

#### שי ארנון

מכון צוקרברג לחקר המים, המכונים לחקר המדבר ע"ש י. בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

#### נעם יוגב

מכון צוקרברג לחקר המים, המכונים לחקר המדבר ע"ש י. בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

#### צפירי אדר

מכון צוקרברג לחקר המים, המכונים לחקר המדבר ע"ש י. בלאושטיין, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

#### גדי בורד

רשות נחל הירקון

#### שירן פרי

רשות נחל הירקון

#### אילן רוזנבלום

רשות נחל הירקון

#### דוד פרגמנט

#### יונתן רו

רשות נחל הירקון

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

#### ציטוט מומלץ

ארנון ש, יוגב נ, אדר צ ואחרים. 2021. מדידת איכות מים בזמן אמת ככלי לניהול משאבי מים ולשיקום נחלים. *אקולוגיה וסביבה* 12(3): 6-12.



כיוול חיישנים בעזרת מדידה בלתי תלויה בחיישנים ניידים. נחל הירקון, חורף 2020/21 | צילום: שי ארנון

## מדידת איכות מים בזמן אמת ככלי לניהול משאבי מים ולשיקום נחלים

25 בנובמבר, 2021

גיליון סתיו 2021 / כרך 12(3) / נחלי ישראל

סקירות

### על קצה המזלג

- המאמר מעלה את הבעיה המוכרת של איכות המים הירודה בנחלי הארץ, וסוקר שיטות מתקדמות של מדידה רציפה של איכויות מי נחלים. המדידה מאפשרת קבלת מידע מיידי על אירועי זיהום בנחל, ומאפשרת מעקב הדוק אחר תהליך השיקום של אותו נחל.
- ניטור רציף על-ידי חיישנים בגופי מים מאפשר לעקוב אחר מגוון רחב של משתנים כימיים, פיזיקליים וביולוגיים, ומשפר את הבנת התהליכים האקולוגיים בנחל.
- יישום המלצות המאמר יסייע בבניית תשתית מדעית חזקה, ביצירת פלטפורמה אחידה לבקרת איכות ולשיתוף הנתונים, ביעול הניהול הסביבתי של נחלים ובקבלת החלטות ניהוליות מבוססות מדע לשימור

- ולשיקום של נחלים וגופי מים אחרים.  
מכל אלה אפשר לגזור שלל המלצות ורפורמות מדיניות בתחום הסביבה והנחלים.

המערכת

## תקציר

מדידת איכות מים רציפה מספקת מידע לגבי מצב הבריאות של נחלים. כיום מתבסס ניטור איכות המים בנחלי ישראל בעיקר על דגימות חטף בתדירות נמוכה, ולכן הדינמיקה של השתנות איכות המים ברזולוציית זמן גבוהה אינה ידועה, וקיים קושי באיתור אירועי זיהום. פיתוח חיישנים חדשניים וטכנולוגיות ניטור בעשורים האחרונים פתח אפשרויות נרחבות למדידות איכות מים אמינה בזמן אמת ואפשר התקדמות משמעותית בהבנת תהליכים המתרחשים בנחלים. מאמר זה יציג את היכולות הטכנולוגיות המבוססות ששימשו בחקר מקרה בתחנה לניטור רציף בנחל הירקון, ואת המשמעויות של כניסת דור חדש של חיישנים לגבי ניהול משאבי מים ושמירה על בריאות הנחל. במאמר נסקור את השימוש בחיישנים לניטור נחלים ואת החידושים בתחום זה תוך שימוש בדוגמאות ממערכת הניטור בנחל הירקון שיש בה מגוון רחב של חיישנים נפוצים (המודדים מפלס, טמפרטורה, מוליכות חשמלית, ערך הגבה, חמצן ועכירות) ומספר חיישנים חדשניים (המודדים חנקה, כלורופיל, חומר אורגני ופחמן דו-חמצני מומס). ניתן לראות נתונים בזמן אמת בקישור [www.tinyurl.com/Yarkon-public-view](http://www.tinyurl.com/Yarkon-public-view). בניית תשתיות ניטור לטווח ארוך מאפשרת למדוד את הדינמיקה של השתנות איכות המים בעקבות אירועי זרימה וזיהום, ואת התקופות שהנחל נמצא תחת עקה. שימוש בטכנולוגיות מסוג זה צפוי לשפר את יכולת מקבלי ההחלטות להגיב לשינויים בנחל, את יכולת האכיפה כלפי הגורמים המזהמים ואת היכולת לכמת פעולות של שיקום נחלים מבוסס מדע.

