגימות                                                                                                                                                          |
|-------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-2   | עליון        | חתך עם כיוון הגדילה. גבולות השלד חדים [איור i1]. גידול משני מועט. מבנה מקורי חד ושמור. מילוי מיקריטי, שברי סלעים מזוותים מעל 500 מיקרון, פורמיניפרים, שברי צדפות, אצות גירניות, חלקי שלד של קווצי עור ופטרופודים [איור j1].                                                        |       |
| K-17  | תחתון        | מבנה השלד צפוף [איור k1], חללים קטנים פזורים, אולי תוצרי נבירות. מעט מאוד גידול ארגוניטי בחללים [איור l1]. חתך בניצב לכיוון הגדילה. מילוי מיקריטי צמוד לדפנות חללי השלד.                                                                                                           |       |
| K-16  | תיכון        | חתך בניצב לכיוון הגדילה. ארגוניט משני ממלא מעט חללים [איור n1]. אומנם מרבית החללים חשופים אולם, בהשוואה לדוגמאות אחרות, דוגמא זו מכילה את מרבית הארגוניט המשני. מעט מיקריט, חול וסדימנט קריסטליני מעוגל יחסית [איור m1]. סיבי השלד ברורים. אצה גירנית צמודה לדופן החיצוני של השלד. |    |
| K-14  | עליון        | חתך עם כיוון הגדילה. האלמוג סדוק יחסית, בחללים מוגבלים מילוי מיקריטי ממלא לחלוטין [איור p1]. בחללים אלו עד כ-10 מיקרון סדימנט מעוגל יחסית. סיבי השלד ברורים וכן גבולות השלד [איור o1]. שברי צדפות עם אצה גירנית צמודה. כמעט ולא מכיל כלל ארגוניט משני בחללים.                      |   |

| קידוח | מיקום ביחידה | תיאור                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | תמונות מדגימות                                                                                                                                                          |
|-------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-14  | עליון        | חללי השלד מכילים מיקריט [איור q1]. לא ברור האם האורגניזם בשקף הוא אלמוג. מעט ארגוניט משני בחללים.                                                                                                                                                                                                     |       |
| K-14  | תחתון        | חתך באלכסון לכיוון הגדילה. השלד עשיר במילוי מיקריטי ונבירות של אורגניזמים אחרים. אצה גירנית צמודה לו ומספר פורמיניפרים, ביניהם פלנקטונים, בתוך המיקריט. ארגוניט משני התפתח בחלק מהחללים [איור s1]. מבנה השלד המקורי נשמר [איור t1].                                                                   |       |
| K-10  | תיכון        | ה"קורות" העדינות של השלד שמורות, מילוי מיקריטי בחללים [איור v1]. אזורים מוגבלים נקיים לחלוטין מסדימנט. הסדימנט מורכב גם מחול ושברים עד כ-100 מיקרון, חלקם מעוגלים וחלקם מזוותים. מבנה השלד הארגוניטי המקורי שמור היטב [איור u1]. ארגוניט משני מועט בנקודות מסוימות בחללים בלבד.                       |     |
| K-10  | עליון        | חתך באלכסון לכיוון הגדילה, מרכזי קלסיפיקציה מאורכים וברורים [איור x1]. החללים מכילים כיסוי של שכבה דקה של מחטי ארגוניט מגידול משני (רק באזורים מוגבלים בשלד, איור x1). כמעט ואין כל מילוי.                                                                                                            |   |
| K-1   | עליון        | חתך עם כיוון הגדילה. סדימנט מיקריטי ממלא חלק מהחללים [איור y1], מצוי בעיקר בחלק העליון של האלמוג יחד עם חול דק ושברי אלמוג המגיעים לגודל של כ-500 מיקרון, מעוגלים יחסית. המבנה העדין של השלד נשמר היטב [איור z1]. חורים קטנים פזורים בתוך השלד. מעט ארגוניט משני בחללים. סיבי השלד הארגוניטיים נשמרו. |   |

