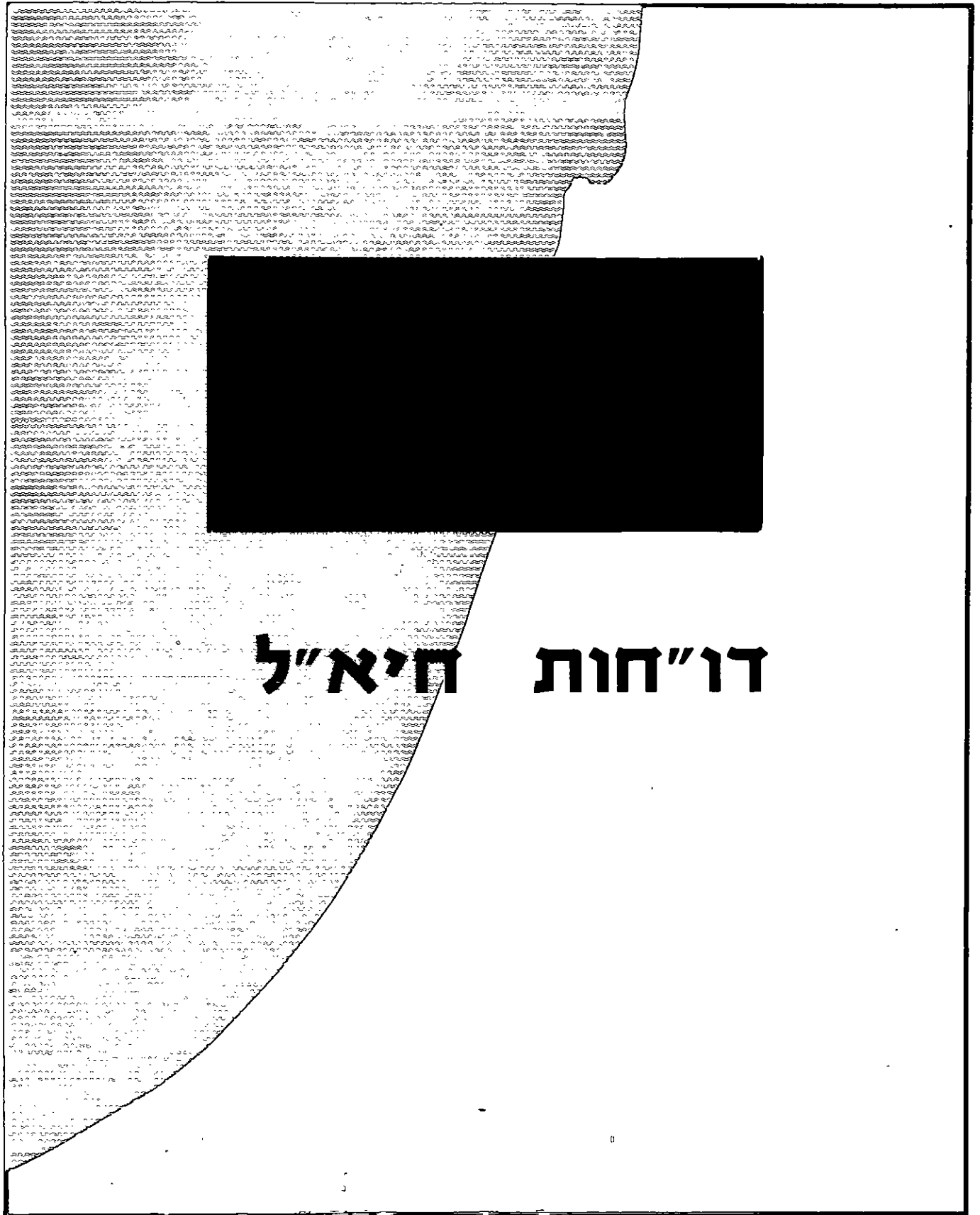




**חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ**  
**ISRAEL OCEANOGRAPHIC & LIMNOLOGICAL RESEARCH LTD.**  
תל שקמונה, ת"ד 8030, חיפה 31080 טלפון: 04-8515202 פקס: 04-8511911 טל: 04-8515202  
TEL SHEKMONA, P.O.B. 8030, HAIFA 31080 FAX: 04-8511911 TEL: 04-8515202



**דו"חות חיא"ל**



60513896

**משטר הידרוגרפי, משטר הזרימה ואיכות**

**מי נחל הירקון המלוח**

נורית קרס, סטיב ברנר, ברק חרות, צבי רוזנטראוב וירון גרטנר

דו"ח חיא"ל H/27/2001

במחקר השתתפו: לורה יזראילוב, גרטה פינשטיין, אפרת שהם-פרידר, עדנה שפר,  
גדי ברוקמן, יונה בישופ ווייבן קיקי.

הדו"ח מוגש למשרד לאיכות הסביבה ולרשות נחל הירקון

אוקטובר 2001

## משטר הידרוגרפי, משטר הזרימה ואיכות מי נחל הירקון המלוח

נורית קרס, סטיב ברנר, ברק חרות, צבי רוזנטראוב וירון גרטנר

### 1. מבוא

אורכו של נחל הירקון המלוח הוא כ-4 ק"מ, מהים עד לאזור שבע טחנות. מקורות המים לקטע זה של הנחל הם נחל הירקון ונחל איילון (זרימה טבעית ממעלה הנחלים והזרמות אנתרופוגניות), גשם ומי-ים. השרות ההידרולוגי מדד בשנת 1995/1996 בתחנה 17135 (ירקון - כביש הרצליה) ספיקה חודשית ממוצעת בין 6.71 מ"ק לשניה בחודש ינואר 1996 לבין 0.5 מ"ק לשניה בחודש מאי 1996. בחודשי הקיץ (יוני עד ספטמבר) לא נמדדה זרימה טבעית בתחנה זאת אלא רק הזרמות אנתרופוגניות. בינואר 2000 הספיקה החודשית הממוצעת הייתה 9.1 מ"ק לשניה בעיקר בגלל שני אירועי שטפונות חזקים. בנוסף, קרוב לשפך הירקון, מוזרמים לנחל מי הקירור של תחנת הכוח רידינג בספיקה של 25 מ"ק לשניה.

משטר הזרימה בקטע המלוח של נחל ירקון כמו בכל אסטואר אחר, מושפע הן על ידי הים (מפלס פני הים, גאות ושפל, גלים) והן על ידי זרימה של מים מתוקים ממעלה הנחל. השאלה המרכזית בלימוד משטר הזרימה באסטואר היא עד איזה מרחק מהים חודרת חזית המליחות לתוך הנחל. כמו כן, חייבים לאפיין את הריבוד שנוצר ע"י הפרשי מליחות (בין מי ים ובין המים המתוקים שזורמים מהמעלה) וע"י אפקטים תרמיים (הפרשי טמפרטורה). איכות מי הנחל מושפעת מעומס המזהמים המוחדרים אל הנחל, מספיקה של מים נקיים ומתהליכים פיסיקו-כימיים וביולוגים המתרחשים בהם.

מטרת מחקר זה היא לאפיין את נחל הירקון המלוח מבחינת המשטר ההידרוגרפי, משטר הזרימה ואיכות מימיו. דו"ח זה מסכם את התוצאות ומנתח את הממצאים של תקופת המחקר, יוני 1998-מאי 2000.

### 2. דיגום ושיטות

#### 2.1 סקר שדה

המחקר התמקד בשש תחנות דיגום מים וקרקעית: תחנה 1 - 250 מ' מהשפך, ליד גשר ווקוף; תחנות 2-4, 50 מ' לכוון המעלה מגשרי רוקח, אבן גבירול ונמיר, (במרחקים של 1,500, 750 ו-2,500 מ' מהשפך, בהתאמה); תחנה 5 - 50 מ' במורד המפגש ירקון-איילון (במרחק של 3,250 מ' מהשפך); ותחנה 6 בשבע טחנות, במרחק של 4,150 מ' משפך. בנוסף, מכשיר המודד בצורה רציפה את מפלס המים הותקן על העמודים של גשר רוקח (ראה להלן).

חלקו המלוח של נחל הירקון (להלן הנחל) נדגם חמש פעמים במשך תקופת המחקר: 19 אוקטובר 1998 (מים וקרעית) בזמן גאות, 28 דצמבר 1998 (מים) בזמן שפל, 17 מרץ 1999 (מים) בזמן גאות, 12 יולי 1999 (מים) בזמן גאות ושפל ו- 12 ינואר 2000 (מים וקרעית) בזמן גאות. ביולי 1999 הנחל נדגם חמש פעמים במשך מחזור אחד של גאות ושפל לפי הפירוט הר"מ (שעון חורף):

דיגום	תחילת הדיגום	סוף הדיגום	פרופיל עומק in situ	דיגום מים	מועד ים
A	6:42	8:22	ן	לא	גאות
B	9:45	12:18	ן	ן	גאות ← שפל
C	13:20	15:16	ן	לא	שפל
D	15:44	16:53	ן	לא	שפל
E	17:19	19:43	ן	ן	שפל ← גאות

הדיגומים בוצעו מסירה באמצע האפיק. פרופיל עומק של טמפרטורה, מליחות, חמצן מומס, pH ועכירות בעמודת המים נמדדו בעזרת מכשיר YSI 6000 UPS מחברת Yellow Springs Instruments אשר כויל במעבדה לפני הדיגום. מליחות המים כפי שנמדדה היא פרמטר ללא יחידות (UNESCO, 1985) כמקובל היום. הערך המתקבל הוא דומה לערך בפרומיל, כפי שמליחות בוטאה בעבר. דוגמאות מים לבדיקות נוטריאנטים (פוספאט, ניטראט, ניטריט, חומצה סיליצית ואמוניום), כלורופיל, חומר מרחף, צריכת חמצן ביוכימית (BOD), פלואורסנציה של המים (כמדד לחומר אורגני מומס), וחיידקים פתוגניים נדגמו באמצעות בקבוק Niskin אופקי בעומק אחד או בשני עומקים, בהתאם לעומק המים בתחנה. עומקי הדיגום נבחרו כדי לייצג את שתי שכבות המים בנחל, השכבה העליונה (מתוקה יותר) והשכבה העמוקה (מלוחה). באוקטובר 98 נבדק רק עומק אחד בכל תחנה. דגימות המים נלקחו למעבדה להמשך הטיפול והבדיקות. הקרקעית נדגמה באמצעות מחפרון שהורד יזנית מהסירה.

מד לחץ מסוג SBE 26 של חברת Sea Bird Electronics למדידת גובה מפלס המים הותקן מתחת לגשר רוקח ב- 11 בינואר 1999 ופעל ללא הפסקה עד פברואר 2000. מד הלחץ נקבע בקצהו של לוח אנכי, השקוע כ- 2 מ' מתחת למפלס המים, אשר הוצמד לאחד מעמודי הגשר. אופן החיבור אפשר את הוצאת הלוח עם מד הלחץ לצורך טיפול וקריאת הנתונים המוקלטים והחזרתו, בדיוק מרבי, למקומו הקודם. מד הלחץ הוא בעל רזולוציה גובהה של 0.1 מ"מ ודיוק של 3 מ"מ. המכשיר תוכנן לרשום את הלחץ הממוצע בפרקי זמן של 10 דקות, תוך כדי מיצוע וסינון התנודות המהירות בפני המים. אחת לחודש - חודשיים הועתקו נתוני הלחץ (והטמפרטורה בפנים חלל המכשיר) למחשב נייד. נתוני המדידות הם רציפים ומאיכות טובה מאוד מלבד זליגה לינארית קבועה ואיטית במדידת הלחץ של 2.7 מ"מ ליום, לאורך תקופת המדידה, שתוקנה במהלך עיבוד הנתונים. גובה מפלס המים יחסית למכשיר המדידה חושב לאחר החסרת נתוני הלחץ האטמוספרי, כפי שנמדד בתחנת בבית דגן, מנתוני הלחץ המקוריים. מודד מוסמך ביצע מדידת גובה מוחלט של נקודה

ידועה על עמוד הגשר בתחנת המדידה אשר מאפשר גם, במידת הצורך, ליחס את גובה המים לגובה האפס הארצי.

### 2.2 שיטות מעבדתיות

**מים:** נוטריאנטים נבדקו בשיטה פוטומרית וזרימה מקוטעת במכשיר Technicon Autoanalyzer II (Krom et al. 1993). דגימות מים לקביעת כלורופיל סוננו דרך פילטרים של GF/F, ונבדקו בשיטה פלואורימטרית המתוארת על ידי Holm-Hansen et al. (1965). ריכוז החומר המרחף נקבע על ידי סינון נפח מים ידוע דרך פילטר Nucleopore 0.45  $\mu\text{m}$ . הפילטר נשקל לפני הסינון, יובש בתנור, נשקל שנית וכמות החומר המרחף נקבעה על ידי הפרש המשקלים. צריכת חמצן ביוכימית (BOD) נקבעה בשיטה סטנדרטית (EPA, 1979). פלואורסנציה המים (אורך גל לעירור - 365 ננומטר ואורך גל פליטה - 400-600 ננומטר) נמדדה וכילה כנגד תמיסות של quinine sulphate (QS) (Moore et al., 1993). חיידקים נספרו לאחר הרחפה של כמות מתאימה של מים ב-saline-buffer phosphate, סינון והדגרה על מצע סלקטיבי המתאים לכל חיידק. דיגום אוקטובר 98 נבדק על ידי ד"ר אורה הדס מחיא"ל ודיגום מרץ 99 על ידי מעבדה מוסמכת של משרד הבריאות.

**קרבועית:** דגימות קרבועית יובשו בשיטת הליאופיליזציה והועברו דרך נפה של 1000 מיקרו-מטר. כספית, קדמיום, נחושת, עופרת ואבץ נבדקו לאחר עיכול עם חומצה חנקתית (Homung et al., 1989). מנגן, ברזל, כרום ואלומיניום נבדקו לאחר עיכול עם תערובת של חומצה פלואורית ומי מלכים (ASTM, 1983). לאחר העיכול, כספית נבדקה בשיטה של בליעה אטומית עם Cold Vapour במכשיר Coleman 50A Mercury analyser ויתר המתכות נבדקו בספקטרוסקופיה של בליעה אטומית בלהבה או בתנור גרפיט במכשיר Perkin Elmer 1100B.

## **3. תוצאות ודיון**

### 3.1 תאור חזותי

בכל דיגום הנחל נראה שונה. באוקטובר 98 המים היו ירוקים ואילו בדצמבר 98 הנחל היה מלא בפסולת מוצקה צפה (פלסטיקים, בקבוקים, עלים) והמים היו עכורים וחומים. במרץ 99 נראו גלים שנכנסו אל הנחל. תחנה מס' 1 הייתה הדודה (85 ס"מ) והמים בה מי ים. המים מהעומק בתחנות 5 ו-6 היו עכורים עם ריח חריף של סולפיד. ביולי 99 המים ירוקים. הכניסה המקורית של נחל האיילון אל הירקון הייתה חסומה על ידי סוללה עקב עבודות בגשר, ובמקומה נפתח פתח מלאכותי בהמשך לכוון המעלה של הירקון. הדיגום בינואר 00 נערך שבוע לאחר גשמים חזקים שגרמו להצפות באזור ת"א ושיטפון בנחל (ספיקת הנחל בתאריכים 5-6 ינואר הייתה כ- 35 מ"ק/שניה, נתונים מהשרות ההידרולוגי). המים היו עכורים וחומים וגדות הנחל ליד השפך היו מלאות ב-debris (פסולת, חתיכות עץ, דגים מתים – שפמנונים, מושטים, בורים). בתחנה 5,

מפגש ירקון-איילון, המים היו מאוד לא הומוגניים. מליחות פני השטח השתנתה מ-10 ל-20 במרחק של מטרים בודדים. בדיגום זה בדקנו שתי תחנות בנחל האיילון ובהן נמצאו מי ים.

עומק המים בתחנה 1 השתנה בין הדיגומים וכנראה הושפע הן ממועדי הים והן מהסעת חול מהים לנחל: אוקטובר 98 - 2 מ', דצמבר 98 - 1.7 מ', מרץ 99 - 85 ס"מ, יולי 99 - 0.5 מ' וינואר 00 - 1.6 מ'.

### 3.2 איכות הקרקעית

הקרקעית נדגמה ב-19 באוקטובר 98, בעונת זרימה מינימלית בנחל וב-12 בינואר 2000, לאחר אירוע של שיטפון. בדיגום אוקטובר, ברוב התחנות הסדימנט שחור ובוצתי. בתחנה 1 הסדימנט חולי אך שחור ובתחנה 5 הסדימנט שחור מעורב עם בוץ. בתחנה 6 הסדימנט הכיל הרבה אבנים וזרדים. בינואר הסדימנט בתחנות 1 ו-4 היה חולי. בתחנות 2,3,5 נצפתה שכבה דקיקה של אדמה על שכבה שחורה ובוצתית עמוקה.

טבלה 1 מסכמת את ריכוזי המתכות (כספית, קדמיום, נחושת, עופרת, אבץ, כרום, מגנז, ברזל ואלומיניום) והפחמן האורגני בדגימות הקרקעית של הנחל. ריכוז האלומיניום, ברזל ומגנז טבעיים, וקיים מתאם טוב ביניהם (ציור 1). הריכוזים הנמוכים של כל המתכות נמצאו בתחנות בהן הקרקעית הייתה חולית: תחנה 1 בשני הדיגומים ותחנה 4 בדיגום ינואר. כללית, כמעט ולא נראו הבדלים בריכוזים בין דיגום אוקטובר לדיגום ינואר, להוציא כאמור תחנה 4 שהייתה חולית בינואר עם ריכוזי מתכות נמוכים לעומת אוקטובר אז הייתה הקרקעית חרסיתית עם ריכוזים גבוהים של מתכות. ככל הנראה שיטפון בנחל גרף את השכבה הבוצתית בתחנה זאת וחשפה את הקרקעית הטבעית. דיגום שבוצע באביב 2000 בנחל (כוכבא וחובריה, 2000) מצא כי שכבה בעובי של כ-20 ס"מ נגרפה החוצה במשך שטפונות. חורף 1999-2000.

קריטריון לאיכות הסדימנט לגבי מתכות כבדות המקובל בארה"ב הוא של ERM - ERL, (Long et al. 1995). קריטריון זה מגדיר תחומי ריכוזים לגבי מספר מתכות בהם צפויות השפעות על הביטה השוכנת בקרקעית. אם הריכוז בסדימנט הוא מתחת לערך הנמוך (ERL) השפעה ביוטית צפויה רק לעיתים נדירות. אם הריכוז בסדימנט הוא בין שני הערכים, ERL ו-ERM, צפויה השפעה ביוטית לעיתים ואילו אם הריכוז גבוה מה-ERM צפויות השפעות ביוטיות לעיתים קרובות. קריטריונים אלה מופיעים בטבלה 1.

השוואת הריכוזים שהתקבלו בסקר זה לבין קריטריונים אלה מראה כי לגבי כספית ועופרת כל הריכוזים שנמדדו נמוכים מה-ERL. קדמיום, נחושת, אבץ וכרום במספר תחנות נמצאו בין ערכי ERL ו-ERM.

Roth and Hornung (1975) דגמו את קרקעית הירקון המלוח שש פעמים בין פברואר 74 ופברואר 75 ומצאו ריכוזים דומים של כספית, קדמיום ועופרת. ריכוזי האבץ היו נמוכים במקצת (ערך מרבי של 99.4 חל"מ לעומת ערך מרבי בדיגום זה של 178 חל"מ). נחושת וכרום היו אז נמוכים בהרבה מהריכוזים הנמדדים היום. תחום הריכוזים של הנחושת היה אז מ- 0.6 עד 7.9 חל"מ והיום מ- 2.6 עד 56.6 חל"מ. תחום הריכוזים של כרום היה מ- 1.3 עד 4.4 חל"מ והיום מ- 10.4 עד 136 חל"מ (טבלה 1). בשני הדיגומים הריכוזים שנמדדו בשפך הנחל דומים.

### 3.3 הידרוגרפיה: חתכי עומק של מליחות וטמפרטורה

ציור 2 מתאר חתך עומק של המליחות לאורך הנחל בעונות שונות. גוף המים משוכב בכל הדיגומים. המליחות משתנה בין הדיגומים בעיקר בשכבת המים העליונה (מטר עליון) ואילו מתחת למטר עומק המליחות תמיד מעל 30, להוציא דיגום דצמבר 98; בו רק בעומק של 1.5 מטר המליחות עלתה על 30. השינויים במליחות בשכבת המים העליונה הם תוצאה של שינויים בספיקת המים מהמעלה כתוצאה משינויים בנגר (הספקת מים, גשמים) או בהזרמות אנתרופוגניות. גם מועדי הים משפיעים על המליחות של השכבה העליונה (ציור 3), בעיקר בתחנות הקרובות לשפך. המים בתחנה מס' 1 היו לעיתים כמעט רק מי ים (מרץ 99 ויולי 99 B, טבלה 2). על סמך חתכי המליחות ניתן לקבוע כי הירקון המלוח הוא אסטואר Type C, משוכב חזק (Pickard and Emery, 1990) בו מתקיים עירוב טורבולנטי בין שכבת המים העליונה, המתוקה יותר והזרמת לכוון השפך, לבין השכבה התחתונה, המלוחה והיציבה יחסית.

בכל הדיגומים הנחל גם משוכב מבחינה תרמית, להוציא את הקטע הקרוב לשפך בו עמודת המים מעורבת בזמן גאות (אוקטובר 98, מרץ 99 ויולי 99 B) (ציור 3). הטמפרטורה מושפעת מעונת השנה: בחורף התחום היה 14-24 מעלות צלזיוס ובקיץ 32-38 מעלות צלזיוס (טבלה 3). בכל הדיגומים המים בעומק חמים יותר מהמים בפני השטח לאורך כל הנחל כאשר לעיתים מופיע מקסימום של טמפרטורה באמצע עמודת המים בתחנות הקרובות לים. הסיבה העיקרית היא כניסה של מי ים חמים, אשר שמשו כמי קירור בתחנת הכוח רידינג. כניסה של המים החמים מתוארת בביורר במרץ 99, יולי 99 וינואר 00 (ציור 3). לעיתים נראית גם "עדשה" של מים חמים בעומק של תחנה 2 ו-3 שיתכן ומייצגת "לכידה" של מים אלה. סיבה נוספת היכולה לגרום לכך שהמים בעומק חמים יותר מאשר בפני השטח היא הפרש המליחויות הגדול בין השכבות, בדומה למה שקורה בבריכות סולריות.

טמפרטורת המים בעומק של כ- 2 מ' מפני המים בגשר רוקח, על סמך הטמפרטורות שנמדדו בתוך מד הלחץ, גבוהות בכל השנה באופן משמעותי מהטמפרטורות הקיימות ביס בקרבת המוצא. ערכי הטמפרטורה המדודים משקפים בצורה טובה למדי את הטמפרטורה מחוץ למכשיר ונמצאו בהתאמה עם מדידות הטמפרטורה בסמוך למכשיר בחתכי הטמפרטורה מעונות הקיץ והחורף.

בחודשים החמים בעיקר בולטים גם תנודות יומיות בטמפרטורת המים הקשורות אולי למהלך החימום והקירור היומי (ציור 4).

### 3.4 איכות המים

#### חתכי עומק של חמצן מומס, pH ועכירות

תחום ריכוזי החמצן הנחל רחב ונע בין חוסר חמצן, מצב של היפוקסיה (עד 2 מ"ג/ל), תחום עקה ביולוגית (בין 2-5 מ"ג/ל) ועד רווית יתר, כתוצאה מפוטוסינתזה מוגברת (ציורים 5-6). ככלל הריכוזים יורדים עם המרחק מהשפך ועם עומק המים. בכל הדיגומים כחצי מנפת הנחל הכיל מים עם ריכוזי חמצן מתחת ל-5 מ"ג/ל. ניכרת עונתיות בריכוזי החמצן, במיוחד בשכבה העליונה. הריכוזים הגבוהים (ברווית יתר) נמדדו בקיץ (יולי ואוקטובר) והיו נמוכים יותר בחורף (דצמבר, ינואר). קיים קשר ישיר בין רווית היתר לבין ריכוז הכלורופיל במים (כמדד לייצור הראשוני) (ראה להלן).