## מבוא

הערכת מצב בריאותם של נחלים מתבססת על שילוב של מדידות פיזיקליות, כימיות וביולוגיות, ובהתאם לה מתקבלות החלטות לגבי פעולות שימור, שיקום וניהול משאבי המים [1,2,5]. שיטות ביולוגיות להערכת מצב בריאות נחלים ניתן ליישם בתדירות נמוכה יחסית, מכיוון שהן מחייבות דגימה מורכבת וזמן ניתוח ארוך יחסית. לעומת זאת, מדידות כימיות ופיזיקליות של איכות מים ניתן לבצע בפשטות יחסית, ולכן הן נפוצות הרבה יותר בתוכניות ניטור נחלים. לדוגמה, בישראל בדיקות איכות מים בנחלים נעשות בתכיפות נמוכה (כפעמיים בשנה) ומפורסמות בדו"ח שנתי החל מ-2005 (באתר המשרד להגנת הסביבה), בעוד שאפיון מקיף ומוסדר של המאספים הביולוגיים החל רק לאחר הקמת המרכז הלאומי לאקולוגיה אקוטית ב-2015. ניכר כי התדירות הנמוכה יחסית של דגימת איכות המים בישראל מקשה על הבנת מצב הנחלים בזמן אמת, וברור כי הניטור הביולוגי שנעשה בכל נחל רק אחת למספר שנים יתרום בעיקר להבנת תהליכים ארוכי-טווח, ולכן קיים צורך משמעותי בפיתוח מדדים בזמן אמת שיישעו לניהול משאבי מים בנחלים.

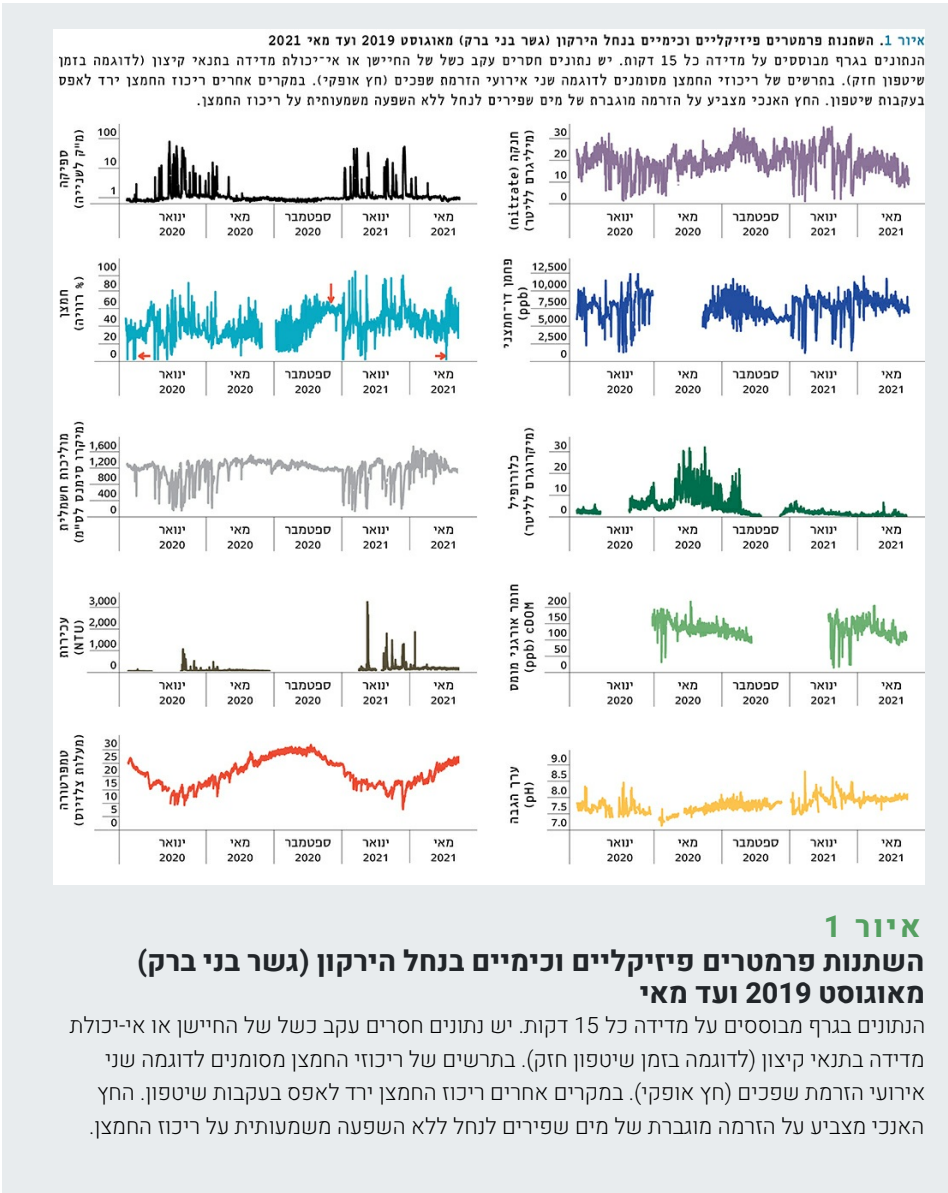
השימוש המתרחב בשני העשורים האחרונים בחיישנים הוביל לגילויים מדעיים חדשים שחשפו התנהגות מורכבת של המערכת הנחלית ושינוי באיכויות המים שלא ניתן להבחין בהם בדגימות חטף [8,10,24]. מסדי הנתונים המתקבלים מחיישנים הפרושים כיום בעולם הובילו לתובנות חדשות בדרך שאנו מבינים את המתרחש בנחלים, את השרידות של חומרי הזנה באגני הניקוז ואת תגובת הנחלים לאירועי קיצון, כגון שיטפונות ואירועי זיהום [7,9,23]. מכיוון שדגימות חטף בודדות אינן מסוגלות לייצג אירועי קיצון ושונות עיתית במערכות נחלים, מסתמן שמעבר הדרגתי בשנים הקרובות לניטור המתבסס על חיישנים הוא בלתי נמנע. מאמר זה יסקור את הטכנולוגיות הקיימות בעולם בתחום המדידה הרציפה של איכות מים בנחלים, את המצב הקיים בארץ ואת האפשרויות הגלומות באימוץ הניטור הרציף לשמירה על איכות מים בנחלים ולניהול משאבי מים באגני ניקוז.

