



## מדידות רציפות של זרימה ואיכות מים בירקון

שי ארנון, מיכאל קוגל, יובל שני, עמיר מיימון, נעם יוגב וצפריר אדר  
מכון צוקרברג לחקר המים, המכונים לחקר המדבר ע"ש י. בלאושיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

### 1. תקציר מנהלים

מדידת איכות המים והערכת מצב הבריאות של נחלים נעשית ברחבי העולם ובארץ כבר מספר עשורים על מנת לספק מידע עבור מקבלי ההחלטות לגבי השימושים שבני האדם עושים במים. לדוגמא, נחל הירקון משמש בעיקר לפעילות פנאי ונופש ואספקת מים להשקיה, שימושים שבהם ישנה השפעה על בריאות הציבור. מדידת איכות מים בנחלים בישראל נעשה ע"י בדיקות חטף (grab sampling) בתדירות נמוכה יחסית (שבועות-חודשים) ולכן הדינמיקה של השתנות איכות המים ברזולוציית זמן גבוהה נותרה עלומה, וקיימת אי ודאות גדולה כמה מייצגות דוגמאות החטף את מצב הנחל. כיוון שנחל הירקון נמצא בסביבה עירונית ומקבל קולחים ממתקני טיפול בשפכים או לעיתים מים באיכות ירודה עקב הזרמת שפכים עקב תקלות או נגר ותשיפים באיכות ירודה, למידע רגעי אין משמעות בהכרח לגבי הערכת מצב הבריאות הכללי בנחל. בנוסף, לא ידוע מה קורה לאיכות המים בנחל בזמן שיטפון ולאחריו ובאיזה קצב מתאושש הנחל מאירועי זרימה או זיהום. על מנת לענות על שאלות אלו ולהשלים את פערי המידע לגבי מצב איכות המים בנחל החל ב 2019 פרויקט שמטרתו העיקרית היא הקמת תחנה למדידת איכות מים באופן רציף בירקון ואיפיון השתנות מצב בריאות הנחל כתגובה לשינויים אופייניים לנחל עירוני באזור אקלים ים תיכוני.

תחנת המדידה מודדת מ 2019 באופן רציף מגוון רחב של פרמטרים נפוצים (מפלס, טמפרטורה, מוליכות חשמלית, ערך הגבה, חמצן ועכירות) ומספר פרמטרים חדשניים (ניטרט, ופחמן דו-חמצני מומס). גם כלורופיל וחומר אורגני נמדדו אך ריבוי תקלות בחיידנים גרמו לנו להחליפם בחדשים ולכן דו"ח זה לא ידון בהם. את הנתונים ניתן לראות בזמן אמת בקישור [www.tinyurl.com/Yarkon-public-view](http://www.tinyurl.com/Yarkon-public-view) והם ניתנים לגישה דרך אתר רשות נחל הירקון.

התחנה מהווה מוקד ייחודי של מידע שמסייע בהבנת תהליכים בירקון ובנחלים במקומות אחרים בארץ ובעולם. עקב ייחודה, התחנה גם מהווה מקור ידע לשיטות של ניטור רציף ואף המשרד להגנת הסביבה הביע עניין בשימוש בידע שנצבר בירקון להרחבת השימוש בניטור הרציף בנחלים. העניין במחקר בירקון גבר באופן משמעותי לאחר הפרסום של מאמר משותף לאנשי רשות נחל הירקון ואוניברסיטת בן-גוריון בנגב בעיתון אקולוגיה וסביבה (ארנון וחובריו, 2021). התחנה בירקון היא חלק משמעותי מרשת עולמית של תחנות ניטור רציף, ובין הבודדות שנמצאות באזור אקלים ים תיכוני (<https://data.streampulse.org/sitelist>).

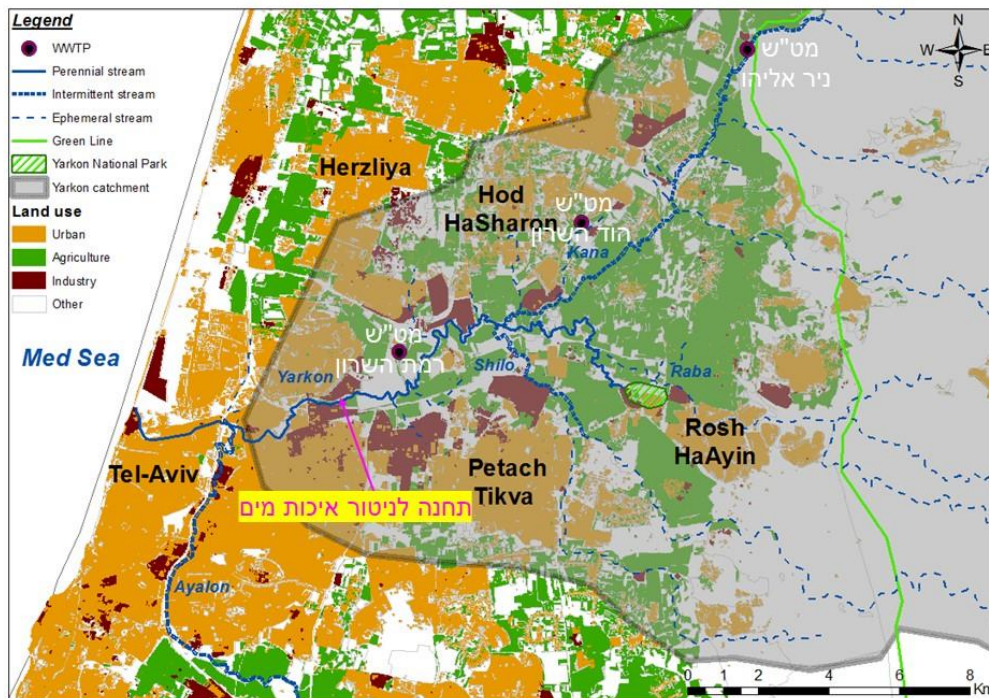
דו"ח זה מציג את הנתונים שנמדדו עד כה, ניתוח ראשוני של הנתונים, ותיאור של דפוסים עיקריים של דינמיקת איכות המים בנחל בסקלות זמן שונות (יום-שנה) תוך דגש על ממצאים מדעיים ויישומים שהתגלו במהלך המחקר.

סיכום הממצאים העיקריים:

- הנתונים הרציפים אפשרו לנו לאבחן דליפות משמעותיות של ביוב, וקצבי שיקום של הנחל מאירועי זיהום או שיקום לאחר צניחת ריכוזי חמצן בעקבות שיטפון ראשון של החורף. נמצא כי הירקון באזור תחנת הניטור מושפע רק מאירועים קיצוניים ספורים במהלך השנה, ומשתקם יחסית מהר לאחר תום האירוע (בד"כ כעבור 24-48 שעות). אנו ממליצים להתקין תחנות ייעודיות ומערכת בקרה לכל האגן כך שאיתור דליפות מזהמים ממקורות פוטנציאליים במעלה האגן יהיה מהיר ויאפשר תגובה יעילה להגבלת אירועי זיהום (פרק 3.1).
  - נבדקה האפשרות לסיוע בשיקום הנחל בזמן אירוע זיהום על ידי הזרמה מים שפירים אך נמצא כי שיטה זו אינה יעילה (פרק 3.1).
  - המדידות הרציפות אפשרו כימות של איכות המים בנחל לאורך כל השנה ונמצא כי הנחל נמצא בעקת חמצן במשך זמן מצטבר משמעותי. לדוגמא: 50% מהזמן הכולל בחורף ריכוז החמצן נמוך מ- 2.9 מג"ל ו ב-25% מהזמן הכולל בקיץ ריכוז החמצן נמוך מ- 2.1 מג"ל (פרק 3.2).
  - נמצא כי קיימים הבדלים בריכוזי פרמטרים של איכות מים שנמדדו בקיץ לעומת החורף (בזמן זרימת הבסיס), אך ברוב המקרים הבדלים אלו היו קטנים יחסית ומבחינת תפקוד הנחל הם אינם משמעותיים (פרקים 3.2 ו-3.3).
  - בזמן שיטפון ישנה עליה בערכי עכירות ובריכוז החמצן אך ריכוזי שאר הפרמטרים יורד עקב מיהול (פרק 3.2).
  - נבדקו קורלציות בין כל הפרמטרים הנמדדים על ידי החיישנים. ניתן להשתמש בקשרים בין הפרמטרים למגוון של שימושים. לדוגמא: על פי המתאם ניתן לחשב מה הספיקות הדרושות להעלאת ריכוז החמצן במים בערך מסוים לדוגמא, על מנת להעלות את ריכוז החמצן הממוצע ב 1 מג"ל נדרשת ספיקה של לפחות פי שלוש יותר מהספיקה כיום. בנוסף, נמצא קשר בין מוליכות חשמלית לניטרט אשר יכול לאפשר כימות של שטפי הניטרט בתחנות אחרות שיוקמו בעתיד בירקון. לקשר מסוג זה ישנה חשיבות רבה עקב העלות הגבוהה של חיישן ניטרט (פרק 3.4).
  - על פי אנליזה סטטיסטית של כלל הנתונים שנמדדו בנחל בזמן ספיקת הבסיס, נמצא כי הסיכוי שתוצאת דיגום חטף בודדת עבור חמצן, מוליכות חשמלית או-pH תהיה בטווח של  $\pm 25\%$  מערך הממוצע האמיתי של המים הוא קטן מ-50%. עבור ניטרט המצב היה חמור יותר ורק כ-25% מהדוגמאות חטף היו בטווח של  $\pm 25\%$  מערך הממוצע האמיתי של המים (פרק 3.3, תרשים 9).
  - חושבו פרמטרים מטבוליים המאפיינים את הנחל (טביעת אצבע מטבולית). נמצא כי תהליכי הנשימה בנחל גבוהים באופן משמעותי מהיצרנות הראשונית. הנשימה בחורף גבוהה מעט מזו שבקיץ, אך ערכי היצרנות הראשונית בחורף נמוכים במידה ניכרת מאלו שבקיץ. טביעת אצבע מטבולית זו מאפשרת בחינה של תפקוד אקולוגי של הנחל בזמן עקה או כתגובה לפעולות שיקום (פרק 3.5).
  - כיווני המחקר העתידיים הם: בחינת של קשרים מורכבים בין מספר פרמטרים (multivariate analysis), בחינת מתאם בין פרמטרים שנמדדו על ידי החיישנים ונוטריינטים שנמדדו בדוגמאות חטף על מנת לבחון את האשרות להגדיל את במידע שהמערכת מספקת (ללא התקנת חיישנים נוספים). בנוסף, אנו מתכננים לבחון מהם הגורמים המשפיעים על טביעת האצבע המטבולית והאם ניתן להשתמש בשיטה זו לכימות תהליכי שיקום בנחל.
- לסיכום, דו"ח זה מהווה סיכום ראשוני של ממצאי העבודה לאחר ניטור רציף במשך שנתיים וחצי. סיכום מקיף יותר של המידע יושלם עד אוקטובר 2022 במסגרת עבודת המסטר של צפריר אדר. אנו רואים חשיבות מחקרית ויישומית גבוהה בהמשך תחזוקת תחנת הניטור וניתוח הממצאים לאורך שנים רבות על מנת שניתן יהיה לאפיין השתנות רב שנתית ומעקב אחרי השפעתן של פעולות שיקום. **אנו ממליצים להרחיב את מערך הניטור כך שיכלול תחנות נוספות להתראת דליפות זיהום קרוב למקורות, ולאורך נחל הירקון כך שניתן יהיה לעקוב בזמן אמת אחר אירועים בנחל ולפעול במהירות לשיקום ושיפור המצב האקולוגי.**