חתכי עומק של ערכי ההגבה (pH) נחל מתוארים בציור 7. ערכי ההגבה מושפעים ממי הים, מההזרמות ממעלה הנחל, מתהליכי הפוטוסינתזה ופירוק חומר אורגני. ערכים גבוהים במיוחד נמדדו בחודשי הקיץ, יחד עם ריכוזים גבוהים של כלורופיל.

העכירות נחל גבוהה יותר בחורף מאשר בקיץ, ובכל השנה המים הקרובים לפני השטח עכורים יותר מאשר המים העמוקים (טבלה 2, ציור 8). בחורף, העכירות בכל שכבת מים אחידה לאורך הנחל ואילו בקיץ היא עולה לכוון שבע טחנות. קיים קשר ברור בין עכירות למליחות המים (ציור 9). הערכים המרביים נמדדו באזור האוליגו-הליני (מליחות 1-10), אזור בו מתרחשים תהליכים של הפתחה (flocculation) במגע בין מים מתוקים למלוחים (Fisher et al., 1988). ברוב הדיגומים נמצא אזור של עכירות מרבית (Maximal turbidity zone) אולם בכל פעם במיקום שונה נחל (ציור 8). אזור עכירות מרבית מתאים למקום בו מי ים הזורמים קרוב לקרקעית פוגשים את המים המתוקים הזורמים במורד הנחל.

#### נוטריאנטים (פוספאט, ניטראט, ניטריט, חומצה סיליצית ואמוניום)

ריכוזי הנוטריאנטים היו גבוהים בכל הדיגומים יחסית לריכוזים שנמצאים במי הים באזור ויחסית לאמות מידה סביבתיות בינלאומיות (טבלה 2) (NOAA, 1996; Kress and Herut, 1998). בדיגומי מרץ ויולי 99 המים בתחנה 1 היו בעיקר מי ים, מה שמתבטא בריכוזים הנמוכים (טבלה 2). בכל הדיגומים הריכוזים גבוהים יותר בפני השטח מאשר בעומק שכן פני השטח מושפעים יותר מההזרמות האנתרופוגניות ממעלה הנחל. בקיץ ניכרת עליה של הריכוזים לכוון שבע טחנות הן בפני השטח והן בעומק. בחורף הריכוזים לאורך הנחל דומים. הדיגום שבוצע בדצמבר 98 חריג, כמעט ללא הבדל בריכוזים בין מים מפני השטח למים בעומק. בדיגום מרץ נמדדו הריכוזים הגבוהים ביותר של פוספאט ואמוניום ואילו בדיגום יולי הריכוזים של שני מרכיבים אלה היו



נמוכים ועלו לכוון שבע טחנות. בדיגום ינואר ריכוזי הפוספאט והאמוניום היו דומים לאלה של יולי ונמוכים יותר מאשר בשלושת הדיגומים הראשונים. חומצה סיליצית הייתה גבוהה במרץ וביוולי ואילו ניטראט היה נמוך יותר בקיץ, עם ירידה חדה בתחנות 5 ו-6. דיגומים שבוצעו על ידי רשות נחל הירקון במהלך 2000 מצאו ריכוזי ניטראט, אמוניום ופוספאט דומים לאלה המדווחים בדו"ח זה (רשות נחל הירקון, 2000)

נמצא מתאם ליניארי בין ריכוז הפוספאט לריכוז האמוניום והחומצה הסיליצית (ציור 10), המצביע על שפכים ביתיים כמקור משותף אפשרי לשלושת מרכיבים אלה. ידוע כי גלישות ביוב אל הקטע המלוח של הנחל מתחרשות לעיתים, בנוסף לכניסה של קולחים באיכויות שונות לאזור שבע טחנות (רשות נחל הירקון, 2000). תמיכה לסברה זאת מתקבלת בדיגום של מרץ 99 בו נמדדו הערכים הגבוהים ביותר של אמוניום ופוספאט יחד עם מספרים גדולים של חיידקי Coli (טבלה 2). לא נמצא קשר בין פוספאט לניטראט, האחרון מיוחס בד"כ לשפכים תעשייתיים ולדשן חקלאי (ציור 10).

רוב החנקן האי אורגני המומס בנחל נמצא בצורת יון האמוניום (מעל 75%). ביולי 99 האחוז הממוצע היה נמוך יותר (56%) אולם עיקר ההבדל נבע כהריכוזים בתחנות 1 ו-2 הקרובות לשפך. כאשר תוצאות אלו מוזנחות בחישוב אחוז האמוניום מסה"כ החנקן האי-אורגני דומה לאחוז שנמצא בדיגומים האחרים. במרץ וביוולי 99 ריכוזי הניטראט בתחנות 5 ו-6 נמוכים מהמצופה, ככל הנראה בגלל תנאים אנוקסיים ודניטריפיקציה. ואמנם קיים קשר בין ריכוזי האמוניום והניטראט, כאשר האחרון יורד עם עליית האמוניום בתחנות אלה (טבלה 2). למים הייתה תכולת חמצן נמוכה וריח חריף של סולפיד, המצביע גם על חיזור של סולפאט, המתרחש לאחר ניצול החמצן והניטראט כמחמצנים (Stumm and Morgan, 1981). זאת ככל הנראה גם הסיבה לערכי הגבה נמוכים מהצפוי במים מלוחים יחסית.

#### כלורופיל וחומר מרחף

תחום ריכוזי הכלורופיל בנחל רחב ומשתנה עונתית (טבלאות 2-3). הריכוזים הנמוכים ביותר נמדדו בחורף והגבוהים ביותר בקיץ. במספר תחנות בקיץ ריכוז הכלורופיל גבוה מ-60 מיקרוגרם/ליטר, המגדיר את הנחל כהיפר-איטרופי (NOAA, 1996). לא נמצא קשר בין ריכוז הכלורופיל לבין ריכוזי הנוטריאנטים, שהיו תמיד בעודף בנחל, מה שמראה כי לא מחסור בנוטריאנטים מגביל את הייצור הראשוני בנחל. הדיגום היחיד בו נמצא קשר ישיר משמעותי בין ריכוז הכלורופיל לריכוז הניטראט היה דיגום יולי. בדיקה הקשר בין חנקן אי אורגני כללי לפוספאט (שיפוע 4.1, המתאים ליחס N:P) מצביע על N כגורם פוטנציאלי להגבלת הייצור הראשוני באותה עת. בנוסף, נמצא מתאם ליניארי בין ריכוז הכלורופיל לבין ערכי ההגבה ואחוז רווית החמצן במים, בהתאם למצופה בתהליכים של פוטוסינתזה מוגברת (Stumm and Morgan, 1981).

ריכוז החומר המרחף היה דומה בכל הדיגומים להוציא דיגום יולי בו הריכוזים היו גבוהים יותר (טבלה 2). בקיץ, רוב העכירות בנחל מוסברת על ידי כלורופיל (נוכחות אצות) (ציור 11). בחורף, עיקר העכירות נגרמת ככל הנראה מחלקיקים אי-אורגניים או שאריות של חומר אורגני (detritus) ללא כלורופיל.

#### חיידקים פתוגניים

חיידקים פתוגניים נבדקו בשני דיגומים. בדיגום של אוקטובר 98 מספר החיידקים היה קטן מאוד ואילו בדיגום של מרץ 99 נמצאו מספרי חיידקים גבוהים יותר (טבלה 2). מספרי החיידקים היו גבוהים יותר בפני השטח מאשר בעומק ומספרם ירד עם הקירבה לשפך הנחל. בדגימות פני השטח של תחנות 5 ו-6 מספר החיידקים היה גבוה בהשוואה לתקן הישראלי לאיכות מי ים המתאימים לרחצה (ערך מרבי לבדיקה בודדת-400 חיידקי Fecal Coli ל-100 מ"ל מיס) או לקיום שיט (1000 חיידקי Fecal Coli ל-100 מ"ל מיס). גרדיאנט מספרי החיידקים מראה על כניסת שפכים ביתיים ממעלה הנחל בעת דיגומים אלה.

#### 3.5 תהליכי ערבוב וקביעת End Members במימי הנחל

הצגת תלות של פרמטר מסוים במליחות (דיאגרמת ערבוב) במערכות נחלים מאפשרת למידה של תהליכי הערבוב המתרחשים בה כגון: א. מספר גופי המים (EM) (end members) המתערבבים במערכת, ב. ריכוזי הפרמטרים ב-EM לפני הערבוב, ג. עונתיות ב-EM, ד. ערבוב קונסרבטיבי, ה. תהליכים הגורעים או מוסיפים את הפרמטר למערכת בזמן הערבוב. במקרה של המערכת ירקון מלוחים תיכון אנו מגדירים את ה-EM הנחלי, הם המים הנכנסים לשבע טחנות, כבעל מליחות 0 ואילו ה-EM הימי מוגדר כבעל מליחות 39.

נבחן לדוגמא את דיאגרמת ערבוב לחומצה סיליצית לכל דיגום בנפרד (ציור 12). ברוב הדיגומים נמצא קשר משמעותי בין ריכוז החומצה הסיליצית לבין המליחות: הריכוז ירד עם עליה במליחות המים. בדיגום דצמבר אין תלות במליחות ולכן ה-EM הנחלי חושב כמוצע של הערכים שנמדדו במים עם מליחות נמוכה מ-10. דיאגרמת הערבוב לאוקטובר אינה מדייקת כי כל הערכים מרוכזים באזור של מליחות גבוהה ולכן לא התחשבנו בדיגום זה בניתוח. הקווים הישרים מצביעים על ערבוב קונסרבטיבי ואילו הערכים השונים של ה-EM הנחלי מצביעים על עונתיות. בחורף, ה-EM הנחלי היה הנמוך ביותר ועקבו עלה הדרגתית מהחורף (164 מיקרומולר בינואר ו-136 מיקרומולר בדצמבר) דרך האביב (298 מיקרומולר) ועד לקיץ (405 מיקרומולר). העלייה בריכוז של ה-EM הנחלי מהחורף לקיץ דהיינו, עם ירידה בספיקת הנחל, מצביעה על מקורות נקודתיים המזרימים בצורה קבועה חומצה סיליצית לנחל. בחורף, עם זרימה טבעית מוגברת, החומצה הסיליצית נמהלת וריכוז ב-EM יורד. בקיץ, במצב של זרימה מינימלית, כמות החומצה הסיליצית המוחדרת לנחל נמהלת פחות ולכן ריכוז ב-EM גבוה יותר. אילו מקור החומצה

הסיליציית היה טבעי (כגון בליה של סלעים) היינו מצפים ל-EM גבוה יותר בחורף עם הגברת הספיקה. ה-EM הימי, המחושב כאמור למליחות 39, מתקבל בתחום בין 33-81 מיקרומולר חומצה סיליציית. ריכוזים אלה גבוהים בהרבה מהמרכיב הימי הנקי באזורנו (כ-1 מיקרומולר - Kress and Herut, 1998) וכפי שנראה בדיאגרמה בשתי נקודות בלבד (תחנה 1 במרץ ויולי - טבלה 2). ריכוזים גבוהים אלה מראים כי ה-EM הימי המחושב מושפע מההזרמות מהמעלה ולכן אין הוא ה-EM הימי התיאורטי.

דיאגרמות ערבוב עבור פוספאט ואמוניום הן לא חד משמעיות. בדיגום מרץ היתה כניסה של שפכים ביתיים אשר לוותה בערכים גבוהים של שני נוטריאנטים אלה. הערבוב נראה קונסרבטיבי אולם ה-EM הנחלי הגבוה (217 ו-1574 מיקרומולר עבור פוספאט ואמוניום, בהתאמה - ציור 13) אינו מייצג ככל הנראה תקופה זאת של השנה. השוואה בין ה-EM הנחלי בקיף ובחורף לגבי פוספאט מצביעה על אפשרות של EM גבוה יותר בקיף בדומה לחומצה הסיליציית. אמוניום לא התנהג בצורה קונסרבטיבית בקיף ולכן לא ניתן להסיק מסקנות על העונתיות. שני החורפים שנדגמו דומים.

דיאגרמות הערבוב של ניטראט משמעותיות והערבוב נראה קונסרבטיבי להוציא תחנות 5 ו-6 ביולי בהן מתרחשת דניטריפיקציה (ציור 14). הדיאגרמות דומות מאוד בכל הדיגומים וה-EM הנחלי דומה במשך כל השנה ( $149.5 \pm 14.7$  מיקרומולר). התנהגות זאת מתאימה למקור ניטראט בעל אופי דיפוזובי, כמו שדות חקלאיים.

תלות עכירות המים במליחות היא דוגמה מובהקת לתהליך ערבוב לא קונסרבטיבי (ציור 10). תהליכי הפתחה ושיקוע מסלקים חומר מרחף מעמודת המים. לעומת זאת, חומר אורגני מומס (QSU) מתנהג בצורה קונסרבטיבית (ציור 15).

### 3.6 גובה מפלס המים ומשטר הזרימה

ניתוח סדרות הזמן של נתוני הלחץ בגשר רוקח מגלה בברור את קיומם של תנודות חצי-יומיות (יום ירח) בנות 12.4 שעות במפלס המים. תנודות אלו הן בהתאמה לתנודות במועדי הים בים הפתוח, כפי שנמדדו בתחנה קבועה למדידת מפלס הים במזח הפחם בחדרה. ציורים 16-17 מביאים דוגמאות מתקופת הקיץ והחורף, בהתאמה. בעונת החורף קיימות, בנוסף לתנודות החצי יומיות, גם עליות מפלס משמעותיות בעת שטפונות. אלו מלווים בירידה בטמפרטורת המים בעומק מכשיר המדידה (1 מ' מעל לקרקעית, ציור 18). דוגמאות בולטות במיוחד לקוחות מאירועי גשמים ב-5-6 ינואר 2000, ספיקה יומית ממוצעת של כ-35 מ<sup>3</sup> לשניה ו-28 בינואר 2000, ספיקה יומית ממוצעת של 92.7 מ<sup>3</sup> לשניה (נתונים מהשרות ההידרולוגי). באירועים אלה נמדדה עלית מפלס חזקה של 1 מטר וירידה דרסטית של 16 מעלות בטמפרטורת המים, בהשפעת מי השיטפונות (ציורים 19-20).

ניתן להעריך את תנועתו של חלקיק המוכנס לנחל רק כתוצאה ממועדי היס, ללא קשר לזרימה מהמעלה. נפח מי היס הנכנס או היוצא מהנחל כתוצאה מעלייה או הירידה במפלס היס הוא קטן יחסית עקב המשרעת הקטנה של מועדי היס באזורינו והטופוגרפיה של הנחל. ניתן להעריך את מהירות הזרם הממוצעת בחתך של הנחל (רוחב כפול עומק) בהשפעת מועדי היס כדלקמן:

1. מניחים שינוי אחיד במפלס המים לאורך הנחל, ולא עליה או ירידה בצורה גלית לאורכו. המפלס עולה ויורד בצורה אחידה ובו זמנית כתוצאה ממועדי היס. קירוב זה הוא טוב בהתחשב באורכו של הנחל ובמהירות התקדמות הפאזה של גלים ארוכים.
2. הזרם הממוצע בחתך פרופורציונלי ליחס (S) שבין שטח פני המים במעלה לחתך הנתון לבין שטח החתך.
3. הזרם הממוצע בחתך מסוים מחושב על ידי מכפלת קצב השינוי במפלס בערך S המתאים לחתך.
4. ערך זרם חיובי מציין זרימה מהים את הנחל ואלו ערך שלילי, זרימה מהנחל לים.

גודלו של היחס S באזור גשר רוקח הוא 900 בקירוב. הוא גדל במקצת במעלה הנחל עד לגשר אבן גבירול ( $S = 1100$ ) ואחר כך קטן עד להתאפסותו בשבע טחנות. ציור 21 מתאר סדרת זמן של הזרמים הממוצעים המחושבים לחתך בגשר רוקח בעונת הקיץ. התנודות במהירות הזרם קטנות יחסית ועוצמות הזרם הממוצעות לחתך אינן עולות על 3 ס"מ לשניה. באזור גשר בבלי ( $S = 400$ ) צפויה סדרת זמן זומה של זרמים אך במחצית העוצמה. ניתוח פריסת הזרמים על פי שעות היממה בחודשים ללא שטפונות, מראה על מרכיב זרימה קבוע לאורך היום בעל זמן מחזור של 12 שעות (ציור 22). מרכיב זה, הנובע מתרומת השמש למועדי היס, גורם לצפי לא אחיד של הזרם בשעות היום. כך למשל בשעה 09:00 וכן ב- 21:00 (שעון קיץ), הצפי לזרימה לתוך הנחל היא מכסימלית, ואילו בשעה 15:00, ב- 73% מהמקרים, הזרימה היא מהנחל לים.

בדומה להחלשות הזרימה (הנגרמת על ידי מועדי היס) עד להתאפסותה בשבע טחנות, כך קטנות גם התנודות האופקיות או המרחק האופקי המרבי המקורב שעובר חלקיק מים במהלך של מחזור של מועדי היס. מרחק זה, התלוי באמפליטודת התנודה של הזרם אינו עולה על 350 מטר באזור גשר רוקח וקרוב לאפס באזור שבע טחנות. המסקנה היא שבתקופת הקיץ, בו קיימת זרימה קטנה יחסית של מים מהמעלה, סיכוי חלקיק המוכנס לנחל לצאת את היס רק בהשפעת מועדי היס הוא לא גדול עקב המרחק האופקי המרבי הקצר שהוא עובר. ההנחה של השפעה בלעדית של מועדי ים על ההסעה בנחל היא כמובן לא נכונה ויש להתחשב בזרימה מהמעלה, גם בתקופת הקיץ בה הספיקה מינימלית.

ניתן להעריך את זמן השטיפה (flushing time) של הנחל, הוא הזמן הדרוש להחליף נפח אחד של מים מתוקים בנחל, כדלקמן

$$T_f = V/Q$$

$$V = ((S_{sw} - S_{avg})/S_{sw}) * V_{tot}$$

כאשר  $T_f$  הוא זמן השטיפה (שניה),  $V$  נפח המים המתוקים ( $m^3$ ),  $Q$  ספיקת המים מהמעלה ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ).  
 לשניה,  $S_{sw}$  היא מליחות מי הים (39),  $S_{avg}$  היא המליחות הממוצעת בנחל ו-  $V_{tot}$  הנפח הכללי של הנחל.

נפח הקטע המלוח של הירקון הוא 380,000  $m^3$  (ד. פרגמנט). להערכה של זמן השטיפה נניח כי:

1. המליחות הממוצעת בנחל בחורף היא 22 ובקיץ 30 (ציור 2) ולכן נפח המים המתוקים בחורף הוא כחצי מסה"כ הנפח ובקיץ כרבע מסה"כ הנפח
2. ספיקת המים בחורף היא כמו ב- 5-6 ינואר 2000 (כ- 35  $m^3$  לשניה)
3. ספיקה יומית ממוצעת בקיץ היא של 0.02  $m^3$  לשניה
4. המרחק בין שבע טחנות לשפך הוא 4,150 מ'.
5. זמן השטיפה הוא הזמן הלוקח לחלקיק לעבור את המרחק בין שבע טחנות לשפך

מתקבל כי זמן השטיפה הוא 1.5 שעות בחורף ו- 1320 שעות בקיץ. מהירות הזרימה בקיץ, המחושבת מהנתונים הנ"ל, היא 0.09 ס"מ לשניה, נמוכה יותר מהמהירות הנגרמת כתוצאה ממועדי הים, המחושבת לגשר רוקח. מהירות הזרימה בחורף היא 76 ס"מ לשניה, גבוהה מהמהירות הנדרשת (35 ס"מ לשניה) להניע חול דק בקרקעית (Norton and Champ, 1989) כך שבאירוע שטפונות ניתן לצפות להסעה של חלקיקים בקרקעית לכוון השפך. גריפה של השכבה הבוצתית לכוון השפך נמצאה דיגום שבוצע באביב 2000 ע"י כוכבא וחובריה, 2000.

### 3.7 השפעת מועדי הים על הנחל - יולי 99

עדות להשפעת מועדי הים ניתן למצוא בסדרת חתכי הטמפרטורה לאורך הנחל מה- 12 ביולי 1999 (ציור 3). חתכים אלה, שבוצעו בפרקי זמן שונים במהלך מחזור אחד של גאות ושפל (ציור 23), מראים על תנועה של לשון מים חמים בעומק של 1.5 מטר במעלה ובמורד הנחל בהתאמה עם חזירה או יציאה של מי ים. מהירות הזרימה אינה עולה על 3 ס"מ לשניה. הערכה נוספת למהירות הזרימה בוצעה ע"ש תנועת האיזותרמות  $34^\circ C$  ו-  $35^\circ C$  בין דיגום A ו-D בעומק מים של 1.5 מ' (ציור 3). מהירויות הזרימה המתקבלות הן 0.9 ו- 3.5 ס"מ לשניה בהתאמה. בחתכי המליחות (ציור 2) השפעה זו מורגשת בעיקר בהעמקה של שכבת המים העליונה, המתוקה יותר, בעת יציאה של מים מהירקון לים או לרידודה בעת כניסת מי הים לירקון.

נתוני הטמפרטורה במד הלחץ במהלך היממה בעונה החמה מורים על מרכיב של תנודה בעלת מחזור שלם בשיעור של 1.5 מעלות לערך (ציור 24c). המים קרים יותר בד"כ בשעות הבוקר, וחמים ביותר בשעות הערב המאוחרות עד חצות. קיימת ההתחממות או ההתקררות של המים הן במקרה שבו הזרימה היא מהים לנחל (ציור 24a) או מהנחל לים (ציור 24b). המהלך היומי של הטמפרטורה נובע ככל הנראה מהשפעת ההתחממות האטמוספרית דרך פני המים בשעות היום וההתקררות, יחד עם אפשרות של שקיעה וערבוב בשעות הלילה. אין נתונים מתאימים על מנת ללמוד על תהליכי הערבוב היומי לעומק העמודה. מידת ההשפעה של מי הקירור מתחנות הכוח אינה ברורה, אך לאור ירידת הטמפרטורה בשעות הלילה בעת הזרימה מהים אל הנחל יתכן והיא פחות דומיננטית.

חמצן מומס, ערך הגבה, כלורופיל ועכירות המים, משתנים עם מועדי הים. אולם, עיקר השוני נובע מתהליכים ביולוגיים, התלויים בקרינת השמש ולכן בשעה ביממה. לא ניתן להפריד בין השפעת התהליכים הביולוגיים להשפעת מועדי הים על ריכוזי הפרמטרים הכימיים.

#### 4. סיכום ומסקנות

הירקון המלוח הוא אסטואר משוכב בו מתקיים ערבוב טורבולנטי בין שכבת המים העליונה, המתוקה יותר והזורמת לכוון השפך, לבין השכבה התחתונה, המלוחה והיציבה יחסית. המליחות משתנה בין הדיגומים בעיקר בשכבת המים העליונה (מטר עליון) ואילו בשכבה התחתונה המליחות תמיד מעל 30. טמפרטורת המים מושפעת מעונת השנה ובכל הדיגומים המים בעומק חמים יותר מהמים בפני השטח. ריכוזי החמצן המומס במים יורדים עם המרחק מהשפך ועם עומק המים. ריכוז החמצן בכחצי מנפח הנחל הוא מתחת ל-5 מ"ג/ל, ולעיתים חלקים בו אנוקסיים (מתחת ל-2 מ"ג/ל חמצן). ריכוזי הנוטריאנטים היו גבוהים בכל הדיגומים יחסית לריכוזים במי הים באזור יחסית לאמות מידה סביבתיות בינלאומיות. בכל הדיגומים הריכוזים גבוהים יותר בפני השטח מאשר בעומק שכן פני השטח מושפעים יותר מההזרמות האנתרופוגניות ממעלה הנחל. תחום ריכוזי הכלורופיל בנחל רחב ומשתנה עונתית עם ריכוזים נמוכים בחורף וגבוהים בקיץ. נמצא מתאם ליניארי בין ריכוז הכלורופיל לבין ערכי ההגבה ואחוז רווית החמצן במים, בהתאם למצופה בתהליכים של פוטוסינתזה מוגברת.