## מערכות למדידת איכות מים בזמן אמת

השינוי המהותי בשימוש בחיישנים למדידות רציפות של איכות מים בנחלים החל לפני כ-50 שנה [10]. מאחר שהדרישות הבסיסיות מחיישנים לניטור סביבתי הן דיוק, אמינות וצורך מינימלי בטיפול שוטף, עד לפני כעשר נעשה שימוש בעיקר בחיישנים למדידת מוליכות חשמלית (EC), ערך הגבה (pH), טמפרטורה וחמצן. השימוש בחיישנים שהוזכרו לעיל, ביחד עם חיישני מפלס המשמשים לכימות הספיקה בנחל, הוביל לקפיצת דרך

משמעותית בהבנת התהליכים המתרחשים בנחלים בסקאלות זמן שונות מאלה שהתאפשרו בעזרת דגימות חטף, והוא הולך ומתרחב בניטור ובמחקר בישראל [15,4,3,1].

קפיצת מדרגה נוספת התרחשה בעשור האחרון עם כניסת דור חדש של חיישנים, השיפור באמינות המדידה, היכולת להפעיל חיישנים הצורכים מעט אנרגיה, והעלייה באמינות של שידור הנתונים בזמן אמת. לדוגמה, שיפור משמעותי בחיישני החמצן התרחש בעקבות כניסת טכנולוגיית מדידה אופטית והיכולת לניקוי אוטומטי על-ידי מברשות. נוסף על כך, ניתן למדוד כיום באמינות גבוהה בנחלים גם עכירות, חנקת (nitrate), כלורופיל ופיגמנטים פוטוסינתטיים אחרים, חומר אורגני (על-ידי פלואורנציה [fluorescence]) כמדד לריכוז חומר אורגני מומס [cDOM] או בליעה בספקטרופוטומטר) ופחמן דו-חמצני. חיישנים נוספים שישדרגו את יכולת הניטור ובייחוד את יכולת המדידה של מזהמים אורגניים וחיידקים פתוגניים נמצאים כיום בשלבי פיתוח שונים [18,12]. דוגמה למדידות ממגוון רחב של חיישנים ניתן לראות בתחנת המחקר שפועלת כבר כשנתיים בנחל הירקון (איור 1 ובזמן אמת בקישור זה). שילוב מגוון רחב של חיישנים מאפשר איתור אירועי זיהום באופן מדויק יותר, אפיון התהליכים אקולוגיים, טיפול טוב יותר באירועי זיהום מתמשכים ושיקום של הנחל [19].



**איור 1**  
**השתנות פרמטרים פיזיקליים וכימיים בנחל הירקון (גשר בני ברק) מאוגוסט 2019 ועד מאי**

הנתונים בגרף מבוססים על מדידה כל 15 דקות. יש נתונים חסרים עקב כשל של החיישן או אי-יכולת מדידה בתנאי קיצון (לדוגמה בזמן שיטפון חזק). בתרשים של ריכוזי החמצן מסומנים לדוגמה שני אירועי הזרמת שפכים (חץ אופקי). במקרים אחרים ריכוזי החמצן ירד לאפס בעקבות שיטפון. החץ האנכי מצביע על הזרמה מוגברת של מים שפירים לנחל ללא השפעה משמעותית על ריכוזי החמצן.