| קידוח | מיקום ביחידה | תיאור                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | תמונות מדגימות                                                                                                                                                                                                                     |
|-------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-8   | עליון        | חתך באלכסון לכיוון הגדילה. בלוי, עשיר במילוי, שברי סלעים מגמתיים, פורמיניפרים, שברי צדפות וצדפות שלמות (בעלות שתי קשוות). מבנה דמוי אידרה של דג המאפיין צורת גידול סיבי ארגוניט [איור b2]. מחטי ארגוניט משני גסים מזוהים [איור a2].                                                                                                                                                    |   <p>ארגוניט מחטי</p>                                            |
| K-6   | תחתון        | חתך באלכסון לכיוון הגדילה. מבנה השלד המקורי נשמר. גידול ארגוניט משני דמוי מניפה במספר אזורים בחללי השלד [איור d2] ודמויי מברשת [איור c2]. עשיר במילוי מיקריטי, פורמיניפרים, גסטרופודים ושברי צדפות באזור החשוף של האלמוג. שברים של סלעים מגמתיים מזוותים, מעל 200 מיקרון. צדפה שלמה זוהתה (מכילה שתי קשוות). אופן הגידול של הארגוניט המשני בשקף זה ייחודי ומגוון (לא רק מחטי ארגוניט). |   <p>ארגוניט משני דמוי מברשת</p> <p>ארגוניט משני דמוי מניפה</p> |
| K-17  | עליון        | חתך בניצב לכיוון הגדילה. חללי השלד קטנים, נקיים לרוב ממילוי [איור f2]. סיבי הארגוניט המקוריים נשמרו היטב. מחטי שלד בעלי גבישים גסים יותר התפתחו מעט בחלק מהחללים [איור e2]. מרכזי הקלסיפיקציה שמאפיינים את ההתפתחות השלד ברורים.                                                                                                                                                       |                                                              |

## נספח – תוצאות XRD

להלן תוצאות מדידות ריכוז הארגוניט מדוגמאות האלמוגים שנלקחו לתארוך.

| Core number | Aragonite percentage | Calcite percentage |
|-------------|----------------------|--------------------|
| K-1 – 65-1  | 100                  |                    |
| K-1 – 65-2  | >99                  | <1                 |
| K-2 – 35    | 100                  |                    |
| K-2 – 40    | 100                  |                    |
| K-2 – 43    | 99                   | 1                  |
| K-6 – 68-1  | <99                  | <1                 |
| K-6 – 68-2  | 98                   | 2                  |
| K-6 – 80    | 98                   | 2                  |
| K-7 – 26-1  | 100                  |                    |
| K-7 -26-2   | 99                   | <1                 |
| K-14 – 117  | 100                  |                    |
| K-14 – 120  | 95                   | 5                  |
| K-16-105    | >99                  | <1                 |
| K-16 – 107  | 100                  |                    |
| K-16 – 109  | 100                  |                    |
| K-25 – 165  | 97                   | 3                  |
| K-25 – 171  | 90                   | 10                 |
| K-25 – 172  | 98                   | 2                  |
| K-26 – 139  | 100                  |                    |
| K-26 – 144  | 100                  |                    |

טבלה 5 : תוצאות ריכוז אחוז הארגוניט מדוגמאות האלמוגים שנלקחו לתארוך.

## נספח – תיאור תת היחידה העמוקה במזח הדרומי, היחידה הקלסטית התחתונה

טבלה 6 : ניתוח דוגמאות מתת היחידה העמוקה במזח הדרומי תחת בינוקולר.

| קידוח | עומק [מטר]<br>מקרקעית המפרץ | תאור הדוגמאות תחת הבינוקולר                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | תאור מדוח חברת איזוטופ                                                                                                         |
|-------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K-5   | 30.6-31.5                   | צבע צהבהב – לבן, חול סילטי, שברי קוורץ ביוטיט ופלדספר בעלי עיגוליות בינונית, עטופים במטריקס דק מאוד קלציטי (תוסס מאוד בתמיסת HCl). בהיבט במיקרוסקופ זוהו שכבות דקות של יחידות לבנות וצהבהבות. בחלק מהשכבות הבהירות יש יותר פרגמנטים ליתיים גדולים בהשוואה לשכבות הצהובות.                                                                                             | סדימנט דק, מיון גרוע, צפוף מאוד, מכיל פרגמנטים דקים 2-5%. עדשות סילט בעובי של כ-1 ס"מ ובחלק העמוק, כמות שברי הסלע גבוהה יחסית. |
| K-10  | 29.6-30.4                   | הסדימנט מכיל גבישים שנראים כנצנוצים בעין, פריר מאוד. שברים רבים של קוורץ, ביוטיט ופלדספר. הרכיב העיקרי הוא קוורץ במגוון גדלים. המטריקס מורכב גם מקלציט (תוסס מעט). אין שיכוב [איור 4.1.6.1].                                                                                                                                                                          | חום בהיר, חול סילטי, צפוף מאוד. מכיל שכבות של חרסית חולית.                                                                     |
| K-3   | 48.2-52.2                   | חסר שיכוב, עדשות לבנות בצבע בז'. סדימנט חרסיתי מאוד, מכיל מעט שברי קוורץ קטנים מאוד, מעוגלים, מעט ביוטיט ופלדספרים. עיקרה קלציטית, גרגרים קטנים מאוד [איור 4.1.6.4].                                                                                                                                                                                                  | חרסית חווארית, מכילה עדשות חוואר וחלוקים פזורים. שכבות של עד 10 ס"מ רוחב בחוליות פזורות.                                       |
| K-2   | 48-49.1                     | דחוס, מקשה אחת שלה שני מופעים. סדימנט לבן צהבהב המתחלף בגבול חד עם סדימנט אפור כהה בעל תת שכבות דקות מאוד שצבען אפור כהה מאוד [איור 4.1.6.3]. הסדימנטים חרסיתיים מאוד. הסדימנט האפור עשיר בקוורץ בהשוואה ללבן. שברי הקוורץ קטנים, בעלי עיגוליות בינונית עד גרועה. הסדימנטים קלציטיים אם כי, הסדימנט הלבן קלציטי יותר (תסיסה חזקה יותר עם תמיסת HCl). הסדימנטים מכילים | חום אפרפר, דחוס מאוד, חוואר חרסיתי עד חוואר. בחלק העליון של הסדימנט, יותר שברי סלע.                                            |