תלות עכירות המים במליחות היא דוגמה מובהקת לתהליך ערבוב לא קונסרבטיבי, המושפע מתהליכי הפתחה ושיקוע המסלקים חומר מרחף מעמודת המים. לעומת זאת, חומר אורגני מומס מתנהג בצורה קונסרבטיבית. גם בחלק מהמקרים, תהליכי הערבוב של הנוטריאנטים הם קונסרבטיביים, כגון חומצה סיליצית. עונתיות ב-EM הנחלי הצביעה על מקורות נקודתיים המזרימים בצורה קבועה חומצה סיליצית לנחל. לעומת זאת ה-EM הנחלי של ניטראט אינו משתנה עונתית מה שמתאים למקור ניטראט בעל אופי דיפוזיבי. דיאגרמות ערבוב עבור פוספאט

ואמוניום הן לא חד משמעיות, לעיתים עם ערבוב קונסרבטיבי ולעיתים לא. ניכרת השפעה גדולה של כניסה אנתרופוגנית חריגה על הריכוזים בנחל.

ניתוח סדרות הזמן של נתוני הלחץ בגשר רוקח מגלה בברור את קיומם של תנודות חצי-יומיות (יום ירח) בנות 12.4 שעות במפלס המים, בהתאמה לתנודות במועדי הים בים הפתוח. בעונת החורף קיימות, בנוסף לתנודות החצי יומיות, גם עליות מפלס משמעותיות בעת שטפונות. אלו מלווים בירידה בטמפרטורת המים בעומק מכשיר המדידה. עוצמת הזרם הממוצעת בחתך בגשר רוקח (המחושבת ע"ש תנועת חלקיק כתוצאה ממועדי הים בלבד) אינה עולה על 3 ס"מ לשנייה, והיא עולה לכוון המעלה עד לגשר אבן גבירול ואחר כך קטנה עד לאפס בשבע טחנות. כך קטן גם המרחק האופקי המרבי שעובר חלקיק מים במהלך של מחזור של מועדי הים. מרחק זה, התלוי באמפליטודת התנודה של הזרם אינו עולה על 350 מטר באזור גשר רוקח וקרוב לאפס באזור שבע טחנות. המסקנה היא שבתקופת הקיץ, בו קיימת זרימה קטנה יחסית של מים מהמעלה, סיכוי חלקיק המוכנס לנחל לצאת את הים רק בהשפעת מועדי הים הוא לא גדול עקב המרחק האופקי המרבי הקצר שהוא עובר. ההערכה של זמן שהטיפה של הנחל, כאשר מתחשבים רק בספיקה מהמעלה, היא של 1.5 שעות בחורף ו-1320 שעות בקיץ. מהירות הזרימה בקיץ, המחושבת מהנתונים הנייל, היא 0.09 ס"מ לשנייה, נמוכה יותר מהמהירות הנגרמת כתוצאה ממועדי הים, המחושבת לגשר רוקח. מהירות הזרימה בחורף היא 76 ס"מ לשנייה, גבוהה מהמהירות הנדרשת (35 ס"מ לשנייה) להניע חול דק בקרקעית כך שבאירוע שטפונות ניתן לצפות להסעה של חלקיקים בקרקעית לכוון השפך. ואמנם, בדיקות של קרקעית הנחל בינואר 2000 הראו שטיפה אפשרית של הקרקעית בתחנה 4 (ליד גשר נמיר). הקרקעית הייתה חולית ולא בוצתית כמו בדיגום קודם. איכות הסדימנט לגבי כספית ועופרת הייתה טובה בכל התחנות. במספר נקודות דיגום נמצאו ריכוזי קדמיום, נחושת, אבץ וכרום בתחום הבינוני של אמות מידה בינלאומיות לאיכות סדימנט.

עדות להשפעת מועדי הים על הנחל מתקבלת מתנועה של לשון מים חמים בעומק של 1.5 מטר במעלה ובמורד הנחל בהתאמה עם חדירה או יציאה של מי ים. המליחות מושפעת בעיקר בהעמקה של שכבת המים העליונה, המתוקה יותר, בעת יציאה של מים מהירקון לים או לרידודה בעת כניסת מי הים לירקון. הפרמטרים הכימיים מושפעים בעיקר מתהליכים ביולוגיים, התלויים בקרינת השמש ולכן בשעה ביממה, ולא ניתן לבדוד את השפעת מועדי הים.

התנאים ההידרוגרפיים הממוצעים בנחל (כמו טמפרטורה או מליחות) נקבעים למעשה על ידי הזרימה השירית לאחר מיצוע בזמן של מחזורי מועדי ים. זו מושפעת מהספיקות הנכנסות של המים המתוקים, מתופעות ערבוב ותהליכי הסעה בגוף המים וכן מאידוי ומעבר חום דרך פני המים המחייבים הפעלה של מודל פיזיקלי להערכת משתנים כמו קצב הסעה, זמן שהות ושטיפה של הנחל. הנתונים הדרושים להרצת מודל כזה הם: א. תנאי שפה (ספיקות בשבע טחנות ומפלס פני הים), בתימטריה, רוחות, טמפרטורת האוויר ולחות (לחישוב שטפי חום), גשמים, ספיקות באמצע הנחל, נתונים לכיול המודל. חלק מהנתונים הדרושים התקבלו במחקר זה וחלק ניתן להשגה ממקורות אחרים. מומלץ מאוד להמשיך את חקירת הירקון המלוח בכוון זה.

ASTM. (1983). American Society for Testing and Materials Designation -D 3683-78. Standard test method for trace elements in coal and coke ash by atomic absorption, pp. 472-475.

EPA (1979). Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes.

Fisher, T.R., Harding Jr., L.W., Stanley, D.W. and Ward, L.G. (1988). Phytoplankton, Nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware and Hudson estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 27, 61-93.

Holm-Hansen, O., C.J. Lorenzen, R.W. Holmes AND J.D.H. Strickland (1965) Fluorometric determination of chlorophyll. *J. du Conseil Perm. Int'l. pour l'exploration de la mer*, 30, 2-15.

Hornung, H., M.D. Krom and Cohen Y. (1989) Trace metal distribution in sediments and benthic fauna of Haifa Bay, Israel. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 29, 43-56.

Kress, N. and Herut, B. (1998). Hypertrophication in the oligotrophic Eastern Mediterranean. A study in Haifa Bay, Israel. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 46, 645-656

Krom M. D., S. Brenner, N. Kress, A. Neori and L. I. Gordon (1993) Nutrient distribution during an annual cycle across a warm-core eddy from the Eastern Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research*, 40, 805-825.

Moore, C.A., Farmer, C.T. and Zika, R.G. (1993). Influence of the Orinoco river on hydrogen peroxide distribution and production in the Eastern Caribbean. *Journal of Geophysical Research* 98, 2289-2298.

Long, E., Smith, S.L. & Calder, F.D., 1995. Incidence of adverse biological effects within .R., MacDonald, D.D ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19, 81-97



National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1996. NOAA's Estuarine Eutrophication Survey. Volume 1 : South Atlantic Region. Silver Spring, MD. Office of Ocean Resources Conservation Assessment. 50 p.

Norton, M.G and Champ, M.A.(1989). The influence of site-specific characteristics on the effects of sewage-sludge dumping. Oceanic Processes in Marine Pollution V4. Scientific monitoring strategies for Ocean waste disposal , Wood, D.W., Schoener, A. and Park, P.K Eds, 161-183.

Pickard, G.L. and Emery, W.J. (1990). Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. Butterworth-Heinemann Publishers.

Roth, I. and Hornung, H. (1975). The concentrations of heavy metals in streams and estuaries in the central and northern area of Israel. IOLR report

Stumm, W. and Morgan, J.J. (1981). Aquatic chemistry. AN introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. Wiley Interscience, 2<sup>nd</sup> edition.

UNESCO (1985) The international system of units (SI) in oceanography, UNESCO Technical Papers No. 45, IAPSO Pub. Sci. No. 32, Paris, France.

כוכבא, מ., דסה, ע., סגל, י. ואבנימלך, י. (2000). בדיקת קרקעית נחל הירקון אביב 2000.

רשות נחל הירקון (2000) דו"ח מצב לשנת 2000. 46 עמ'

טבלה 1 : ריכוזי מתכות בפני השטח של קרקעית נחל הירקון המלוח. ערכים מודגשים גבוהים מקריטריונים של ERL-ERM הנתונים אף הם בטבלה.

Station	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	Mn	Fe	Al	C <sub>org</sub>
	ppm							wt %		
אוקטובר-98										
1	0.026	0.07	4.5	2.6	12.9	10.1	77.5	0.23	0.97	0.06
2	0.106	0.64	42.0	<b>39.3</b>	146	<b>136</b>	856	4.17	5.15	1.12
3	0.058	<b>1.93</b>	32.2	<b>38.9</b>	121	<b>127</b>	663	4.20	5.48	0.94
4	0.067	<b>2.28</b>	43.9	<b>51.0</b>	178	<b>125</b>	730	5.50	6.98	1.00
5	0.025	0.87	17.9	20.3	62.4	<b>82.0</b>	595	3.39	4.59	0.35
6	0.065	0.43	31.9	31.5	129	64.4	238	2.52	3.08	2.63
ינואר-00										
1	0.017	bdl	-	4.17	10.4	10.4	109	0.44	0.83	0.05
2	0.058	1.03	35.1	<b>34.9</b>	145	<b>123</b>	517	3.65	5.37	1.06
3	0.059	0.69	38.7	<b>44.1</b>	166	<b>91.2</b>	451	2.94	4.27	1.19
4	0.001	bdl	14.1	3.68	12.8	29.1	231	0.75	0.67	0.06
5	0.059	<b>2.98</b>	42.5	<b>56.6</b>	176	<b>124</b>	776	5.37	7.78	1.04
6	0.054	0.10	32.5	26.8	125	74.9	485	2.43	3.78	0.82
ERL*	0.15	1.2	46.7	34	150	81				
ERM*	0.71	9.6	218	270	410	370				

bdl-below detection limit (Cd < 0.01 ppm)

\* Long et al., 1995, ראה טקסט.

טבלה 2: ריכוז התוצאות של בדיקות המים בייגומים השונים בנחל הירקון המלוח

Date	Station	Depth m	Temp °C	Salinity	PO <sub>4</sub> µM	Si(OH) <sub>4</sub> µM	NO <sub>3</sub> µM	NO <sub>2</sub> µM	NH <sub>4</sub> µM	QSU	Chl. µg/l	BOD mg/l	SPM mg/l	DO %	DO mg/l	pH	Turbidity NTU	F Coll no/100 ml	E Coll
98-אוקטובר	1	1	33.64	37.23	45.6	136	76.8	16.2	410	38.1	3.1	16.0	123	7.14	8.48	5.8	15	2	
98-אוקטובר	2	2	30.61	35.38	17.5	65	33.4	5.82	129	12.9	2.2	9.4	125	7.69	8.5	6.2	6	1	
98-אוקטובר	3	1	30.79	33.86	45.3	137	85.5	16.7	278	51.2	7.8	15.8	165	10.2	8.51	15.4	23	2	
98-אוקטובר	4	1	31.01	33.61	47.0	143	88.0	16.4	411	43.0	7.2	14.8	120	7.45	8.46	8.3	69	10	
98-אוקטובר	5	1	30.93	33.38	53.5	158	78.8	14.6	390	45.8	1.0	18.0	42	2.62	8.29	45.3	91	6	
98-אוקטובר	6	1	31.13	33.36	82.8	189	71.2	6.33	434	125	1.3	21.3	16	0.99	7.87	62.3	119	38	
98-דצמבר	1	0	15.63	4.25	69.7	122	84.7	16.7	959	114	13.0	0.9	39.2	19	1.82	7.89	62.9		
98-דצמבר	1	1	20.86	26.71	67.6	110	75.0	11.9	519	99.6	8.0	5.4	38.8	73	5.56	8.41	23.9		
98-דצמבר	2	0	15.01	2.79	56.6	124	79.5	13.5	739	113	9.8	2.8	36.8	32	3.16	7.92	70.1		
98-דצמבר	2	1.9	21.97	30.28	51.7	105	50.7	10.9	374	78.6	6.0	4.2	36.4	59	4.34	8.35	18.2		
98-דצמבר	3	0	15.30	3.00	67.3	125	73.4	11.0	896	110	8.5	3.1	20.6	33	3.28	7.95	68.8		
98-דצמבר	3	1.9	22.77	31.20	39.5	85.3	29.4	9.0	297	52.4	4.7	0.2	21.7	5	0.37	8.02	19.2		
98-דצמבר	4	0	15.30	2.58	35.2	157	228	8.3	346	97.8	6.5	3.5	25.8	37	3.68	7.97	72.6		
98-דצמבר	4	1.6	21.76	28.24	54.0	136	91.0	9.5	477	72	7.1	0.1	20.0	4	0.27	8.02	18.2		
98-דצמבר	5	0	15.48	2.14	28.1	160	256	9.6	259	96.7	7.2	4.2	15.2	44	4.31	7.98	72.5		
98-דצמבר	5	1.9	22.53	28.79	53.6	115	32.1	7.1	449	51	8.0	*	16.5	3	0.24	7.98	18.0		
98-דצמבר	6	0	15.61	6.09	77.9	126	35.2	10.9	1482	104	6.8	*	33.0	32	3.04	7.94	78.7		
99-מרץ	1	0	25.33	38.17	0.62	1.35	1.03	0.21	0.63	4.7	2.4	0.8	6.5	111	7.36	8.18	5.9	2	10
99-מרץ	2	0	19.48	11.97	187	192	118	5.93	1938	71.2	31.6	3.8	19.0	46	3.96	7.85	17.6	600	5600
99-מרץ	2	2	23.07	35.79	47.9	56.9	15.5	1.6	478	19.8	6.7	2.4	11.3	96	6.66	8.13	7.9	104	2900
99-מרץ	3	0	20.53	10.86	182	209	67.3	2.14	679	68.0	35.5	2.3	19.3	35	2.94	7.78	20.7	800	4400
99-מרץ	3	2	24.74	36.48	40.7	62.0	21.6	1.84	432	22.8	19.6	2.4	11.7	38	2.59	8.00	9.5	104	2000
99-מרץ	4	0	20.38	8.94	172.8	272	155	4.53	1498	71.8	29.6	1.6	24.3	19	1.61	7.71	27.2	300	2600
99-מרץ	4	1.9	23.87	35.80	66.3	96.2	20.5	1.6	612	32.6	26.8	*	13.2	8	0.55	7.63	17.7	128	1800
99-מרץ	5	0	21.55	7.14	152	202	69.4	3.67	880	59.7	40.0	*	22.5	24	2.02	7.76	39.3	1000	4700
99-מרץ	5	1.9	23.78	35.07	48.9	68.2	10.3	0.7	419	22.9	18.1	*	15.0	11	0.76	7.25	19.4	130	900
99-מרץ	6	0	20.41	6.94	177	301	6.17	1.63	1456	97.0	14.3	*	32.6	43	3.73	7.84	78.5	3100	7700

Date	Station	Depth m	Temp °C	Salinity	PO <sub>4</sub> µM	Si(OH) <sub>4</sub> µM	NO <sub>3</sub> µM	NO <sub>2</sub> µM	NH <sub>4</sub> µM	QSU	Chl. µg/l	BOD mg/l	SPM mg/l	DO %	DO mg/l	pH	Turbidity NTU	F Coli no/100 ml	E Coli no/100 ml
99-גור	6	1.2	23.15	33.31	95.1	100	1.20	0.23	783	43.4	40.5	*	24.8	18	1.29	7.12	32.6	154	2900
99-גור	1B	0.66	37.74	38.00	0.2	1.6	0.55	0.1	bdl	7.32	0.1	0.7	44.5	104	5.64	8.18	4.4		
99-גור	2B	0.22	32.69	25.63	22.1	102	48.1	12.1	31.1	47.0	76.7	6.2	32.3	210	13.24	8.72	20.4		
99-גור	2B	2.61	34.26	35.69	8.7	42.8	12.1	3.1	35.6	17.7	11.5	10.0	18.9	76	4.39	8.20	15.3		
99-גור	3B	0.22	33.06	25.57	25.7	133	52.4	16.7	28.5	49.3	92.6	2.1	53.8	192	12.02	8.73	24.5		
99-גור	3B	1.94	35.38	36.23	12.6	48.8	22.0	8.5	34.5	24.5	39.8	11.8	8.4	31	1.77	8.11	8.5		
99-גור	4B	0.23	32.61	24.20	36.4	155	44.3	20.2	168	48.1	111	2.0	52.4	167	10.59	8.53	20.5		
99-גור	4B	1.84	35.53	35.70	13.6	54.6	13.9	7.5	44.4	24.2	16.9	10.3	17.6	48	2.74	8.15	9.3		
99-גור	5B	0.18	32.90	21.71	53.2	267	45.7	20.2	12.9	54.9	116	1.9	34.6	176	11.28	8.54	63.2		
99-גור	5B	1.89	33.17	34.90	28.3	105	24.7	7.9	190	29.6	62.0	10.0	29.1	32	1.87	7.39	72.2		
99-גור	6B	0.26	32.09	10.14	121	327	13.1	18.1	405	85.7	37.2	2.7	17.3	81	5.61	8.09	18.0		
99-גור	6B	2.32	32.01	34.68	66.3	149	3.19	1.7	569	59.2	56.4	5.0	54.7	44	2.64	7.09	17.8		
99-גור	1E	0.28	35.41	34.38	15.0	72.4	24.1	8.3	1.7	30.8	37.5	0.3	17.8	80	4.60	8.34	3.9		
99-גור	2E	0.00	35.36	30.31	15.1	84.4	33.6	12.4	1.9	36.9	55.2	10.0	60.7	105	6.16	8.87	20.3		
99-גור	2E	2.59	34.40	35.95	11.8	68.0	25.8	9.4	14.0	28.5	35.1	4.1	39.0	39	2.25	7.90	19.8		
99-גור	3E	0.00	35.01	26.43	21.1	136	41.0	16.5	21.1	49.5	92.8	2.1	37.0	108	6.52	8.95	99.6		
99-גור	3E	1.93	34.82	35.40	15.4	66.6	20.3	9.3	36.7	29.1	45.6	2.0	6.1	39	2.25	7.94	11.7		
99-גור	4E	0.00	33.10	20.68	25.7	207	132	16.4	31.9	50.5	149	2.1	58.8	75	4.80	8.77	38.0		
99-גור	4E	1.78	34.02	35.83	22.6	101	39.1	6.1	138	30.0	46.1	*	18.0	37	2.15	7.64	28.8		
99-גור	5E	0.00	33.10	16.48	56.0	244	94.9	22.2	315	58.3	89.4	2.2	34.0	80	5.23	8.64	26.9		
99-גור	5E	1.45	33.90	34.10	41.7	140	34.9	6.7	276	34.8	41.6	*	39.8	37	2.15	7.70	29.2		
99-גור	6E	0.20			108	321	14.3	12.2	254	97.0	50.8	-	11.2						
99-גור	6E	1.90			67.3	200	5.25	7.3	487	53.7	60.8	-	60.2						
00-גור	1	0.00	13.88	11.95	43.4	137	99.4	9.92	534	73.9	0.98	5.7	22.0	72	6.90	7.77	36.3		
00-גור	1	1.23	23.80	37.92	10.5	33.7	32.0	3.01	114	21.6	0.30	1.0	8.9	96	6.55	8.08	9.8		
00-גור	2	0.00	14.24	11.28	43.4	138	112	9.34	560	75.5	0.91	5.6	28.7	68	6.53	7.78	35.3		
00-גור	2	1.89	21.80	36.27	10.7	41.3	42.8	3.49	131	15.3	0.38	1.7	10.8	91	6.50	8.05	12.3		
00-גור	3	0.00	14.12	10.41	52.5	141	116	11.5	569	74.6	0.82	5.2	24.0	62	5.96	7.76	36.9		
00-גור	3	1.90	23.66	36.81	9.2	30.3	31.0	2.71	96	19.5	0.33	0.5	19.7	70	4.78	7.95	15.2		
00-גור	4	0.00	14.92	10.45	48.8	134	133	11.7	464	74.3	0.36	2.8	25.4	71	6.78	7.77	34.1		

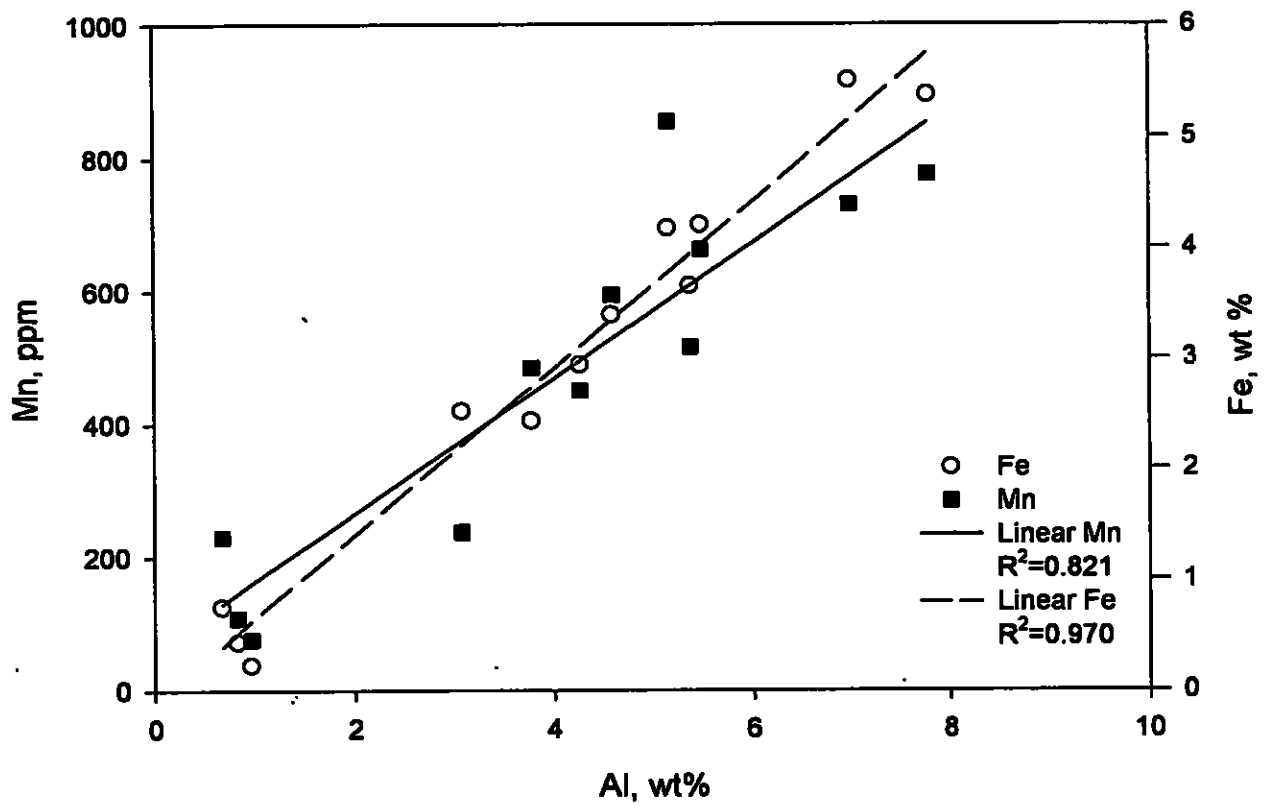
Date	Station	Depth m	Temp °C	Salinity	PO <sub>4</sub> μM	Si(OH) <sub>4</sub> μM	NO <sub>3</sub> μM	NO <sub>2</sub> μM	NH <sub>4</sub> μM	QSU	Chl. μg/l	BOD mg/l	SPM mg/l	DO %	DO mg/l	pH	Turbidity NTU	F Coli no/100 ml	E Coli
00-1000	4	1.39	23.02	35.70	20.2	57.7	73.4	5.70	219	38.3	0.30	0.0	23.5	45	3.12	7.86	5.7		
00-1000	5	0.00	14.24	5.33	49.0	134	175	13.9	468	75.0	0.34	2.8	22.3	85	8.46	7.82	39.3		
00-1000	5	0.71	22.49	34.64	17.6	45.5	63.0	5.15	175	33.6	0.26	0.6	21.3	49	3.49	7.87	6.8		
00-1000	6	0.00	14.38	5.83	49.9	123	163	13.1	394	77.2	0.88	3.5	30.3	84	8.29	7.79	38.9		
00-1000	6	0.85	21.15	33.17	16.1	44.7	55.7	5.08	210	32.9	0.37	0.0	30.1	32	2.38	7.76	3.8		

