

דו"ח מספר 3. השפעת שינוי אקלים על המערכות הנחליות. ד"ר זוהר

ינאי

בדוח זה מוגשת סקירה של השפעות שינויי האקלים המרכזיות הצפויות למערכות נחלים. הדגש הוא על השפעות על המערכת האקולוגית ועל המגוון הביולוגי, ולא על דווקא השפעות ישירות או עקיפות על האדם – סוגייה שנבחנה בעבר במקומות רבים. הסקירה מתבססת על ידע מהעולם אך מנותחת לאור המצב הקיים והתחזיות לישראל.

ירידת מפלס והתייבשות

עם הירידה בספיקת המים נחשפים בנחל אזורים שבימים כתיקונם היו אמורים להיות טבולים במים. עצמים כמו סלעים ועצים טבולים שמפלס המים סביבם יורד, עלולים לחשוף מינים שאינם נעים במהירות (למשל רכיכות, ספוגים או טחבים) לאוויר הפתוח ולגרום להתייבשותם. התייבשות גדוה הנחל עם נסיגת מפלס המים מסכנת צמחיית גדה מתמחה, שלעיתים מפנה את מקומה לצמחייה רודרלית או פולשת. ניתוק ערוץ הנחל הראשי מצמחיית הגדות שלו גורר פגיעה מיידית בבעלי חיים שמאכלסים בית גידול זה כדי למצוא בו תנאי זרימה נוחים, לארוב לטרף, להטיל ביצים או להתפתח בשלבי החיים המוקדמים (בכלל זה דגים, חרקי מים ועוד). בהתאם לטופוגרפיה של ערוץ הנחל, עשויים להיחשף איים במרכזו (הדוגמה המפורסמת ביותר לכך בישראל מגיעה דווקא ממערכת לא נחלית – האי אל מול חופי מעגן בכינרת). ככל שייוצרו איים רבים יותר וככל שיגדלו, יגבר הסיכוי לאיחודם של האיים או הגדות ובכך לקיטוע מוחלט של הנחל.

קיטוע הנחל יוצר מלכודות בהן בעלי חיים שאינם מסוגלים לעזוב את המים. בעלי חיים אלה לא יוכלו להימלט במקרה של התייבשות מוחלטת, ובכל מקרה יאבד הקשר בינם לבני מינם במקטעי נחל אחרים. פירוש של הקיטוע הוא הפסקה מוחלטת של הזרימה בנחל, ובכך הפיכתו למעשה לבית גידול בריכתי (לנטי). בשל כך, מינים שתלויים בזרימת מים למטרת נשימה (למשל, חלזונות נושמי זימים) או הזנה (למשל, חרקי מים מסננים) לא ישרדו.

תקופות יובש הן חלק מהעונתיות הטבעית באזורים ים תיכוניים, אך לאחר תקופות בצורת ארוכות המערכת האקולוגית מתקשה להתאושש. בקליפורניה, לאחר חמש שנות בצורת (מתאר דומה לאזורים הים תיכוניים בישראל), הרכב החברה השתנה לחלוטין ודג פולש התבסס בבית הגידול (Bêche et al. 2009). בשנות בצורת בהן ספיקת המים בנחלים פוחתת, חברת הדגים נשלטת על ידי מינים פולשים ואופורטוניסטיים, בעוד בשנים גשומות המינים המקומיים מצליחים לעיתים להשתלט מחדש על הרכב החברה (Bernardo et al. 2003). תקופת יובש ממושכת עלולה להוביל לשינוי גם בהרכב התזונה של דגים (Mas-Martí et al. 2010). כפי שנרמז

לעיל, מי שעשוי להרוויח מהתייבשות הנחל הם דווקא מינים פולשים בעלי עמידות ליובש, כמו חילזון הבוץ מני זילנד (*Potamopyrgus antipodarum*) וסרטן הנהרות (*Procambarus clarkii*) שכבר פלש בישראל.

בעקבות אירועי התייבשות ממושכים ותכופים, המלווים בהאטת מהירות הזרימה, משתנה החברה הביולוגית לחברה המאפיינת זרימה איטית או מים עומדים. בעלי חיים בעלי כושר היצמדות או שחייה המאפשר להם עמוד בזרימה מהירה ואף לשגשג בזכותה, מוחלפים בבעלי חיים כמו זחלי זבובאים שמותאמים לזרימות שקטות בלבד. לירידה בלחות השפעה פיזיולוגית מיידית על מינים מסוימים, מלבד היעלמות התווך המימי שבו הם חיים. יכולת הקפיצה נפגעת אצל דו-חיים שסובלים מהתייבשות (Greenberg and Palen 2021). יכולת התנועה שלהם משתבשת, הם חשופים יותר לסכנות כמו טריפה וטווח ההגירה הפוטנציאלית שלהם (למקור מים מהימן למשל) מצטמצם.

