



תאריך שליחת הדו"ח : מרץ 2024

מספר מחקר: 1935

השפעות אקלימיות ומרחביות על זיהום אגני הניקוז במרכז רמת הגולן

דו"ח מדעי מסכם

אלעד דנטה*¹, אורן רייכמן², לאה ויטברג¹, שלומית פז¹, נורית שטובר¹, תום קולייר³

1. בית הספר למדעי הסביבה, אוניברסיטת חיפה
2. החוג למדעי הסביבה ומוקד המחקרים בחולה, המכללה האקדמית תל-חי
3. המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

* כתובת דואר אלקטרוני של החוקר הראשי: edente@geo.haifa.ac.il

חתימת החוקר הראשי: 

רפרנט קק"ל: ד"ר יהונתן בר יוסף

מילות מפתח: זיהום נחלים, שינויי אקלים, רעיה, רמת הגולן, נהר הירדן

תקציר מנהלים

אגני הניקוז של הגולן מאופיינים ברגישות הידרולוגית גבוהה ופעילות אנתרופוגנית מגוונת: חקלאית, צבאית, תיירותית והתיישבותית. בשנים האחרונות מתרבים הדיווחים על ערכי זיהום חריגים בנחלי הגולן הנשפכים אל הכנרת, בעיקר של נוטריינטים וקוליפורמים. זיהומים אלו, ובפרט הדיווח על הדבקה בעכברת (Leptospirosis) של מטיילים שרחצו לאורך הנחלים משושים, יהודייה, דליות, הירדן והזוויתן בקיץ 2018, הביאו לסגירת שמורות טבע ולנזק כלכלי נרחב לתושבי הצפון המתפרנסים מתיירות. בנוסף, לזיהום בנחלים אלו עשויה להיות השפעה על המערכות האקולוגיות האקוויטיות, על היכולת לנצל את המים לצורך הפקתם כמי שתייה והשקיה, ועל איכות המים בכנרת. מחקרים קודמים הצביעו על מספר גורמים אפשריים לזיהום, ביניהם: ירידה בספיקת הערוצים בעקבות שנות בצורת, רעיית יתר בקרבת הערוצים וזיהום על ידי חזירי בר נגועים.

על מנת להבין את התהליכים המרחביים וההידרולוגיים ארוכי הטווח באגני הניקוז של מרכז רמת הגולן, שילבנו מספר שיטות מחקריות: א. ניתוח נתונים של סדרות זמן הידרולוגיות (כולל פרמטרים כימיים וביולוגיים) ומטאורולוגיות ארוכות, ב. יישום מודל הידרולוגי מרחבי, לניתוח פוטנציאל הסעת המזהמים מרחבי אגן הניקוז ואל הערוצים האיתנים, ו-ג. שחזור מרחבי בכל רמת הגולן של השתרעות הרעייה הפעילה לאורך ארבעת העשורים האחרונים. כל אחד מהפרקים בנפרד ושילובם יחד, הניבו תובנות לגבי שינויים באיכות מי הנחלים וגורמים אפשריים לשינויים אלו. עבור נהר הירדן ההררי (לאורכו ממוקם פארק הירדן של קק"ל), נמצא שיפור באיכות מי הנחל לאורך העשורים האחרונים. זאת, לצד מספר חודשים (קיץ וחורף) בהם נרשמו חציוני קולי צואתי גבוהים. מלבד חודשים אלו, חציוני הקולי הצואתי מאז שנת 2017 נמוכים מערך הסף המקובל היום לרחצה לתיירות (400 MPN/100ml). בניגוד לטענה הקושרת בין שנים שחונות לזיהום בנחלים, בכל התחנות ההידרולוגיות שנבחנו, לא נמצא קשר מובהק בין שנים בהן הספיקה הייתה נמוכה מהממוצע הרב שנתי לאיכות ירודה של מי הנחלים. יתרה מזאת, בגשר הפקק (מעלה הירדן ההררי) נמצא שערכי הקולי הצואתי גבוהים באופן מובהק בשנים עם ספיקה גבוהה יחסית. בנחלים יהודייה ומשושים, חציוני ערכי המוצקים המרחפים גבוהים באופן מובהק בשנים המאופיינות בספיקה גבוהה. בשנת 2018 (התפרצות העכברת) בנהר הירדן ובנחל יהודייה, נמצאו ערכי קולי צואתי ומוצקים מרחפים גבוהים ביחס לשנים אחרות. תוצאות ניתוח הרעייה על סמך חישה מרחוק הראה ששטח הרעייה הפעיל לא השתנה באופן משמעותי בעשורים האחרונים. זאת, לצד צמצום שטח הרעייה הפעיל במורד אגני הניקוז לעומת עלייה במעלה האגנים. תוצאות אלו לא סותרות זיהום אפשרי שמקורו ברעייה פעילה בנחלים עצמם. תוצאות המחקר והצלבתם עם דיווחים על גלישות שפכים חוזרות ונשנות, ובעיקר בשנים גשומות, מצביעים על הצורך בהגברת האכיפה למניעת אירועי גלישות אלו וביצוע פעולות לאצירתם בסמוך למקור הזיהום ובטרם יגיעו אל אזורים בעלי קישוריות הידרולוגית גבוהה.

Abstract

High hydrological sensitivity and diverse anthropogenic activities, including agriculture, military activity, tourism, and settlements, characterize the drainage basins of the Golan Heights. In recent years, there has been an increase in reports of abnormal pollution levels in the Golan streams flowing into the Sea of Galilee (Kinneret), primarily involving nutrients and coliforms. These incidents, including the outbreak of leptospirosis among travelers who swam in streams such as Meshushim, Yehudiya, and the upper Jordan River, during the summer of 2018, resulted in the closure of nature reserves and significant economic losses for residents reliant on tourism. Previous studies have suggested various potential causes of contamination, including reduced discharge due to prolonged drought, overgrazing near waterways, and contamination by infected wild boars.

To comprehensively understand the long-term spatial and hydrological processes in the central Golan Heights drainage basins, we employed several research methodologies. This included data analysis of extensive hydrological (including chemical and biological parameters) and meteorological time series, utilization of a spatial hydrological connectivity model to assess potential pollutant transport within the drainage basins and into perennial streams, and spatial reconstruction of grazing activity across the entire Golan Heights over the past four decades. The integration of these methods provided insights into changes in stream water quality and potential pollution sources.

For the upper Jordan River, which feeds KKL's Jordan Park, there has been an overall improvement in water quality over recent decades. Despite occasional months with elevated fecal coliform levels, most of the monthly median values since 2017 have remained below the accepted threshold for tourism bathing standards (400 MPN/100ml). Contrary to claims associating low flow years with stream pollution, no clear correlation was found between below-average flow years and water quality degradation at the hydrological stations examined. Moreover, significantly higher fecal coliform values were observed during years with relatively high discharge in the upper Jordan River. Remote sensing-based grazing analysis indicated no significant change in active grazing areas over recent decades, despite a decrease downstream and an increase upstream. These findings do not discount the potential contribution of grazing-

related pollution to stream contamination. Overall, the study results, along with reports of recurring sewage overflows during rainy periods, underscore the importance of enhanced enforcement measures to prevent and mitigate such overflows at their source before they reach areas with high hydrological connectivity.