באיור 1 ניתן לראות דוגמאות לאיתור אירועי הזרמת ביוב גולמי בנפחים קטנים יחסית בעקבות התראה על ירידת חמצן במים, שצפויה להיות קטלנית עבור מינים רבים של בעלי חיים בנחל [22]. העובדה שמתבצעות בתחנה מדידות של פרמטרים נוספים הקשורים לחמצן, מעלה את ודאות המדידה בזמן ניתוח האירוע (לדוגמה: ירידה בחמצן מלווה בעלייה בפחמן הדו-חמצני). חיישנים עבור מדדים נפוצים אחרים, כמו עכירות, טמפרטורה ומליחות (הנמדדת על-ידי מוליכות חשמלית), נמצאו יעילים פחות לאיתור זיהום מביוב בתנאים השוררים בירקון. גם ריכוזי החנקת לא הגיבו באופן מובהק לאירועי הזיהום, אך כן ניכרת שונות עונתית בריכוזי החנקת – הם נמוכים יותר בחורף לעומת הקיץ. מכיוון שריכוזי cDOM לא עלה כצפוי מתוספת של חומר אורגני מהביוב שגלש, סביר להניח שרוב החומר האורגני התפרק עוד במעלה הנחל, ואילו העובדה שריכוזי החמצן נמוכים מעידה כי חילוף החמצן בין הנחל לאטמוספירה איטי במיוחד, כצפוי בנחל עם שיפוע נמוך וזרימה איטית.

ערכי העכירות שנמדדו בחורף 2020/21 בנחל הירקון (גשר בני ברק) היו גבוהים מאלה שנמדדו בשנה הקודמת. הערכים מעידים על שינויים בשימושי קרקע, שנגרמו ככל הנראה מעבודות תשתית ומהפרת קרקע סמוך לאזור התעשייה בצפון בני ברק. המשך המעקב אחרי ערכי העכירות והשינויים בשימושי הקרקע באגן הניקוז של הירקון בשנים הקרובות יאפשר מחקר כמותי על השפעת השינויים בשימושי הקרקע באגן הניקוז על תהליכים אקולוגיים, וגם יסייע ביכולת לנקוט פעולות מנע מול הרשויות הרלוונטיות. 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 [20]. הבדיקה בעזרת החיישנים מצאה שהזרמה בהיקפים סבירים לא גרמה לשינויים משמעותיים בריכוזי החומרים השונים, ואינה יעילה (חץ אנכי בגרף החמצן באיור 1). איסוף נתונים ארוך-טווח מאפשר לבחון גם את תגובת הנחל לאירועי זיהום מתמשכים. לדוגמה, הזרמת שפכים תכופה במהלך בניית מט"ש חדש במועצה אזורית דרום השרון בשנים 2017–2020 הובילה לעלייה בריכוזי חומרי הזנה בירקון ולפריחת אצות מוגברת, דבר שהתבטא בריכוז הכלורופיל. במדידות שנערכו באביב 2021 ניכר שהודות להפסקת הזרמת השפכים ירדו ריכוזי הכלורופיל, והדבר מעיד על ירידה בעוצמת תופעת פריחת האצות.



עכירות גבוהה בירקון, לאחר שיטפון. צולם סמוך לתחנת המדידה | צילום: שי ארנון

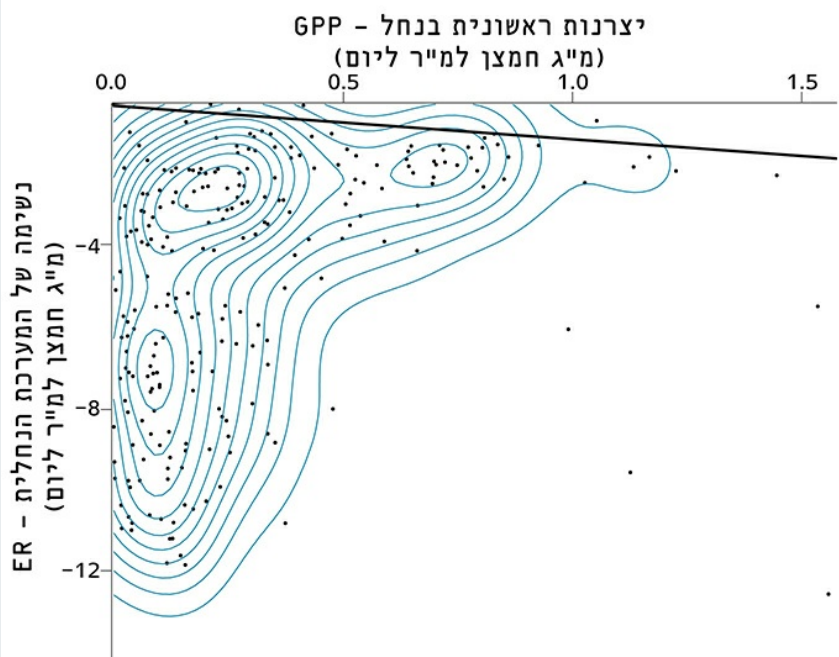
## כימות תהליכים אקולוגיים בטווחי זמן שונים