שינויים במשטר הזרימה

הקבוצה העיקרית של נחלים בישראל נמצאת במרכז הארץ ובצפונה, תחת אקלים ים תיכוני קלאסי. פירוש הדבר הוא שאזור זה חווה שתי עונות ברורות במהלך השנה, קיץ חם ויבש וחורף קר ולח. משקעים זמינים רק בחלק מהשנה, וכתוצאה מכך הנחל מקיים משטר הידרולוגי המבוסס על זרימות משמעותיות יותר בחורף. חלק מהנחלים באזור הים תיכוני, וכמעט כל הנחלים המדבריים, הם נחלי אכזב שבאופן טבעי מקיימים מופע לח רק חלק מהשנה, ובחודשים החמים האפיק מתייבש. מאכלסי הנחל התפתחו בתנאים אלה במשך אלפי שנים, ומחזורי החיים שלהם מותאמים היטב למשטר ההידרולוגי. עם אירועי התייבשות מחזוריים הם מתמודדים באמצעים של הסתגלות והימנעות (Hershkovitz and Gasith 2013 ;resistance and resilience).

שיטפונות

אירועים שיטפוניים הם חלק מהמחזוריות הטבעית של נחלים ים תיכוניים ושל נחלי מדבר בישראל (Gasith and Resh 1999). באירועי גשם משמעותיים, לרוב בתחילת החורף, המערכת כולה נשטפת ו"מתאפסת", ולאחר מכן מתחיל מחזור חדש של התיישבות והתבססות של מינים מהסביבה הקרובה או באמצעות גופי קיימה (זרעים, ביצים) שנותרו בנחל לאחר העונה האחרונה. עובר זמן עד שהאורגניזמים מתבססים ומתבגרים ועד שהחברה מתייצבת. התפקוד התקין של המערכת וההתמודדות האפקטיבית של המינים בה עם השיטפונות תלויים בכך שהשיטפונות צפויים (Gasith and Resh 1999). אולם, שינויי האקלים מגבירים באזורנו את תדירות השיטפונות ואת עוצמתם. בכך הם "מאפסים" את המערכת לעיתים קרובות מהרגיל. אורגניזמים שמחזור החיים שלהם ארוך יחסית עלולים שלא להספיק להשלים אותו, בטרם יישטפו על ידי השיטפון הבלתי צפוי הבא. שינויי

האקלים צפוי לעלות את מספר השיטפונות, עוצמתם ופיזורם לאורך העונה בשל שיבוש משטר הגשמים האופייני. כתוצאה מכך, החברה הביולוגית כולה עלולה להיסחף פעמים מספר במהלך העונה הגשומה, ולאחר מכן להיות תלויה בסיכויי התאוששות איטיים, עד השיטפון הבא (Boix et al. 2010).

הומוגניזציה של גומחות אקולוגיות

נחלים בריאים ומאוזנים אקולוגית מקיימים מגוון גומחות אקולוגיות, המתבטא בממדים שונים (עומק המים, מהירויות זרימה, תשתית המצע, צמחיית מים, הצללה מצמחיית גדות וכיוצא באלה). תנאים סביבתיים משתנים כמובן גם לאורך ציר הזמן, במחזורים יומיים, עונתיים ושנתיים. מערכת סבוכה זו של תנאים סביבתיים מאפשרת למינים שונים למצוא את הגומחות המתאימות להם – לחלקם מגוון רחב של גומחות ולאחרים דרישות מדויקות ביותר. מגוון הגומחות האקולוגיות משקף את מגוון המינים הפוטנציאלי בנחל. הפחתה בכמות המים בשל ירידה בספיקת הנביעות מובילה באופן ישיר לצמצום כל המשרעות האקולוגיות האפשריות בנחל, ומכאן לצמצום המורכבות המבנית ומגוון הגומחות האקולוגיות.