תוכן העניינים

נושא	עמוד
1. דו"ח שנה ג'	3
2. פירוט המשימות השנתיות	3
3. דו"ח מסכם	4
3.1. מבוא	4
3.2. שיטות עיקריות	5
3.3. תוצאות	5
3.3.1. שינויים מרחביים ברעייה באגני הניקוז	5
3.3.2. מקורות זיהום בהיבט הידרולוגי מרחבי	8
3.3.3. שינויים באיכות מי הנחלים בעשורים האחרונים	9
3.3.4. שינויים באיכות מי הנחלים בשנים האחרונות	12
4. דיון ומסקנות	14
5. פרסומים במאמרים ובכנסים	15
6. הנגשת הנתונים והמודלים שעובדו ונוצרו במסגרת המחקר	16
7. רשימת ספרות	17

1. דו"ח שנה ג'

בשנה ג' עסקנו באינטגרציה של חלקי המחקר השונים על מנת להסיק מסקנות לגבי השפעת גורמים אקלימיים ואנושיים על איכות מי הנחלים. האינטגרציה כללה חיבור של נתונים הידרולוגיים, כימיים, פיזיקליים, ביולוגיים, נתוני מבקרים, תוצאות מחקר הקישוריות ההידרולוגית וזיהוי שינויים מרחביים ברעיה. במחקר השינויים במרחביים ברעיה פעילה ברמת הגולן, יישמנו את המודל המכויל כדי לשחזר שטחי מרעה פעיל ברזולוציה עיתית תלת-שנתית, מ-1984 ועד היום. תוצאות המודל מאפשרות לאתר שינויים במיקום והיקף המרעה בכל רמת הגולן ולבחון את הקשר של שינויים אלה לאיכות מי הנחלים. את המודל ההידרולוגי יישמנו בכל אגן ניקוז כדי לאתר את האזורים בהם פוטנציאל הסעת המזהמים הוא הגבוה ביותר, והצלבנו עם אירועי זיהום מדווחים. בנוסף, במסגר שנה ג' פיתחנו קוד שיהיה נגיש ויסייע בניתוח מהיר של נתונים הידרולוגיים לקבלת החלטות אופרטיביות בניהול אגני הניקוז.

2. פירוט המשימות השנתיות

2.1. שנה א'

מטרות: מיפוי אגני הניקוז (טופוגרפיה ושימושי קרקע), ריכוז נתונים הידרולוגיים ואקלימיים, וניתוח מגמות ראשוני, תחילת פיתוח שיטה לזיהוי מקורות זיהום שינויים במרעה, איתור דוקטורנט ומסטרנט למחקר. ביצוע: האגנים מופו, ונתונים הידרולוגיים וביולוגיים נאספו מרשות המים, השירות המטאורולוגי, ומהמשרד לאיכות הסביבה. הנתונים נותחו והניבו מסקנות ראשוניות לגבי מגמות ארוכות טווח, השפעת שינויים הידרולוגיים באגני הניקוז והקשר בין שנות בצורת לאיכות מי הנחלים. פותח מודל הידרולוגי ראשוני (קישוריות) לבחינת פוטנציאל הסעת המזהמים. בוצע ריכוז של נתוני חישה מרחוק זמינים לאיתור מקורות זיהום ושינויים בהשתרעות מרעה. נעשו ניסיונות לאיתור תלמידי מחקר, אך ללא הצלחה. סטודנט לתואר שני פרש. כדי להתגבר על הפער, שכרנו עוזרת מחקר שסייעה בניתוח הנתונים.

2.2. שנה ב'

מטרות: ניתוח מרחבי-עיתי של נתוני חישה מרחוק לאיתור מקורות זיהום ומרעה פעיל. השלמת פיתוח המודל הקישוריות ההידרולוגי (הועדף על פני GB-HYDRA בזכות הדגש על הקשר המרחבי למבלעים שהוגדרו כנחלי הגולן האיתנים). ביצוע: הניתוח המרחבי-עיתי לאיתור שינויים במרעה פותח בעזרתו של הסטודנט לתואר ראשון תום קולייר, במסגרת פרויקט המחקר שלו בחוג למדעי הסביבה, תל חי. סטודנט נוסף החל תואר שני במסלול תזה אך פרש מהלימודים לאחר מספר שבועות. יישום המודל ההידרולוגי הורחב והניתוח ההידרולוגי קודם בסיוע עוזרי מחקר.

2.3. שנה ג'

מטרות: ניתוח עונתי רב-שנתי משולב של מגמות ואירועי קיצון, בחינת קשר בין שינויים באיכות המים לגורמים אקלימיים ואנושיים ופוטנציאל זיהום עתידי. הנגשת המודלים והנתונים שעובדו במחקר. פרסום תוצאות המחקר במאמרים, כנסים ודו"חות.

ביצוע: השלמת הניתוח המשולב עברו כל תת אגן כולל שינויים עונתיים ארוכי וקצרי טווח באיכות המים אל מול גורמי זיהום פוטנציאליים. בוצע שחזור שינויים בהשתרעות המרעה בעשורים האחרונים. פותחה אפליקציה לחיתוך וניתוח איכות מי הנחלים. תוצאות המחקר סוכמו בדו"ח, ועל מחקר שינויי המרעה נכתב מאמר (טרם הוגש). תוצאות המחקר הוצגו בשלושה כנסים. בשנה ג' סייעו שלושה עוזרי מחקר בקידום עיבוד הנתונים והשלמת הניתוח המשולב. שלושתם גויסו למילואים עם פרוץ המלחמה, והייתה לכך השפעה על השלמת המחקר.

3. דו"ח מסכם

3.1. מבוא

אגני הניקוז של מרכז רמת הגולן והירדן ההררי מוגדרים כבעלי רגישות הידרולוגית גבוהה, הן בשל התנקזותם לכנרת והן בשל האקווה הבזלתית המצויה בתחומם. להתרבות הדיווחים על זיהום נחלי אגנים אלו, הוצעו בשנים האחרונות מספר הסברים: א. ירידה בספיקת הנחלים בעקבות סכירה או שנות בצורת והעדר שטיפת מזהמים כתוצאה מכך (לדוגמא, Dadon et al. 2019), ב. מרעה בקר בסמוך ובתוך הערוצים הזורמים, ו-ג. ארועי זיהום נקודתיים ממקורות אנתרופוגניים (יישובים, בסיסים ורפתות. לדוגמא, בריינסקי וחוב, 2020).

מרבית המחקרים שנעשו עד כה על הזיהום באגני הניקוז של מרכז רמת הגולן התמקדו בניתוח דוגמאות מים וסדימנטים ממורד הערוצים. ניטור זה הינו בעל ערך רב למניעת הזרמת מים מזהמים לכנרת ולמניעת הדבקת מטיילים בתחלואה שמקורה במעלה הערוצים. עם זאת, גישת ניטור זו, המתמקדת בהסעת מזהמים אל הכנרת, מוגבלת מבחינת זיהוי מוקדם של מקורות הזיהום במעלה אגן הניקוז. זיהוי מקורות אלה הינו חיוני למניעת זיהומים עתידיים לאורך כל הערוץ, מקו פרשת המים ועד השפך, ויכול להפחית את המקרים בהם הזיהום מנוטר לאחר שכבר הגיע לערוץ ואף לכנרת. על סמך הנתונים המרחביים והעיתיים הזמינים כיום מחישה מרחוק וממדידות ישירות של הגורמים השונים הפועלים באגנים, ניתחנו מקורות הזיהום הפוטנציאליים ואת דרכי ההסעה שלהם ברחבי אגני הניקוז של מרכז הגולן. ממצאי ניתוח זה יאפשרו ניהול מיטבי של השטחים הפתוחים והממשק שלהם עם אזורים בנויים וחקלאיים לטובת השמירה

על הערוצים עצמם, על איכות מי הכנרת ועל הפעילות הכלכלית באזור (חקלאות ותיירות). בהמשך ניתן יהיה להרחיב גישה זו גם לאזורים נוספים ברחבי הארץ.