\* BOD > 3 mg/l

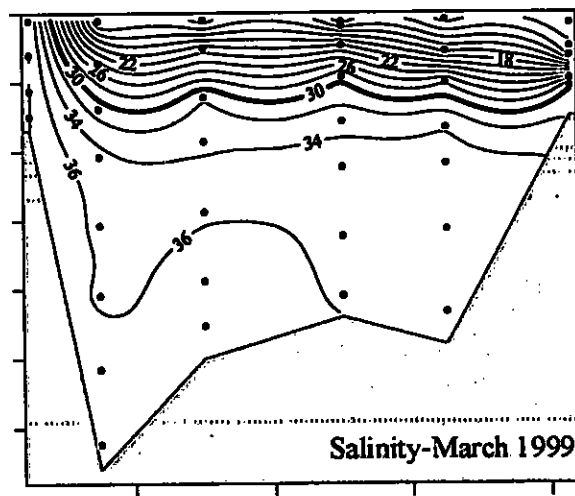
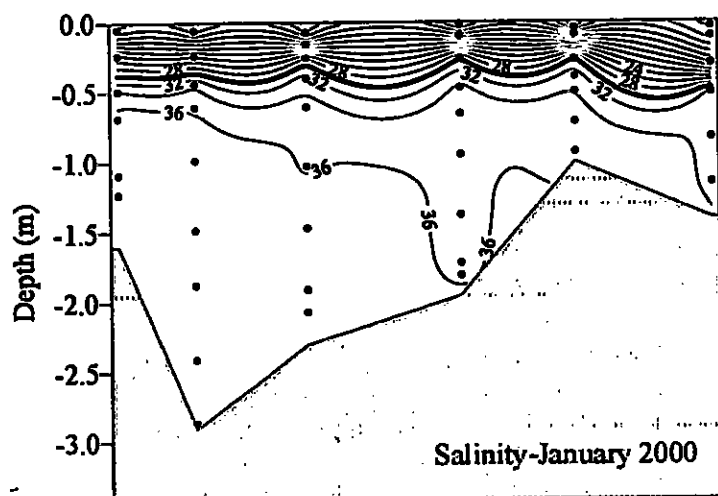
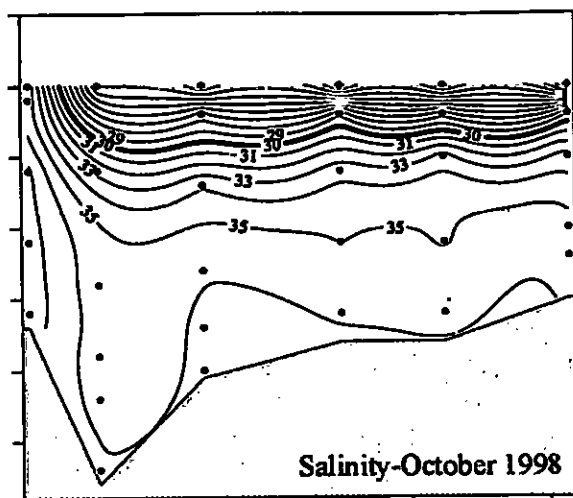
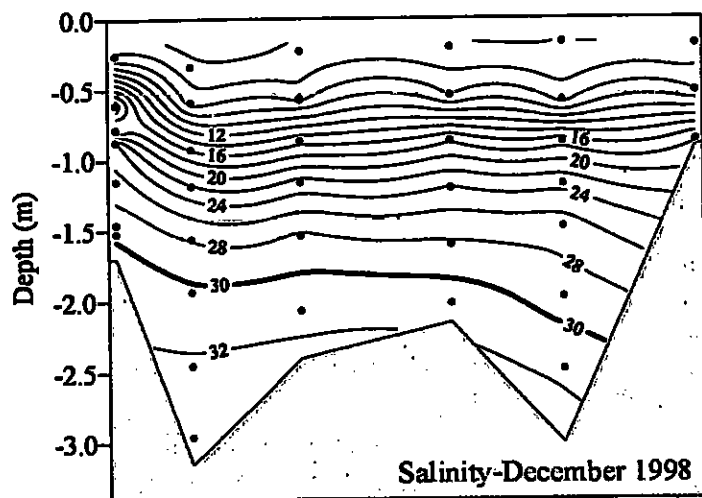
טבלה 3: תחום ריכוזים של הפרמטרים שנמדדו במימי הנחל הירקון המלוח כדיגומים שונים

Date	Temp °C	Salinity	PO <sub>4</sub> μM	Si(OH) <sub>4</sub> μM	NO <sub>3</sub> μM	NO <sub>2</sub> μM	NH <sub>4</sub> μM	QSU	Chl. μg/l	BOD mg/l	SPM mg/l	DO %	DO mg/l	pH	Turbidity NTU
98-אוקטובר	min	30.61	33.36	17.5	65.0	33.4	5.82	129	12.9	1	9.4	16	0.99	7.87	5.8
	max	33.64	37.23	82.8	189	88.0	16.7	434	125	7.8	21.3	165	10.2	8.51	62.3
98-דצמבר	min	15.01	2.14	28.1	85.3	29.4	7.1	259	4.7	0.1	15.2	3	0.24	7.89	18.0
	max	22.77	31.2	77.9	160	256	16.7	1482	13.0	5.4	39.2	73	5.56	8.41	78.7
99-מרץ	min	19.48	6.94	0.62	1.4	1	0.21	0.63	2.4	0.8	6.5	8	0.55	7.12	5.93
	max	25.33	38.17	187	301	155	5.93	1938	40.5	3.8	32.6	111	7.36	8.18	78.5
B 99-יולי	min	32.01	10.14	0.2	1.6	0.6	0.1	bdl	7.32	0.1	0.7	31	1.77	7.09	4.4
	max	37.74	38	121	327	52.4	20.2	569	85.7	11.8	54.7	211	13.2	8.73	72.2
E 99-יולי	min	33.1	16.48	11.8	66.6	5.3	6.1	1.7	28.5	0.3	6.2	37	2.15	7.64	3.85
	max	35.41	35.95	108	321	132	22.2	487	149	10.0	60.7	108	6.52	8.95	99.6
00-ינואר	min	13.88	5.33	9.24	30.3	31.0	2.71	96.3	15.3	bdl	8.9	33	2.38	7.76	3.8
	max	23.8	37.92	52.5	141	175	13.94	569.0	77.2	0.98	30.3	96	8.46	8.08	39.3

bdl - below detection limit



ציור 1: תלות ריכוז ברזל ומנגן באלומיניום בדגימות קרקעית בנחל הירקון המלוח

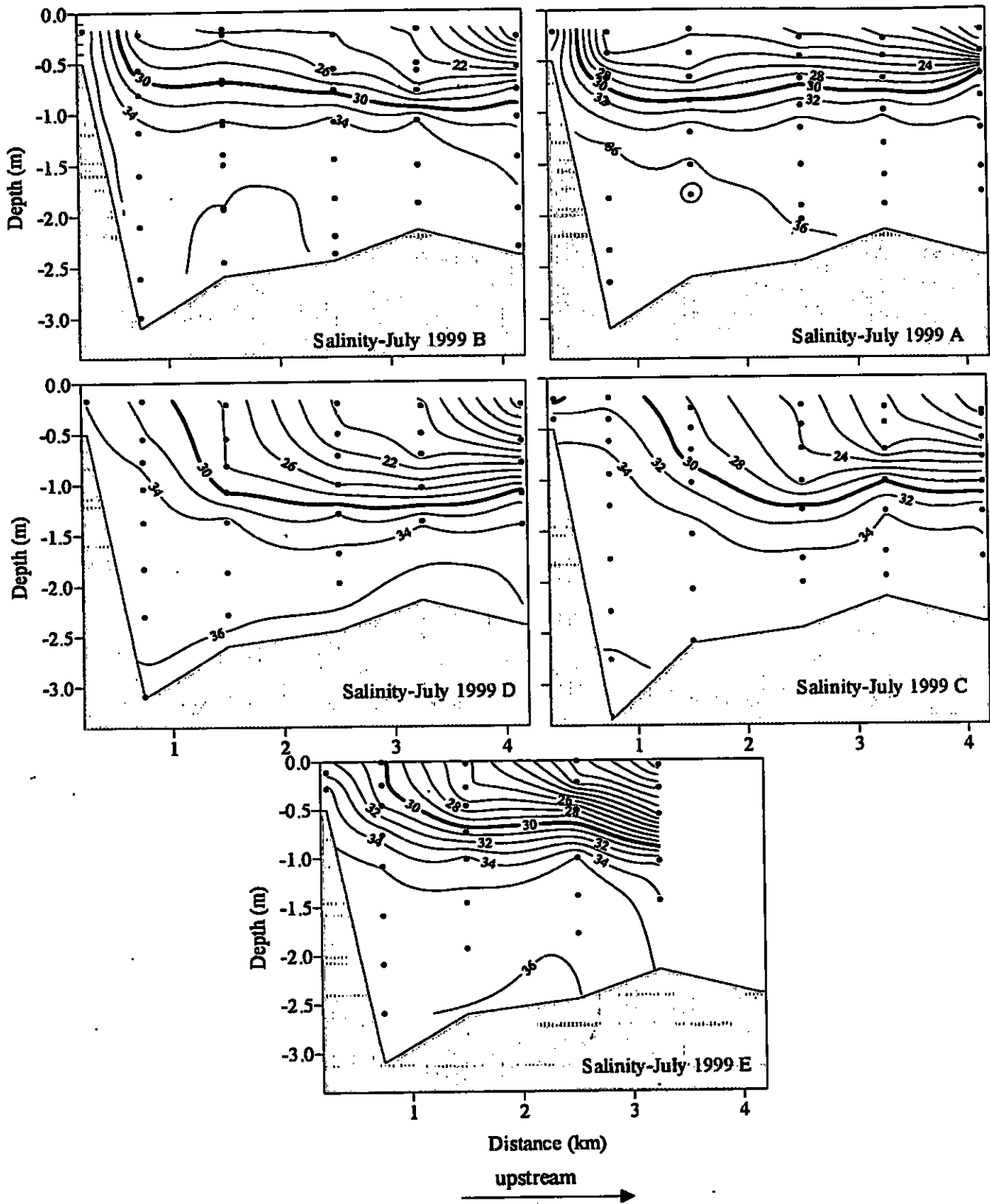


Distance (km)  
upstream  
→

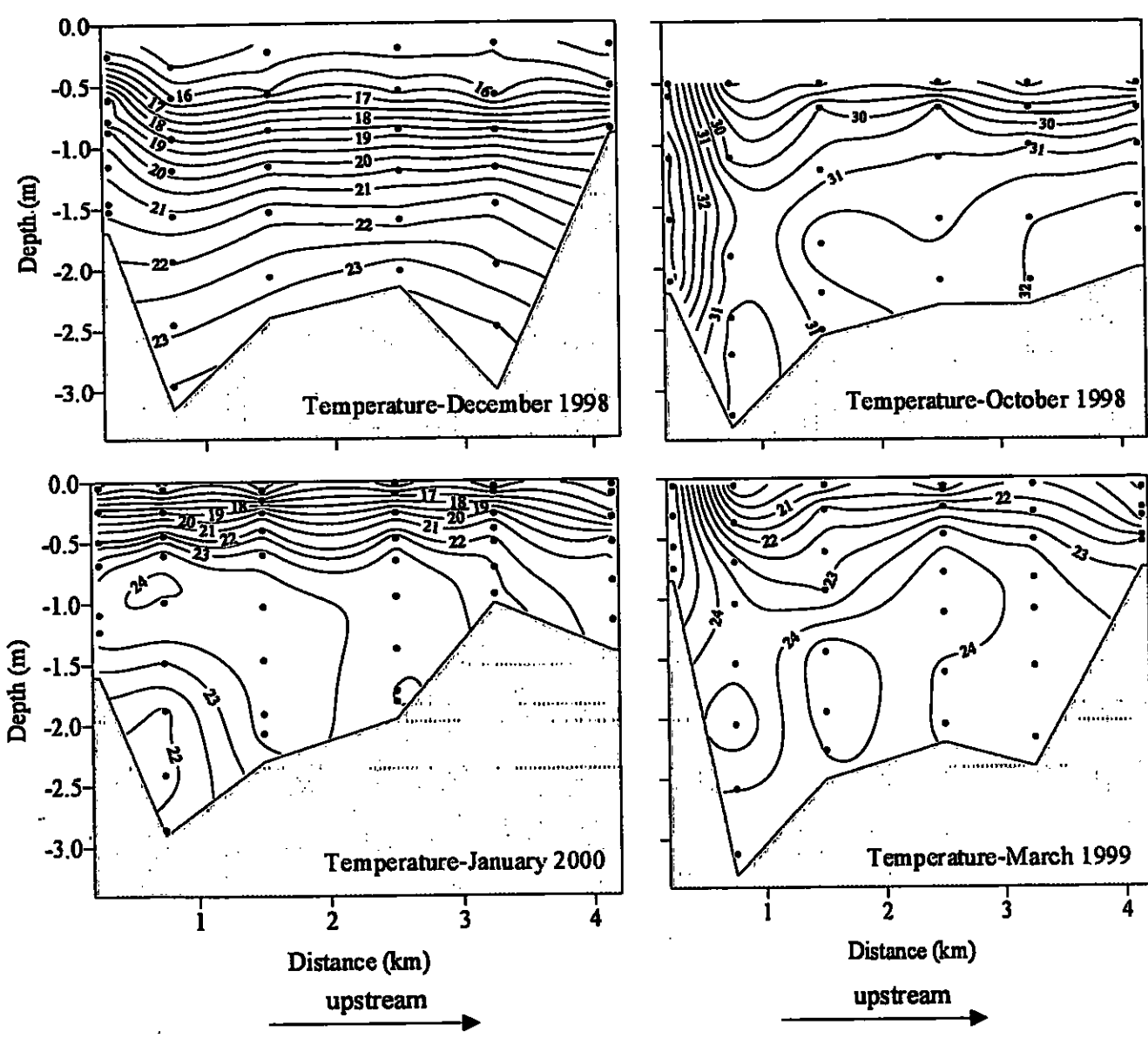
Distance (km)  
upstream  
→

ציור 2: חתכי עומק של מליחות המים בחמישה דיגומים בחלקו המלוח של נחל הירקון. עיגולים שחורים מסמנים נקודות מדידה.

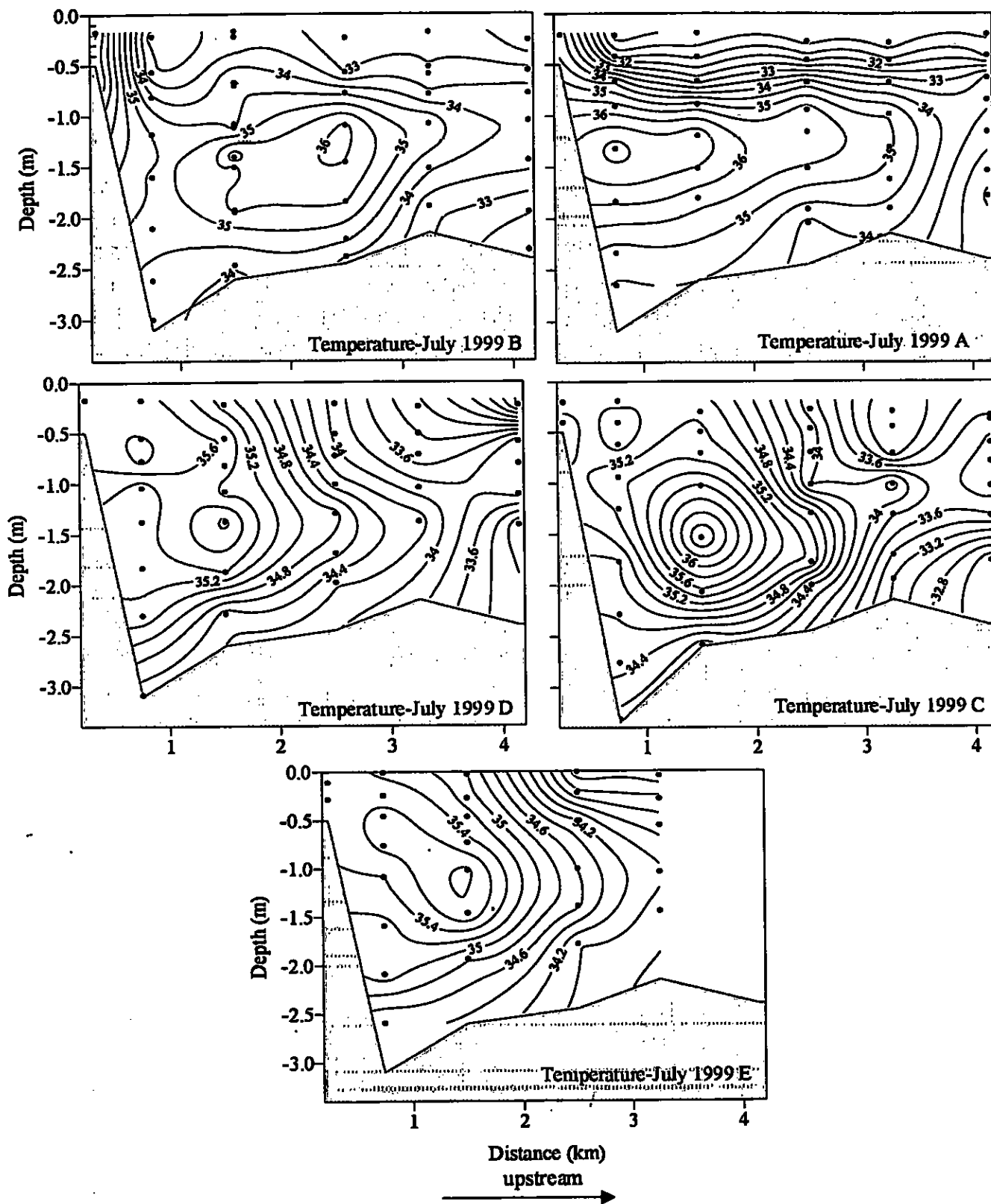




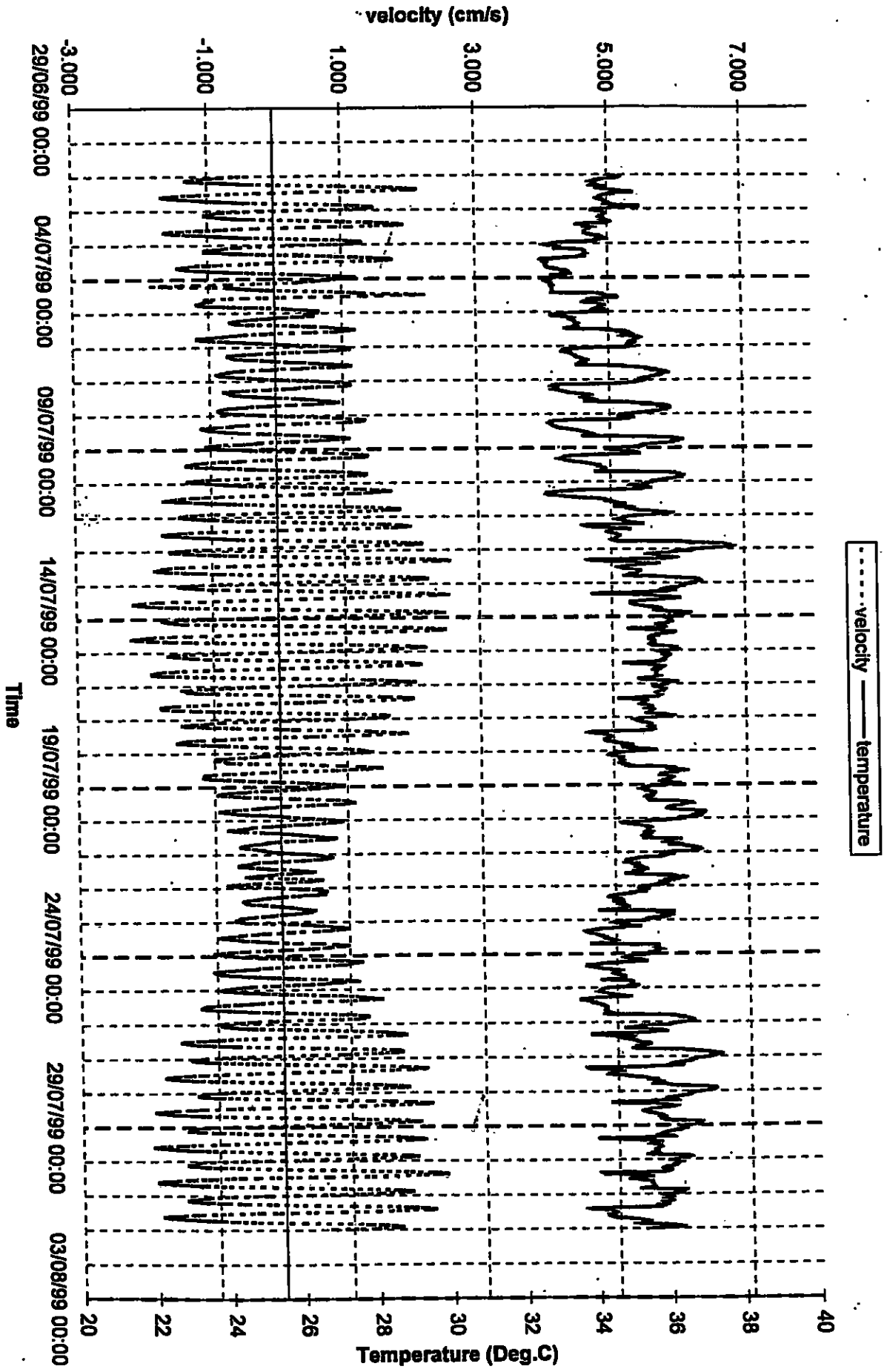
ציור 2 המשך: מליחות למשך מחזור גאות ושפל.