עליית טמפרטורת המים

ככלל, בבתי גידול לוטיים (של מים זורמים) הטמפרטורה יציבה ונמוכה בהשוואה לבתי גידול לנטיים (בריכות ואגמים). המים הקרירים מאפשרים, ולעיתים מהווים תנאי, להתפתחותם של מיני צומח ובעלי חיים רבים, בעיקר בצפון הארץ. בתרחיש של התחממות עקבית ומדודה הנפרשת לאורך שנים רבות, טמפרטורת המים בנחלים צפויה לעלות בהדרגה ולמתוח את גבול ההתמודדות של מינים הרגישים לחום. מינים אלה, המוגבלים לטמפרטורת מים נמוכה, מאוימים במיוחד בתרחיש של שינויי אקלים (Hershkovitz et al. 2015). חרקי מים כמו גדותאים (Plecoptera), למשל, רגישים במיוחד לעלייה בטמפרטורת המים (Heino 2001). חרקי מים שסובלים רק טווח צר של טמפרטורות יידחקו לאכלס אזורים נוחים יותר, עד שלא יהיה להם יותר מקום להידחק אליו, ולא יהיו בתי גידול הולמים בסביבה (Timoner et al. 2020). כמו כן, לעיתים מינים בעלי טווח סבילות תרמית צר (כלומר, מינים המוגבלים לטווח טמפרטורות מצומצם) הם גם בעלי יכולת הפצה ואכלוס מוגבלת: חיפושיות מים מהסוג *Agabus* המצוי בישראל, למשל, הראו קשר ברור בין סבילות לטמפרטורה ובין יכולת ההפצה (Calosi et al. 2008). מכך עולה שדווקא המינים המאוימים ביותר, שיתקשו יותר מכולם להתמודד עם שינויי האקלים, הם גם אלה שיתקשו להתחמק מתנאי הסביבה המשתנים. אצל חיפושיות מים אחרות נראה שיכולת ההפצה יכולה להיות בלתי תלויה בטווח הסבילות התרמית, אך שני המאפיינים משפיעים על יכולתן להימנע מאיומי האקלים המשתנה (Arribas et al. 2012). לטמפרטורת המים השפעה גם על גורמי מפתח בהיסטוריית החיים של מינים אקוואטיים, כמו יכולת הרבייה. למשל, בניסוי מעבדה, חריגה מטווח מצומצם של 14–16 מעלות צלזיוס הפחיתה בשיעור ניכר את התפתחות הגונדות, ומכאן את יכולת הרבייה, בנקבות של בינון

הירדן (*Nemacheilus jordanensis*), דג אנדמי למקורות הירדן הנמצא בסיכון (רוטמן 2009). ככל שהטמפרטורה עלתה, עלה גם שיעור הטפילים שנמצאו על הדג. עלייה של 6 מעלות צלזיוס בטמפרטורת המים הממוצעת צמצם ב-50% את קצב הגדילה ואת ההתפתחות של דגים (Hester and Doyle 2011). כמו כן עלייה בטמפרטורה מובילה להתפתחות מהירה יותר ולגודל גוף קטן יותר וייצור פחות ביצים בבריום *Cloeon* (Sweeney et al. 2018). להתחממות המים השפעה גם על איכותם הכימית והפיזיקלית, כמו עלייה בריכוז המלחים המומסים, ירידה ביכולת המסת החמצן האטמוספירי ופגיעה בכושר המיהול של מזהמים ממקור חיצוני (ר' להלן).

ריכוז מלחים ומזהמים במים

הפרת האיזון ברמות של מומסים שונים במים עלולה לאתגר את המינים האקוואטיים ולסכן את סיכויי שרידותם. אירועי גשם קיצוניים צפויים להגביר את הזרימה באופן מידי ולהוביל מזהמים ממקורות שונים בכמויות מוגברות למים. מתקני תשתית רבים ברחבי הארץ קורסים מדי חורף בשנים האחרונות באירועי גשם קיצוניים, ומזרימים לערוצי נחלים ביוב וקולחים. לאחר ההזרמה לנחל, מגיעות תקופות יובש (עוצר גשמים) תכופות וארוכות משהיו בעבר, המותירות את הזרימה בנחל רגועה. כך נפגעת יכולת הנחל להסיע את המזהמים במהירות או למהול אותם על מנת לדלל את השפעתם. מכאן שלשינויים הצפויים בפיזור הגשמים שתי השפעות על פוטנציאל הזיהום של הנחל: הגברת הזיהום מחד, ופגיעה ביכולת למתן אותו מאידך. כמות המלחים והרכבם מקווי מים ונובעת בדרך כלל מתכסית הקרקע המקומית. ככל שכמות המים קטנה, ריכוז המלחים המומסים בהם עולה.

תשטיפים משטחים חקלאיים נושאים עימם חומרי הדברה (פסטיצידים, הרביצידים) שצפויים לפגוע משמעותית בצמחים ובבעלי חיים בנחל. בנוסף, דשנים ממקור חקלאי מעשירים את הנחל בחומרים מזינים (נוטריינטים); בעיקר צורות של חנקן וזרחן). אלה מספקים תנאים מיטביים להתפתחות אצות במים, בקצב ובהיקף שהמערכת האקולוגית בדרך כלל לא מסוגלת לעמוד בהם. תופעה זו, המכונה אוטרופיקציה, מובילה לצריכת חמצן גבוהה מאוד על ידי האמות בשעות הלילה, ובכך חונקת את שאר המינים המצויים במים ולא מאפשרת להם את ריכוזי החמצן הבסיסיים החיוניים להם.