|      |                                                      |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                            |
|------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | מחטים או סיבים שקופים (שרידים ביוגנים) שחלקם גמישים. |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                            |
| K-9  | 22.7-24.25                                           | סדימנט אדמדם, אין שיכוב ברור, גרגרי קוורץ, ביוטיט ופלדספר יחד עם שברי סלע מגמתיים, מעוגלים עד מזוותים, לא בוגר. מילוי חרסיתי.                                                                                        | חרסית אדמדמה חומה, דחוסה מאוד. מורכבת שכבות של סילט חולי וחרסית חולית חרסיתית עד כ-30 ס"מ.                                                                                 |
| K-4  | 39.21-41.2                                           | אין שיכוב ברור, חרסיתי מאוד, פרגמנטים קטנים מאוד של קוורץ עיגוליות בינונית, שברי סלע מגמתי. שרידים של אורגניזמים זוהו, מעין מחטים שקופים וסיבים גמישים.                                                              | חואר חרסיתי, דחוס מאוד. בעל עדשות דקות של חואר אפרפר.                                                                                                                      |
| K-5  | 54.6-54.9                                            | אדום כהה, קשה מאוד, שיכוב דק, גודל גרגר דק מאוד עם שברים קטנים של סלעים מגמתיים, בעיקר קוורץ. מכיל שרידי אורגניזמים. בעיקר מחטים וסיבים שקופים למחצה. זוהה אורגניזם שלם שקוף, בעל מחטים גמישים (ייתכן וסוג של סרטן). | חרסית אדומה חומה, דחוסה מאוד. בחלק התחתון 10-20% שברי סלעים דקים עד גסים ממגוון ליתולוגיות (גנייס, גרניט, מיגמטיט).                                                        |
| K-3  | 42.8-44.7                                            | ורדרד, חרסיתי ופריך, קלציטי מאוד. שברי סלעים ממקור מגמתי, בעיקר קוורץ. הרכיב העיקרי דק מאוד, קלציטי.                                                                                                                 | סילט עד סילט חרסיתי, חום אדמדם, דחוס מאוד. שכבות דקות של חרסית.                                                                                                            |
| K-11 | 28.35-29.85                                          | סדימנט אפרפר חום, גרגרים דקים מאוד. עשיר במחטים וסיבים מיקרוסקופיים.                                                                                                                                                 | חואר חום, דחוס מאוד. מכיל שברי גיר שגודלם המרבי 8-9 ס"מ. עדשות חואר גירי אפורות.                                                                                           |
| K-6  | 55-56.1                                              | סדימנט אדמדם, קלציטי מאוד, אין שיכוב, דק גרגר, שברי מינרלים קטנים, בעיקר קוורץ ומיקות. שרידי סיבים/מחטים שמקורם חי. זוהה אורגניזם שלם שנראה גם בשקף K-5.                                                             | חרסית אדמדמה, אחוז קלציט שנבדק בעומק של 52 מטר מורכב מ-24% קלציום קרבונט. סדימנט דחוס מאוד, בעל שכבות סילט חולי עם חלוקים (עד 30 ס"מ). עדשות דקות של חול סילטי וחואר אפור. |
| K-10 | 60.5-62.2                                            | מטריקס דק, קלציטי, שברי קוורץ, מיקות במגוון גדלים, חלקם קטנים מאוד, מזוותים ומעוגלים עד רמה בינונית. מעט מחטים/סיבים ממקור אורגני.                                                                                   | חרסית, אדמדמה חומה, דחוסה מאוד. מכילה שכבות דקות ועדשות של סילט עד עובי של 10 ס"מ.                                                                                         |