3.2. שיטות עיקריות

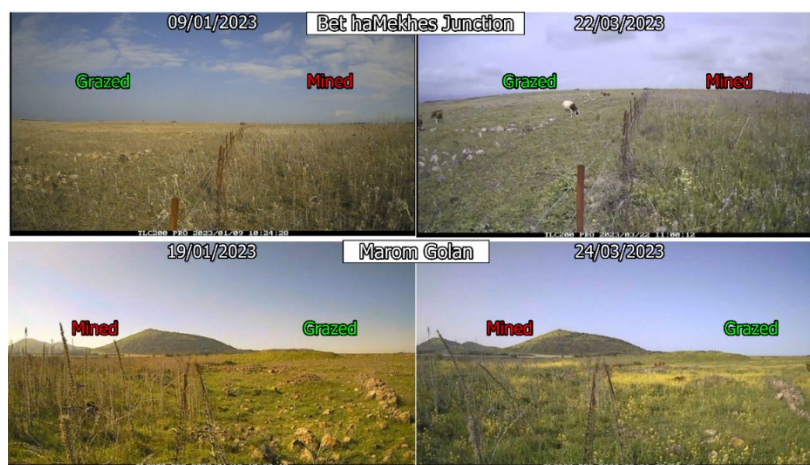
במסגרת המחקר שילבנו מספר רב של שיטות וסוגי נתונים שהתקבלו מגופים שונים, על מנת לזהות שינויים באיכות מי הנחלים ולאתר את הגורמים השולטים על שינויים אלה. נתוני איכות הנחלים התקבלו מרשות המים וממשרד הבריאות, נתוני גשם הורדו מאתר השירות המטאורולוגי; נתוני שימושי קרקע התקבלו ממכון דש"א; נתוני מספר המבקרים באתרים הכוללים כניסה לנחלים התקבלו מרט"ג; לצורך בניית וחישוב הנתונים הטופוגרפיים וההידרולוגיים של אזור המחקר, בוצע שימוש במודל גבהים (DEM) ברזולוציה של 12.5 מ' שהורד מתוך בסיס הנתונים של הלוויין ALOS-PALSAR; דיווחים על אירועי זיהום ברמת הגולן נאספו מרשות המים ומהמועצות המקומיות; פיתוח המודל לאיתור ושחזור שטחי מרעה פעילים התבסס על קשר ישיר על בוקרי רמת הגולן, דיווחי המעוצות המקומיות ומשרד החקלאות, צילום רציף (מצלמות קיטועי-זמן) של שטחי מרעה, ונתונים לווייניים מארבעת העשורים האחרונים. ככלל, עיבוד סדרות הזמן נעשה בעזרת פיתוח קוד פייתון ייעודי ואילו הנתונים המרחביים עובדו ב-Google Earth Engine (GEE). שינויים באיכות מי הנחלים בהשפעת שנות בצורת ובחינת איכות המים בשנת 2018 (שנת התפרצות העכברת), נעשו בעזרת מבחן א-פרמטרי Wilcoxon דו-צדדי. מודל הקישוריות (Borselli et al., 2008) הותאם לרמת הגולן על בסיס נתוני הטופוגרפיה ושימושי הקרקע. לפירוט נוסף על השיטות, ראו פרק תוצאות.

3.3. תוצאות

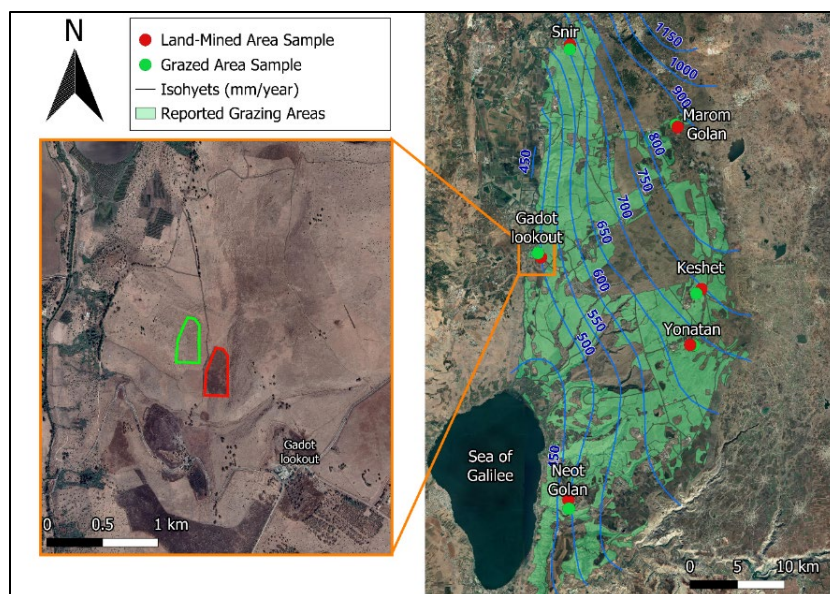
3.3.1. שינויים מרחביים ברעייה באגני הניקוז

במסגרת המחקר פותח כלי ראשון מסוגו לאיתור שטחי מרעה פעיל על סמך נתוני חישה מרחוק. השימוש בנתוני לווייני Landsat מאפשר שחזור של שינויים בפני השטח מאז 1984 (רזולוציה עיתית של מספר שבועות ומרחבית של 30 מטרים לפיקסל). מטרת השחזור הייתה לאתר שינויים בהיקף המרעה ברמת הגולן כדי לבחון את הקשר בין שינויים פוטנציאליים אלו לשינויים באיכות מי הנחלים השונים. בכלי שפותח, ההבחנה בין שטח מרעה לשטח ללא מרעה מבוססת על תהליכים שנצפו בשטח רמת הגולן בסיורי שטח ובעזרת מצלמות קיטועי זמן (איור 1). התיעוד הראה שבאזורים ללא מרעה אין רמיסה של קמל משנים קודמות ונראה שהוא מסוכך על צומח עונתי חדש ובכך מפחית את הנראות ואת קצב התפתחותו וכתוצאה מכך גם את ההחזר ממנו בתחומים הספקטרליים האדום והאינפרא אדום הקרוב. תופעה זו באה לידי ביטוי בסדרת הזמן שיוצרה עבור אינדקסים של בריאות הצומח המחושבים מנתוני לוויינים, כדוגמת אינדקס SAVI