מינים ששיטת ההזנה שלהם נסמכת על סינון המים יכולים לתרום להטמעה והרחקה של המזהמים. אולם, חימום עקבי של המים יפגע בתפקודן של צדפות נחלים (Unionidae) שרגישות לטמפרטורות גבוהות (Spooner and Vaughn 2008).

מידת ההשפעה של העשרה בחומרים מזינים על המגוון הביולוגי תלויה במידה רבה בנתוני הבסיס. מערכות אקוואטיות במצב טוב וחסות מזיהום, שאינן מועשרות באופן רגיל (אוליגוטרופיות, oligotrophic streams),

מסוגלות לספוג שינויים במשך זמן מה לפני שיתערער האיזון האקולוגי בהן. לרוע המזל, מצבם הכללי של נחלי ישראל הוא כמעט תמיד גרוע יותר, והם כבר סובלים ממידה גבוהה של העשרה (נחלים יוטרופיים, eutrophic streams). בשל כך, השינויים הצפויים כתוצאה משינויי אקלים יפרו את האיזון האקולוגי בנחלי ישראל אף יותר. חברת הדגים צפויה להתחלף, כשמינים ממשפחת הקרפיוניים (Cyprinidae), משפחה עם נציגים מקומיים ופולשים בנחלי ישראל, ידחקו דגים ממשפחות אחרות. בטווח הרחוק יותר, נחלים משמשים כאזור חיץ (בופר) המסייע במיתון השפעתם של מזהמים. תשטיפים משטחים חקלאיים ומכבישים, למשל, שמגיעים אל נחל בריא, נמהלים בהדרגה במורד הנחל. ככל שספיקת המים קטנה, התשטיפים והשפכים מהווים מרכיב דומיננטי יותר בזרימה, ויכולת המיהול הטבעית של הנחל מצטמצמת. נחלי אגן הכינרת, לדוגמה, צפויים להסיע בתרחיש כזה יותר מזהמים, ובכך לסכן את איכות מי הכינרת.

ריכוז החמצן המומס

ריכוז החמצן המומס במים עשוי להיות קריטי עבור מינים המסתמכים עליו לנשימה (למשל, סרטנים, חלזונות זימים ודגים), והוא מושפע ממספר גורמים שלעיתים פועלים באופן סותר: טמפרטורת המים עומדת ביחס הפוך לריכוז החמצן שהם מסוגלים להכיל, כך שהתחממות עקבית תתבטא בריכוזי חמצן נמוכים מהמוכרים היום; זרימה ומערבולות מאזוררות את המים ומעלות את ריכוז החמצן, אך בתנאים של הקטנת הספיקה או של פעולות הנדסיות ליישור ערוצי זרימה ריכוז החמצן צפוי לרדת; ולבסוף ריכוז צמחיית המים, ובעיקר אצות, עשוי להשפיע על תנודות יממתיות ולהוביל לריכוזי חמצן גבוהים מאוד ביום ונמוכים מאוד בלילה (אאוטרופיקציה, ר' לעיל). מירידת ריכוזי החמצן במים צפויים להיפגע, כאמור, בעיקר מינים הנושמים באמצעות זימים ושאינם מסוגלים לצאת ליבשה, כמו דגים, ראשני דו-חיים, סרטנים ירודים, חלזונות נושמי זימים (למשל מגדלית או שחריר, *Melanopsis* spp., *Melanoidea* spp., סוגים בולטים בנחלים רבים בישראל) וזחלי חרקים כמו בריומאים, גדותאים, שעירי-כנף, שפיריות ושפיריות. בתמורה, בתנאי עקת חמצן מתמשכת יתבססו מינים אחרים, חלקם מהווים מטרד עבור בני האדם, כמו זחלי יתושים (Culicidae, ר' להלן).

החמצה

השפעת שינויי האקלים על ערך ההגבה בנחלים (כלומר, הפיכת המים לחומציים או בסיסיים יותר) לא נחקרה לעומק עד כה. מעט המחקרים שבוצעו מצביעים על תוצאות סותרות, וכן על השלכות סותרות על המגוון הביולוגי (Heino et al. 2009).