## 2. הקמה ותפעול של התחנה לניטור רציף של איכות מים בירקון

תכנון ובניית תחנת הניטור ארך כשנה עקב המורכבות הגדולה בשילוב של חיישנים ייחודיים, ולאור השיטפונות העזים שמתרחשים בנחל ושחייבו תכנון מערכת הגנה פיזית לחיישנים במים. היה צורך גם להרחיק את מערכת האגירה ושידור הנתונים אל מעבר/מעל לפשט ההצפה. התכנון המפורט התבסס על ידע מקומי מכיוון שלא הצלחנו לאתר תחנות בעלות אופי דומה בארץ ובעולם. התחנה ממוקמת בסמוך לגשר הולכי הרגל לכיוון בני ברק (תרשים 1), כמאה מטר מזרחית לתחנת מדידת הספיקה של השירות ההידרולוגי ושל רשות ניקוז ירקון. מיקום התחנה נקבע במשותף עם רשות נחל הירקון כשהרעיון היה לנטר את דינמיקת איכות המים שנכנסת לאזור העירוני של תל-אביב ומשקפת את כלל ההשפעות ממעלה האגן (נגר עירוני וחקלאי וכניסות של מתקני טיפול בשפכים). מבנה התחנה כולל צינור הגנה על החיישנים בתוך המים, תא ביקורת לטיפול וכיול החיישנים צמוד לגדת הנחל, וארון להגנת אוגר הנתונים והמערכת הסולרית שמזינה את החיישנים (תרשים 2). צינור המגן של החיישנים נטוי לכיוון מורד הזרימה, מקובע ע"י שישה עמודי מתכת הנוצצים לעומק של 2 מטר ומחוברים כיחידה אחת (תרשים 3). קצה הצינור בו ישוה החיישנים בזמן המדידה הוא כשלושה מטר מהגדה ובעומק של כחצי מטר (עומק הנחל בתנאי זרימת הבסיס בנקודת המדידה הוא כמטר).



תרשים 1. מפה של שימושי קרקע באגן, ומיקום תחנת הניטור לאיכות מים בירקון.



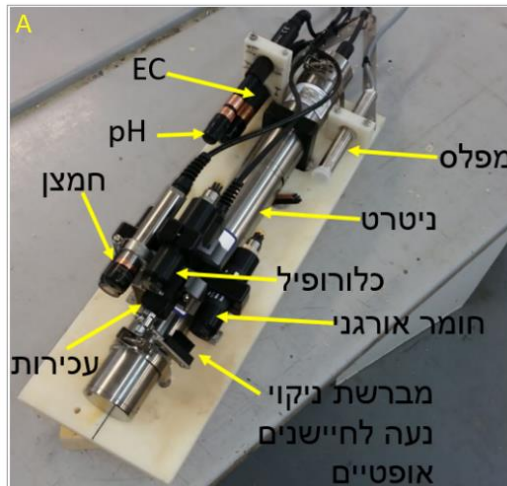
**תרשים 3.** מבט כללי על הצינור המגן בזמן ההתקנה



מערכת שליטה ואספקת מתח

**תרשים 2.** מבט כללי על התחנה מגשר הולכי הרגל לכיוון בני ברק. תוואי הצינור שמופיע בתרשים 3 מסומן כקו מקווקו

בחירת סוג החיישנים התבסס על איכותם ויכולתם לבצע מדידות רציפות במינימום תקלות. הפרמטרים שנבחרו למדידה מכסים את כל המדדים הדרושים להערכת איכות מים בנחלים, וקיימים לגביהם חיישנים ברמת אמינות גבוהה. והפרמטרים שנבחרו הם: מפלס מים, טמפרטורה, מוליכות חשמלית (EC), ערך הגבה (pH), חמצן, עכירות, ניטרט, כלורופיל, חומר אורגני (cDOM), CO<sub>2</sub>, וארבעה חיישני קרינת שמש שהותקנו בתוך ומחוץ למים בסביבה של התחנה. בחירת החיישנים הסתמכה על ניסיון אישי וניסיון של עמיתי מחקר מרחבי העולם. מארז החיישנים הותקן בתוך צינור המגן המוצג בתרשים 3 על גבי מגלש המאפשר הוצאה לצורך טיפול שוטף (תרשים 4).



**תרשים 4.** מארז חיישנים ומתקני ניקוי (A). החיישנים מחוברים למגלש אשר ניתן לשליפה דרך תא הביקורת (ראה תרשים 2) לצורך ניקוי וכיול. לאחר אירועי שיטפון חזקים במיוחד ישנה היעדרות של בוץ על גבי מערכת הניטור אולם ניתן לראות כי מערכות הניקוי שומרות על החיישנים נקיים והמדידות נמשכות גם בזמן שבו הסדימנטים נעים בנחל. בתרשים B מסומנים על ידי חיצים הערמות של בוץ לאחר שיטפון שבו עלה המפלס, ופני החיישנים מייד לאחר הוצאת המערכת מהנחל (ללא ניקוי ידני).

במהלך העבודה נמצא כי לא כל החיישנים מודדים באופן יציב ועומדים בקריטריונים המחמירים הדרושים לתפקוד ומדידה בתנאים קשים כמו אלו השוררים בירקון. את חיישני קרינת השמש, החלפנו לאחר כמה חודשים בחיישן אחד באיכות גבוהה יותר אשר מותקן בסמוך לפנל הסולרי של התחנה. החיישנים של חברת TURNER שמוודים עכירות, כלורופיל ו-cDOM לא עבדו בצורה טובה וסבלו מהפרעות רבות. את חיישן העכירות החלפנו לאחר כשנה בחיישן של חברת PONSEL. את חיישני הכלורופיל ה-cDOM ניסינו לתקן מספר פעמים אך לדעתנו איכות התוצאות אינה משביעה רצון. לאחרונה רכשנו חיישנים חליפיים לכלורופיל ו-cDOM של חברת Trios והם יותקנו בירקון במהלך אביב 2022. במהלך המחקר פותחו פרוטוקולים לתפעול התחנה ונצבר ידע רב לגבי תפעול תחנה מסוג זה. נמצא כי מומלץ לבצע ביקור לצורך ניקוי וכיול החיישנים אחת לשלושה עד ארבעה שבועות. זמן ארוך יותר עשוי לגרום לתקלות ופגיעה באיכות התוצאות. בזמן שיטפונות מומלץ לבוא לניקוי אחת לשבועיים (או לאחר השיטפון) למרות שלחיישנים ישנה מערכת ניקוי אוטומטית. מעקב אחר נתוני זמן אמת נעשה באופן יומיומי על דרך תוכנת Konect ([www.tinyurl.com/Yarkon-public-view](http://www.tinyurl.com/Yarkon-public-view)). גרסה פשוטה יותר של הצגת התוצאות בזמן אמת מוגשת דרך אתר רשות נחל הירקון. מהלך של ביקור אופייני בתחנה כולל השוואה בין מדידות בלתי תלויות של מכשירים ניידים (EC, pH, חמצן, טמפרטורה, מפלס ועכירות) לחיישני המערכת. בנוסף, דוגמאות נדגמות לאנליזה במעבדה לצורך השוואה לפרמטרים בהם לא ניתן לבצע בדיקה בשדה (לדוגמא, נוטריינטים, כימיה כללית וכלורופיל). כיולים מתבצעים כאשר מתגלה סטייה בקריאות החיישן או לפי הוראות היצרן (כל חיישן על פי הדרישות שלו כפי שמפורט בנספח 1). נתוני הספיקה בעבודה זו מבוססים על כיול בין מדידות חיישן מפלס המים ומדידת ספיקה בעזרת מכשיר Acoustic doppler current profiler (ADCP). ההתאמה המדויקת ביותר נעשית על ידי שימוש בשתי משוואות שונות המתארות את הקשר בין המפלס מעל החיישן, L (מטר) לבין הספיקה, Q (מטר מעוקב לשנה, מק"ש).

$$Q = L^{1.53} \times 10^{0.993} \quad \text{for } L < 0.5 \text{ [מטר]}$$

$$Q = L^{2.61} \times 10^{1.2} \quad \text{for } L > 0.5 \text{ [מטר]}$$

הכיול הישיר נעשה עד למפלס מקסימלי של 0.77 מטר מעל למפלס ספיקת הבסיס (שווה ערך לספיקה של כ-8 מק"ש) וזאת על מנת לא לסכן את המכשיר בספיקות גבוהות.