השינויים במערכת האקולוגית הנחלית מורכבים הרבה יותר מהנראה לעין בסדרות הנתונים. שינויים נסתרים אלה יכולים להתגלות בעזרת חישובי סך התהליכים המטבוליים בנחל. תהליכים מטבוליים מתרחשים אצל יצורים חיים בעת קליטת חומרים מהסביבה, טיבודם, הפקת אנרגיה מהם ופליטת חומרים. מדידת ההשתנות בזמן של מדדים מטבוליים של כל הנחל, כגון יצרנות ראשונית (GPP – Gross Primary Production) ונשימה (ecosystem respiration), מסייעת בחישובי קצבי ספיגה של חומרי הזנה ובהערכת מצב בריאות הנחל [24, 7]. 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 חנקן רק לאחר ששולבו עם חישובי נשימה ויצרנות ראשונית בנחל [14].

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 [21, 17]. לדוגמה, ניתן לראות בנחל הירקון אפיון דפוסים מטבוליים (metabolic regimes) המייצגים את תפקוד הנחל (איור 2). האפיון מתבסס על מדידת חמצן בנקודה אחת בנחל וכימות בעזרת מודלים מתמטיים. הנחת הבסיס היא ששינוי ריכוז החמצן מושפע מהיצרנות הראשונית, 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 בעזרת מודל נומרי [6] הנקרא Streammetabolizer. אפיון דפוסים מטבוליים אלה צפוי לסייע בהערכת של התפקוד האקולוגי בזמן אירוע זיהום, קצבי הטיבוד של חומרי הזנה, קצב השיקום וחזרתו של הנחל לתפקוד תקין.

## איור 2. דפוס מטבולי רב-שנתי של נחל הירקון

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. 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 נכון יותר את המצב המטבולי של הנחל, ורשויות שונות בעולם החלו להשתמש בו לצורכי ניטור מצב הנחל. בדוגמה המצורפת ניתן לראות שבירקון רוב הזמן הנשימה דומיננטית (מתחת לקו השחור הרציף).



## איור 2

### דפוס מטבולי רב-שנתי של נחל הירקון

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. 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 נכון יותר את המצב המטבולי של הנחל, ורשויות שונות בעולם החלו להשתמש בו לצורכי ניטור מצב הנחל. בדוגמה המצורפת ניתן לראות שבירקון רוב הזמן הנשימה דומיננטית (מתחת לקו השחור הרציף).

הצגת תוצאות היצרנות הראשונית והנשימה ממדידות חמצן שנעשו בירקון (איור 1) על גבי איור פיזור ויצירת מפה לפי צפיפות הנקודות (Kernel density plot) מאפשרות אפיון שהוא מעין "טביעת אצבע" מאפיינת של הנחל. 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 אצבע יכולה להעיד על בעיה בתפקוד אקולוגי תקין של הנחל [7].

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](#) שמאוחסנים בו גם נתוני התחנה בנחל הירקון. אנו צופים כי הקמת אתר לאומי שיאפשר שיתוף מדידות שגופי מחקר שונים ורשויות עורכים במקווי מים (לדוגמה: [reco.ruppin.ac.il/sensor](http://reco.ruppin.ac.il/sensor)! רשות נחל הקישון<sup>[3]</sup>), תאפשר את קידום המדע בנושא נחלים ומערכות אקוטיות ים תיכוניות, כפי שנעשה במדינות אחרות בעולם (לדוגמה, בארה"ב).