מהלך חיים ותזמון

מינים מציגים פנולוגיה (עונתיות) שמשתקפת מהאקלים שבמסגרתו הם התפתחו במשך שנים רבות. שינויים קיצוניים בדפוסים עונתיים עלולים לשנות את מהלך החיים ולפגוע בתזמון של שלבי מפתח בחייהם של בעלי חיים וצמחים (Filipe et al. 2012). מינים רבים, למשל, מקיימים שלבי חיים צעירים במים, ובשעת כושר עוזבים את המים בצורתם הבוגרת על מנת להמשיך בחייהם, ובעיקר להתרבות. בטרם יעזבו את המים הם חייבים לגדול דיים ולפתח את כל מערכות גופם בצורה נאותה לקראת השלב הבוגר בחייהם. דו-חיים, למשל, מתפתחים במים כראשנים, ובמהלך התפתחותם משנים את מבנה גופם ויוצאים אל היבשה. במקרה של התייבשות מוקדמת, ראשנים יאיצו את ההתפתחות במחיר גודל גוף קטן יותר וסיכויי שרידות נמוכים יותר. תופעה זו נצפתה גם בניסוי מעבדה בסלמנדרה המצויה (Sadeh et al. 2010). בדומה לדו-חיים, מרבית חרקי הנחל מתפתחים בתוך מימי אך מעופפים בהיותם בוגרים. בטמפרטורות מים גבוהות יותר, ההתפתחות עלולה להיות מהירה יותר ולהתבטא בפגיעה בתכונות ההפצה ופוטנציאל השרידות והרבייה של הבוגרים, כפי שהוצג בבריום מסוג שנמצא גם בישראל (Sweeney et al. 2018). בבריומאים ממינים אחרים בספרד זוהו עדויות לפגיעה ביכולת הרבייה וההפצה, המקושרות לעליית הטמפרטורה ולהתארכות תקופת היובש (López ;Cid et al. 2008). טמפרטורות גבוהות יותר הוצגו כמשבשות גם את יחס הזוויגים המאוזן בשעירי-כנף (Rodríguez et al. 2009). במינים מסוימים השלמת מחזור החיים מחייבת תזמון מדויק מול מחזור חייו והתנהגותו של מין אחר, וכל פגיעה באיזון העדין הזה עלולה להיות מכרעת. צדפות נחלים רבות מתרבות באמצעות שלב צעיר שמתפתח על פני, או בתוך, גופם של דגים. באופן זה הצדפות גם מהגרות לאורך הנחל ומייסדות אוכלוסיות חדשות או מחזקות אוכלוסיות קיימות. מחקר בנושא זה טרם בצורה רחבה על מיני צדפות בישראל, אך דוגמאות מהעולם מעלות חשש שפגיעה בסנכרון עלולה לנתק את מחזור חייה של הצדפה אם לא תסתגל במהרה למחזור חייו של הדג המאכסן (Gallardo et al. 2018).

שינויים בדגמי תפוצה

אחת הדרכים הבולטות של מינים להתמודד עם שינויי אקלים היא עזיבת אזורים שהפכו בעייתיים והתבססות מחדשת באזורים שהפכו נוחים יותר (Filipe et al. 2012). עם העתקת קו המדבר צפונה, כפי שחוזים המודלים, מינים רבים בישראל צפויים להעתיק בהדרגה את תפוצתם מערבה וצפונה (הדס שטייניץ). מינים שכושר ההפצה שלהם מוגבל, ולא יצליחו להתמודד עם השינויים בבית גידולם מהר מספיק, לא ישרדו. תנועת מינים לכיוון הקטבים (כלומר, צפונה בחצי כדור הארץ הצפוני) כבר נרשמת במדינות בהן קיים מעקב ארוך טווח (Hickling et al. 2005, 2006), כאשר מינים בעלי כושר הפצה גבוה (כמו שפיריות) מצליחים להעתיק את תפוצתם במהירות רבה יותר ממינים המוגבלים לחיים במערכת הנחלים (כמו דגים). כ-14 דגי מים פנימיים בסביבת הים התיכון צפויים לצמצם את תחום התפוצה שלהם עד 2100 (Lassalle and Rochard 2009). תנועת מינים צפונה צפויה בעיקר בקרב מינים חובבי מים קרים, כמו הגדותאים – סדרת חרקי מים הרגישה לטמפרטורות