### 3. תוצאות

#### **3.1 סדרות זמן של ספיקה, טמפרטורה ופרמטרים של איכות מים בירקון**

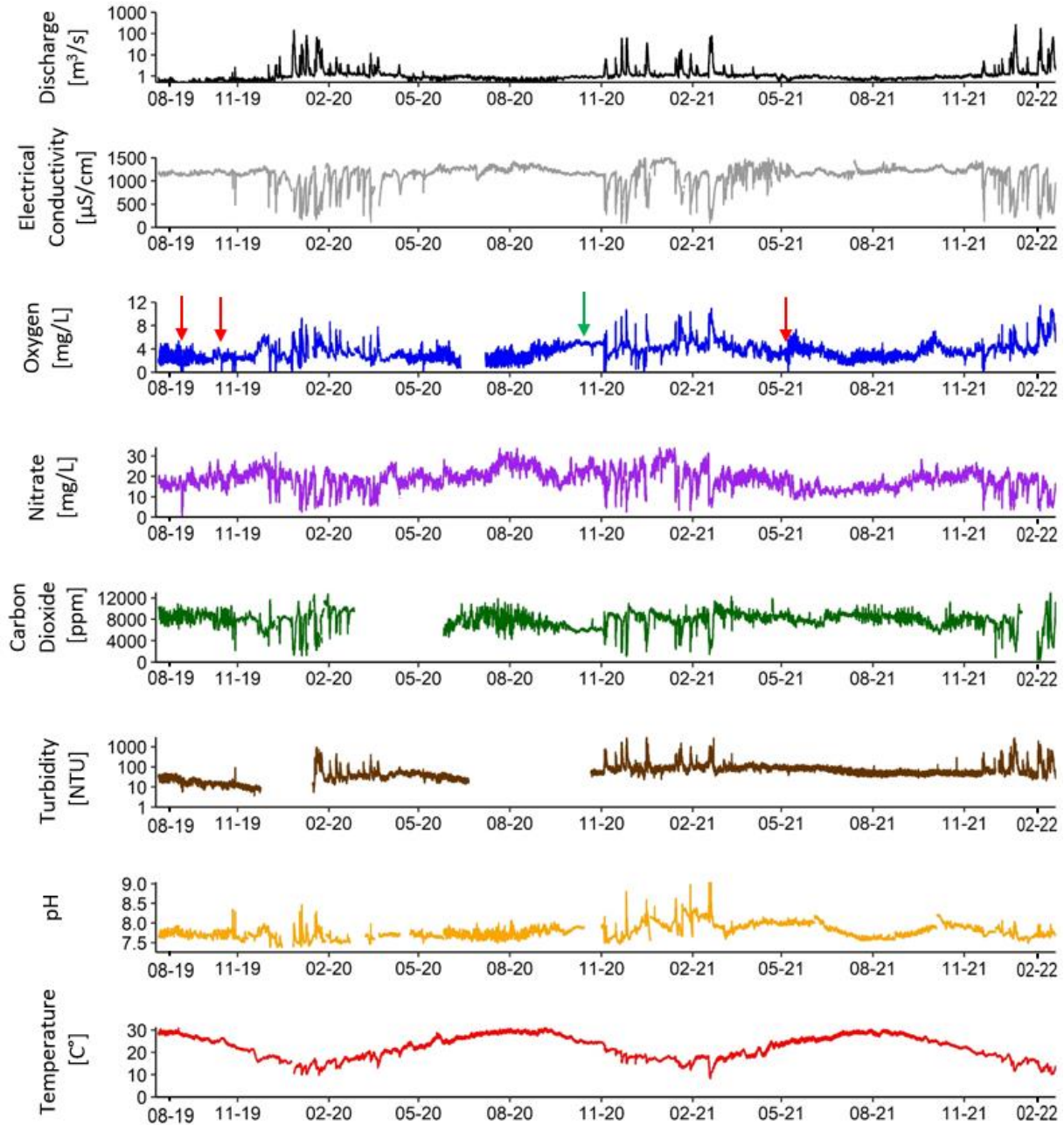
כל נתוני המדידות מהחיישנים החל מאוגוסט 2019 עד סוף ינואר 2022 מופיעים בתרשים 5. נתוני הספיקה בנחל מוצגים על סקלה לוגריתמית על מנת שיהיה ניתן לבחון תנודות גם בספיקות הבסיס. תוצאות המדידה מדגישות את הבדלי העונתיות (קיץ וחורף) הבולטים בעיקר בספיקה ובטמפרטורה. ניכר שגם שבמהלך חודשי הקיץ ספיקת הבסיס משתנה בטווח שבין 0.65-1.35 מק"ש כתוצאה משינויים בהזרמת מים שפירים וקולחים לנחל. מדדי איכות המים השונים הגיבו בעצימות שונה ובכיווניות שונה בהתאם לשינויים בספיקה. ערכי מוליכות חשמלית (EC), ניטרט ( $\text{NO}_3^-$ ) ו- $\text{CO}_2$  ירדו עם העלייה בספיקה בזמן שיטפון, בעיקר כתוצאה ממהיול. לאחר שיטפון, הספיקה וערכי המדדים הכימיים שהוזכרו לעיל חוזרים תוך זמן קצר לערכים שלפני אירוע הזרימה. קצב החזרה תלוי בעוצמתו של השיטפון ופיזור הגשם (מעלה או מורד האגן). גשם שהגיע ממעלה האגן ישפיע לאורך זמן ארוך יותר לעומת גשם מקומי באזור השפלה. ברוב האירועים החזרה לזרימת הבסיס אירעה תוך 24-48 שעות מתום ירידת הגשם. אנו מזהים כי בימים הראשונים לאחר החזרה לתנאי

זרימת הבסיס ישנה עליה בריכוז הניטרט וה- $CO_2$  המעידים על שינויים בפעילות המיקרוביאלית. לאחר מספר ימים נוספים הערכים חוזרים להיות נמוכים יותר (וקרובים לערכים הממוצעים לאותה תקופה). כימות של תופעה הזו, ומשמעותה, יעשה בחודשים הבאים.

בניגוד למדדים שזורדים בזמן שיטפון, ישנה עליה בעכירות כתוצאה משטיפת חרסיות מקרקעות בסביבת הנחל ומהרחפה של הסדימנט בתוך הנחל. דעיכת העכירות לערך שלפני השיטפון אורכת מספר ימים כתוצאה משיקוע פיזיקלי (deposition) של חומר (חרסית, חומר אורגני, ואצות) שנשאר מרחף גם לאחר החזרה לזרימת הבסיס. בנוסף, ניכר שגם ערך ה-pH עולה עם הספיקה אך תגובתו מתונה יחסית ורוב הזמן הוא נמצא בין 7.5 ל-8.5.

השתנות ריכוז החמצן מורכבת יותר משאר הפרמטרים. בדרך כלל הריכוז עולה בזמן שיטפון כתוצאה מכניסה לנחל של מי גשם עשירים בחמצן ותחלופה מהירה יותר של חמצן עם האטמוספירה מכיוון שבזמן שיטפון מהירות הזרימה בנחל מהירה בהשוואה למהירות זרימת הבסיס. ירידה לערכי החמצן שלפני השיטפון אירעה בטווח זמן של שעות לאחר דעיכת הזרימה בנחל וקשורה לפעילות המיקרוביאלית הדומיננטית בנחל. אולם, ישנם מקרים בהם ריכוז החמצן יורד מייד עם התחלת השיטפון. תופעה זו נצפית בעיקר באירועי הזרימה הראשונים של עונת הגשם ונובעים משטיפה של מזהמים שהצטברו על פני השטח במהלך תקופת היובש הארוכה. בנוסף, אירעו מספר מקרים שבהם ירד ריכוז החמצן לערכים נמוכים לאחר דליפות ביוב במעלה (חיצים אדומים בתרשים 5). במספר מקרים אותה דליפת הביוב לאחר שזוהתה ירידה בריכוז החמצן בתחנת הניטור. יכולת ההתראה של תחנת הניטור אף הובילה לתכנון משותף של צוות המחקר ורשות נחל הירקון של רשת ניטור לכל אגן הניקוז, ובתוכה תחנות ייעודיות לאיתור דליפות ביוב.

הנתונים הרציפים מאפשרים להבין גם את קצב התאוששות הנחל מאירועי הזרמה שונים. לדוגמה, בעקבות הזרמת מי תהום מהשפלת מים מאתרי בנייה והזרמת מי שתייה ממערכת המים של חברת מקורות אל הנחל, נערכה בחינה של האפשרות להשתמש בהזרמה יזומה לנטרול אירועי זיהום קיצוניים, כגון זיהום מגשם עונתי ראשון (Peter et al., 2020). הבדיקה בעזרת החיישנים מצאה שהזרמה בהיקפים סבירים לא גרמה לשינויים משמעותיים בריכוזי החומרים השונים, ונמצאה כלא יעילה (חץ ירוק בגרף החמצן בתרשים 5).