חיישנים בתחנת המחקר בנחל הירקון, חורף 2020/21. " השימוש המתרחב בחיישנים הוביל לגילויים מדעיים חדשים שחשפו התנהגות מורכבת של המערכת הנחלית ושינוי באיכויות המים שלא ניתן להבחין בהם בדגימות חטף" | צילום: שי ארנון

## יתרונות, מגבלות ואפשרויות עתידיות בשימוש במערכות לניטור רציף

זיהוי מגמות שינוי באיכויות מים בנחלים מצריך מדידות רציפות וניתוח תוצאות על פני מגוון רחב של סקאלות זמן, הן כדי לאתר זיהום הן כדי להבין את הדינמיקה הטבעית של המערכת הנחלית. לדוגמה, רוב השינויים השבועיים או החודשיים הם "בלתי נראים" בדפוסי דגימות החטף המקובלים בעולם<sup>[13, 21]</sup>. יתרון נוסף שנותנת היכולת לניטור רציף הוא קבלת מידע על פרמטרים שאינם נמדדים באופן ישיר, וזאת לאור העובדה שקיימים מתאמים ברורים בין פרמטרים שונים, וכך ניתן להעריך ריכוז של פרמטר הניתן למדידה רק במעבדה על-ידי פרמטר שנמדד באופן רציף. יכולת כזו מרחיבה את הפוטנציאל הגלום בניטור הרציף, תוך דגש על טווח האי-ודאות הטמון בשיתות מסוג זה. לדוגמה, מספר עבודות אכן הראו כי ניתן לחזות ריכוז זרחן בנחלים בעזרת נתוני עכירות<sup>[15, 16]</sup>.

למרות היתרונות הגלומים בניטור הרציף יש לזכור ששימוש בחיישנים למדידה רציפה דורש הכשרת כוח אדם, טיפול שוטף באתר ובדיקה מתמדת של איכות המדידה של החיישנים. מניסיוננו בירקון, מומלץ לטפל בחיישנים הנפוצים למדידת EC, טמפרטורה ו-pH אחת לחודש, אם כי בחלק מסביבות הנחלים החיישנים הללו ימדדו באופן אמין גם במשך תקופות ארוכות יותר. החיישנים האופטיים המודדים חמצן, חנקה, עכירות וכלורופיל דורשים ניקוי באמצעות מברשות בתדירות גבוהה (עדיף לפני כל מדידה). החיישנים האופטיים עלולים גם לסבול מהפרעות בשל עכירות גבוהה, ולכן דורשים כיוול מתאים שמביא בחשבון את האפקט המפריע, ועיבוד של הנתונים לאחר המדידה, בייחוד בעקבות שיטפון. עיבוד הנתונים נעשה על-ידי כיוול ובדיקת החיישן להפרעות מגורם ידוע בזמן הכיוול הראשוני שלפני ההתקנה, וכן על-ידי השוואה של תוצאות ממדי דגימת חטף לתוצאות

המדידה הרציפה. מבחינה טכנית מערכות הניטור מחייבות מערכות חשמל הצורכות מעט אנרגיה, ופן זה של התפעול נעשה כיום באופן פשוט יחסית בעזרת פאנל פוטו-וולטאי המטעין סוללה באתר הדגימה.

משטר הזרימה בנחלים ים תיכוניים מחייב מיגון של החיישנים מפני זרימות חזקות במיוחד בעת שיטפון. בירקון מערכת החיישנים עומדת בספיקות גבוהות פי 100 מספיקת הבסיס תוך כדי עליית מפלס של יותר משני מטר. במקרי קיצון מסוג זה עולה העכירות לרמות גבוהות ביותר, שאינן מאפשרות מדידה של רוב החיישנים האופטיים, אם כי לתקופות קצרות, כפי שניתן לראות בפערי נתונים במהלך הנתונים של החורפים באיור 1. דרך אחרת להתמודד עם שיטפונות היא באמצעות שאיבת מים מן הנחל אל תחנה שממוקמת בגדת הנחל, וביצוע המדידות מחוץ לאפיק הנחל. יש לשים לב שתהליך השאיבה עשוי להשפיע על ערכי חלק מהמדדים.