גבוהות (Heino 2001). מספר מצומצם בלבד של מינים מסדרה זו מוכרים בצפון ישראל (Bromley 1988), ומגמות של דעיכה קיצונית כבר ניכרות באוכלוסיותיהם. בבריטניה תופעות דומות נצפו גם בקרב דגי נחלים ופשפשי מים (Hickling et al. 2006). בשווייץ הצביעו חוקרים על כך שחקרי מים יידחקו לאזורים הנוחים עבורם, שילכו ויצטמצמו, עד שלא יישאר להם לאן להגר ואוכלוסיותיהם עלולות להיכחד (Timoner et al. 2020). כושר ההפצה של מינים הוא מרכיב חיוני ביכולתם להתמודד עם שינויי אקלים, כי הוא מאפשר להם לאכלס בתי גידול חדשים ונוחים יותר, לקשר בין אוכלוסיות שנקטעות, או להימלט באופן זמני לאתרי מפלט. בנחלים האתגר גדול אף יותר, שכן מינים רבים לא מסוגלים לחצות את התווך היבשתי ולדלג בין נחלים. גם בעלי חיים ניידיים יותר ניצבים בפני קשיים: שפריריות מהסוג *Enallagma*, למשל, מרחיבות את תפוצתן בעילות רבה יותר ככל שכנפיהן גדולות באופן יחסי (Rundle et al. 2007). שינוי בתכונה כמו גודל הכנפיים מתרחש על פני דורות רבים, די והותר זמן כדי לאיים על שרידותו של המין. המינים שצפויים למתוח את גבול התפוצה שלהם צפונה הם אלה שמוצאים בישראל את גבול התפוצה הצפוני שלהם, כלומר בעיקר מינים אפריקניים ואסייתיים. מינים ממוצא פליארקטי, כלומר שעיקר תפוצתם באירופה ובצפון אסיה, מבטאים בישראל את תחום התפוצה הדרומי שלהם, וצפויים להיעלם בהדרגה מהמערכות האקולוגיות בישראל עם שינויי התנאים הקיצוניים בהם. ישראל עשירה במינים מהקבוצה השנייה (ממוצא אירופי), כולל דגים, דו-חיים וחרקים רבים (מנחם גורן). תנאי האקלים המתחממים בישראל יהיו נוחים יותר עבור מינים טרופיים, בכלל זה מינים פולשים כמו רכיכות ממוצא טרופי (ר' להלן), או מינים נושאי מחלות אנדמיות לאפריקה ולדרום-מזרח אסיה, כמו יתושים (ר' להלן).

שינויים בהרכב החברה

היעלמותם של מינים מהמערכת לצד הגעתם של מינים חדשים (מינים אופורטוניסטים הממלאים גומחות שהתפנו, או כאלה המחפשים מפלט) משנות את פני החברה הביולוגית (Bêche and Resh 2007). ככל שנצברים שינויים רבים יותר, המערכת האקולוגית כולה משתנה, וקטנים סיכוייה להשתקם ולחזור למה שהייתה. בתרחישים של שינויי אקלים, שינויים בהרכב החברה צפויים להפוך מהירים ותכופים (Filipe et al. 2012). ככל שבתי גידול רבים יותר יהפכו להיות עוינים למינים שונים, מינים אלה יתרכזו בבתי גידול נוחים וייצרו חברות הומוגניות יותר (Timoner et al. 2020), שתהיינה גם צפופות יותר מבחינה אקולוגית וככל הנראה שיעור התחרות בהן יהיה גבוה במיוחד. שינויים בטמפרטורה מובילים לשינויים ברמות ההזנה (הרמות הטרופיות) בחברה, על ידי שגשוג או דעיכה של קבוצות שפונקציונליות שונות (Woodward et al. 2010). שינויים כאלה מוציאים את המערכת מאיזון ועלולים להוביל לקריסתה. בסדרת מחקרי מעבדה תחת משטרי טמפרטורה משתנים, נראו שינויים בהרכב חברת ה-Protista שהתבטאו בפגיעה לא פרופורציונלית בטורפים ובהרביבורים (לעומת יצרנים ובקטריבורים), לצד פגיעה בבקרה הטרופית על רמות נמוכות במארג המזון (Petchey et al. 1999). שינויים בהרכב חברת הפטריות, למשל, יובילו לפגיעה ביכולת המערכת לפרק את החומר האורגני המת

שבה (Dang et al. 2009), מה שעלול לגרום לפגיעה בתנאים הכימיים הדרושים לאורגניזמים כולם. שינויים במשטר הזרימה, בעיקר בעקבות אירועים תכופים וארוכים של ירידה משמעותי בספיקה, יובילו לשינויים בהרכב חברת האצות, ובעקבותיה בחברת חברי החוליות שנשענת עליהן (Ledger et al. 2008).