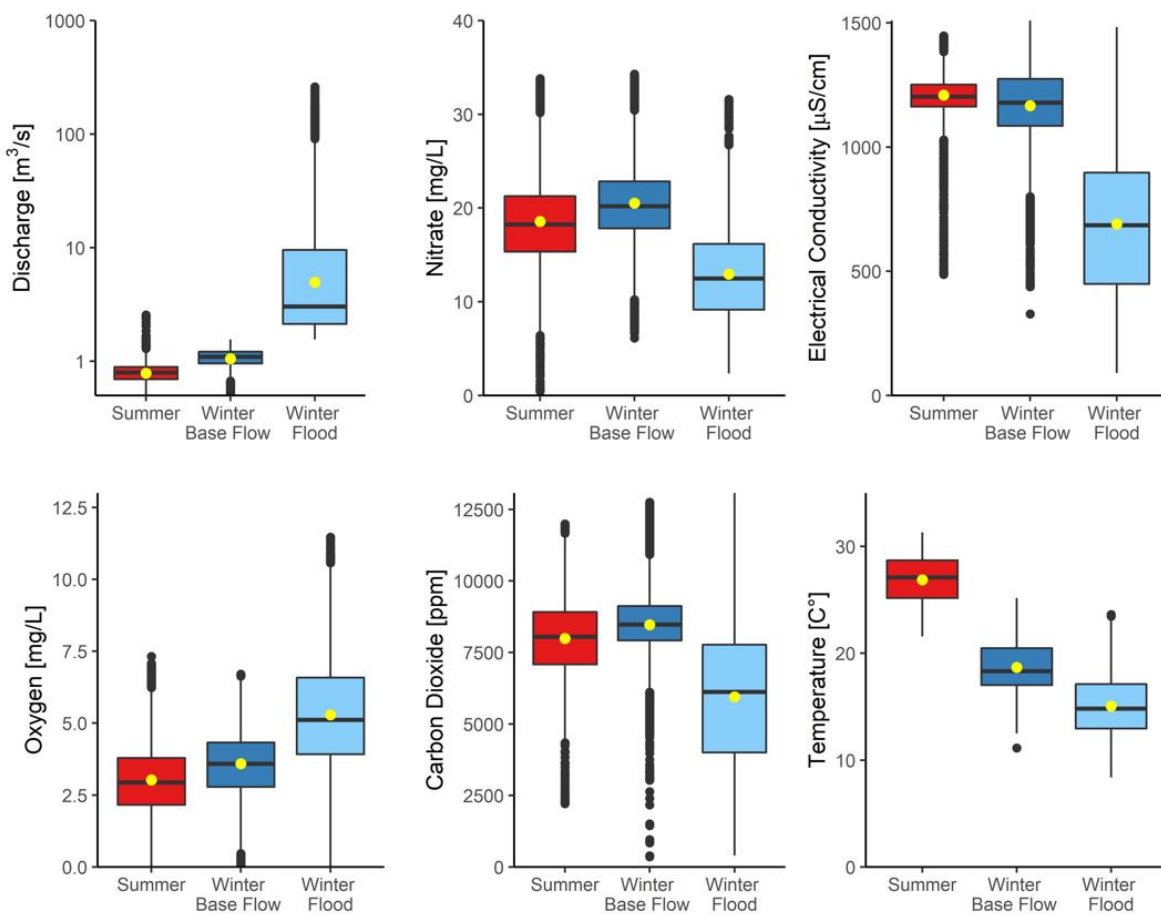


**תרשים 5 -** סדרות זמן של ספיקה, טמפרטורה ופרמטרים של איכות מים בירקון במשך השנים 2019-2022. החיצים האדומים מסמנים אירועי זיהום שגרמו לירידת חמצן בנחל ללא עליה בספיקה. כל שאר המקרים שבהם החמצן ירד לאפס היו קשורים לאירועי זרימה בנחל. החץ הירוק מצביע על ניסוי של הזרמה יזומה של מים שפירים כאמצעי לתגובה במקרה של זיהום בנחל. ניתן לראות כי להזרמה לא היתה השפעה משמעותית על ריכוז החמצן או על פרמטר אחר שנמדד במערכת הניטור.

### 3.2 השתנות עונתית של איכות המים

מסדרות הנתונים שבתרשים 5 ניתן לראות כי השינויים הגדולים באיכות המים מתרחשים בזמן אירועי הזרימה בנחל, אשר מתרחשים בתקופת החורף (נובמבר-אפריל). על מנת לבחון את היקף השינויים בין העונות, ובין זרימת הבסיס לזרימה שטפונית, נבחן את התוצאות בעזרת תרשים קופסא (Box plot, תרשים 6). ספיקת הבסיס הממוצעת בחורף

גבוהה מזו שבקיץ ( $m^3/s$  1.1) וזו גורמת לריכוזים הממוצעים של החמצן, ניטרט, והעכירות להיות מעט גבוהים יותר מאלו שבקיץ. גם ריכוזי ה- $CO_2$  בזרימת הבסיס בחורף גבוהים מעט מאלו שבקיץ אך לא באופן משמעותי. לעומת זאת, ערכי המוליכות החשמלית נמוכים מעט מאלו שבקיץ, ככל הנראה ממהיל. בזמן השיטפונות ריכוזי החמצן והעכירות עולים באופן משמעותי בהשוואה לזרימת הבסיס, בעוד שריכוזי הניטרט, מוליכות חשמלית, ו- $CO_2$  יורדים כתוצאה ממהיל. לסיכום, לעונות השנה השפעה קטנה יחסית (אך משמעותית מבחינה סטטיסטית) על איכות המים בזמן ספיקת הבסיס, וגבוהה בזמן שיטפון.

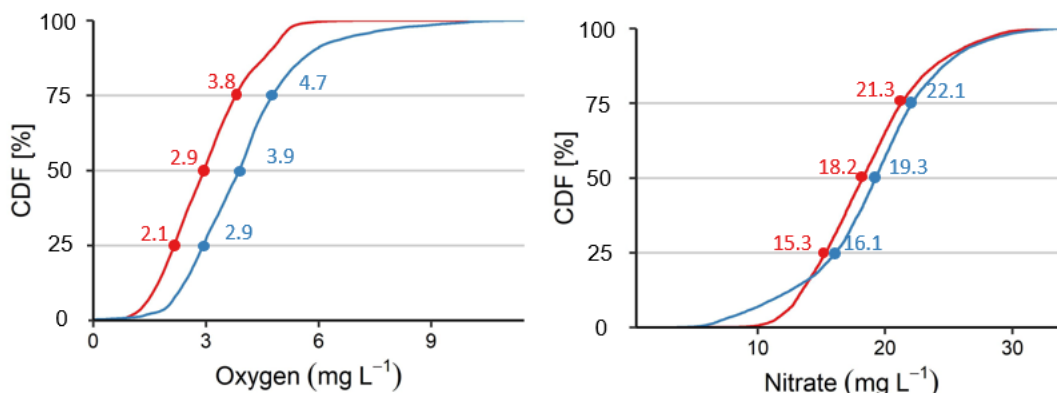


**תרשים 6.** תרשים קופסא עבור הנתונים לתקופת הקיץ (מאי-אוקטובר,  $n = 45,482$ ), החורף בזמן זרימת הבסיס (נובמבר-אפריל,  $n = 32,629$ ), והחורף בזמן שיטפון ( $n = 10,777$ ). הקו האופקי בתוך הקופסא מציין את החציון, נקודה בתוך הקופסא מייצגת את הממוצע, הקו התחתון והעליון של הקופסא מציינים את הערכים 25%-ו-75%, בהתאמה של הנתונים. נקודות מתחת ומעל הקוים האנכיים מתארות את הערכים שנמצאים בטווח של 10% הקיצוניים של הנתונים. לא ניכר הבדל משמעותי בין ערך ממוצע לחציון למעט בספיקה בזמן שיטפון.

ריכוז החמצן הינו קריטי במיוחד לתפקוד האקולוגי של הנחל ושמירה על בריאותו ואילו הניטרט הינו נוטריינט הנמצא בעודף ועשוי לגרום להשפעה אקולוגית שלילית כגון פריחת אצות. על מנת לבחון את היקף הזמן בו הנחל נמצא בעקת חמצן או בעומס גבוה של ניטרט, הנתונים שמוצגים בתרשים 6 רוכזו בעזרת פונקציית ההתפלגות המצטברת (Cumulative distribution function CDF) לתקופה של הקיץ (מאי-אוקטובר) והחורף (נובמבר-אפריל), (תרשים 7). ניתן לראות שבכ- 25% מסך המדידות (שווה ערך גם לזמן) ריכוז החמצן נמצא מתחת ל-2.9 מג"ל בחורף, ו- 2.1



מג"ל בקיץ, מצב שמתאר עקה/היפוקסיה בנחל. התפלגות ריכוז הניטרט בנחל דומה בקיץ ובחורף כאשר ערכי החציון הם 18.2 ו-19.3, בהתאמה. ערכי הקיצון בחורף (<20%) נמוכים מאלו שבקיץ לאור המיהול המתרחש בזמן שיטפון.



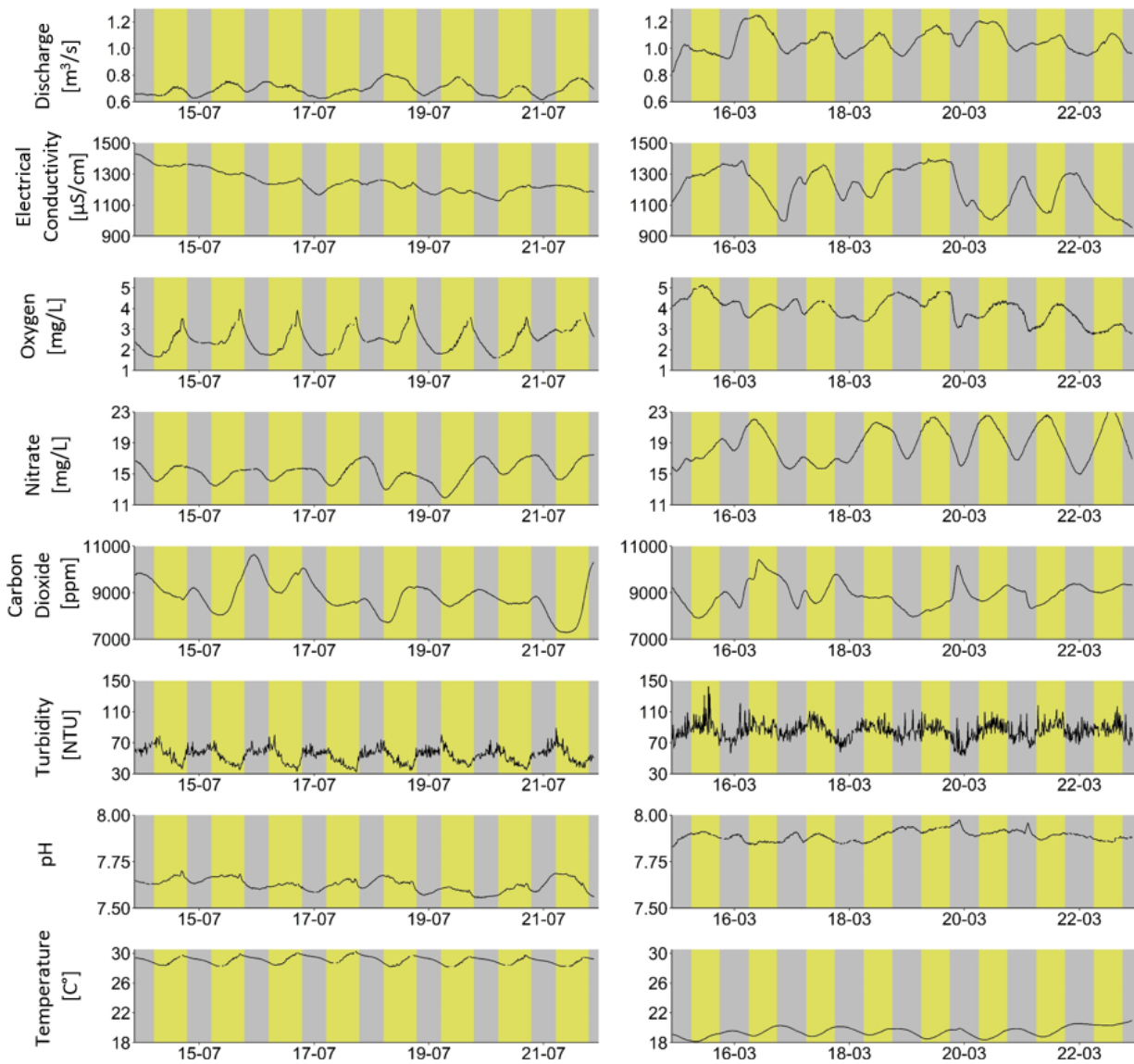
**תרשים 7.** פונקציית ההתפלגות המצטברת של המצנן וניטרט עבור תקופת הקיץ (אדום) ועבור תקופת החורף (כחול). ערכים מדויקים של המצנן וניטרט מופיעים על גבי התרשים בסמוך לנקודות המציינות את החציון (50%) והקווים המציינים 25% ו-75%.