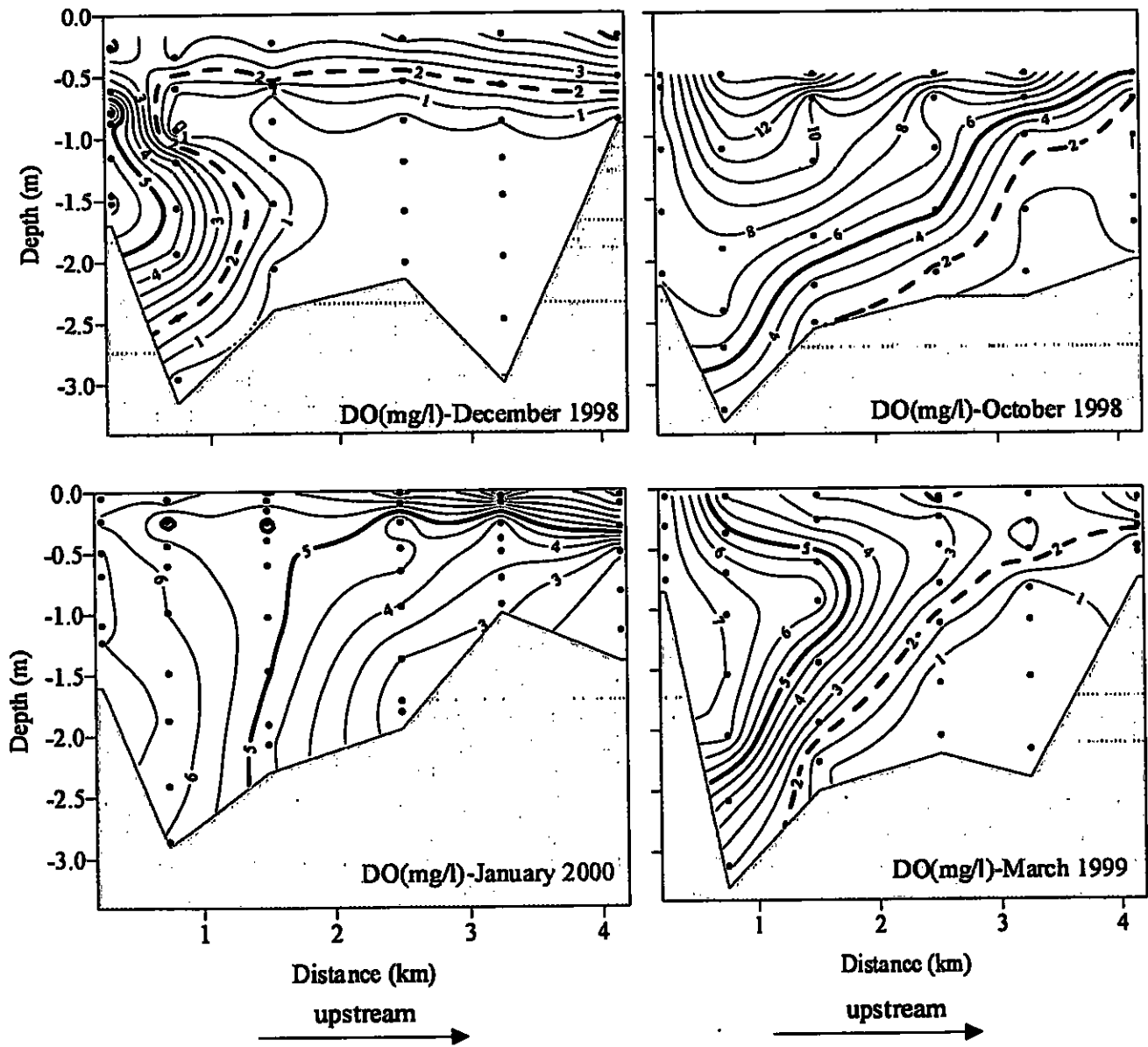
ציור 3 : תכני עומק של טמפרטורת המים ( $^{\circ}\text{C}$ ) בחמישה דיגומים בחלקו המלוח של נחל הירקון. עיגולים שחורים מסמנים נקודות מדידה.



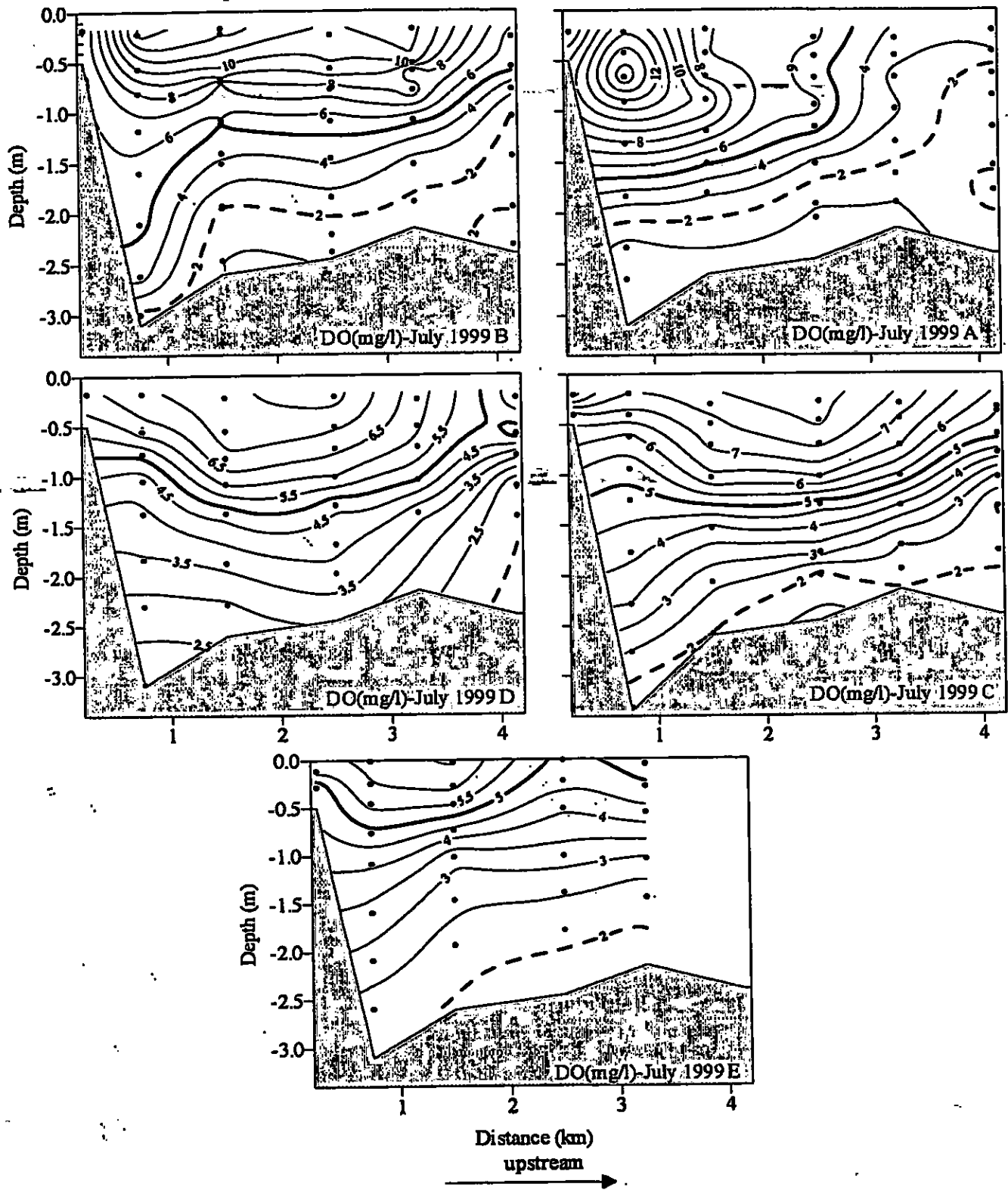
ציר 3 המשך: טמפרטורה למשך מחזור גאות ושפל.



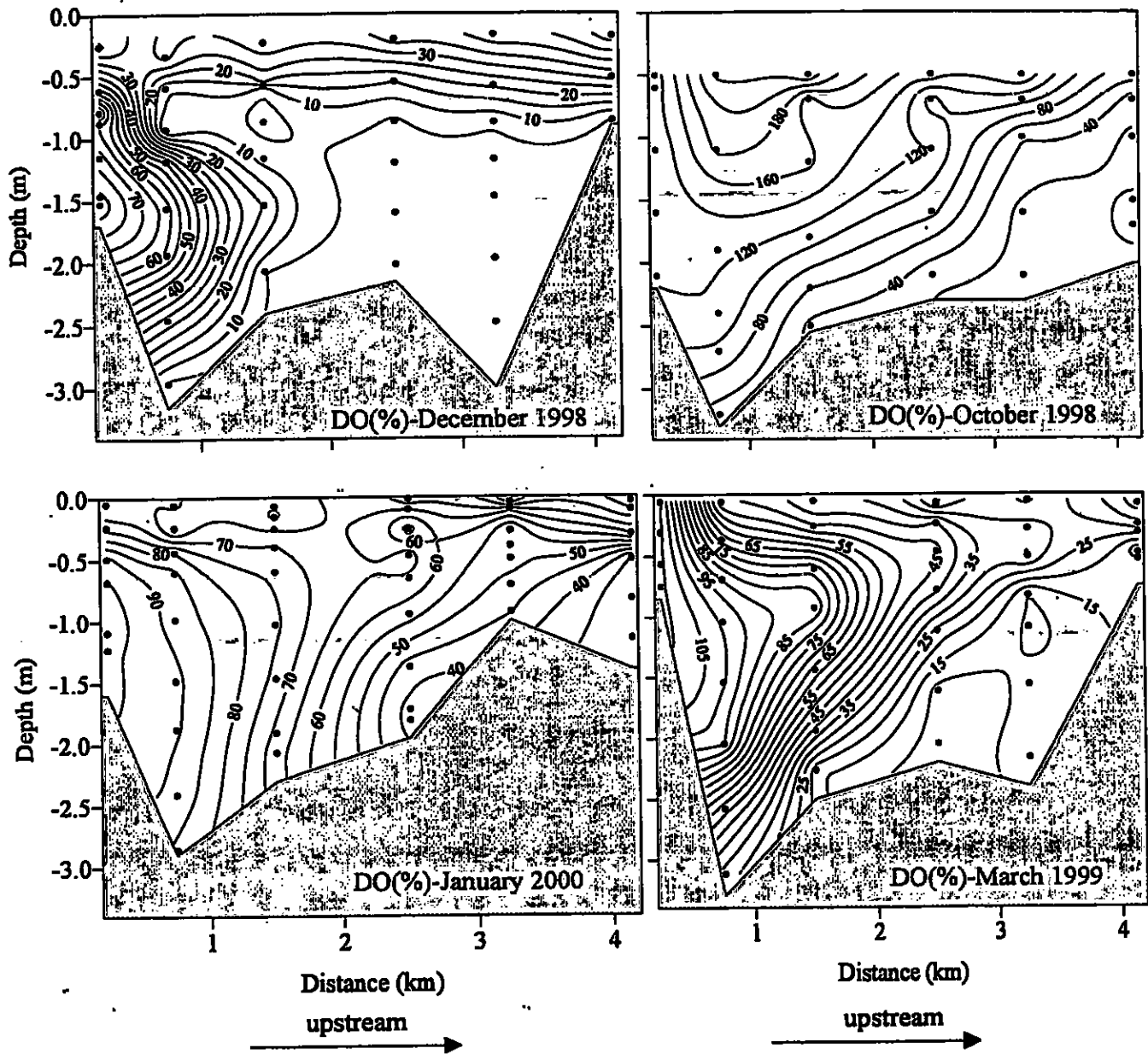
צירוף 4: טמפרטורת חמים כפי שנמדודת באופן רציף במוד חלואי-בגשר רוקח ומחירות זרימה ממושבת לתקופת הקיץ של 1999.



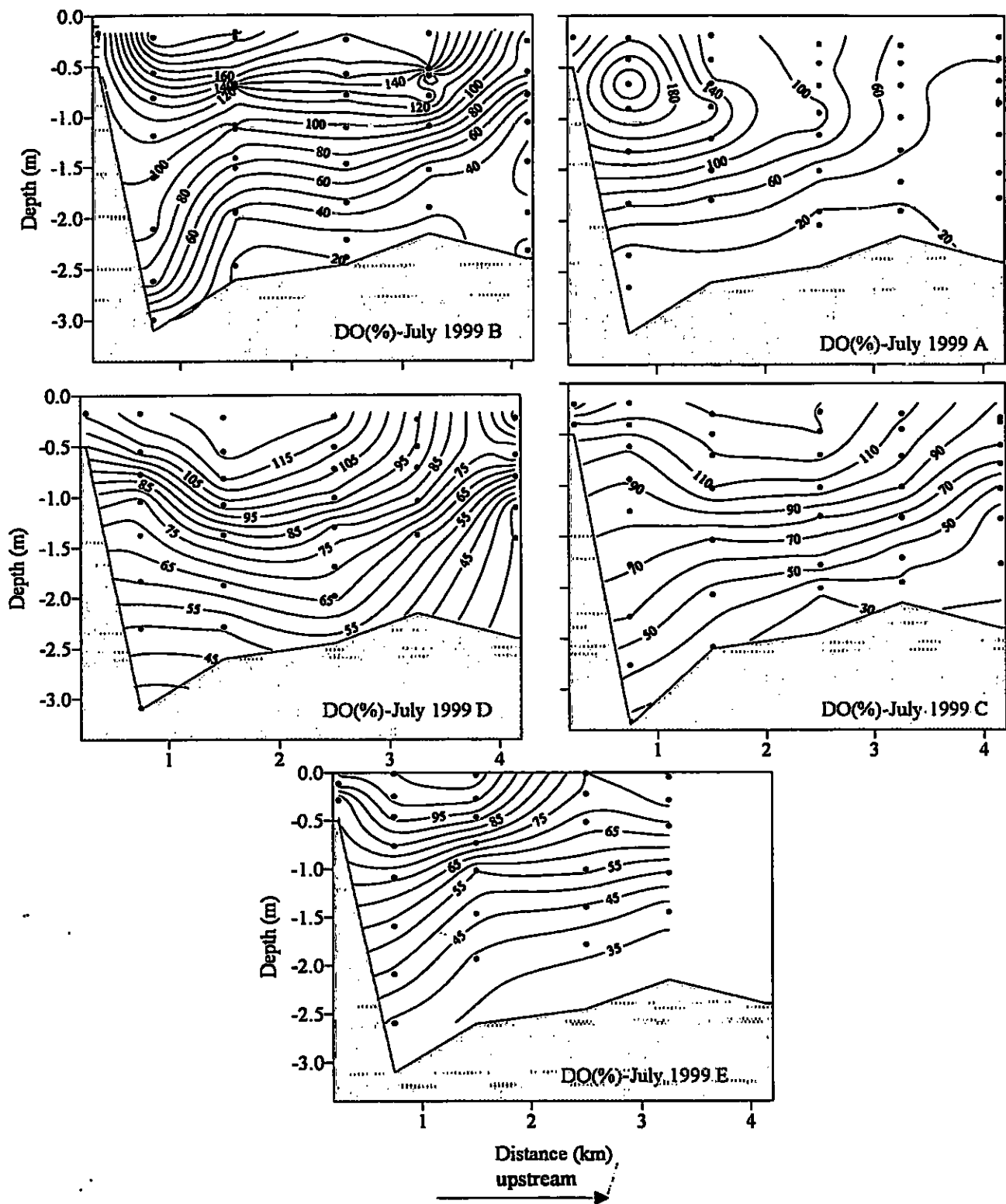
ציור 5. חתכי עומק של חמצן מומס במים (מ"ג/ל) בחמישה דיגומים בחלקו המלוח של נחל הירקון. עיגולים שחורים מסמנים נקודות המדידה.



ציר 5 המשך: חמצן מומס למשך מחזור גאות ושפל.

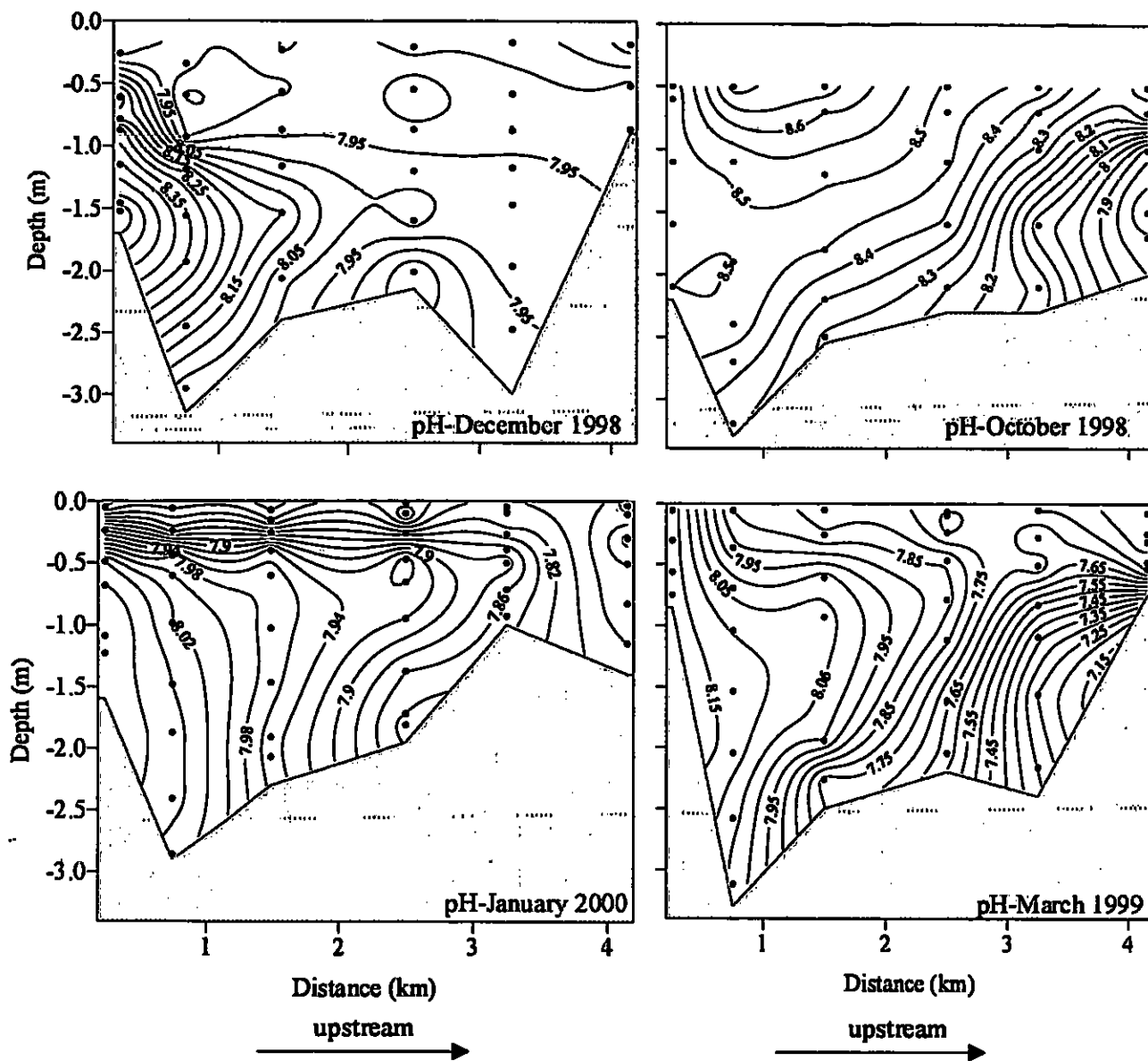


ציור 6. חתכי עומק של רזיית חמצן במים (%) בחמישה דיגומים בחלקו המלוח של נחל הירקון. עיגולים שחורים מסמנים נקודות המדידה.

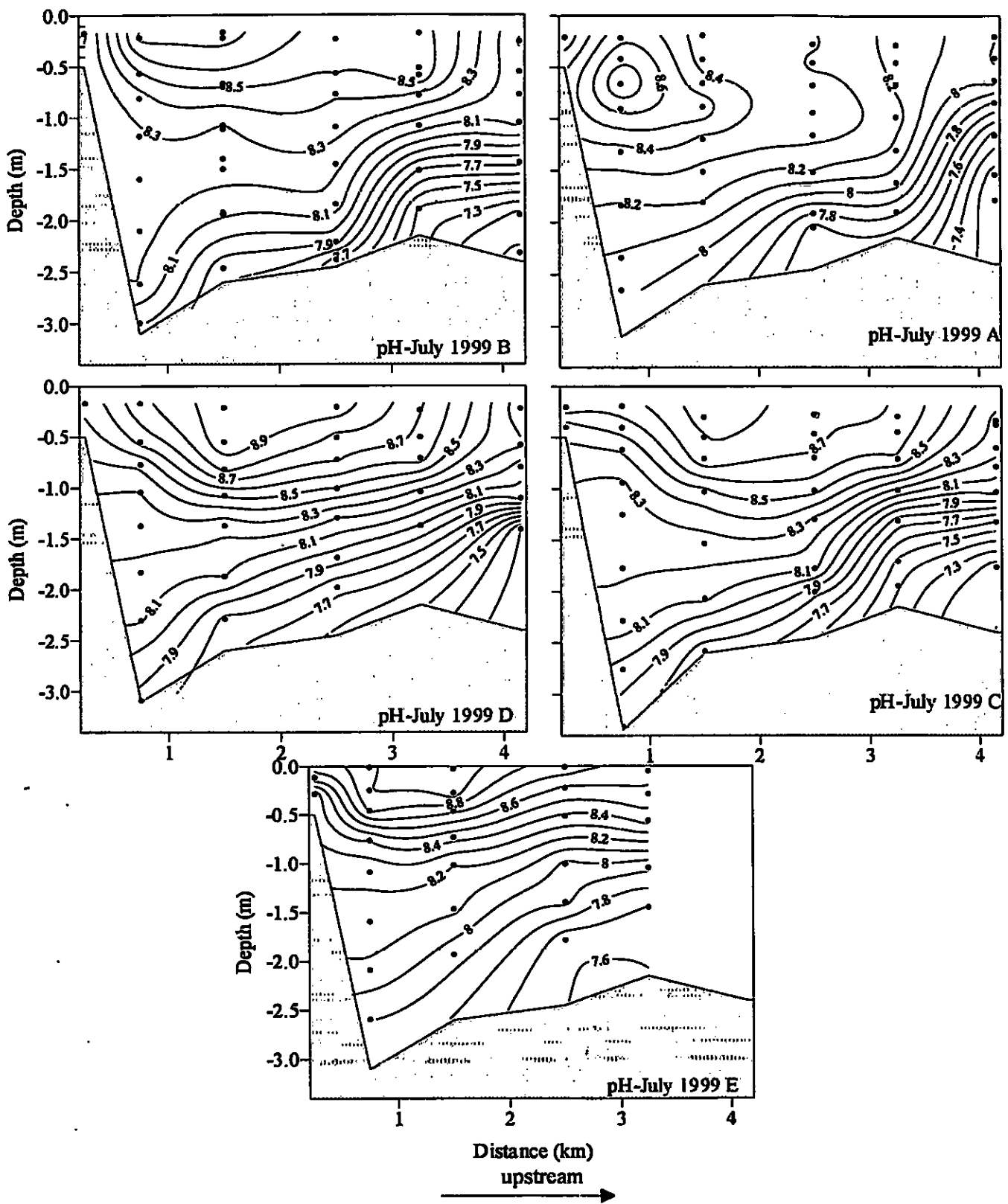


ציור 6 המשך: רווית חמצן למשך מחזור גאות ושפל.