מאגרים וחסמים הידרוביולוגים

מאגרים וסכרים הם פרקטיקה נפוצה במקומות שונים בעולם. למעלה משני שלישים מנהרות העולם סכורים (Grill et al. 2019). באירופה מעל 21 אלף סכרים קיימים ואלפים נוספים מתוכננים, כמעט אך ורק למטרה של הפקת אנרגיה הידרואלקטרית. בישראל המצב שונה, ללא סכרים פעילים להפקת אנרגיה הידרואלקטרית (הניסיון היחיד היה תחנת הכוח בנהריים שאינה פעילה). תחת זאת, קיימים סכרים רבים היוצרים מאגרי מי שתייה, בעיקר בגולן ובאזורים המנותקים ממערכת הובלת המים הארצית, אך גם במקומות אחרים. מטרת המאגרים היא הבטחת אספקה שוטפת של מים שפירים לשימושים חקלאיים וביתיים, בעיקר במקומות שאינם מחוברים למערכת הובלת המים הארצית, כמו הגולן והערבה. הסכר קוטע את זרימתו הטבעית של הנחל, ובכך מונע מאורגניזמים המאכלסים את הנחל מעבר רציף לאורכו. מינים שונים נסמכים על היכולת להגר בין חלקו העליון של הנחל לחלקו התחתון, למשל על מנת להשלים את מחזור חייהם. השפעתו העיקרית של הסכר גלומה במטרתו: יצירת מאגר המים, שהוא למעשה אגם מלאכותי רחב-ממדים. התייחסות מיוחדת לסכר דגניה ולקוטע הירדן הדרומי ממקורותיו הטבעיים העיקריים באופן שלא צפוי להשתנות בעקבות המגמות האקלימיות. הסכר משפיע גם על הנחל במורד הזרם, אפילו אם זרימת המים מובטחת. אחת ההשפעות עלייה בטמפרטורת המים (Coleman et al. 2021), שנובעת ככל הנראה משינויים במשטר הזרימה. אכן, במורד סכרים נמדדו עליות בטמפרטורת המים שמקושרים עם דילול אוכלוסיותיהם של דגים ייחודיים למים קרים (Lessard and Hayes 2003).

פלישות ביולוגיות

שינויי אקלים עשויים לעודד ולהרחיב את מגמת הפלישות הביולוגיות בשלושה ערוצי השפעה עיקריים (Rahel and Olden 2008): (א) תגובות האדם להתמודדות עם שינויי האקלים תיצורנה הזדמנויות פלישה חדשות; (ב) מינים פולשים שבעבר נבלמו בשל התנאים הסביבתיים עשויים למצוא סביבה נוחה יותר להתבססות; ו(ג) מינים מקומיים שאינם בעלי סבילות גבוהה יקרוסו תחת הצורך להתמודד עם האקלים המשתנה ועם המינים הפולשים במקביל. שינויי האקלים יובילו בני אדם להגברת פרקטיקות נפוצות, או לאימוץ פרקטיקות חדשות שמעודדות פלישות ביולוגיות. בניית סכרים, מאגרים ומערכות השקיה נדון לעיל. בהיבט של חקלאות מים, תנאי אקלים חמים יותר יעודדו ענפי חקלאות מים (אקווקולטורה) המבוססת על מינים מאזורים טרופיים. מינים אלה יכולים לשגשג בבריכות גידול, ומקרים של הימלטות למערכות טבעיות (כמו שקורה לא אחת) יאפשרו להם להתבסס גם בטבע. לא רק בחקלאות המתועשת, שבה קיימים פיקוח ואסדרה, התופעה צפויה, אלא גם בגינות נוי פרטיות. בריכות

נוי בגינות פרטיות מתהדרות לעיתים קרובות בצמחי מים, דגים וחלזונות ממקור טרופי. במכוון או שלא במכוון, פעמים רבות מינים המגודלים לצורכי נוי משוחררים לטבע ומתבססים במערכות טבעיות, גם בישראל (Roll et al. 2007, 2009; Yanai et al. 2017; דופור-דרור 2019). לאחר הגעתו של מין זר למערכת אקולוגית חדשה, המכשול הקריטי שיקבע אם יצליח להתבסס הוא יכולתו לסבול ולשגשג בתנאי האקלים החדשים. **בעוד שבעבר מינים רבים ממקור טרופי אולי נקלעו במקרה למערכות טבעיות בישראל אך לא שרדו זמן רב ובוודאי שלא הצליחו להעמיד צאצאים, היום עם עליית הטמפרטורות הם פוגשים תנאים נוחים יותר שמעלים את סיכוייהם להתבסס.** סרטני נהרות (crayfish) למשל, שרבים מהם משונעים ברחבי העולם ומגודלים למטרות נוי או מאכל, מצליחים בעשורים האחרונים להתבסס בהצלחה יתרה באירופה ובארצות הברית, שם הם מסכנים צמחים, חסרי חוליות, דו-חיים ודגים (Lodge et al. 2000). גם בישראל נצפו סרטנים פולשים בטבע, וחלקם אף הצליחו לבסס אוכלוסיות (Wizen et al. 2008; Snovsky and Galil 2011; Levitt-Barmats et al. 2019).