### 3.3 השתנות יומית של איכות המים בספיקת הבסיס

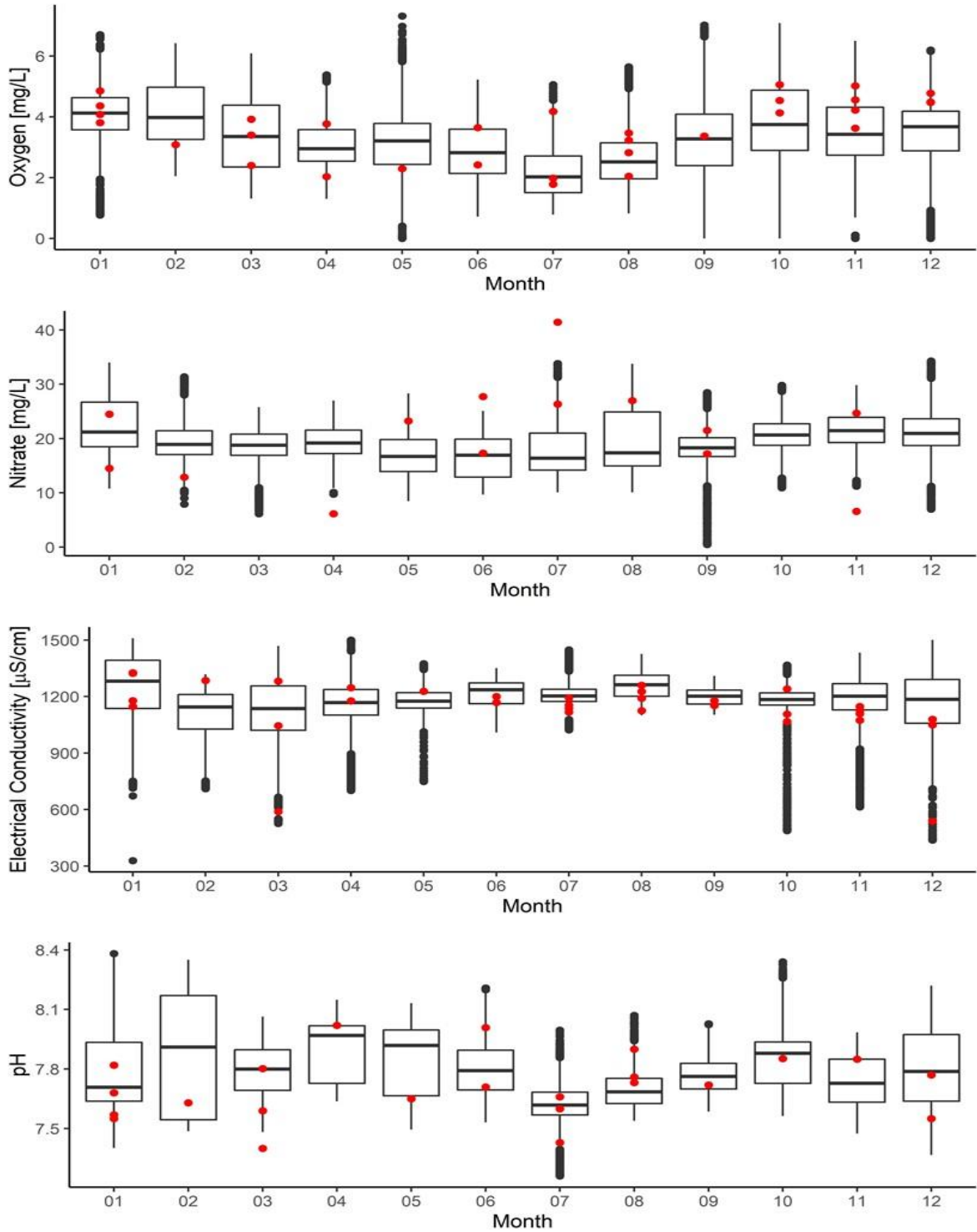
מדדי איכות המים הראו כצפוי תלות חזקה בשינויי הספיקה הדרסטיים שנצפו בזמן שיטפונות אך לא ברור מהתוצאות שהוצגו בתרשימים 5-7 כיצד משתנים מדדי איכות המים לאורך היום בזמן זרימת הבסיס. מידע זה חשוב במיוחד על מנת לתכנן דיגום חטף והערכה על מידת הייצוג של ערכו ביחס לממוצע העונתי/שנתי. על מנת לבחון שאלות אלו נערכה בחינה ראשונית של השינויים היומיים של הספיקה, הטמפרטורה ואיכות המים בקיץ ובחורף (תרשים 8). הספיקה בנחל בזמן זרימת הבסיס באזור התחנה מראה דפוס השתנות בתדירות יומית המושפעת בעיקר מהשינוי היומי בהזרמות קולחים ממתקני הטיפול בשפכים (מט"שים). הזרמות אלו תלויות באופן תפעול המט"שים ובזמן שלוקח למים לנוע מנקודת השחרור לנחל ועד לתחנת הניטור ולכן התדירות היומית הנראית בתרשימים אינה מתרחשת בקשר ישיר לשינויי יום/לילה למרות שידוע כי יש קשר בין שחרור קולחים לשעות הפעילות האנושית במהלך היום. בניגוד לספיקה, ניצפו שינויים יומיים שגררו עליה עקבית בשעות היום בטמפרטורה, ובריכוזי החמצן, וירידה שלהם במשך הלילה גם בקיץ וגם בחורף. לעומת זאת, ריכוזי הניטרט הראו עליה במשך היום בקיץ, אבל לא בחורף. השינויים בחמצן ובניטרט קשורים לפעילות המטבולית בנחל וידונו ביתר פירוט בהמשך הדו"ח (פרק 3.5). בניגוד לפרמטרים שעלו במשך היום, ניכרת ירידה עקבית בעכירות במשך שעות היום בקיץ ועליה בלילה. בחורף לעומת זאת, השינויים היומיים בעכירות לא היה עקביים ביחס לשעות היום/לילה.

על בסיס התוצאות בתרשימים 5-8 ניכר שישנם שינויים עיתיים באיכות המים אשר ישפיעו על ניתוח נתונים של איכות מים אשר מתבססים על דיגומי חטף. לשינויים היומיים ישנה משמעות גדולה במיוחד לגבי ייצוג דיגום חטף בנחל אשר מתבצע בד"כ בזמן שעות העבודה השוטפות (שעות היום). לצורך הערכה עד כמה מייצגות דוגמאות חטף את איכות המים האמיתית בנחל, שרטטנו על גבי תרשים קופסא את כל המדידות מהחיישנים בזמן ספיקת הבסיס עבור כל חודש בנפרד. על גבי התרשים הוספנו את המדידות שביצענו בזמן הביקורים באתר לצורך טיפול שוטף (תרשים 9). הפרמטרים שנבדקו היו מוליכות חשמלית (מדד פיזיקלי שאינו מושפע מהתהליכים בנחל למעט ערבוב בין סוגי מים שונים המוזרמים לנחל), חמצן (מושפע מפעילות מיקרוביאלית ושונות בין יום ללילה), ניטרט (מושפע מפעילות מיקרוביאלית אך אינו עובר שינוי ניכר לאורך הזרימה בנחל), ו-pH (פרמטר כימי שעל פי סדרות הזמן שמר על יציבות יחסית). ניכר כי לפחות 50% מהמדידות יושבות מחוץ לקופסא (50% מהמדידות שנמצאות בין הקווים של ה-25% ל-75%). בניטרט בולט שרוב המדידות נמצאות מחוץ לקופסא (13 מתוך 16 מדידות). תוצאות אלה ממחישות שמבחינה סטטיסטית יש לדיגום חטף בודד סיכוי לא מבוסס להיות מאפיין של ערכי קיצון ולא של הממוצע בנחל. בעוד שמשרעת המדידות של ה-pH לא

צפויה להיות משמעותיות מבחינה אקולוגית ולכן דוגמת חטף עשויה להוות הערכה סבירה, מדידה של חמצן וניטרט אינן צפויות לתאר היטב את המצב האקולוגי בנחל.



**תרשים 8.** שינויים יומיים בספיקה, טמפרטורה ואיכות מים כפי שנמדדו על ידי החיישנים במהלך עשרה ימים רצופים בקיץ (14-22/7/2021) ובחורף (15-23/3/2021). שעות היום והלילה מצוינים על התרשים ברקע צהוב ואפור, בהתאמה.