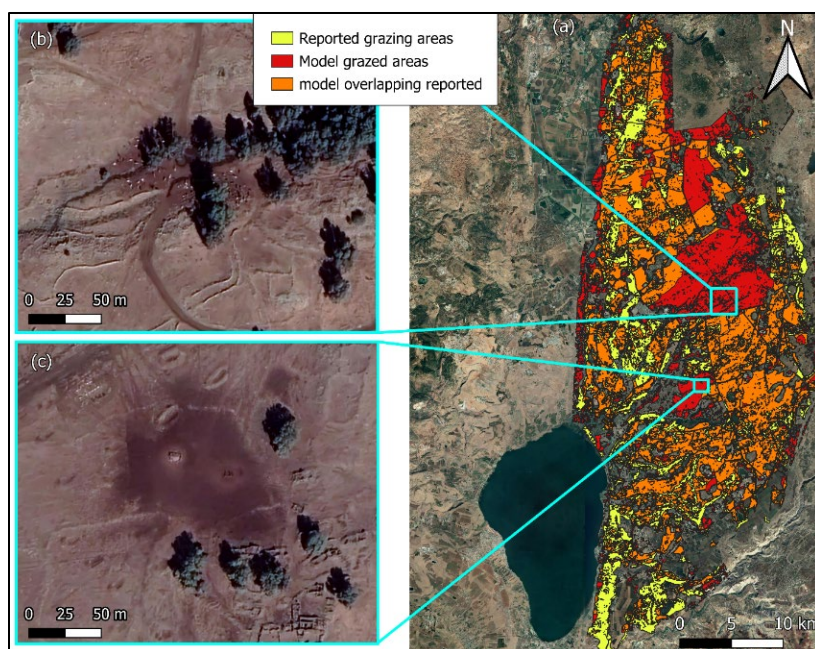
(Soil Adjusted Vegetation Index). ניתוחים אלה מראים כי הצימוח העונתי בשטחי מרעה יהיה מוקדם יותר בעונה ובעל שיא גבוה יותר מאשר בשטח ללא מרעה המושפע ממיסוך הקמל של השנה הקודמת. כיול המודל נעשה על סמך נתוני רעיה מתועדים ממרעה מושב קשת באדיבות הבוקר יהודה גלעד, ועל סמך נתונים משטחי מרעה נוספים ברמת הגולן (איור 2). לאחר כיול המודל, בוצעה בחינה של דיוק המודל על סמך שטחי מרעה שלא נעשה בהם שימוש בשלב הכיול. תוצאות האימות הראו זיהוי נכון של שטחי מרעה ב-80% מהפיקסלים שנדגמו מאז שנת 2000. פרטים נוספים על פיתוח השיטה, מופיעים בדו"ח שנה ב'. על סמך הכיול והאימות הוחל המודל על כל שטח רמת הגולן לאיתור שטחי מרעה פעילים בשנים 2020-2023. המודל זיהה שטחי מרעה פעיל באזורים נרחבים בהם לא דווח על רעיה פעילה בנתוני משרד החקלאות. בחינה של תצלומי אוויר הראתה עדויות לקיום מרעה בשטחים אלו (איור 3). בהמשך, בוצע שחזור של מרעה פעיל בכל שטח רמת הגולן משנת 1984 ועד 2023. על סמך מפות השחזור, חושבו מפות שינויים אשר הדגישו אזורים בהם פחת המרעה הפעיל לאורך העשורים האחרונים לעומת אזורים בהם התגברה הרעייה. מידת השינוי בכל פיקסל במרחב רמת הגולן חושב על סמך היחס בין שנות המרעה הפעילות בתקופות המשנה 1984-2004 ו-2005-2023. ככלל, תוצאות הניתוח (איור 4) הראו עליה ברעיה במעלה אגני הניקוז, לעומת ירידה במורד אגני הניקוז יהודה ומשונים. שינויים מרחביים אלו נבחנו בהקשר ההדרולוגי המרחבי וכחלק מהגורמים הקשורים בהשפעה על איכות מי הנחלים בעשורים האחרונים (ראו המשך פרק התוצאות). הכלי שפותח והתבססותו על נתוני חישה מרחוק יאפשר איתור אזורי מרעה פעיל בעתיד וגם באזורים נוספים המאופיינים באקלים דומה. פיתוח השיטה ותוצאותיה מעובדים למאמר מדעי (הסטודנט תום קולייר הינו הכותב הראשי), אשר יוגש בשבועות הקרובים לפרסום בכתב העת Remote Sensing of the Environment.



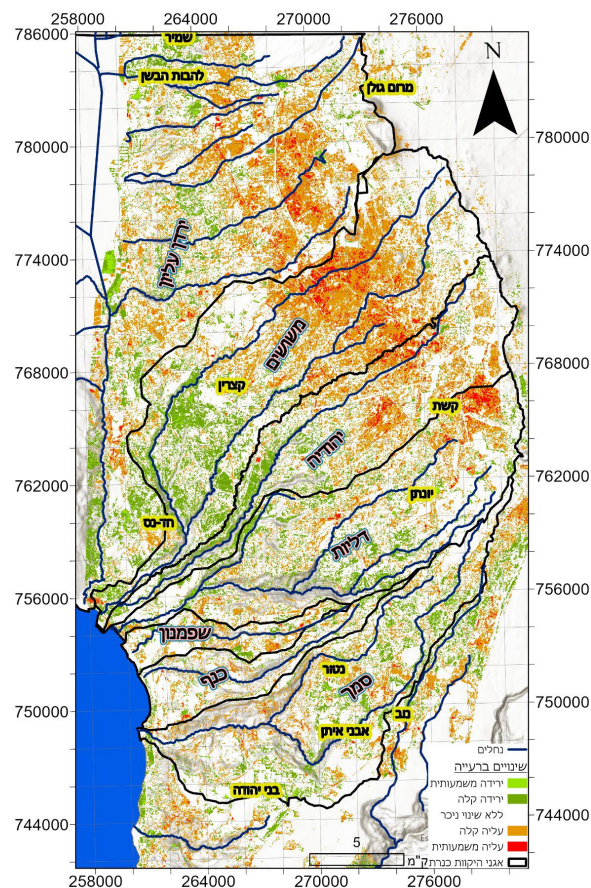
איור 1- תיעוד שינויים במאפייני הצומח העונתי בין שטח מרעה לשטח ממוקש



איור 2- מפת שטחי המרעה ע"פ נתוני משרד החקלאות עם מיקום האזורים הסמוכים לשטחים ממוקשים אשר שימשו לכיול מודל איתור המרעה הפעיל.



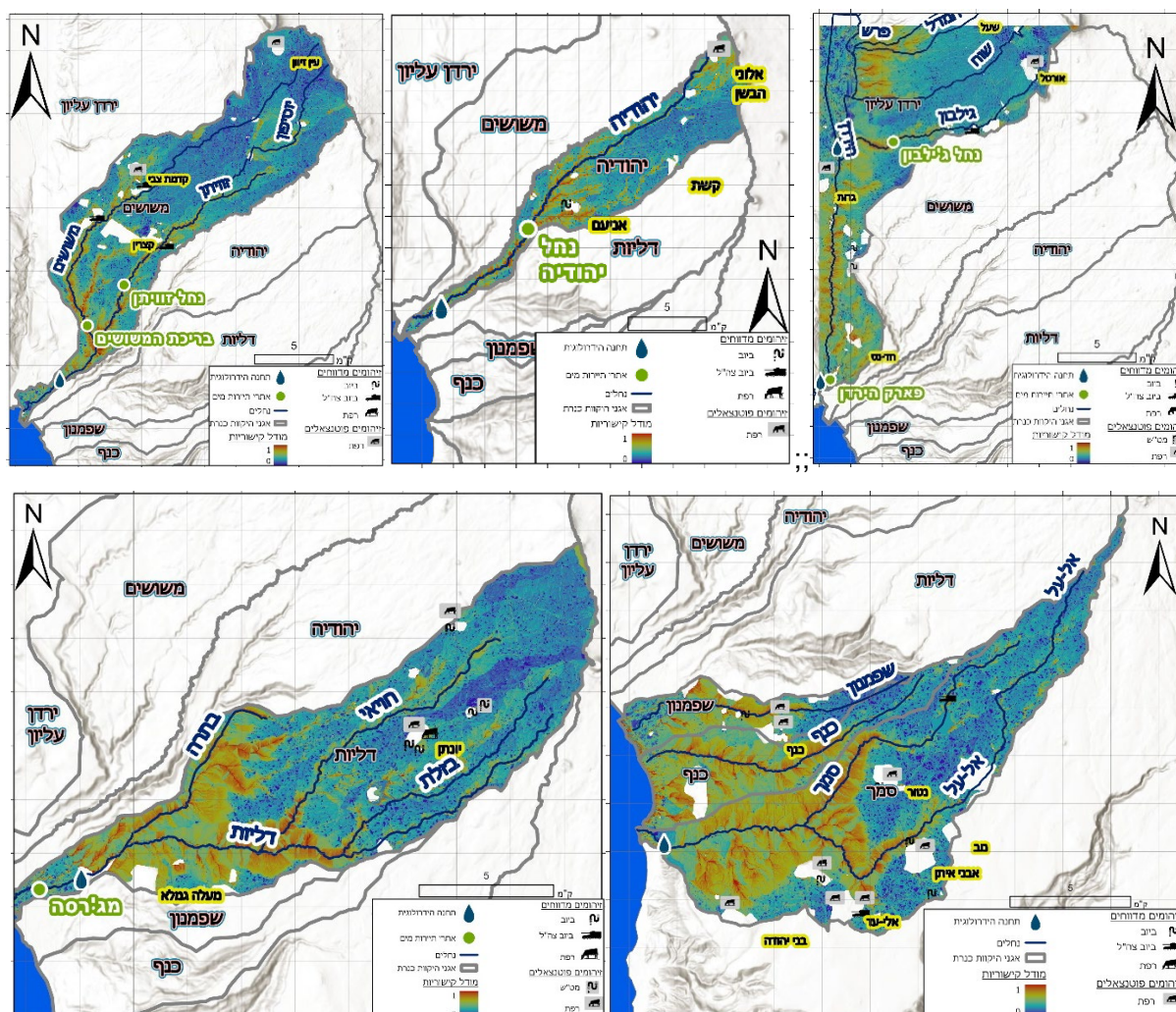
איור 3- תוצאות המודל עבר השנים 2020-2023 והשוואתן לשטחים המדווחים כשטחי מרעה ברמת הגולן. משמאל- תצלומי אוויר של אזורים בהם המודל זיהה רעיה פעילה שאינה מופיעה בשטחי המרעה המדווחים ברמת הגולן.