המדידות מאפשרות הפקת כמות גדולה של נתונים ולא תמיד פשוט לנתח אותם או לבצע עליהם בקרת איכות, ולכן יש לפתח כלים פשוטים שמקבלי החלטות יוכלו לבצע בעזרתם ניקוי נתונים שגויים ועיבוד נתונים מהיר. שיטות מסורתיות של ניתוח נתונים ומסקנות ששימשו בעבר, הופכות ישימות פחות, בייחוד אם אנו זקוקים לניתוח בזמן אמת. הכלים הנדרשים חייבים להיות פשוטים לתפעול, בעלי אוטומציה כמעט מלאה ולאפשר ביצוע בדיקות איכות מהימנות [13]. למרות אתגרים אלה, מערכות חיישנים מתקדמות הן כבר מזמן לא רק כלים אקדמיים, אלא כלים נפוצים בידי גופים ממשלתיים ורשויות העוסקות באכיפה סביבתית, בארה"ב פרט ([www.waterqualitydata.us](http://www.waterqualitydata.us)) וברחבי העולם ([www.gemstat.org](http://www.gemstat.org)). נכון להיום השימוש הוא בעיקר בפרמטרים הפשוטים למדידה (חמצן, EC, pH, עכירות, טמפרטורה), אך התשתית למימוש הפוטנציאל באיתור עמידה בתקינה ובקבלת החלטות לניהול משאבי מים כבר קיימת. מגוון החיישנים הזמין גדל, ואנו צופים כי בקרב חיישנים נוספים (למשל לחנקה ולחומר אורגני) ייעשו סטנדרטיים. למעשה, מדידת חנקה אפשרית כבר כיום ברמת אמינות גבוהה, והחסם העיקרי לשימוש נרחב בחיישנים הוא המחיר היקר. לסיכום, לשימוש בחיישנים למדידה רציפה בזמן אמת של איכות מים יש פוטנציאל עצום לשיפור יכולות ניהול משאבי מים. שילוב מערכות לניטור רציף של איכות המים עם מערך הניטור הביולוגי בהיקפים לאומיים יסייע להחזיר את מערכות המים בישראל למצב אקולוגי יציב וטוב ולספק את שירותי המערכת האקולוגית לרווחת האדם.

## הלכה למעשה

### ד"ר חיים כץ, מנהל תחום בקרת איכות מים וניטור, אגף איכות מים, רשות המים:

ניטור רציף של נחלים הוא בעל ערך רב במעקב ובבקרה אחר איכויות המים הזורמים בהם. בשנים האחרונות, עם פיתוח טכנולוגיות ניטור אמינות והוזלתן, הוכנסו תחנות ניטור רציף למספר נחלים בישראל. אחת הדוגמאות לכך היא תחנות לניטור רציף של מקורות הירדן שמפעילה חברת מקורות במטרה לאפשר זיהוי מוקדם של זיהומים המוסעים בנחל, ניטור רציף של מספר תחנות לאורך הירדן הדרומי ועוד. הטכנולוגיות המופעלות בתחנות אלה כוללות חיישנים של פרמטרים כימיים במים, דוגמת מוליכות חשמלית, ערך הגבה (pH) וחמצן מומס, וכן מערכות של חיישנים ביולוגיים המנטרות תגובת חיידקים למזהמים שונים. כדי להרחיב ולבסס את התמונה המתקבלת ממערכות ניטור רציפות, במקרים מסוימים חשוב להשתמש במערכת משלימה לדגימת מים. שימוש בדוגם מים אוטומטי, המופעל בעת חריגה של המשתנים המנטורים באופן רציף, ממלא את המטרה.

מערכות לניטור רציף של נחלים, המשולבות ביכולת דגימת מים וביצוע אנליזות במעבדה בעת חריגות בערכים המנטורים, מאפשרות סינרגיה של השיטות השונות. השילוב מיושם במספר תחנות שמפעילות רשות המים וחברת מקורות. עם זאת, לנוכח המורכבות והעלויות הכרוכות בניטור רציף המשולב עם דגימות, יש לבחור בשיקול דעת את אתרי הניטור שמיישמים בהם את הטכנולוגיה הזו, בהתאם למידת הרגישות לזיהום, מידת השינוי הצפוי לאורך זמן, מידת הישימות ועוד.

## מקורות

1. גזית א. 2017. [מה צופן העתיד לנחלי ישראל](#). אקולוגיה וסביבה 4(8): 78-79.

2. מורין א. 2018. [השפעת שינוי האקלים על משטר המשקעים ועל המשטר ההידרולוגי במזרח הים התיכון ובישראל](#). אקולוגיה וסביבה 9(2): 4-6.