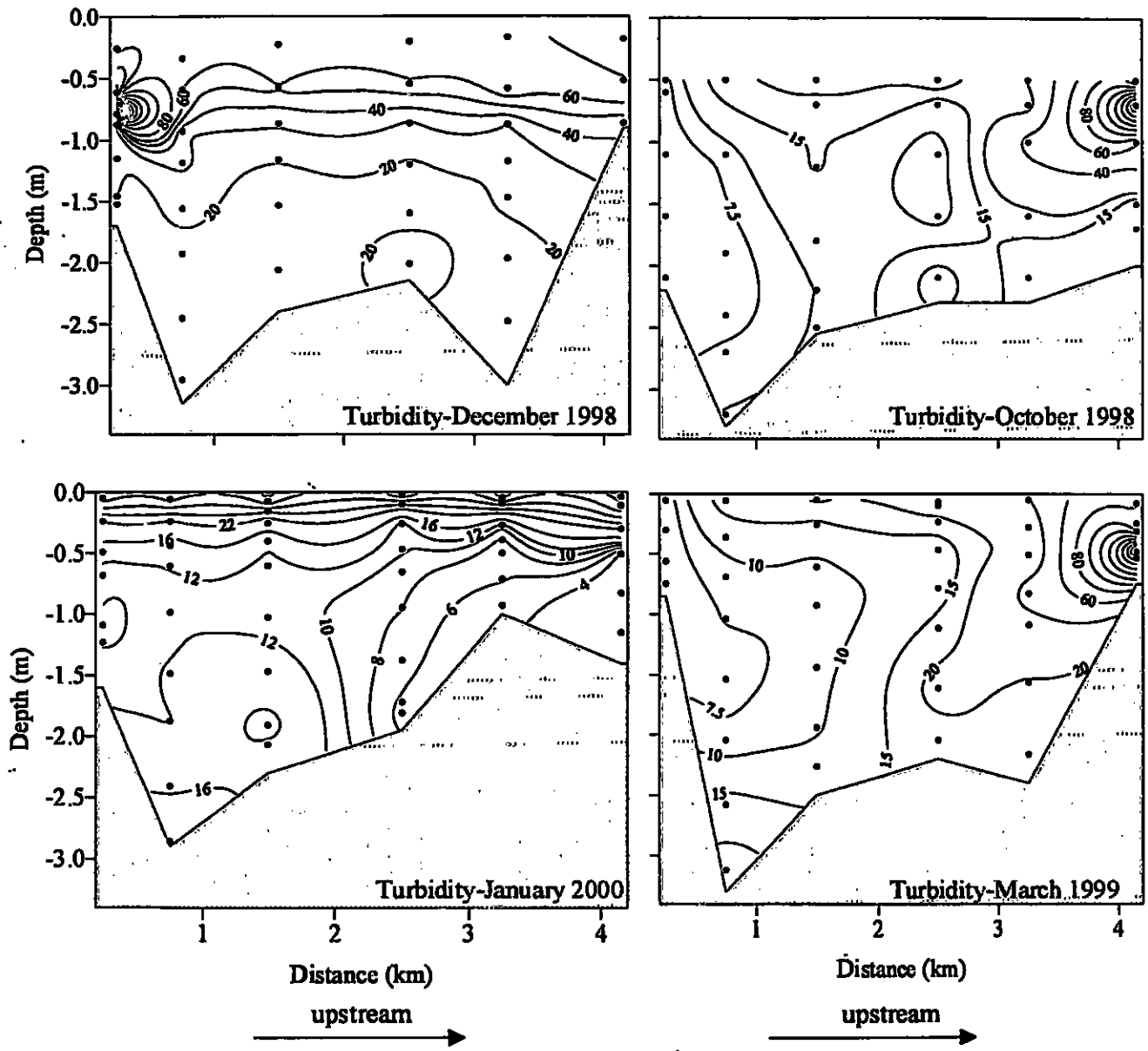




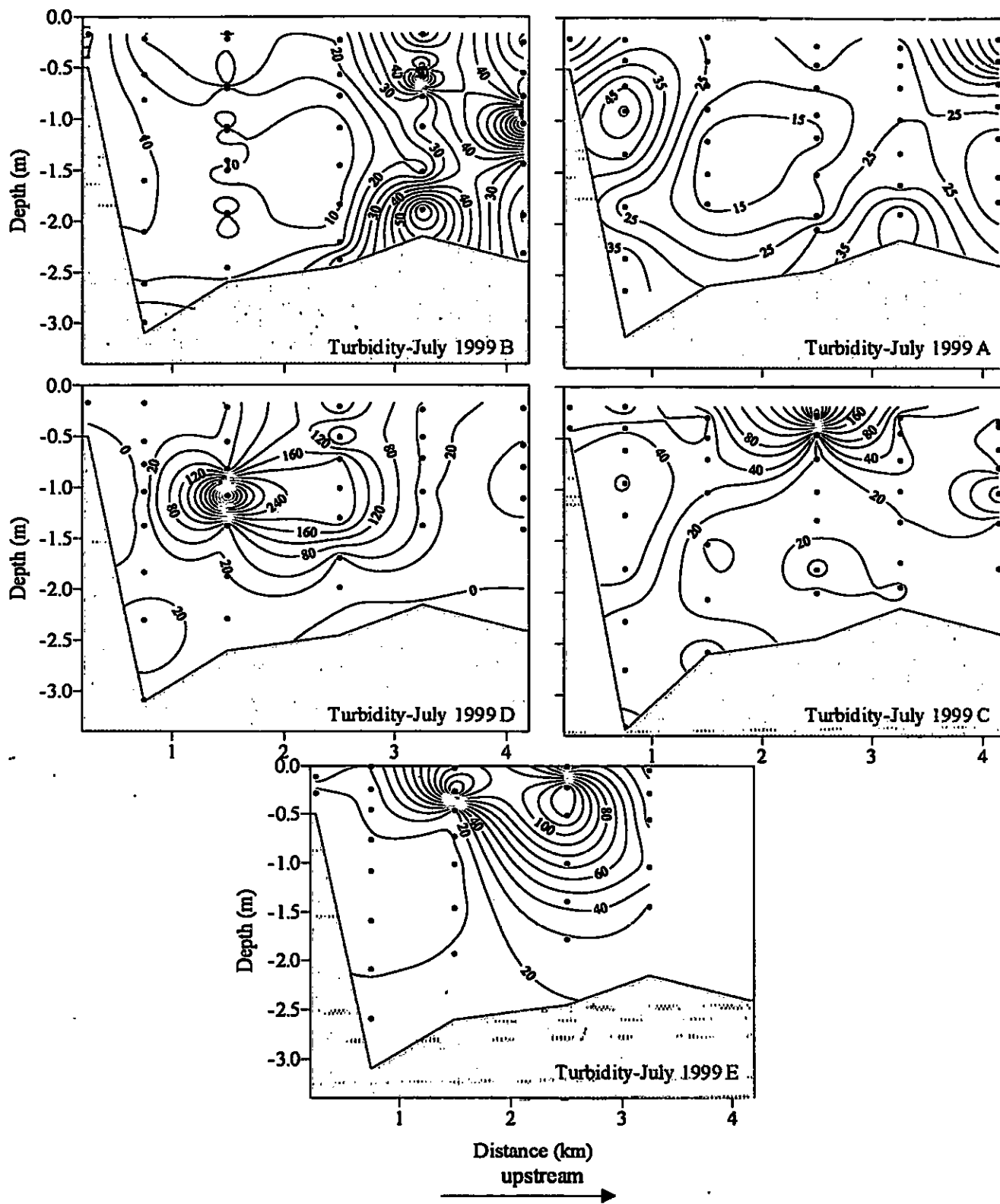
ציור 7. חתכי עומק של ערכי הגבה (pH) בחמישה דיגומים בחלקו המלוח של נחל הירקון. עיגולים שחורים מסמנים נקודות המדידה.



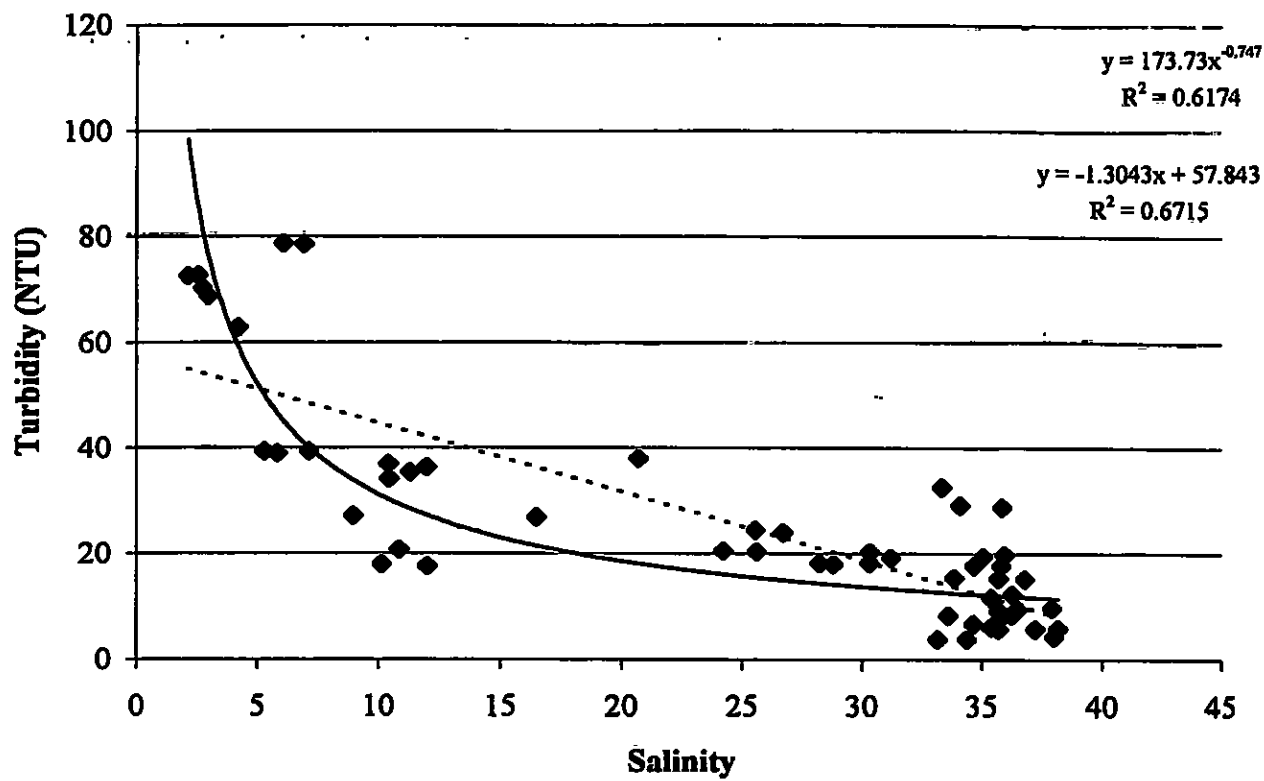
ציר 7 המשך: ערכי הגבה למשך מחזור גאות ושפל.



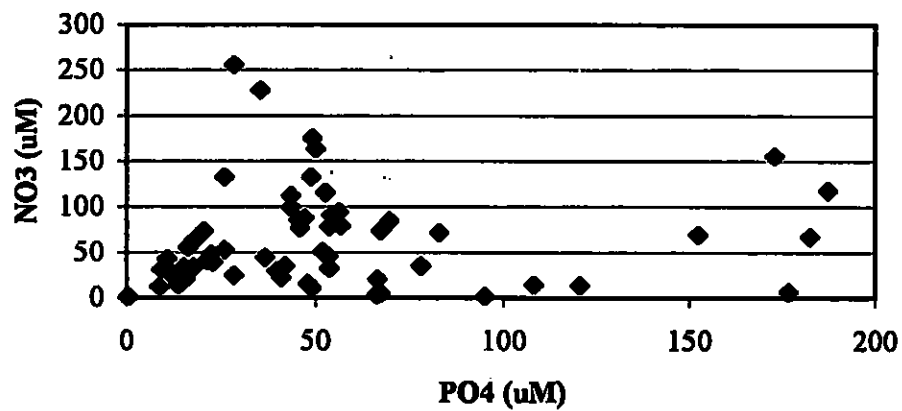
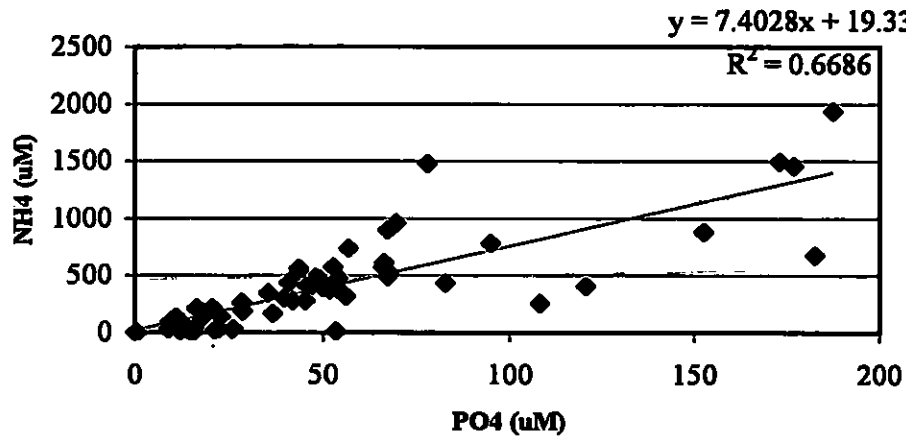
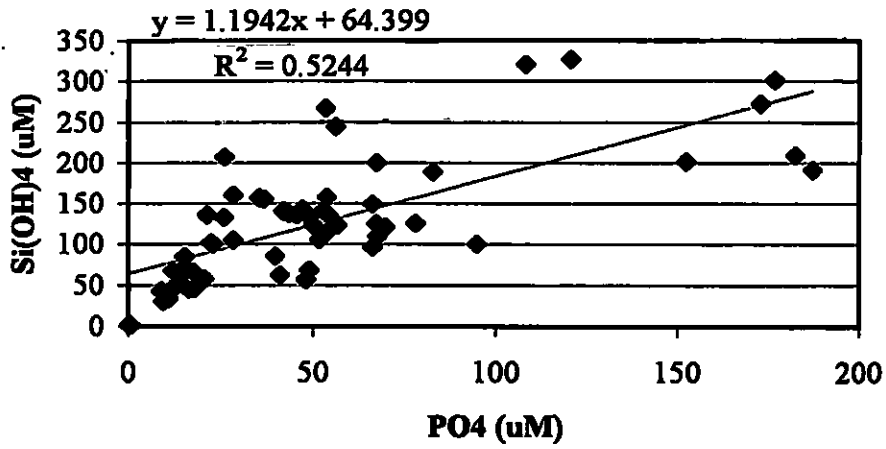
ציור 8. חתכי עומק של עכירות המים (NTU) בחמישה דיגומים בחלקו המלוח של נחל הירקון.  
 עיגולים שחורים מסמנים נקודות המדידה.



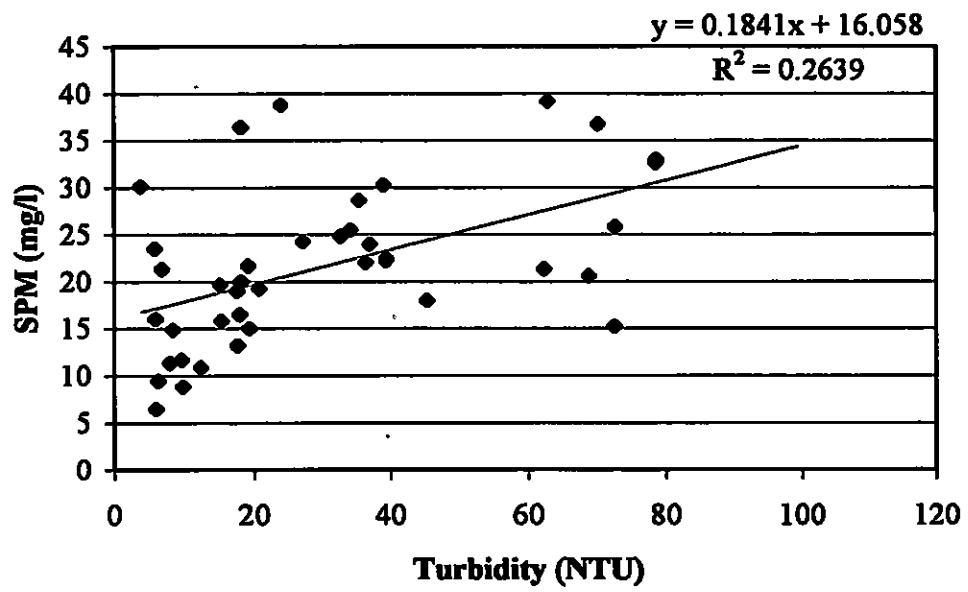
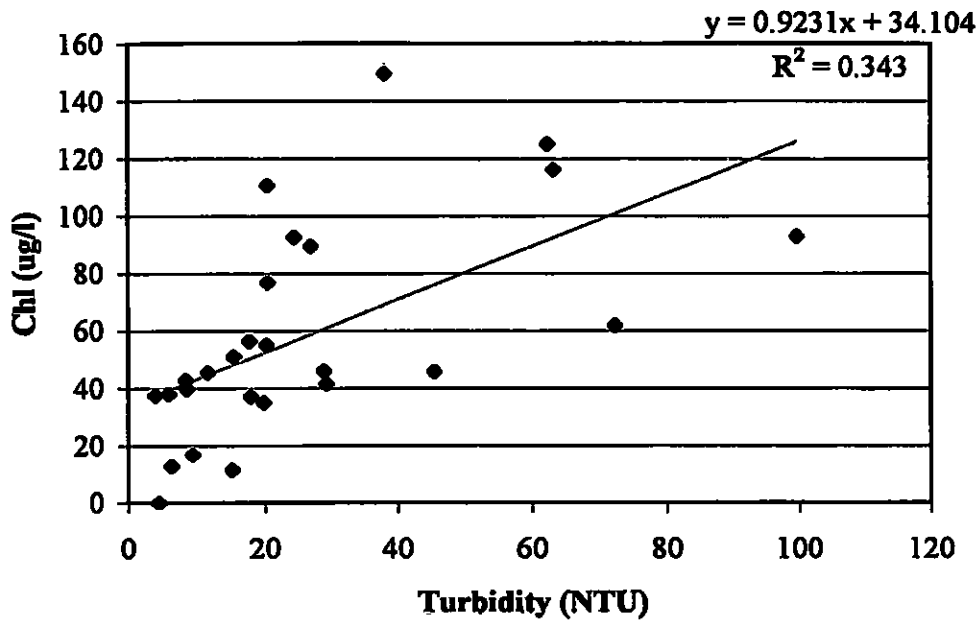
ציור 8 המשך: עכירות למשך מחזור גאות ושפל.



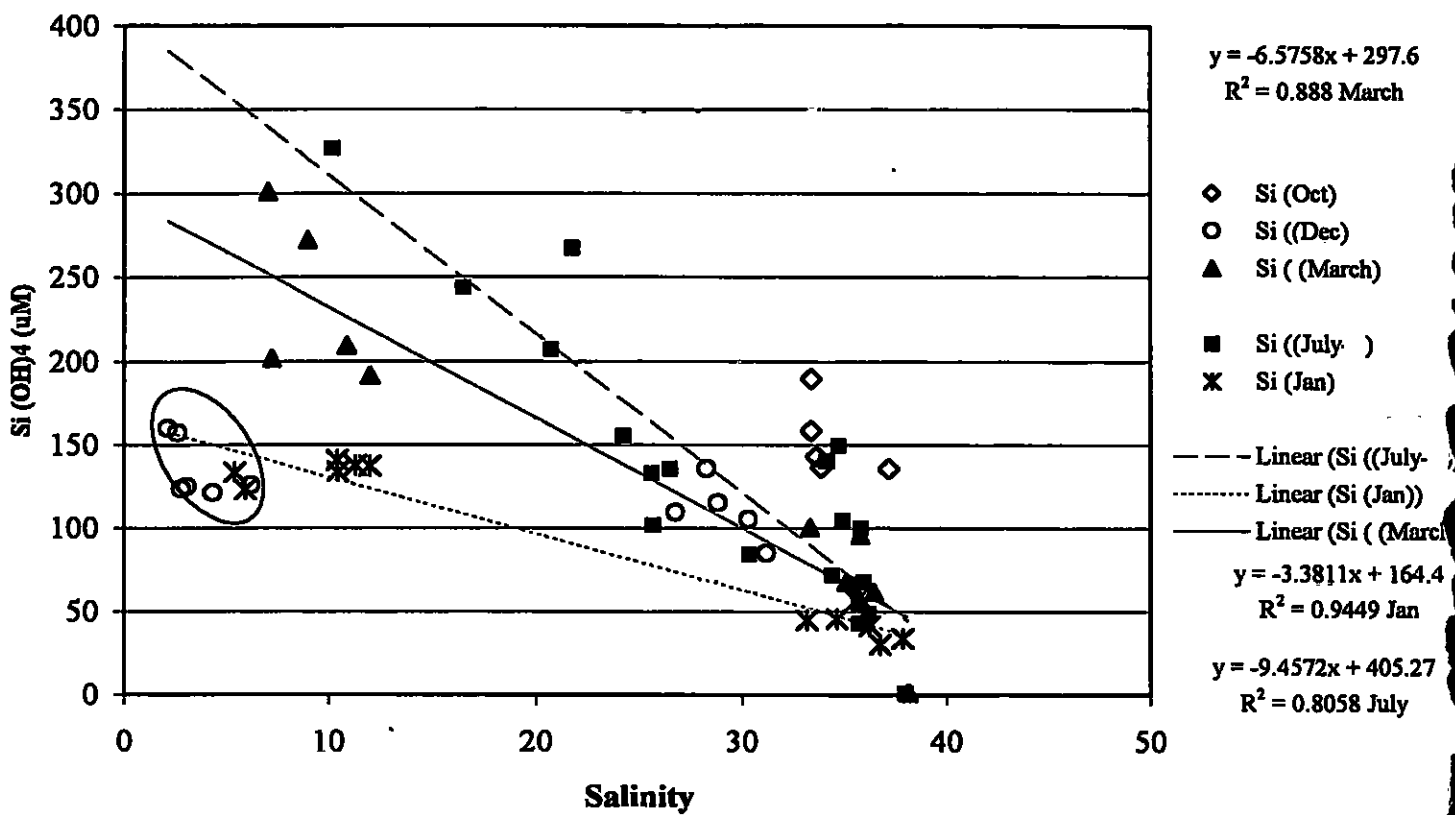
ציור 9 : תלות העכירות במליחות המים בכל הדיגומים בירקון המלוח.



ציור 10: תלות חומצה סיליצית, אמוניום וניטראט בפוספאט במימי הירקון המלוח בחמישה דיגומים.