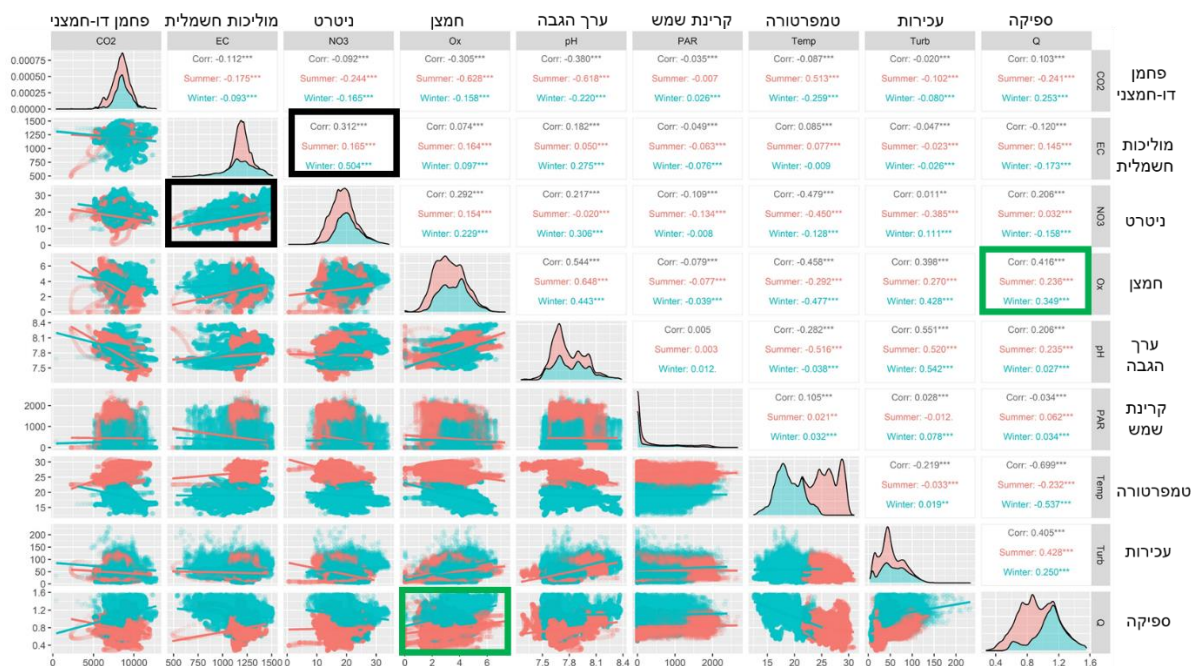


**תרשים 9.** תרשים קופסא עבור הנתונים החודשיים של חמצן, מוליכות חשמלית, ניטרט ו-pH זמן זרימת הבסיס במשך השנים (2019-2022). הקו האופקי בתוך הקופסא מציין את החציון, הקו התחתון והעליון של הקופסא מציינים את הערכים 25%-ו-75%, בהתאמה של הנתונים. נקודות מתחת ומעל הקוים האנכיים מתארות את הערכים שנמצאים בטווח של 10% הקיצוניים של הנתונים. תוצאות דיגום החטף משורטטות על גבי התרשים כנקודות אדומות.

### 3.4 מתאם בין הפרמטרים השונים

בנוסף לגישה של הסתכלות על הנתונים כסדרות בזמן, ניתן לבחון מתאם (קורלציה) בין פרמטרים שונים על מנת לאתר תהליכים דומיננטיים בנחל ואף לשמש ככלי לחיזוי ריכוזים בנחל, הן של פרמטרים שאין להם חיישנים או במקומות בהם לא כל החיישנים זמינים. בדו"ח זה נסקור רק את הנתונים מהחיישנים. קורלציות בין דוגמאות חטף לפרמטרים שאין עבורם חיישנים נמצאים כעט באנליזה וידווחו בעבודת המסטר של צפריר אדר באוקטובר 2022. על מנת לבחון את הקורלציות, חולקו הנתונים לשלוש קבוצות כפי שנעשה בתיאור הנתונים בתרשים 6: תקופת הקיץ, מאי-אוקטובר, ( $n = 45,482$ ), חורף בזמן זרימת הבסיס (נובמבר-אפריל,  $n = 32,629$ ), וחורף בזמן שיטפון ( $n = 10,777$ ). בזמן שיטפונות נמצא מתאם חיובי בין הספיקה לריכוז החמצן, ל-pH, ולעכירות בנחל, ומתאם שלילי עבור כל שאר הפרמטרים כתוצאה ממהלך (נספח 2). גם כאשר נבחנים הנתונים בזמן זרימת הבסיס, ניתן למצוא מתאם חיובי בין הספיקה לבין ריכוזי החמצן, ה-pH, והעכירות (תרשים 10). נתונים אלו יכולים לסייע בניתוח של איזה ספיקה רצויה בנחל על מנת לשפר את ריכוז החמצן. לדוגמא: על מנת להעלות את ריכוז החמצן הממוצע ב 1 מג"ל נדרשת ספיקה של לפחות פי שלוש יותר מהספיקה כיום. ערך זה הוא הערך המינימלי הדרוש מכיוון שיתכן כי העלאת הספיקה לערך זה לא תביא לשינוי לאורך זמן בריכוז החמצן לאור העובדה שהנתונים הקיימים מתבססים על אירועי זרימה קצרים. יתכן כי לאחר העלאת הספיקה תתייצב המערכת מחדש והעליה בריכוז החמצן תהיה נמוכה יותר מהצפוי.

מתאם שלילי נמצא בין החמצן וה- $CO_2$  (חיובי בין חמצן ל-pH), עובדה המעידה כי בנחל מתרחשים תהליכים מטבוליים של נשימה, כפי שידון בפרק הבא. בנוסף, נמצא שיש מתאם חיובי בין ניטרט למוליכות חשמלית. אנו מייחסים קשר זה להזרמת קולחים לנחל וקצבי ספיגת ניטרט נמוכים יחסית בנחל. קשר זה ניתן לניצול בתחנות נוספות המתוכננות להיבנות בנחל בכך שניתן להשתמש בחיישן מוליכות חשמלית (שהוא זול ואמין) על מנת לחזות את ריכוזי הניטרט שכיום ניתנים למדידה רק על ידי חיישנים יקרים. ניתוח של טווח הטעות שיושג בשיטה זו נמצא כרגע בהערכה וידווח בהמשך.



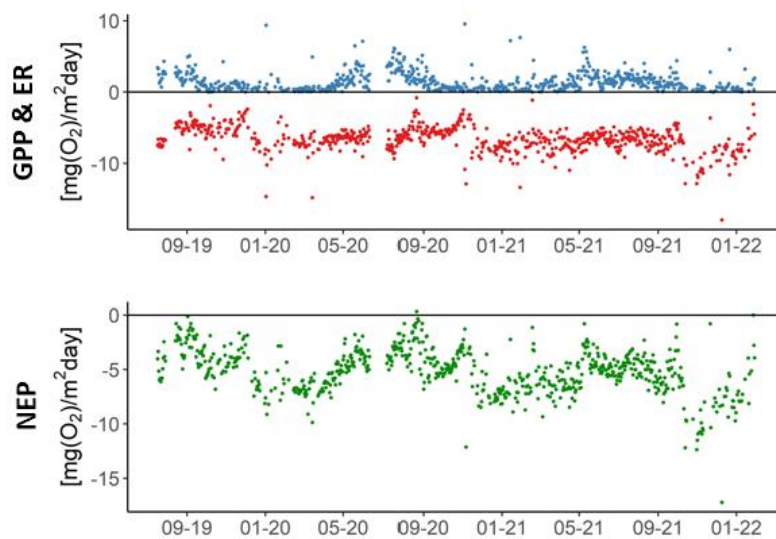
**תרשים 10.** גרף מתאם בין כל הפרמטרים הנמדדים בתחנת הניטרט בזמן זרימת הבסיס בקיץ (אדום) ובחורף (כחול). את התפלגות הנתונים ניתן לראות באלכסון שיוורד מהפינה השמאלית העליונה כלפי הפינה הימנית התחתונה. עבור כל זוג פרמטרים ישנם שני ריבועים בהם ניתן לראות את הקשר ביניהם בצורה גרפית או כסיכום של ערך המתאם ( $r^2$ ) עבור כל הנתונים (שחור), ועבור הקיץ והחורף (אדום וכחול, בהתאמה). בנוסף, מידת ההתאמה מתואר על ידי כוכביות כאשר סימון של \*\*\* מתאר מתאם משמעותי מבחינה סטטיסטית. לדוגמא מודגשים בשרטוט המקומות בהם ניתן לראות קשר בין המוליכות חשמלית לניטרט (מסגרת שחורה) ובין החמצן והספיקה (מסגרת ירוקה).