איור 4- שינויים מרחביים בהשתרעות הרעיון הפעילה ברמת הגולן בעשורים האחרונים על סמך תוצאות כלי הניתוח שפותח במסגרת המחקר.

3.3.2. מקורות זיהום בהיבט ההידרולוגי מרחבי

מודל הקישוריות (Borselli et al., 2008) המרחבי יושם באגני הניקוז על מנת לאתר אזורים בעלי פוטנציאל זיהום גבוה, הן מבחינת פוטנציאל הסעת המזהמים והן מבחינת הקשר ההידרולוגי שלהם אל המבלעים, היינו נחלי הגולן הזורמים באופן רציף. על פי תוצאות המודל, מעלה אגני הניקוז השונים מאופיינים בקישוריות הידרולוגית נמוכה ביחס למורד המתאפיין בשיפועים חריפים יותר (איור 5). אגני הניקוז של נחל סמך-אל-על ונחל דליות, מאופיינים בשטחים נרחבים יחסית של קישוריות הידרולוגית גבוהה במורד האגנים. תוצאה זו יכולה להיות מוסברת על ידי הקניונים הרחבים באגנים אלו, ביחס לקניונים של הנחלים יהודיה, משושים והירדן ההררי. באגני הנחלים סמך, כנף ושפמנון נמצא המספר הגבוה יותר של אירועי גלישת השפכים (בעיקר מרפתות) באזור בעל קישוריות הידרולוגית גבוהה (איור 5). לעומת זאת, אירועי גלישת השפכים המדווחים באגן נחלק דליות התרחשו בעיקר באזורים בעלי קישוריות הידרולוגית נמוכה.



איור 5 - תוצאות מודל הקישוריות ומיקומי זיהומים מדווחים באגני הניקוז הנחקרים.

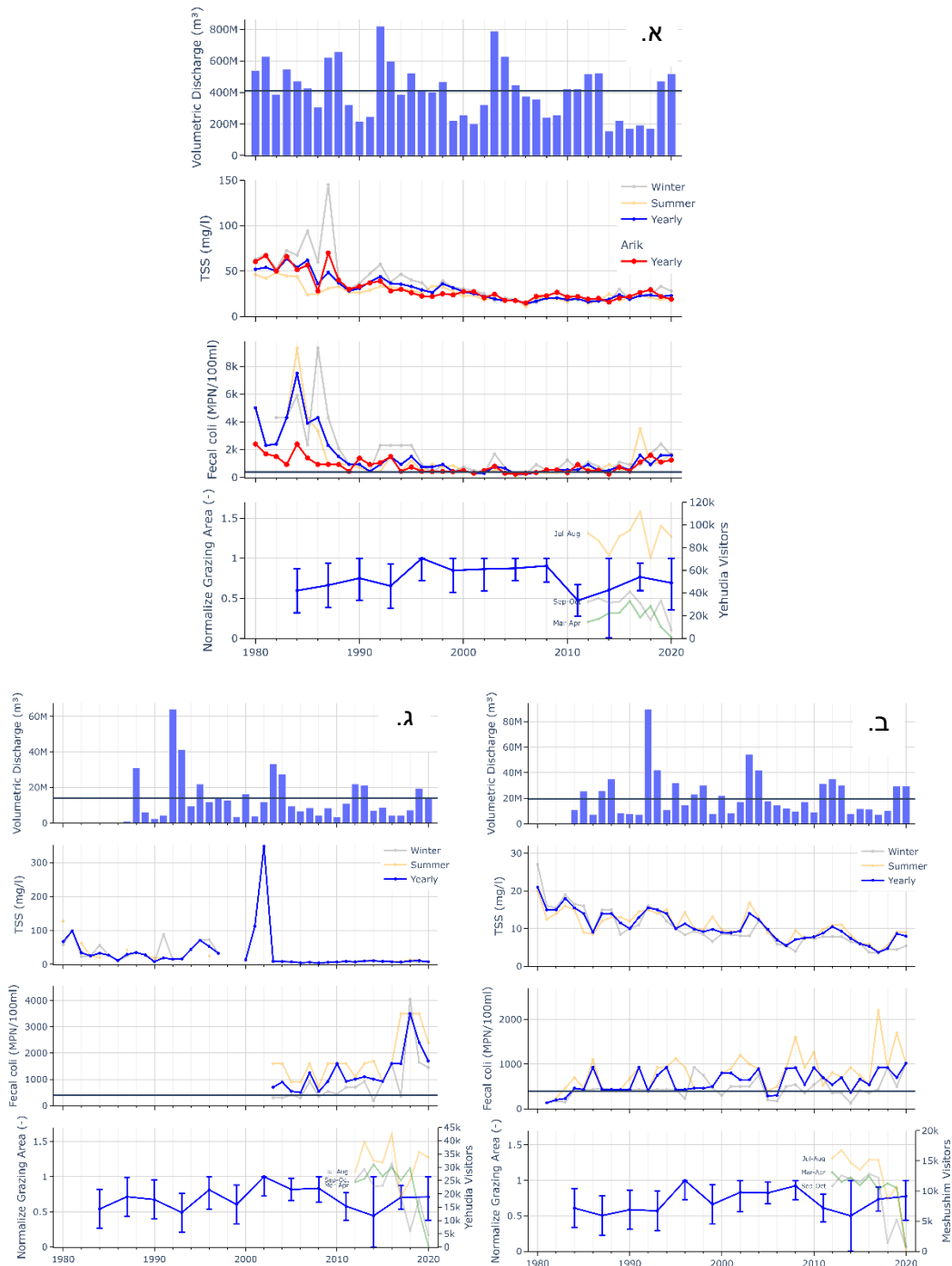
3.3.3. שינויים באיכות מי הנחלים בעשורים האחרונים

כדי להבין האם ישנו שינוי ומה המגמה באיכות מי הנחלים בשנים האחרונות ולאתר את הגורמים השולטים על איכות המים, יש צורך בניתוח ארוך טווח של הדינמיקה הזו. לתהליכים ותופעות עונתיות כדוגמת גאיות, תיירות מים ורעיה עונתית בתוך הערוצים יכולה להיות השפעה על איכות המים. לכן, ביצענו ניתוח הידרולוגי רב שנתי ועונתי שיכול לסייע בזיהוי מגמות, ערכי קיצון, וגורמי זיהום. הניתוח הרב-שנתי של אזור הירדן ההררי, על סמך המדידות בתחנות גשר הפקק וגשר אריק, הצביע על שיפור באיכות המים לאורך ארבעה עשורים, מאז 1980 (איור 6 א'). החציונים השנתיים והעונתיים של דגימות ה-TSS והקולי הצואתי (נתוני רשות המים), ירדו בהדרגה עד להתייבבות החל מהשנים 2005 ו-2000, בהתאמה. לתקופות הבצורת (באות לידי ביטוי בספיקה נמוכה יחסית למוצע הרב שנתי) לא נראית השפעה משמעותית על איכות מי הירדן על פי מדדים אלו. בגשר