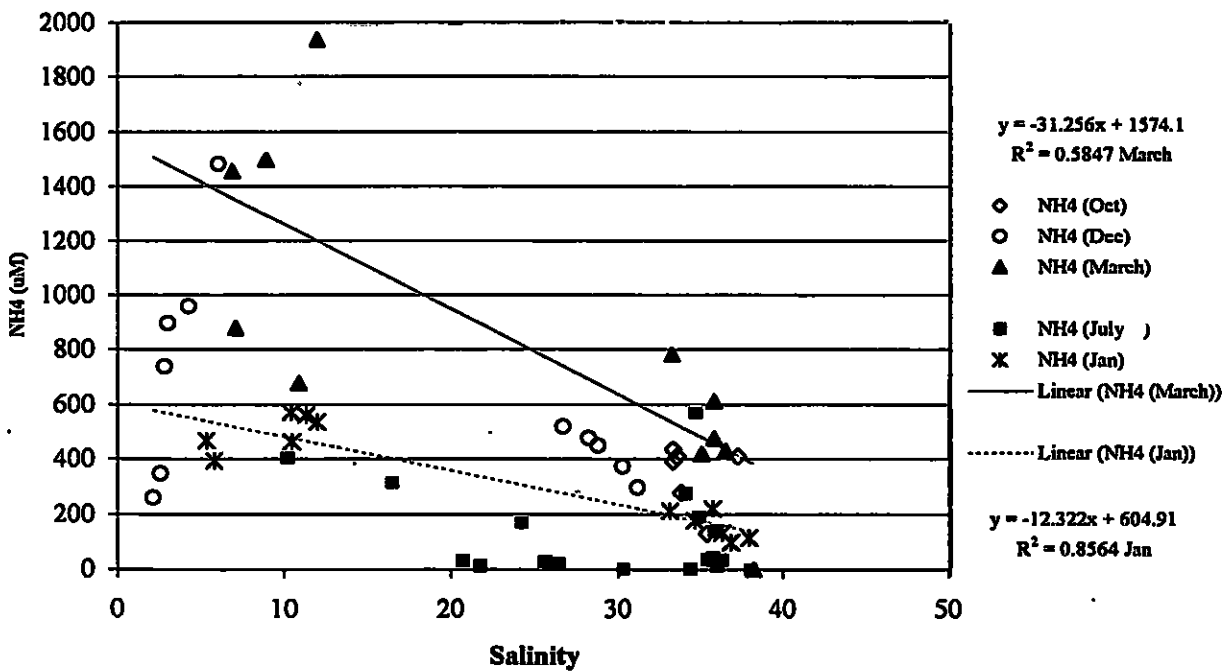
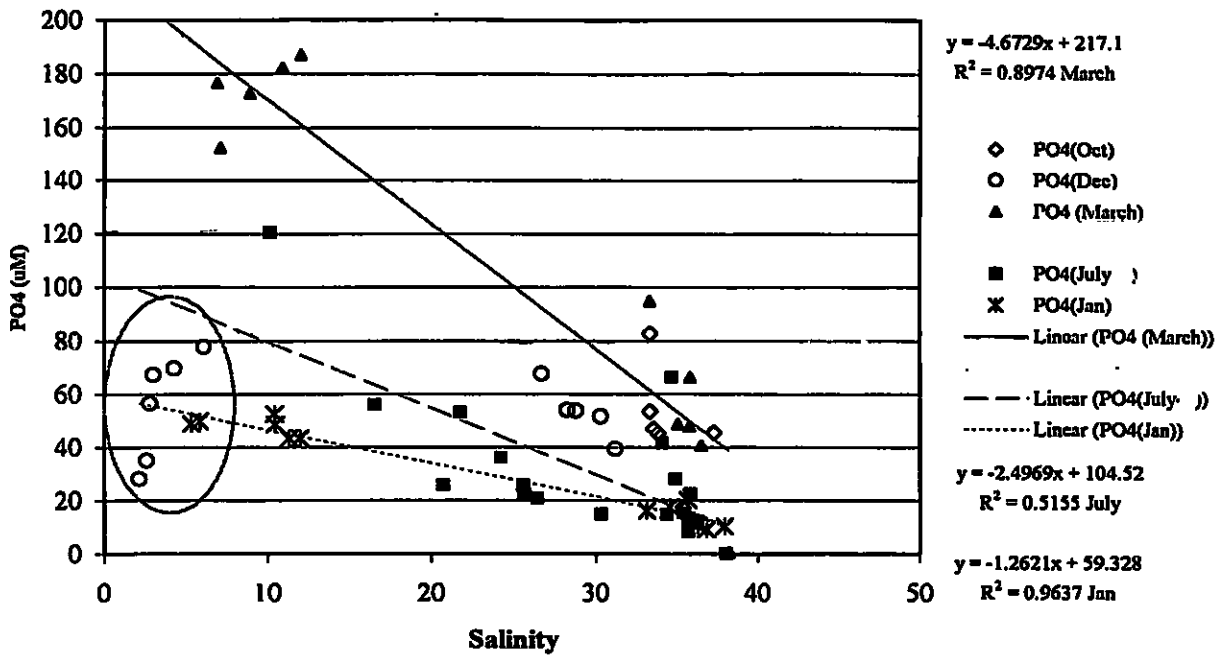


ציור 11: תלות כלורופיל בעכירות המים בדיגומי קיץ ושל חומר מרחף בעכירות המים בדיגומי חורף.

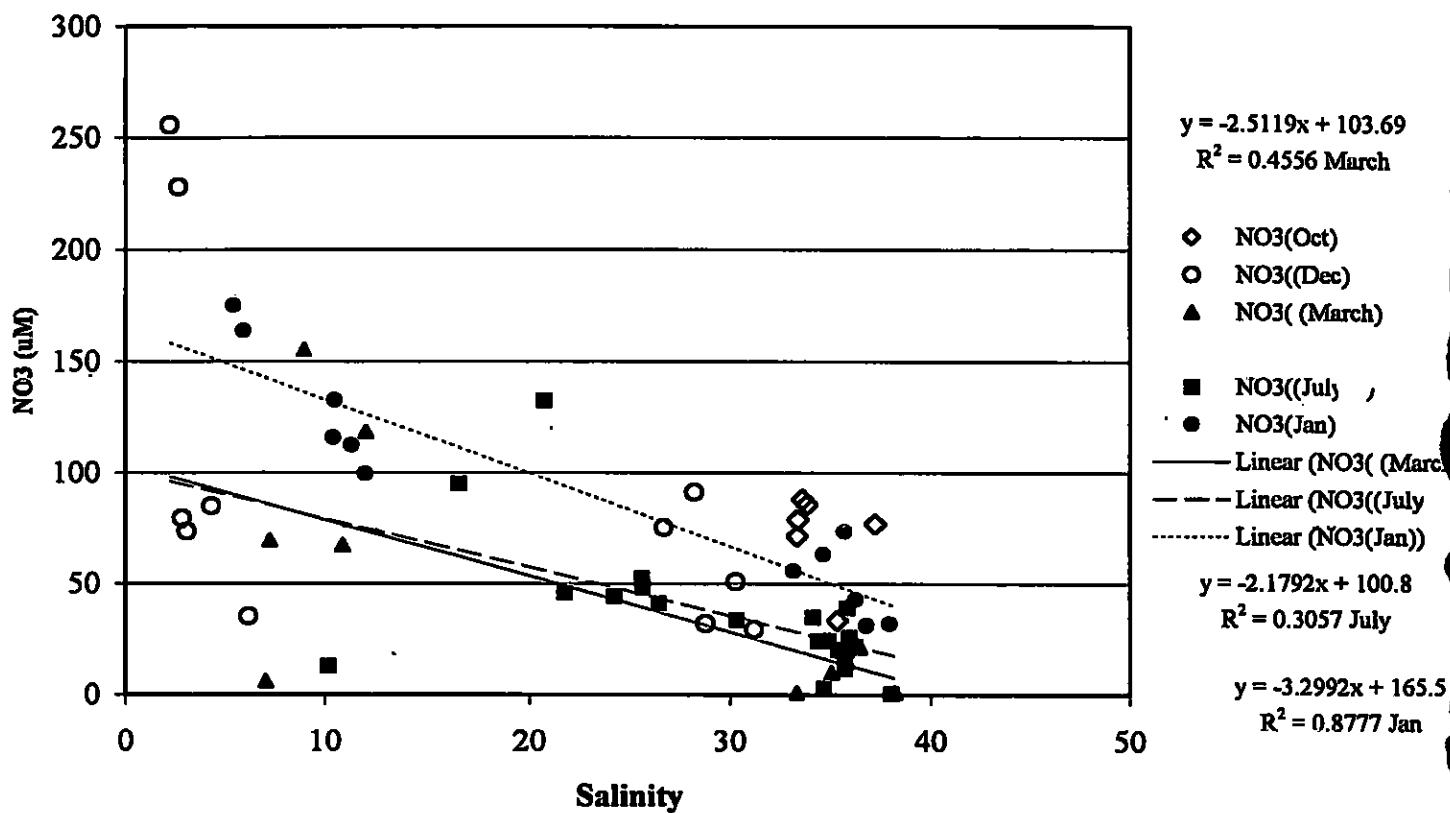


ציר 12 : תלות חומצה סיליצית במליחות המים בדיגומים השונים בירקון המלוח.

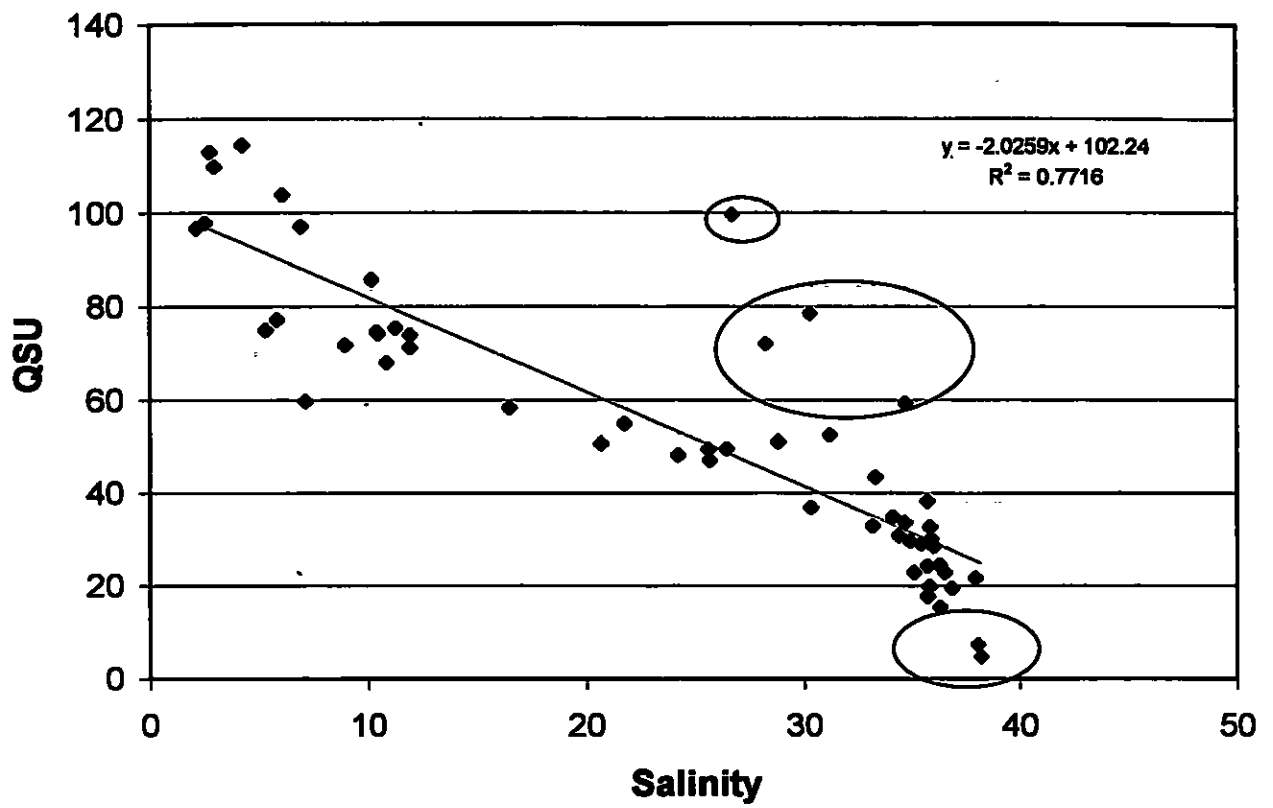




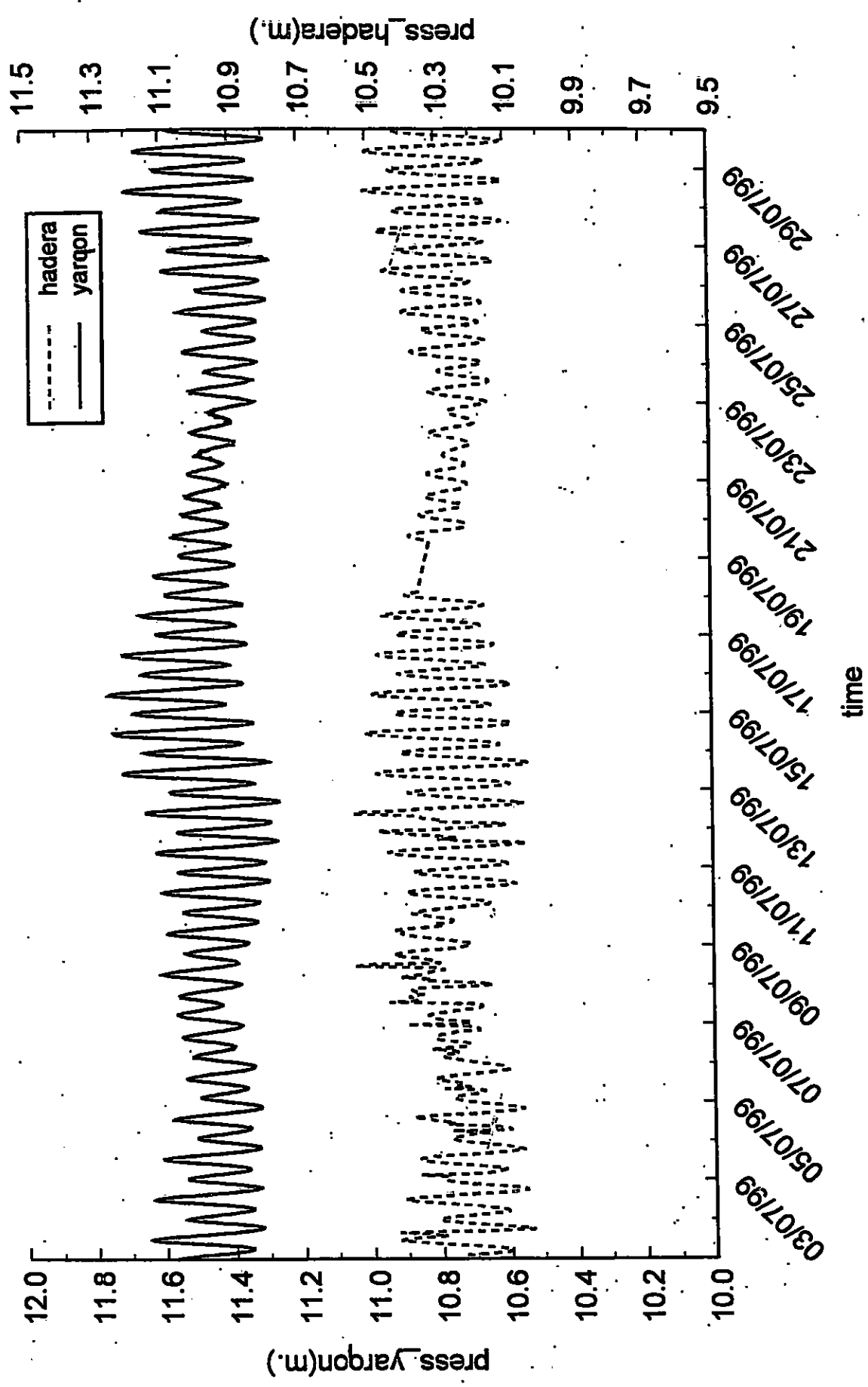
ציור 13 : תלות פוספאט ואמוניום במליחות המים בדיגומים השונים בירקון המלוח.



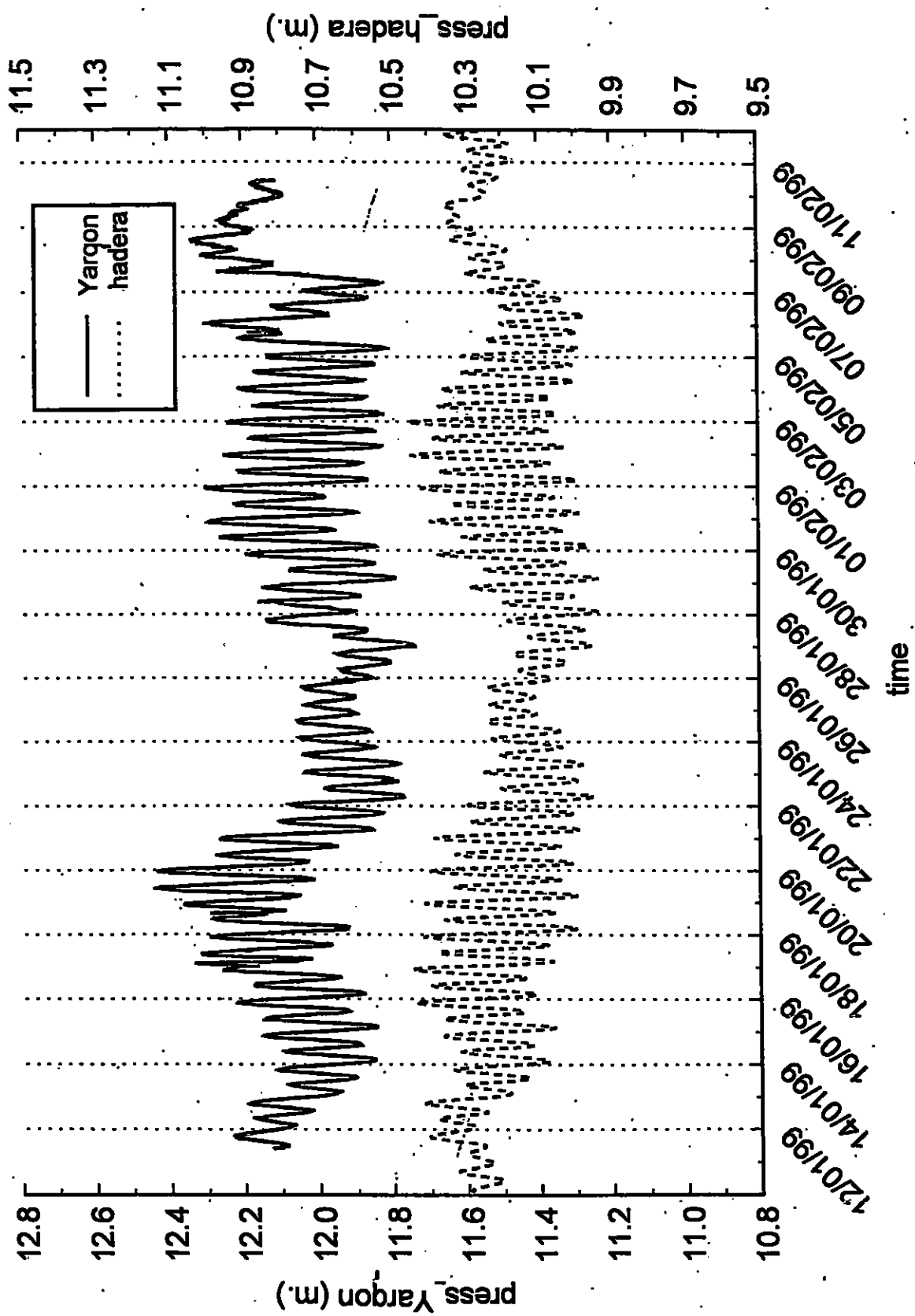
צורך 14 : תלות ניטראט במליחות המים בדיגומים השונים בירקון המלוח.



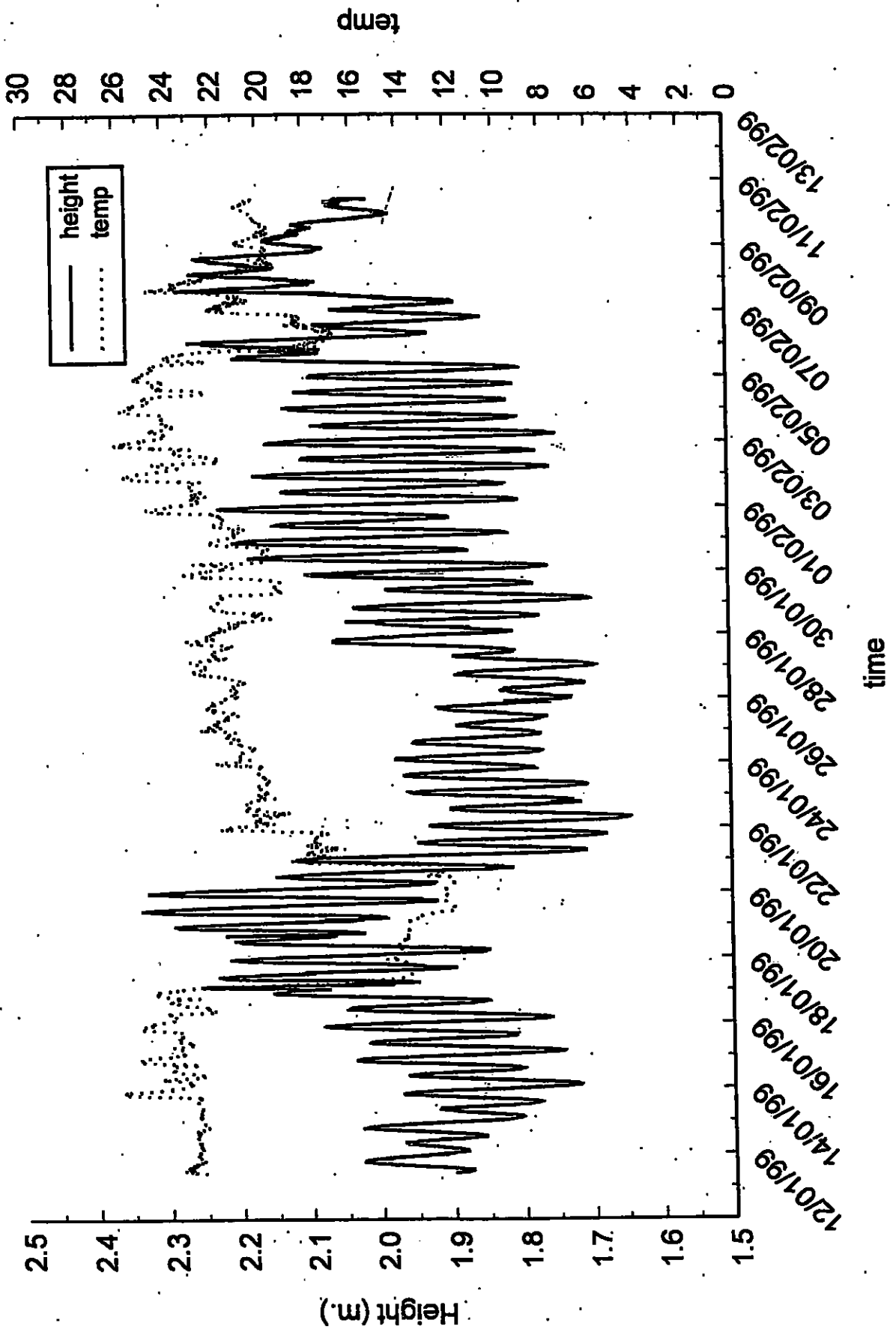
ציור 15 : תלות חומר אורגני מומס במליחות המים בכל הדיגומים בירקון המלוח.  
 ערכים מוקפים הוזנחו בחישוב