3. ניסים ש וקובליו-רוט ר. 2015. דו"ח מסכם לשנת 2014, רשות נחל הקישון.
4. סוארי י, שיש ל, גפני ש ואחרים. 2017. [עקות חמצן מתמשכות באסטואר של נחל אלכסנדר](#). *אקולוגיה וסביבה* **8**(3): 44-52.
5. סוקניק א וסקוטלסקי א. 2017. [זכות הטבע למים? דילמות בשיקום נחלי ישראל לנוכח השינויים במשק המים](#). *אקולוגיה וסביבה* **8**(4): 68-75.
6. Appling AP, Hall RO, Yackulic CB, and Arroita M. 2018. [Overcoming equifinality: Leveraging long time series for stream metabolism estimation](#). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **123**: 624-645.
7. Bernhardt ES, Heffernan JB, Grimm NB, et al. 2017. [The metabolic regimes of flowing waters](#). *Limnology and Oceanography* **63**: 99-118.
8. Bowes MJ, Loewenthal M, Read DS, et al. 2016. [Identifying multiple stressor controls on phytoplankton dynamics in the River Thames \(UK\) using high-frequency water quality data](#). *Science of the Total Environment* **569-570**: 1489-1499.
9. Burns DA, Pellerin BA, Miller MP, et al. 2019. [Monitoring the riverine pulse: Applying high-frequency nitrate data to advance integrative understanding of biogeochemical and hydrological processes](#). *WIREs Water* **6**: e1348.
10. Carritt DE and Kanwisher JW. 1959. [An electrode system for measuring dissolved oxygen](#). *Analytical Chemistry* **31**: 5-9.
11. Cassidy R and Jordan P. 2011. [Limitations of instantaneous water quality sampling in surface-water catchments: Comparison with near-continuous phosphorus time-series data](#). *Journal of Hydrology* **405**: 182-193.
12. Castrillo M and García ÁL. 2020. [Estimation of high frequency nutrient concentrations from water quality surrogates using machine learning methods](#). *Water Research* **172**.
13. Halliday SJ, Wade AJ, Skeffington RA, et al. 2012. [An analysis of long-term trends, seasonality and short-term dynamics in water quality data from Plynlimon, Wales](#). *Science of the Total Environment* **434**: 186-200.
14. Heffernan JB and Cohen MJ. 2010. [Direct and indirect coupling of primary production and diel nitrate dynamics in a subtropical spring-fed river](#). *Limnology and Oceanography* **55**: 677-688.
15. Hillel N, Geyer S, Licha T, et al. 2015. [Water quality and discharge of the Lower Jordan River](#). *Journal of Hydrology* **527**: 1096-1105.
16. Horsburgh JS, Jones AS, Stevens DK, Tarboton DG, et al. 2010. [A sensor network for high frequency estimation of water quality constituent fluxes using surrogates](#). *Environmental Modeling and Software* **25**: 1031-1044.
17. Jones AS, Stevens DK, Horsburgh JS, and Mesner NO. 2011. [Surrogate measures for providing high frequency estimates of total suspended solids and total phosphorus concentrations](#). *Journal of the American Water Resources Association* **47**: 239-253.
18. Offenbaume KL, Bertone E, and Stewart RA. 2020. [Monitoring approaches for faecal indicator bacteria in water: Visioning a remote real-time sensor for e. coli and enterococci](#). *Water* **12**: 2591.
19. Pellerin BA, Saraceno JF, Shanley JB, et al. 2012. [Taking the pulse of snowmelt: In situ sensors reveal seasonal, event and diurnal patterns of nitrate and dissolved organic](#)



- [matter variability in an upland forest stream](#). *Biogeochemistry* **108**: 183-198.
20. Peter KT, Hou F, Tian Z, et al. 2020. [More than a first flush: Urban creek storm hydrographs demonstrate broad contaminant pollutographs](#). *Environmental Science and Technology* **54**: 6152-6165.
21. Rode M, Wade AJ, Cohen MJ, et al. 2016. [Sensors in the stream: The high-frequency wave of the present](#). *Environmental Science and Technology* **50**: 10297-10307.
22. Saari GN, Wang Z, and Brooks W. 2018. [Revisiting inland hypoxia: Diverse exceedances of dissolved oxygen thresholds for freshwater aquatic life](#). *Environmental Science and Pollution Research* **25**: 3139-3150.
23. Savoy P, Appling AP, Heffernan JB, et al. 2019. [Metabolic rhythms in flowing waters: An approach for classifying river productivity regimes](#). *Limnology and Oceanography* **64**: 1-17.
24. Scheffer M, Bascompte J, Brock WA, et al. 2009. [Early-warning signals for critical transitions](#). *Nature* **461**: 53-59.

## קריאה נוספת

מאמר הסוקר תובנות שהושגו בעזרת חיישנים למדידה רציפה בנחלים, ומתאר מה ניתן לעשות בעתיד עם חיישנים בתחום של אקולוגיה נחלית ושיקום נחלים.

Rode M, Wade AJ, Cohen MJ, et al. 2016. [Sensors in the stream: The high-frequency wave of the present](#). *Environmental Science and Technology* **50**: 10297-10307.

מאמר המסביר מהם דפוסים מטבוליים בנחלים, כיצד ניתן לכמת אותם, ומה ניתן לעשות בעזרתם כדי להבין טוב יותר את המצב האקולוגי של הנחל.

Bernhardt ES, Heffernan JB, Grimm NB, et al. 2017. [The metabolic regimes of flowing waters](#). *Limnology and Oceanography* **63**: 99-118.