הפקק נמצאו ערכי קולי צואתי גבוהים באופן מובהק ($p < 0.05$) בשנים בהן הספיקות היו גבוהות מהממוצע הרב-שנתי, ביחס לערכים ביתר השנים (מאז 2005). את טיוב איכות מי הירדן במהלך שנות ה-80 וה-90, ניתן לזקוף בין היתר לזכות הטיפול בביוב קריית שמונה ויישובי צפון עמק החולה ורמת הגולן, הקטנת היקף ושינוי ממשק בריכות הדגים, הקמת מאגר עין והקמת אגמון החולה (Markel et al., 2014; Rom et al., 2014). על פי ניתוח שינוי הרעייה במזרח אגן הניקוז של הירדן, הייתה עליה מתונה בשטח המרעה בסוף שנות ה-90 ותחילת שנות ה-2000, ולאחר 2010 ירידה לשטח מרעה פעיל בדומה לזה של שנות ה-80. מאז 2015, נראית עליה בחציוני הקולי הצואתי. עליה זו מאפיינת את שתי העונות, שתי התחנות, והיא נמשכה גם בחורף 2019, עם ספיקות גבוהות מהממוצע הרב שנתי (ראו תת פרק הבא שמתמקד בשנים האחרונות).

בנחל המשושים, לצד ירידה הדרגתית בריכוז המוצקים המרחפים מאז שנת 1980, חלה עליה הדרגתית בחציונים השנתיים והעונתיים של הקולי הצואתי. עליה זו בולטת יותר בעונת הקיץ, בה נמדדו חציונים גבוהים גם בשנים שהתאפיינו בספיקות גבוהות מהממוצע (איור 6 ב'). מצד שני, בחודשי הקיץ, המאפיינים במספר מבקרים-רוחצים גבוה יחסית, החציונים היו גבוהים מערך הסף המקובל היום (400 MPN/100ml, להלן: ערך הסף המקובל לרחצה) מאז 1983. ערכי ה-TSS בשנים המאופיינות בספיקה גבוהה מהממוצע הרב שנתי, היו גבוהים באופן מובהק ($p < 0.01$) מאלה שנמדדו בשנים עם ספיקה נמוכה. המרעה הפעיל באגן המשושים גדל מאז 2017 לעומת 2010-2016, אך הוא נמוך משטח המרעה במהלך 2000-2010.

בהסתכלות ארוכת טווח, בנחל יהודיה (איור 6 ג'), מאז שנת 2002, שבמהלכה נמדדו ערכי TSS גבוהים, החציונים השנתיים והעונתיים התייצבו על ערכים נמוכים מ-30 מג"ל, ללא קשר לספיקה השנתית בנחל. לעומת זאת, בערכי הקולי הצואתי נצפתה עלייה מאז תחילת המדידות (2003), עם קפיצה בחציונים השנתיים והעונתיים משנת 2016. הערכים החציוניים הגבוהים ביותר נרשמו בשנת 2018, ואילו בשנים העוקבות חלה ירידה במדד זה, יתכן כתוצאה מהשפעת כמות המשקעים הגבוהה יחסית בשנים 2019-2020. החל משנת 2016, חציוני הקולי הצואתי השנתיים ובעונת הקיץ, היו גבוהים מ-1500 MPN/100ml אך גם לפני כן, נתוני החציון היו מעל ערך הסף המקובל היום לרחצה במים. השינויים העיתיים בשטח המרעה הפעיל באגן יהודיה דומים לאלה שנצפו באגן משושים. בשל מיעוט ואי רציפות הנתונים המדודים בנחלים סמך ודליות, לא בוצע להם ניתוח עונתי וסדרות הזמן שלהם מופיעות בדו"ח שנה ב' של מחקר זה.



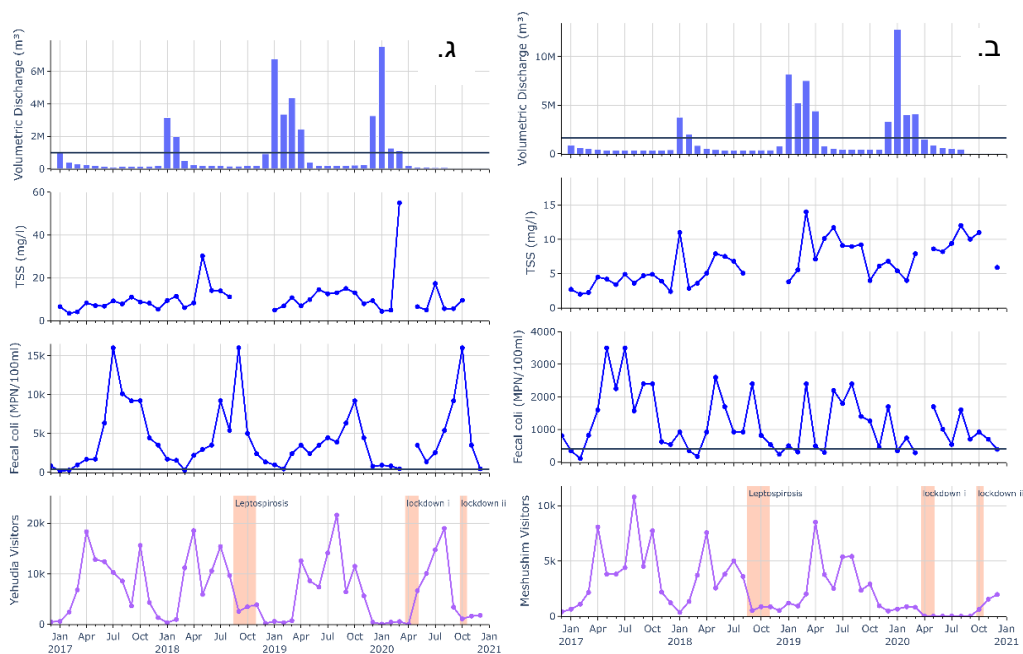
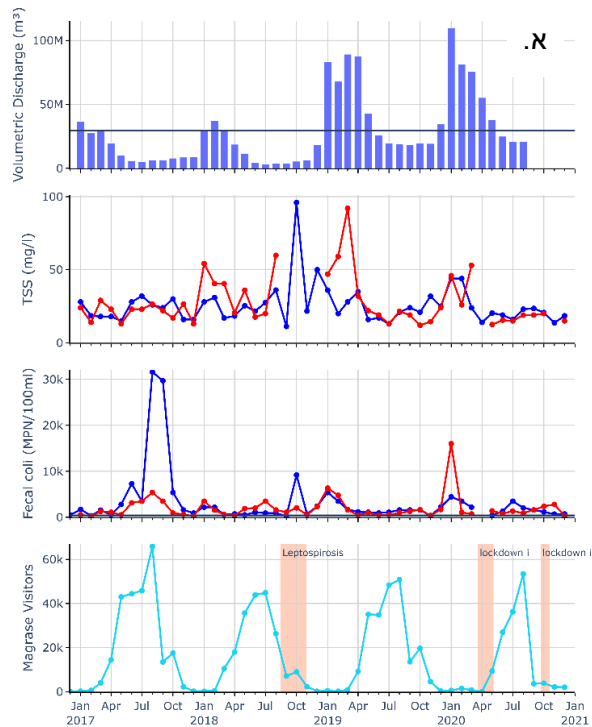
איור 6- חציונים שנתיים ועונתיים של נתוני הנחלים א. ירדן, ב. משושים וג. יהודיה. הספיקה הנפחית של נהר הירדן חושבה על פי תחנת גשר הפקק. קו שחור בגרפי הספיקה הנפחית מייצג ממוצע רב שנתי. נתוני המבקרים באדיבות רשות הטבע והגנים (ציר ימני בגרף תחתון; מספר המבקרים ביולי-אוגוסט בצהוב, ספטמבר-אוקטובר באפור, ומרץ-אפריל בירוק). שטח הרעייה הפעילה ברזולוציה תלת שנתית, מנורמל ביחס לשטח הרעייה הגדול ביותר בכל סדרת זמן. בהעדר נתוני מבקרים בפארק הירדן, מצוינים בגרף הירדן מבקרים במג'רסה לייצוג מידת התיירות באזור.