### 3.5 כימות תהליכים אקולוגיים בטווחי זמן שונים

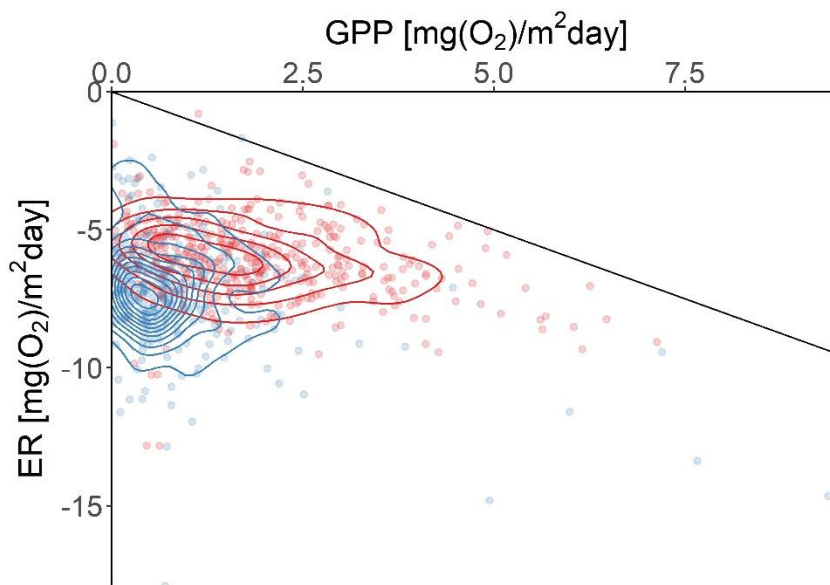
השינויים במערכת האקולוגית הנחלית מורכבים הרבה יותר מהנראה לעין בסדרות הנתונים או בהצגה בעזרת ממוצעים והתפלגויות סטטיסטיות. שינויים נסתרים אלה יכולים להתגלות בעזרת חישובי סך התהליכים המטבוליים בנחל. תהליכים מטבוליים מתרחשים אצל יצורים חיים בעת קליטת חומרים מהסביבה, עיבודם, הפקת אנרגיה מהם ופליטת חומרים. מדידת ההשתנות בזמן של מדדים מטבוליים של כל הנחל, כגון יצרנות ראשונית (Gross – GPP Primary Production) ונשימה (ecosystem respiration-ER), מסייעים בחישובי קצבי ספיגה של חומרי הזנה והערכת מצב בריאות הנחל (Bernhardt et al., 2017; Scheffer et al., 2009). לדוגמה, השתנות יומית נצפתה עבור חמצן וחומרי הזנה שונים מזה זמן רב, אך איסוף נתונים מסוגים שונים של נחלים בעולם אפשר הבנה טובה יותר של קצבי ספיגת ניטרט רק לאחר ששולבו עם חישובי נשימה ויצרנות ראשונית בנחל (Savoy et al., 2019; Scheffer et al., 2009).

אחד האתגרים שנוצרו עקב העלייה הדרמטית בכמות הנתונים הנמדדים הוא ניתוח נתוני העֵתֶק (big data), שנעשה בכלים אנליטיים מתקדמים ובשיטות של בינה מלאכותית ולמידת מכונה, בייחוד בהתחשב בעובדה שחלק גדול מהתהליכים המתרחשים בנחלים אינם לינאריים (Jones et al., 2011; Rode et al., 2016). לדוגמה, ניתן לראות בנחל הירקון אפיון דפוסים מטבוליים (metabolic regimes) המייצגים את תפקוד הנחל (תרשים 11). האפיון מתבסס על מדידת חמצן, טמפרטורה, עומק, ספיקה וקרינת אור בנקודה אחת בנחל וכימות בעזרת מודל נומרי הנקרא Streammetabolizer (Appling et al., 2018). הנחת הבסיס היא ששינוי ריכוז החמצן מושפע מהיצרנות ראשונית, מנשימה של כל האורגניזמים בנחל, ומחילוף חמצן בין הנחל והאטמוספירה בהתאם להפרש הריכוזים. כל אחד משלושת הגורמים הללו משתנה באופן אחר במהלך היום, אך בעזרת מיטוב של כל התהליכים ניתן לחשב את הממוצע היומי של היצרנות הראשונית והנשימה. כלומר, כל נקודה על גבי תרשים 11 מתארת את הממוצע היומי של היצרנות הראשונית או הנשימה של כלל האורגניזמים בנחל. ניתן לראות כי היצרנות הראשונית מושפעת באופן מובהק מעונות השנה ומגיעה לשיא בתקופת הקיץ וערכים אפסיים בתקופת החורף. לעומת זאת, ערכי הנשימה אחידים יחסית במהלך השנה ואף גבוהים יותר (ערך אבסולוטי) מערכי היצרנות הראשונית. חיסור של GPP מסך ה ER מוביל לכימות הערך המוגדר כ NEP- Net ecosystem production (מערכת המסתמכת על קליטת נוטריינטים ממעלה הנחל) אשר מאופיינת ע"י צריכת פחמן אורגני וחמצן ופליטת CO<sub>2</sub>. צריכת החמצן החזקה גורמת לנחל להיות תקופות ארוכות יחסית בעקת חמצן, האופיינית להרבה נחלים עירוניים (Błaszczak et al., 2019).

את התוצאות המוצגות בתרשים 11 ניתן להציג על ידי תרשים פיזור ויצירת מפה לפי צפיפות הנקודות (Kernel density plot). התרשים המתקבל הוא מעין "טביעת אצבע" מאפיינת של הנחל (תרשים 12). בעזרת טביעת אצבע זו ניתן להגדיר מצב שהנחל נמצא בו רוב הזמן, וטווח שינוי הנתונים מתאר את המצב הדינמי שהנחל נמצא בו. יציאה מטווח מוגדר על פי תרשים טביעת האצבע יכולה לציין בעיה בתפקוד אקולוגי תקין של הנחל. במקרים רבים לא ניתן להקיש ממחקר שנעשה באזור גאוגרפי/אקלימי אחד על נחלים מאותו סוג באזורים אחרים. חיסרון זה בולט במיוחד עקב מיעוט מידע על נחלים ים תיכוניים, ובייחוד על נחלים הזורמים בשפלה (lowland streams). לאחרונה החלו קבוצות מחקר רבות ורשויות ממשלתיות לשתף נתונים וליצור מסדי נתונים. בעזרת ניתוח מספר רב של נחלים, ובייחוד בעזרת דפוסים מטבוליים, מתאפשרות הבנה גלובלית ומקומית כאחת וקבלת תובנות רחבות לגבי תהליכים שונים. דוגמאות לכך ניתן לראות בפורטל StreamPulse ([www.pulseofstreams.weebly.com](http://www.pulseofstreams.weebly.com)) שמאוחסנים בו גם נתוני התחנה בנחל הירקון. ככלל, אנו צופים כי אפיון דפוסים מטבוליים כגון אלו המופיעים בתרשימים 11 ו-12 צפוי לסייע בהערכה של התפקוד האקולוגי בזמן אירוע זיהום, קצבי העיבוד של חומרי הזנה, קצב השיקום וחזרתו של הנחל לתפקוד תקין. מחקר בנושא זה הוא בתחילת דרכו בעולם ולמיטב ידיעתנו אין מידע על נחלים עירוניים באקלים ים תיכוני.



**תרשים 11.** סדרות זמן של ממוצע יומי של קצבי נשימה (ER), יצרנות ראשונית (GPP) ו-NEP (Net ecosystem production) במשך השנים 2019-2022.



**תרשים 12.** דפוס מטבולי רב-שנתי של נחל הירקון על פי חלוקה לפי עונות השנה (קיץ באדום וחורף בכחול). כל נקודה באיור מייצגת ממוצע יומי של יצרנות ראשונית ונשימה בנחל, והקו השחור הרציף מייצג יחס של 1:1 בין השניים. פיזור הנקודות במרחב יוצר "טביעת אצבע" מאפיינת של הנחל, המיוצגת כמפת קווי מתאר (Kernel density plot). מיקום נקודות המדידה על גבי מפת קווי המתאר ומיקומן ביחס לשיאים או לנקודות מינימום יוצר מדד למצב הנחל ויכול לסייע לאיתור השפעות אנושיות או טבעיות על תפקוד המערכת האקולוגית בנחל ועל היכולת של הנחל להשתקם מהפרעה. שימוש במדדי הנשימה והיצרנות הראשונית מתאר באופן מדויק יותר את המצב המטבולי של הנחל, ורשויות שונות בעולם החלו להשתמש בו לצורכי ניטור מצב הנחל. בדוגמה המוצגת ניתן לראות שבירקון רוב הזמן הנשימה דומיננטית (מתחת לקו השחור הרציף).

#### 4. סיכום והשלכות יישומיות של ממצאי המחקר

בשנת 2019 הוקמה תחנה למדידת איכות מים באופן רציף בירקון ופותחו פרוטוקולים מפורטים לתחזוקת התחנה. תחנה זו ייחודית משני היבטים: (1) המיקום שלה חשוף לשיטפונות חזקים במיוחד ולכן חייבו פיתוח של שיטות להגנה על החיישנים תוך שימור יכולת מדידה גם בתנאים הקשים ביותר, (2) התחנה מכילה מגוון רחב של סוגי החיישנים שמוודים את איכות המים. למיטב ידיעתי אין תחנות דומות בארץ ואף ברמה העולמית מגוון הפרמטרים הינו ייחודי ומאפשר לנו ללמוד על מגוון תהליכים המתרחשים בנחל. מסד הנתונים שנצבר במסגרת הפרויקט מהווה מקור ידע ייחודי לשימוש רשות נחל הירקון, ואף יכול לסייע לרשויות נוספת בישראל המעוניינות להקים תחנות ניטור. הנתונים שנצברו במהלך השנתיים וחצי האחרונות אפשרו לנו לבחון את הדינמיקה של התנהגות המערכת האקולוגית בנחל עירוני באקלים ים תיכוני. נמצא כי:

- הנתונים הרציפים אפשרו לנו לאבחן דליפות משמעותיות של ביוב, וקצבי שיקום של הנחל מאירועי זיהום או שיקום לאחר צניחת ריכוזי חמצן בעקבות שיטפון ראשון של החורף. נמצא כי הירקון באזור תחנת הניטור מושפע רק מאירועים קיצוניים ספורים במהלך השנה, ומשתקם יחסית מהר לאחר תום האירוע (בד"כ כעבור 24-48 שעות). אנו ממליצים להתקין תחנות ייעודיות לאיתור דליפות מזהמים ממקורות פוטנציאליים במעלה האגן.
- נבדקה האפשרות לסיוע בשיקום הנחל על ידי הזרמה מים שפירים אך נמצא כי שיטה זו אינה יעילה.
- המדידות הרציפות אפשרו כימות של איכות המים בנחל לאורך כל השנה ונמצא כי הנחל נמצא בעקת חמצן במשך זמן מצטבר משמעותי. לדוגמא: 50% מהזמן הכולל בחורף ריכוז החמצן נמוך מ- 2.9 מג"ל ו ב-25% מהזמן הכולל בקיץ ריכוז החמצן נמוך מ- 2.1 מג"ל (פרק 3.2).
- נמצא כי קיימים הבדלים בריכוזי הפרמטרים שנמדדו בקיץ לעומת החורף (בזמן זרימת הבסיס), אך ברוב המקרים הבדלים אלו היו קטנים ומבחינת תפקוד הנחל הם אינם משמעותיים.
- בזמן שיטפון ישנה עליה בעכירות ובחמצן אך שאר ריכוזי שאר הפרמטרים קטן עקב מיהול.
- נבדקו קורלציות בין כל הפרמטרים הנמדדים על ידי החיישנים. ניתן להשתמש בקשרים בין הפרמטרים למגוון של שימושים. לדוגמא: על פי המתאם ניתן לחשב מה הספיקות הדרושות להעלאת ריכוז החמצן במים בערך מסוים לדוגמא, על מנת להעלות את ריכוז החמצן הממוצע ב 1 מג"ל נדרשת ספיקה של לפחות פי שלוש יותר מהספיקה כיום. בנוסף, נמצא קשר בין מוליכות חשמלית לניטרט אשר יכול לאפשר כימות של שטפי הניטרט בתחנות אחרות שיוקמו בעתיד בירקון. לקשר מסוג זה ישנה חשיבות רבה עקב העלות הגבוהה של חיישן ניטרט (פרק 3.4).
- על פי אנליזה סטטיסטית של כלל הנתונים שנמדדו בנחל בזמן ספיקת הבסיס, נמצא כי הסיכוי שתוצאת דיגום חטף בודדת עבור חמצן, מוליכות חשמלית או-pH תהיה בטווח של  $\pm 25\%$  מערך הממוצע האמיתי של המים הוא קטן מ-50%. עבור ניטרט המצב היה חמור יותר ורק כ-25% מהדוגמאות חטף היו בטווח של  $\pm 25\%$  מערך הממוצע האמיתי של המים (פרק 3.3, תרשים 9).
- חושבו פרמטרים מטבוליים המאפיינים את הנחל (טביעת אצבע מטבולית). נמצא כי תהליכי הנשימה בנחל גבוהים באופן משמעותי מהיצרנות הראשונית. הנשימה בחורף גבוהה מעט מזו שבקיץ, אך ערכי היצרנות הראשונית בחורף נמוכים במידה ניכרת מאלו שבקיץ. טביעת אצבע מטבולית זו מאפשרת בחינה של תפקוד אקולוגי של הנחל בזמן עקה או כתגובה לפעולות שיקום.
- כיווני המחקר העתידיים הם: בחינת של קשרים מורכבים בין מספר פרמטרים (multivariate analysis), בחינת מתאם בין פרמטרים שנמדדו על ידי החיישנים ונוטריינטים שנמדדו בדוגמאות חטף, והגורמים המשפיעים על טביעת האצבע המטבולית.
- במהלך מרץ אנו צפויים להתקין חיישנים למדידת כלורופיל ו-cDOM לאחר שניתוח הנתונים מחיישנים שהיו בתחנה לא היה באיכות טובה מספיק והחלטנו לשנות את סוג החיישן.

בהזדמנות זו אני רוצה להודות לאנשי רשות נחל הירקון שסייעו רבות במהלך המחקר ביעוץ ותמיכה בעבודת השדה. בנוסף, יובל שני, מיכאל קוגל ועמיר מיימון (ממכון צוקרברג לחקר המים, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב) סיפקו רעיונות יצירתיים, פתרונות לבעיות ועזרה טכנית אינסופית ששידרגו את הצלחת הפרויקט באופן שלא ניתן לתאר במילים.

## 5. ביביליוגרפיה

- Appling, A.P., Hall, R.O., Yackulic, C.B., Arroita, M., 2018. Overcoming equifinality: Leveraging long time series for stream metabolism estimation. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 123, 624–645. <https://doi.org/10.1002/2017JG004140>
- Bernhardt, E.S., Heffernan, J.B., Grimm, N.B., Stanley, E.H., Harvey, J.W., Arroita, M., Appling, A.P., Cohen, M.J., McDowell, W.H., Hall, R.O., Read, J.S., Roberts, B.J., Stets, E.G., Yackulic, C.B., 2017. The metabolic regimes of flowing waters. *Limnol. Oceanogr.* 63, 99–118. <https://doi.org/10.1002/lno.10726>
- Blaszczak, J.R., Delesantro, J.M., Urban, D.L., Doyle, M.W., Bernhardt, E.S., 2019. Scoured or suffocated: Urban stream ecosystems oscillate between hydrologic and dissolved oxygen extremes. *Limnol. Oceanogr.* 64, 877–894. <https://doi.org/10.1002/lno.11081>
- Jones, A.S., Stevens, D.K., Horsburgh, J.S., Mesner, N.O., 2011. Surrogate measures for providing high frequency estimates of total suspended solids and total phosphorus concentrations. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 47, 239–253. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00505.x>
- Peter, K.T., Hou, F., Tian, Z., Wu, C., Goehring, M., Liu, F., Kolodziej, E.P., 2020. More than a first flush: Urban creek storm hydrographs demonstrate broad contaminant pollutographs. *Environ. Sci. Technol.* 54, 6152–6165. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00872>
- Rode, M., Wade, A.J., Cohen, M.J., Hensley, R.T., Bowes, M.J., Kirchner, J.W., Arhonditsis, G.B., Jordan, P., Kronvang, B., Halliday, S.J., Skeffington, R.A., Rozemeijer, J.C., Aubert, A.H., Rinke, K., Jomaa, S., 2016. Sensors in the stream: the high-frequency wave of the present. *Environ. Sci. Technol.* 50, acs.est.6b02155. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02155>
- Savoy, P., Appling, A.P., Heffernan, J.B., Stets, E.G., Read, J.S., Harvey, J.W., Bernhardt, E.S., 2019. Metabolic rhythms in flowing waters: An approach for classifying river productivity regimes. *Limnol. Oceanogr.* 64, 1–17. <https://doi.org/10.1002/lno.11154>
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W.A., Brovkin, V., Carpenter, S.R., Dakos, V., Held, H., Van Nes, E.H., Rietkerk, M., Sugihara, G., 2009. Early-warning signals for critical transitions. *Nature* 461, 53–59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
- ארנון, ש., יוגב, נ., אדר, צ., בורד, ג., פרי, ש., רוזנבלום, א., פרגמנט, ד., יונתן רז, 2021. מדידת איכות מים בזמן אמת ככלי לניהול משאבי מים ולשיקום נחלים. אקולוגיה וסביבה (3) 12



## נספח 1

פירוט שיטות בדיקת תקינות החיישנים ואיכות המדידות שלהם.

פרמטר	שיטה לבדיקה מזידת החיישנים	מה נעשה בפועל	כיוול
מפלס (SEBA)	השוואת מדידת עומק עם מטר בתוך דלי מים	נעשה בכל ביקור	בהתאם למדידה- התקלקל והוחלף בסתיו 2021 בחיישן מפלס פניאומטי שהוא בעל אמינות גבוהה יותר
(PONSEL) EC	השוואה למדידה בתוך הנחל בעזרת מכשיר נייד -WTW	נעשה בכל ביקור	בהתאם למדידה
טמפרטורה (PONSEL)	השוואה למדידה בתוך הנחל בעזרת מכשיר נייד -WTW	נעשה בכל ביקור	בהתאם למדידה
(PONSEL) pH	השוואה למדידה בתוך הנחל בעזרת מכשיר נייד -WTW	נעשה בכל ביקור למעט מספר פעמים בהם החיישן הנייד היה תקול	בהתאם למדידה
חמצן (PONSEL)	השוואה למדידה בתוך הנחל בעזרת מכשיר נייד -WTW	נעשה בכל ביקור	בהתאם למדידה
ניטרט (Sea-Bird Scientific)	השוואה למדידות מעבדה	מדידות מעבדה באנגליזה	איפוס מכשיר כל חצי שנה וכיוול בהתאם למדידות (לא היה עדיין צורך כיוול)
עכירות (חברת Turner Designs)	השוואה למדידה בשטח (מחוץ למים)	נעשה בכל ביקור	בהתאם למדידה- הוחלף מאחר והיה לא יציב בזמן ודרש הרבה כיוולים
עכירות (חברת PONSEL)	השוואה למדידה בשטח (מחוץ למים)	נעשה בכל ביקור	בהתאם למדידה- (לא היה עדיין צורך כיוול)
cDOM (Turner Designs)	אין מדידות להשוואה. השוואה עתידית למדידות DOC ו TOC	בדיקה עם סטנדרט בשטח + מדידות מעבדה באנגליזה	בהתאם למדידה- הוצא מהמים בסתיו 2021 מאחר והיה לא יציב בזמן ודרש הרבה כיוולים. חיישן חלופי נמצא בבדיקות במעבדה וצפוי להתחיל לעבוד באביב 2022.
כלורופיל (Turner Designs)	השוואה למדידות מעבדה	בדיקה עם סטנדרט בשטח + מדידות מעבדה באנגליזה	בהתאם למדידה- הוצא מהמים בסתיו 2021 מאחר והיה לא יציב בזמן ודרש הרבה כיוולים. חיישן חלופי נמצא בבדיקות במעבדה וצפוי להתחיל לעבוד באביב 2022.
CO <sub>2</sub> (Eosense)	השוואה למדידה בשטח (מחוץ למים)	לא נעשה	בהתאם למדידה- חיישן התקלקל לאחר שנתיים וחצי והוחלף בחיישן זהה חדש.
קרינה (LICOR)	NA	לא נעשה	לא נעשה

## נספח 2

גרף מתאם בין כל הפרמטרים הנמדדים בתחנת הניטור בזמן שיטפון. את התפלגות הנתונים ניתן לראות באלכסון שיוord מהפינה השמאלית העליונה כלפי הפינה הימנית התחתונה. עבור כל זוג פרמטרים ישנם שני ריבועים בהם ניתן לראות את הקשר ביניהם בצורה גרפית או כסיכום של ערך המתאם ( $r^2$ ). בנוסף, מידת ההתאמה מתואר על ידי כוכביות כאשר סימון של \*\*\* מתאר מתאם משמעותי מבחינה סטטיסטית.