## נספח חתכים גאולוגיים

איור 7.1 מציג את חתך B-B', החתך הצפוני במזח הדרומי הניצב לכיוון החוף [איור 5.4.5.1]. נתונים מקידוחים K-6 ו-K-2 הסמוכים לחתך מוצגים [איור 5.4.5.1]. מיקום ההעתק הנורמלי מבוסס על מיקום ה"מדרגה" מתוך המפה הבתימטרית [איור 5.4.6]. היחידה התחתונה, שגבולה העליון מוגדר בקו אפור, היא היחידה הקלסטית התחתונה. מעליה יחידת האלמוגים שגבולה העליון מסמן בקו כחול. מעל יחידת האלמוגים מונחת באזור הנמל מילוי מלאכותי (מעל קידוח K-2 ו-K-6).

ליחידה הקלסטית התחתונה גבול עליון מיושר (יחסית) שלו נטייה כחלק ממדרון המפרץ. מעל היחידה הקלסטית התחתונה התפתחה שונית האלמוגים של נמל אילת. התפתחות אלמוגים מקומית מאוחרת באזור קידוח K-6 ו-K-2 [איור 4.2.3]. מציג את הגילים הצעירים הייחודיים של שני קידוחים אלו. לגי יחידת האלמוגים מבנה גבנוני מחוספס המאפיין מבני אלמוגים.



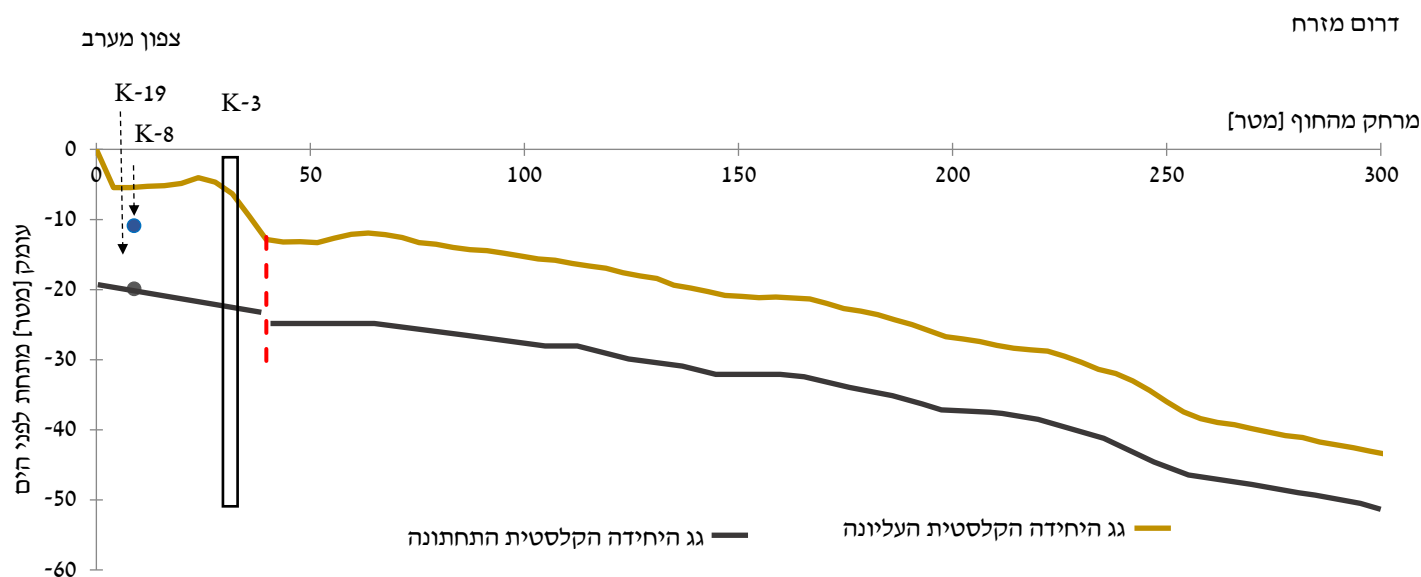
איור 7.1 : חתך גאולוגי על גבי החתך הבתימטרי [איור 5.4.5.3]. מוקמו שתי היחידות הסטרטגרפיות : היחידה הקלסטית התחתונה ויחידת האלמוגים. מעל יחידת האלמוגים בסמוך לנמל, יחידת המילוי המלאכותי. גבולות היחידות מוקמו על פי נתוני קידוחים (K-6, K-2). החתך סכמתי, מיקום היחידות משוער. בקו אדום מקווקו מיקום ההעתק, על פי ה"מדרגה" מהנתונים הבתימטריים. עומק בסיס היחידה הקלסטית התחתונה אינו ידוע.