3.3.4. שינויים באיכות מי הנחלים בשנים האחרונות

במהלך השנים האחרונות, לאחר התפרצות מחלת העכברת בקיץ 2018, עלה מספר הדיווחים על ערכי קולי צואתי, ובעקבותיהם המלצות על איסור רחצה בנחלי הגולן (לדוגמא, <https://www.gov.il/he/Departments/General/disease-leptospirosis> או <https://news.walla.co.il/item/3180536>). כדי להתמקד בשנים האחרונות ולאתר גורמים פוטנציאליים, ביצענו ניתוח ברזולוציה חודשית של ערכי ה-TSS והקולי הצואתי מאז שנת 2017. תקופה זו אופיינה בספיקות נמוכות בשנים 2017-2018 לצד ספיקות גבוהות מהממוצע הרב שנתי בשנים 2019-2020. בנהר הירדן (איור 7 א'), נמדדו חציונים חודשיים גבוהים של TSS בעיקר בקיץ 2018 (גשר הפקק) ובחורף 2019 (גשר אריק). עליה נוספת התרחשה בינואר-פברואר 2020, במהלך חורף גשום ביחס לממוצע. מאז, נרשמו חציונים חודשיים של כ-20 מג"ל, בדומה לחציונים שנמדדו לפני חורף 2018. בשנת 2018 (התפרצות העכברת) נמדדו בגשר אריק ובגשר הפקק ערכי TSS גבוהים באופן מובהק ($p < 0.01$) ביחס לערכים שמדדו ביתר השנים מאז 2005 בתחנות אלו. תוצאה דומה התקבלה עבור השוואה בין שנת 2018 ליתר השנים של ערכי הקולי הצואתי. העלייה בערכי הקולי הצואתי בשנים האחרונות, כפי שנראתה בסדרת הנתונים הרב שנתיים, מושפעת ככל הנראה ממספר חודשים בודדים: אוגוסט-ספטמבר 2017 לאחר חורף עם ספיקה נמוכה מהממוצע הרב שנתי, אוקטובר 2018 לאחר הקיץ בו ארעה התפרצות העכברת, וינואר 2020 בו נרשמה ספיקת שיא של השנים האחרונות. תמונה שונה התקבלה בשנת 2017 בה בחודשים בהם נמדדו ערכי קולי צואתי גבוהים בקיץ 2017, לא נמדדו ערכי TSS גבוהים. הבדל זה יכול להצביע על מקור אחר לזיהום, ללא עליה בעכירות הנחל.

בנחל המשושים (איור 7 ב') נרשמה עליה הדרגתית בערכי ה-TSS בשנים האחרונות, אך ערכי השיא של סדרת זמן זו (כ-10 מג"ל) נמוכים ביחס לערכים בשנים שקדמו ל-2017. חציונים חודשיים גבוהים נמדדו בעיקר בחודשים עם ספיקה גבוהה יחסית בחורפים 2018 ו-2019. בחורף 2020, על אף הספיקות הגבוהות, לא נרשמו חציוני TSS חריגים. בערכי הקולי הצואתי התקבלה ירידה הדרגתית מאז שנת 2017, כאשר ערכים גבוהים מאפיינים בעיקר את חודשי הקיץ. נחל משושים זהו הנחל היחיד מבין הנחלים הנחקרים, בו לא נמצאו הבדלים מובהקים בין ערכי הקולי הצואתי והמוצקים המרחפים שנמדדו בשנת 2018 ליתר השנים.

בנחל יהודייה (איור 7 ב') נרשמו ערכים גבוהים יחסית של TSS במאי 2018 ובמרץ 2020, ללא מתאם לחודשים שהתאפיינו בספיקות גבוהות מהממוצע. ערכי הקולי הצואתי תנודתיים ביחס לנחלים האחרים, עם ערכי שיא בחודש הקיץ. נציין שהתנהגות זו מאפיינת את נחל יהודייה גם



איור 7- חציונים חודשיים של נתוני הנחלים: א. ירדן, ב. משושים, ג. יהודיה, מאז ינואר 2017. הספיקה הנפחית של נהר הירדן חושבה על פי תחת גשר הפקק. קו שחור בגרפי הספיקה הנפחית מייצג ממוצע. נתוני מהבקים באדיבות רשות הטבע והגנים. איסור הכניסה לנחלים בעקבות התפרצות העכברת וכן שני סגרי הקורונה העיקריים מסומנים על גרף המבקרים. בהעדר נתוני מבקרים בפארק הירדן, מצוינים בגרף הירדן מבקרים במג'רסה לייצוג מידת התיירות באזור.

לפני שנת 2017, ושערכים חציוניים קיצוניים נמדדו גם בקיץ 2020, לאחר שני חורפים עם ספיקות גבוהות מהממוצע הרב-שנתי. ערכי הקולי הצואתי והמוצקים המרחפים בשנת 2018 בנחל יהודייה היו גבוהים באופן מובהק ($p < 0.01$) מאלה שנמדדו ביתר השנים מאז 2005.

4. דיון ומסקנות

במהלך העבודה בוצעו ניתוחים שונים וניתוח של נתונים שנאספו בעשורים האחרונים. ניתוח זה העלה מספר תובנות ביחס למגמות באיכות המים והקשר עם מאפייני שימושי הקרקע באגן. ככלל, רמת המוצקים המרחפים בנחלים ירדה לאורך העשורים האחרונים, עם עלייה קלה בשנים האחרונות בנחל משושים. מגמה זו מתאימה עם המופיע אצל Rom et al. (2014) ו-Markel et al. (2014) המדווחים על שיפור באיכות מי הירדן החל משנות ה-80 של המאה הקודמת כתוצאה מסגירת בריכות דגים וטיפול בביוב הישובים בעמק החולה. לצד ירידה ארוכת טווח בריכוזי הקולי הצואתי בנהר הירדן, ביהודייה נרשמה עלייה הדרגתית, כשברוב השנים חציוני הקיץ דומיננטיים בעלייה זו. מאז שנת 2005, אז התייצבו באופן יחסי ערכי הקולי הצואתי בירדן, לא נמצא הבדל מובהק בין ריכוז המוצקים המרחפים בשנים ברוכות גשם ובשנות בצורת המאופיינות בספיקה נמוכה מהממוצע הרב שנתי. לעומת זאת, בתחנת גשר הפקק נמדדו בשנים עם ספיקה גבוהה ערכי קולי צואתי גבוהים באופן מובהק ($p < 0.01$) ביחס לשנים עם ספיקה נמוכה מהממוצע הר שנתי. בשנים האחרונות, רוב החציונים החודשיים לקולי צואתי בנחלים השונים היו גבוהים מערך הסף המקובל לרחצה. בחודשים אלו, החציונים הגבוהים ביותר התקבלו בדרך כלל בחודשי הקיץ. תופעה זו בולטת בנחל היהודייה, עם חציוני קיצון בחודשים יולי-אוקטובר. לעומת זאת, בנחל במשושים, נרשמו חציוני קולי צואתי חודשיים גבוהים גם במהלך חודשי האביב אך יצוין שערכים אלו ($< 4000 \text{ MPN}/100\text{ml}$) נמוכים בכשליש מהחציונים הגבוהים בנחל יהודייה. בנוסף, בנחל המשושים יש יותר חודשים בהם נרשמו חציוני קולי צואתי נמוכים מהערך הסף המקובל לרחצה, ונראה שהמגמה בשנים האחרונות הינה ירידה בריכוזי הקולי הצואתי.