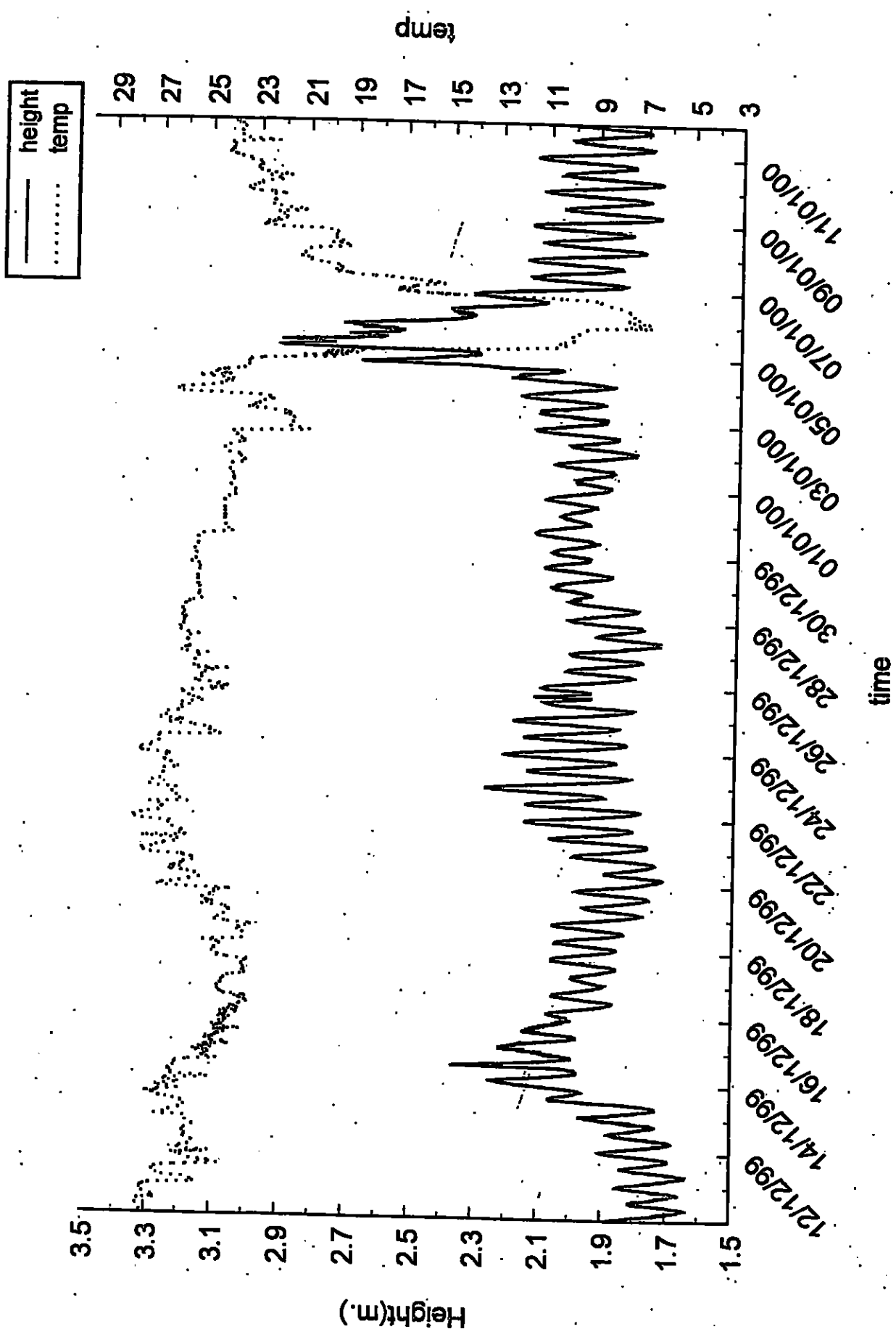


צור 16 : השוואה בין הלחץ שנמדד באופן רציף במד הלחץ בגשר רוקח לבין זה הנמדד בתחנה במוקד הפתח של חדרה בתודע יולי 1999

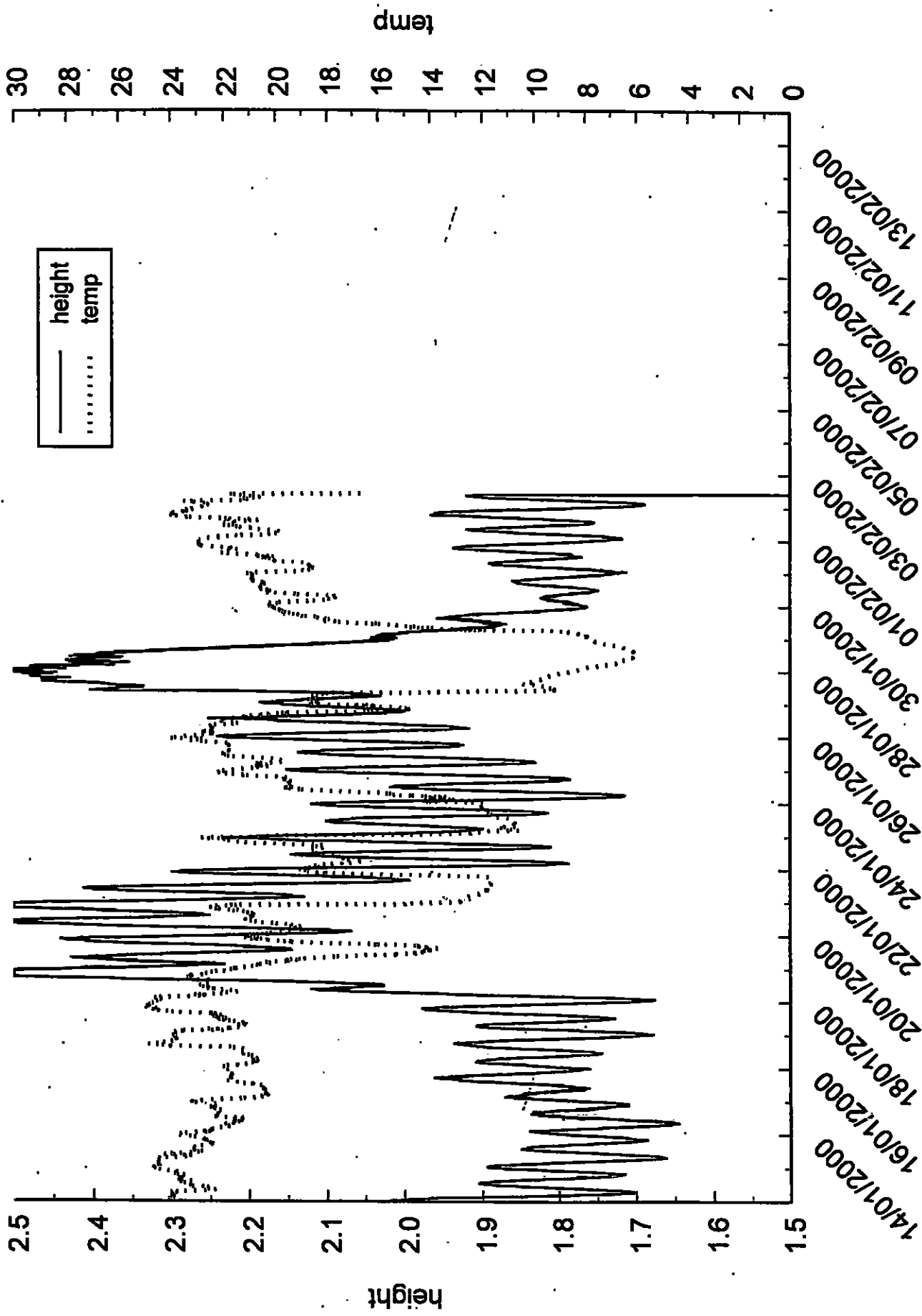


ציר 17 : השוואה בין הלחץ שנמדד באגון רמת השרון לבין הלחץ שנמדד באגון חדרה

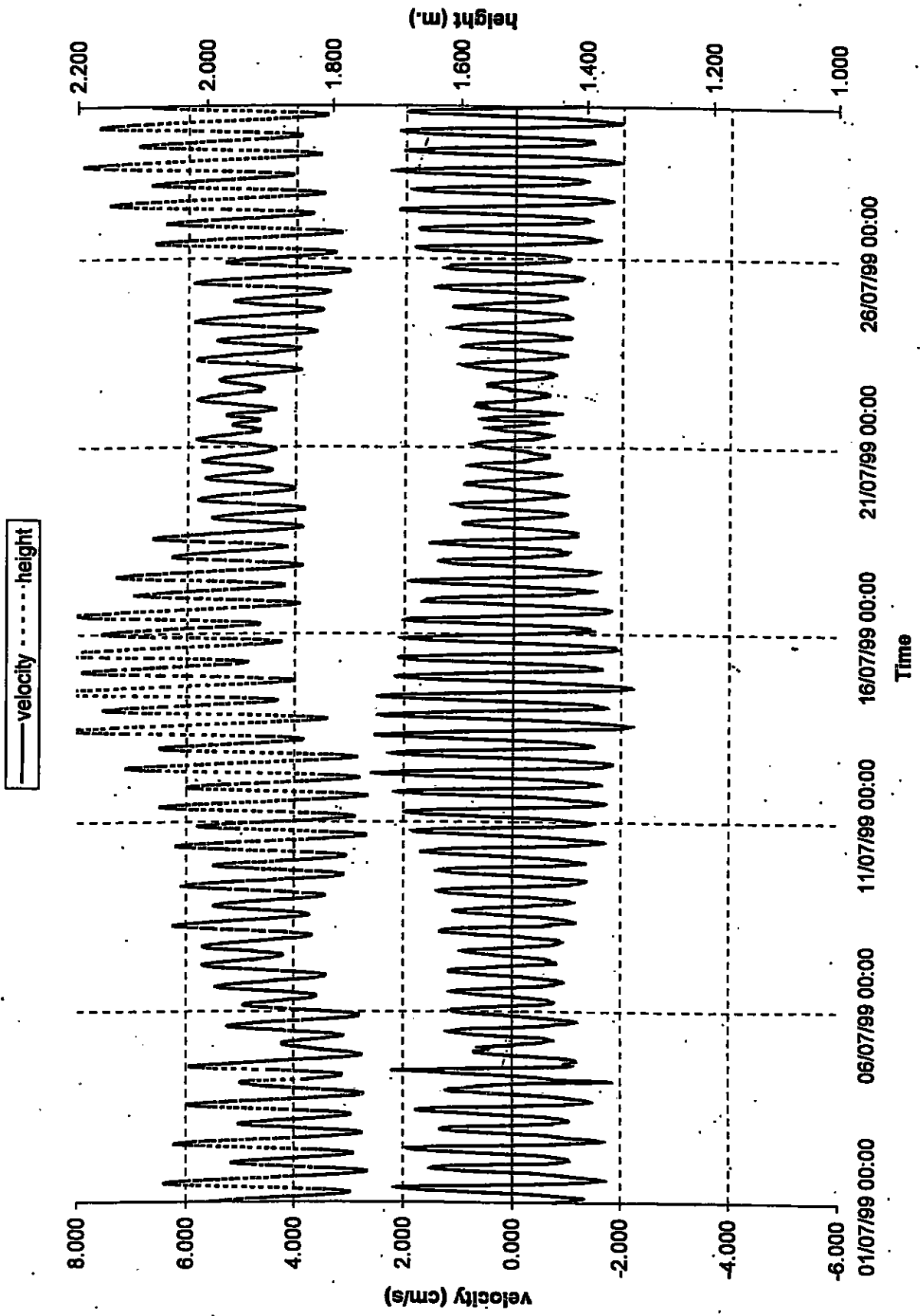




צויר 19 : גובה מפלס וטמפרטורות המים כפי שנמדדו באופן רציף במז הלחץ בגשר רוקח בעת שיטפון בוחל ב- 7-5 בינואר 2000.

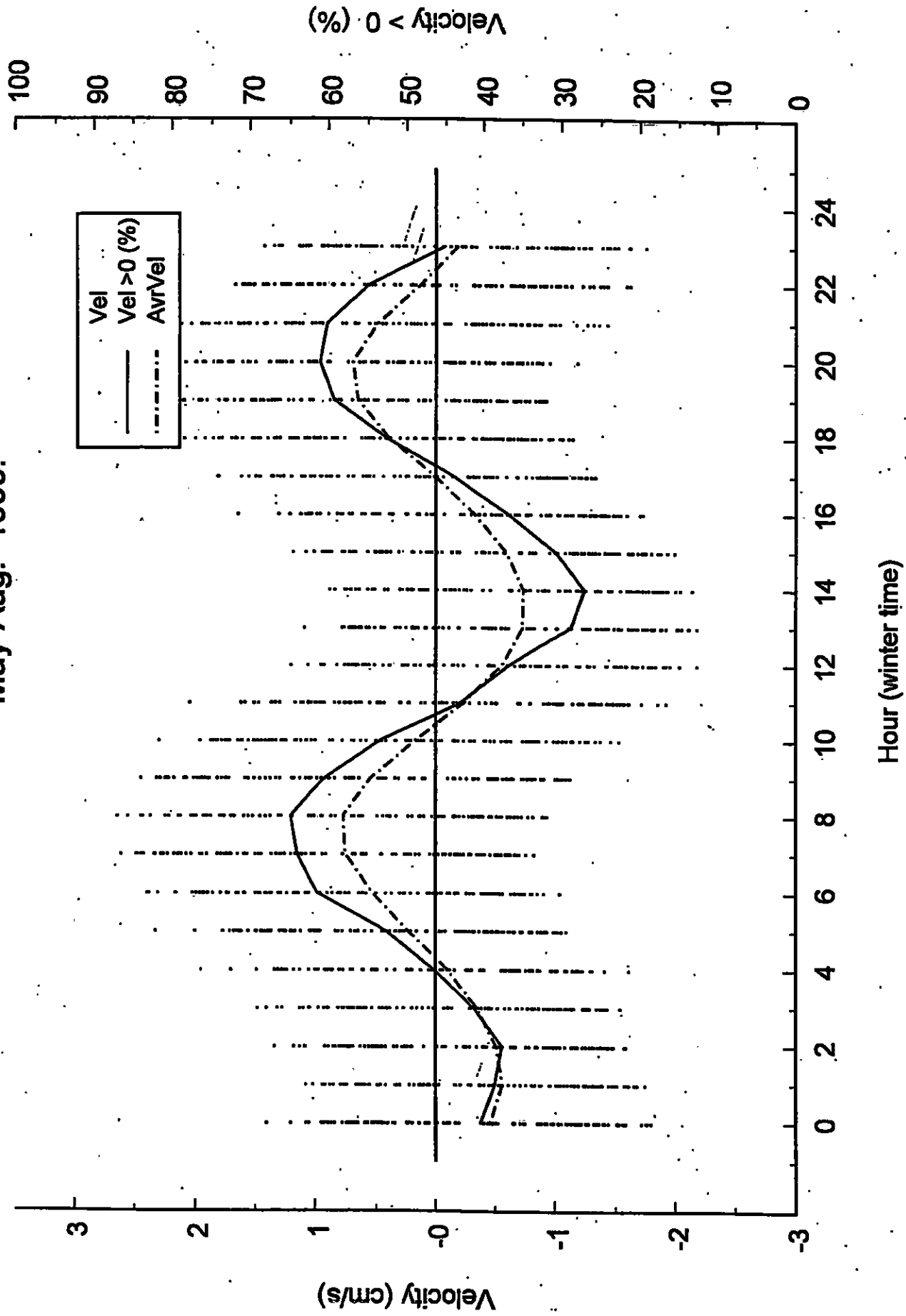




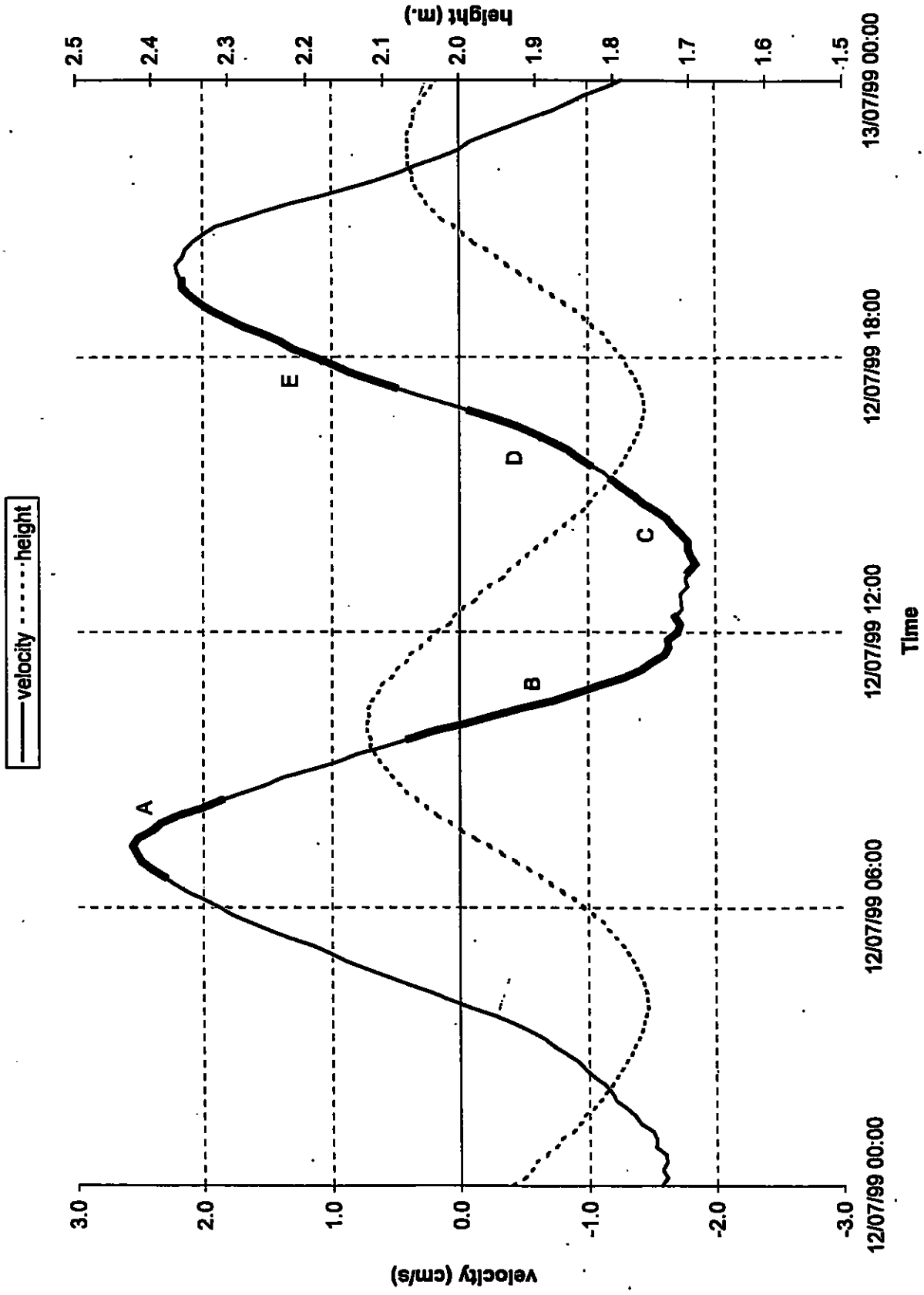


ציר 21: גובה מפלס המים וסדרת זמן של הורמים הממוצעים המתושבים לחונך בגשר רוקח בעונת הקיץ.

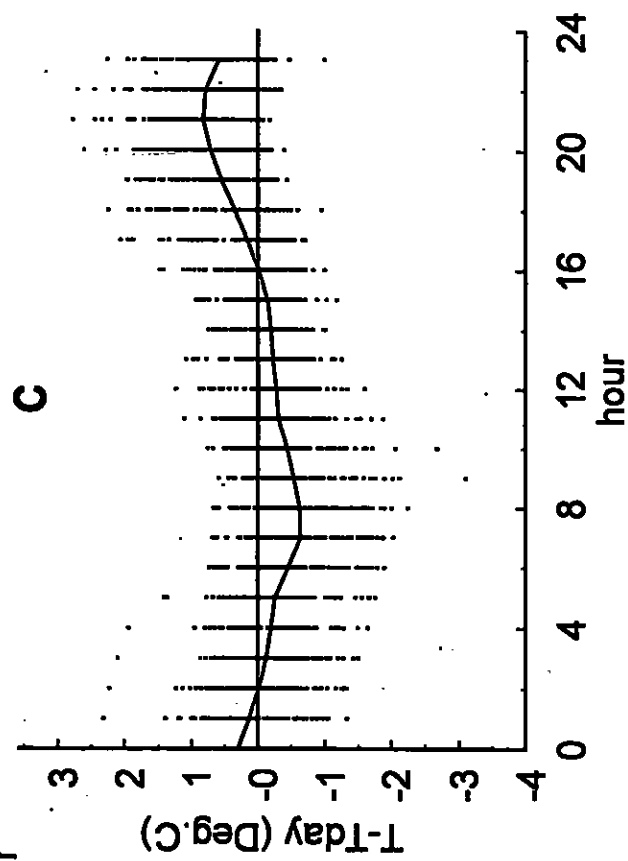
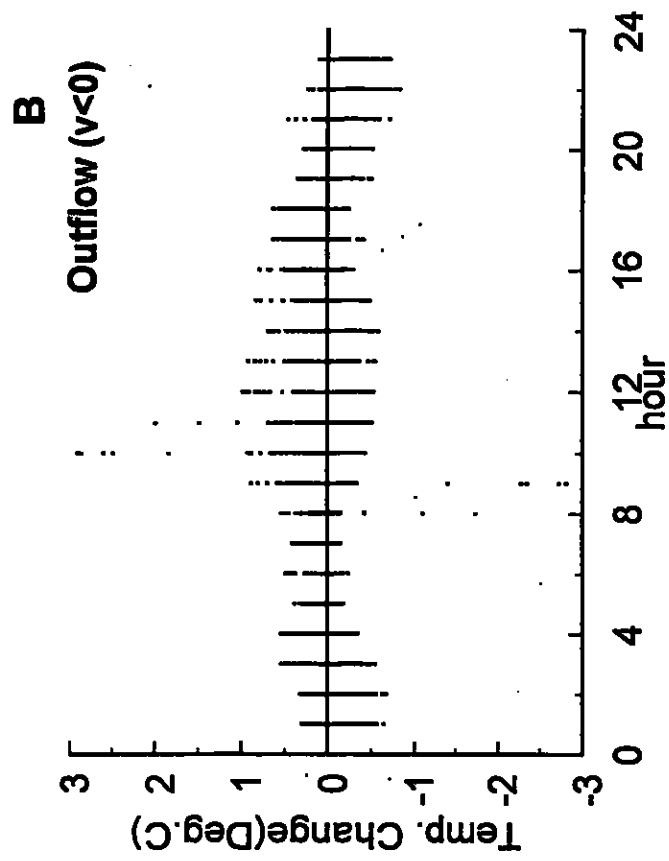
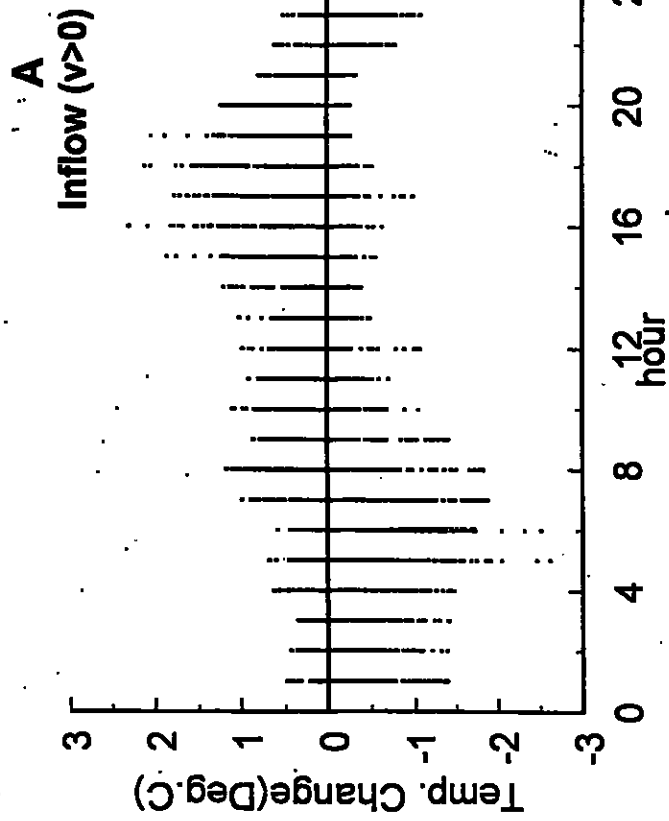
May-Aug. 1999.



צור 22: פרסות זרמים ויל פני שעות היממה בחודשים מאי עד אוגוסט.



ציר 23: גובה מפלס המים ומהירות זרימה מנושבת במחלק דיגום לאורך מרחב אורך גובה מפלס המים (1999)



צורך: 24 מאפיינים של טמפרטורות המים כפי שנמדדו במד הלחץ בשור הקרח בין מאי לאוגוסט 1999. A- שיעורים שעותיים כפונקציה של שעה ביממה במקרים של

נאות, B- שיעורים שעותיים כפונקציה של שעה ביממה במקרים של שעות של שפלה, C- טמפרטורה ב