איור 7.2 מציג את חתך C-C' [איור 5.4.5.4], החתך הדרומי במזח הדרומי בניצב לכיוון החוף [איור 5.4.5.1]. קידוח K-3 סמוך לחתך (עיגול סגור). קידוחים K-8, K-19 מצויים כ-20 ו-15 מטר בהתאמה ומושלכים אל החתך.

בקידוח K-3 נעדרת יחידת האלמוגים, כנראה בעקבות פעילות אפיק הנחל הדרומי לנחל גרופ [איור 4.2.2.2]. ולכן, לפי הערכת התפתחות האלמוגים נמנעה לחלוטין לכל אורך חתך זה. לפיכך, על גבי היחידה הקלסטית התחתונה, שגבולה העליון מוגדר בקו אפור, מונחת היחידה הקלסטית העליונה (גבולה העליון מסומן בכתום).

האזור החשוד בהעתקה נורמלית מסומן בקווקו אדום, מבוסס על מיקום ה"מדרגה" במפה הבתימטרית.

גם באזור זה סביר שליחידה הקלסטית התחתונה גבול עליון ישר יחסית שלו נטייה של המדרון. על היחידה הקלסטית התחתונה, מונחת היחידה הקלסטית העליונה.



איור 7.2: חתך גיאולוגי על גבי החתך הבתימטרי [איור 5.4.5.4]. מוקמו שתי היחידות הסטרטגרפיות שנמצאו באזור זה, היחידה הקלסטית התחתונה והיחידה הקלסטית העליונה. גבולות היחידות מוקמו על פי נתוני קידוח K-3. החתך סכמתי, מיקום היחידות משוער. בקו אדום מקווקו מיקום ההעתק, על פי ה"מדרגה" מהנתונים הבתימטריים. עומק בסיס היחידה הקלסטית התחתונה אינו ידוע.

## Abstract

As part of a geotechnical survey in the Gulf of Aqaba, sediment cores were taken from Eilat's port area which supplied data of the sedimentary and tectonic history during the Holocene. At the base of the sedimentary section of the cores a terrestrial alluvial sediment unit appears. It is underlaid by a fossil coral unit which indicates the development of a reef at Eilat's port area at depths of 15.5 to 21.5 meters below sea level. On top of the coral unit is a marine alluvial fan unit.

The corals maintained their original Aragonite texture. Most of them identified to be a part of the *Faviidae* family and a number of corals belong to the *Stylophora* specie. These corals (and others that were identified) characterize shallow water environment of a fringing reef.

Vertical accumulation rates of the corals are between 1-2 m/ka. These accumulation rates are found at the lower range of fringing reefs developed in the Indian-Pacific Ocean. These low rates may be the result of limited accommodation space which implies that the corals lived at shallow depths.

Dating of the corals' skeleton samples indicates that most ages are between 6.5-3.2 ka. A few corals are older, between 9.1 and 6.5 ka. A limited number of coral were dated to 3.2-2.0 ka and a single sample was dated to 0.6 ka.

Here for the first time the reef shows documentation of the Red Sea's transgression between 9.1-6.5 ka.

Along with the sea level transgression in Aqaba ~9 ka, the coral reef in Eilat's port area started to develop on top of a terrestrial alluvial fan. The reef flourished (6.5-3.2 ka) at a time when sea level was relatively steady (known from earlier researches). Three thousand and two hundred years ago alluvial sediments buried the reef and prevented the development of corals for a thousand years. Renewed development started locally but ceased at 2 ka. I claim that an active normal fault caused the reef to drop and then to be buried under alluvial sediments which killed the corals.

Only one sample that was dated to 0.6 ka. presents a local development younger then the reef.

The tectonic activity at the port area (~2 ka) is on a segment of Eilat's normal fault which is parallel to the coast and was mapped in the south jetty by a bathymetric survey. A previous study mapped a branch of Eilat's fault at the coast area. The branch identified in this study may present another segment of the fault in the port marine environment.

# **A fringing coral reef in the marine environment of Eilat's port during the Holocene – growth, burial and faulting**

Thesis for the Degree of Master of Science

Submitted by:

**Osnat Barnea**

Under the supervision of:

Prof. Amotz Agnon

Prof. Mordechai Stein

Dr. Yonathan Shaked

July 2016

Department of Geology Science

Division of Earth Science

Faculty of mathematics and Natural Science

The Hebrew University of Jerusalem