במחקר זהו שינויים בהיקף המרעה הפעיל באגני הניקוז השונים. לצד זיהוי של אזורי מרעה שאינם מדווחים בנתוני משרד החקלאות (איור 2), נראה שישנה עלייה ברעייה הפעילה במעלה אגן הניקוז לעומת ירידה במורד, באזורים בעלי קישוריות הידרולוגית גבוהה (איורים 3 ו-4). המצאות בקר בתוך ערוצי הזרימה (קישוריות הידרולוגית מקסימלית), יכולה להוות גורם זיהום משמעותי לנחלים בשל מרחק ההסעה הקצר. עבודות שונות מציינות את ההשפעה הרבה שיש לשימושי קרקע מזהמים בקרבת הנחל ובתוכם גם לרעייה. מרחק תנועה קצר והיעדר גורמים העשויים למנוע או לעקב את הגעת המזהם לערוץ, הם הבסיס לקביעה כי אזורי אלה מוגדרים כרגישים ביותר מבחינת תרומות המזהמים (Agouridis et al.).

al., 2005; Reichmann et al., 2013). בעבודה הנוכחית השימוש באלגוריתם שפותח, לא מצא עדויות לעלייה ברעיון במורד האגנים. אנו מניחים כי ריכוזי הקולי הצואתי הגבוהים בחודשי האביב והקיץ בנחלים יהודיים ומשוישים יכולים להיות מוסברים על ידי מיהול נמוך בספיקות הנמוכות יחסית בחודשים אלו.

השפעת חלק מאירועי גלישות הביוב המדווחים באגני הניקוז באים לידי ביטוי באיכות מי הנחלים. לדוגמה, ייתכן ואירוע גלישת הביוב מתחנת השאיבה בטובא זנגרייה בתחילת ינואר 2018 (בר יוסף וחוב', 2018), הביא לעליה בריכוזי הקולי הצואתי בתחנת גשר אריק בחודש זה (איור 7). אירועי גלישות ביוב מבסיסים, יישובים, מתקני חקלאות ושאיבה ברחבי אגן הניקוז התרחשו לאורך תקופת המחקר בר-יוסף וחוב' (2021), חלקם באזורים בעלי קישוריות הידרולוגית גבוהה. גלישות ביוב אלו זורמות לנחל בזמן הגלישה או במהלך אירוע הנגר העילי הקרוב. להערכתנו, לגלישות אלו השפעה ישירה וגבוהה על איכות מי הנחלים ברמת הגולן. מדו"חות רשות המים בהצלבה עם תוצאות מודל הקישוריות, עולה שמספר אירועי גלישת ביוב עם פוטנציאל הסעה גבוה ברחבי האגנים אינו פוחת באופן משמעותי וכי מדובר במפגע רחב היקף והשלכות. אנו ממליצים להגביר את הפיקוח ולהתאים את תכנון הבניה והביוב באזור כך שיוותאם להגדרת אגני הניקוז כבעלי רגישות הידרולוגית גבוהה.

5. פרסומים במאמרים ובכנסים

תוצאות המחקר פורסמו עד כה בשלוש הרצאות בשני כנסים שונים: כנס מחקרי הגליל 2023, וכנס פרויקטי הסטודנטים בפקולטה למדעים וטכנולוגיה, מכללת תל חי (הרצאה מצטיינת של תום קולייר). הסטודנט תום קולייר, שעבד על פרק זיהוי השינויים במרעה הפעיל ברמת הגולן, נמצא בשלב כתיבה מתקדמים של מאמר בנושא. המאמר יוגש לשיפוט בכתב העת Remote Science of the Environment. בנוסף, אנו כותבים מאמר שיסכם את ממצאי פרק השינויים העונתיים באיכות מי הנחלים. במהלך העבודה על המאמר נמשיך לנתח את קשרים אפשריים בין שינויים מרחביים וגלישות ביוב לאיכות מי הנחלים לאורך העשורים האחרונים. תוצאות ניתוח זה יסוכמו במקביל גם בעברית וישלחו לקק"ל.

6. הנגשת הנתונים והמודלים שעובדו ונוצרו במסגרת המחקר

בצמוד לדו"ח זה, מצורפת תיקייה ובה הנתונים והמודלים שעובדו במסגרת המחקר. התיקייה כוללת בין היתר:

- קובץ gdb הכולל את השכבות המרחביות כולל מסמך הסבר המפרט את מהות השכבות השונות.
- קובץ מודל (ESRI ModelBuilder) הקישוריות ההידרולוגית שהותאם לאגני רמת הגולן
- הגרפים, המפות, והאיורים המסכמים
- קוד הפייתון לניתוח נתוני איכות המים
- ממשק משתמש מונגש (מבוסס קוד הפייתון) לניתוח סטטיסטי של נתוני איכות המים. השימוש בנתונים מותנה באישור רשות המים.

- Agouridis, C. T., Workman, S. R., Warner, R. C., and Jennings, G. D. 2005. Livestock grazing management impacts on stream water quality: a review 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), 591-606.
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape : A GIS and field numerical assessment Catena Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape : A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268–277.
- Dadon, Y., Haas, E. J., Kaliner, E., Anis, E., Singer, S. R., Atiya-Nasagi, Y., Cohen-Dar, M., Avramovich, E., King, R., Sued, O., Goshen, T., Amit, S., Miskin, I., Gino, E., Yishai, R., Sheffer, R., Grotto, I., & Moran-Gilad, J. (2018). Outbreak of human leptospirosis linked to contaminated water bodies in Northern Israel, June to August 2018. *Eurosurveillance*, 23(38), 1–7.
<https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2018.23.38.1800486>
- Markel, D., Shamir, U., and Green, P., 2014. Operational management of lake kinneret and its watershed. In: T. Zohary, A. Sukenik, T. Berman, and A. Nishri, eds. *Lake kinneret: ecology and management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 541–560.
- Reichmann O., Chen Y. And Litaor, M.I. 2013. Spatial Model Assessment of P transport from Soils to Waterways in an Eastern Mediterranean Watershed. *Water*. 5(1):262-279.
- Rom, M., Berger, D., Teltsch, B. and Markel, D. 2014. Material Loads from the Jordan River. In: T. Zohary, A. Sukenik, T. Berman, and A. Nishri, eds. *Lake Kinneret: ecology and management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 309–327.
- יהונתן בר-יוסף, דפנה עמר, רוני חרמון, אביחי נחשון, יגאל נאור, ניר לביא, עמי ביטון, יאיר כרמי, רועי אפטבי, שרון זינגר פילו, בעז זימן, ופיראס תלחמי. 2019. סיכום פעילות פיקוח 2018 באגן הכנרת ועמקי המזרח (אגן הירדן הדרומי). רשות המים.
- יהונתן בר-יוסף, דפנה עמר, רוני חרמון, אביחי נחשון, יגאל נאור, ניר לביא, עמי ביטון, יאיר כרמי, רועי אפטבי, שרון זינגר פילו, בעז זימן, ופיראס תלחמי. 2020. סיכום פעילות פיקוח 2019 באגן הכנרת ועמקי המזרח (אגן הירדן הדרומי). רשות המים.
- יהונתן בר-יוסף וחוב'. 2021. סיכום פעילות פיקוח 2020 באגן הכנרת ועמקי המזרח (אגן הירדן הדרומי). רשות המים.