בהתמודדות מול מינים פולשים, ידם של המקומיים בדרך כלל על התחונה. כשהתבססה פלישה של מין זר במערכת אקולוגית מופרעת, המין הזר מתערב ביחסי הגומלין הוותיקים במערכת, ויוצר אינטראקציות של טריפה או תחרות עם המינים המקומיים. למשל, ארבעה מיני קרפיוניים (Cypridae) צפויים לדעוך משמעותית או אף להיכחד כליל בתוצאה מהתבססותו של דג פולש שינצל את התחממות מקווי המים בצפון אמריקה (Jackson and Mandark 2002). חשדות דומים עולים גם בישראל. למשל, החסילון הטרופי שפלש לאחרונה לנחלי ישראל, *Neocaridina denticulata orientalis*, הוא מתחרה פוטנציאלי של הסרטן המקומי קפיצון הנחלים, *Atyaephyra* (Levitt-Barmats et al. 2019). תנאי אקלים חריגים משפרים לעיתים את סיכוייו של מין פולש להתחרות בהצלחה עם מין מקומי (Taniguchi et al. 1998).

שינויים בשימושי קרקע

ניתן להניח ששינויים מהותיים בשימושי הקרקע הסמוכים לגדות ישפיעו על חברת חסרי החוליות בנחלים. חקלאות (דישון, הדברה; Allan 2004). גם שינוי באופי צמחיית הגדות והיבשה ובהרכבה ישפיע על המים. נשר עלים שמגיע למים הוא חלק מהמערכת האקוואטית ומשפיע עליה במגוון דרכים. חסרי חוליות רבים, למשל, ניזונים מגריסת עלים (למשל מיני בריומאים, גדותאים או חיפושיות), ודילול עצים רחבי-עלים בנחל עלול לפגוע בדומיננטיות שלהם בחברות מסוימות (אולי ציטוטים טובים מ-Wallace and Webster 1996, Covich et al. 1999).

שינויים במסדרון הנחל ובמבנה הגדות

מסדרון הנחל הוא הרצועה המקיפה את הנחל משתי גדותיו. היא תומכת בתפקודו של הנחל כמערכת אקולוגית ומצד שני נהנית מהנחל שמחזק אותה כבית גידול יבשתי; בין שתי המערכות קיימים לרוב מעברים שוטפים

של אורגניזמים, חומר ואנרגיה. צמחיית הגדות מספקת גם שירותי הצללה לנחל, החשובים למיתון שינויי הטמפרטורה בו במקרים מסוימים. מסדרון הנחל מספק שכבת חיץ (בופר) הממתנת השפעות שליליות מהסביבה (זליגת מזהמים, תאורה, גישה של בני אדם או בקר רועה וכד') על הנחל עצמו. מסדרון הנחל עלול לספוג שינויים קיצוניים שיפגעו בתפקודו האקולוגי, בעיקר באמצעות שני ערוצי שינוי: התייבשות הנחל עלולה להוביל לפגיעה הדרגתית בצמחיית הגדות, עד היעלמותה והחלפתה בצמחייה חודרנית או פולשת שאינה מתאימה למערכת הטבעית המקורית. דוגמה קיצונית לכך היא התייבשות עצי הדולב – עצים גדולים ועתיקים – בנחל בצת בעקבות התייבשות הנחל בעשורים האחרונים. פעולות הסדרה כצעדים למניעת שיטפונות מתבטאות לעיתים קרובות בשיבוש סביבתו הקרובה של הנחל ולא רק הנחל עצמו, למשל הסרת צמחיית גדות גבוהה ומצילה או ביטון דופנות הנחל. ערוץ ההשפעה השני עובר בשינויים בשימושי הקרקע הסמוכים לנחל. חלק ניכר ממסדרונות הנחל בישראל פגועים היום, ושימושי הקרקע הסמוכים מגיעים לעיתים עד הנחל ממש, ללא אזור חיץ. מצוקות הקשורות בשינויי האקלים, כמו התמרת שטחים נוספים לשימוש חקלאי, יובילו למצב קיצוני עוד יותר בו נחלים רבים הם תעלות שחוצות שימושי קרקע בלתי טבעיים. לכל המהלכים הנ"ל יש השפעה על תפקודו של הנחל ועל תפקודה האקולוגי של הסביבה הקרובה. בעבודה זו נתמקד בנחל. כאשר הגדות אינן בעלות מופע טבעי, מזהמים כמו חומרי דיזון והדברה (Allan 2004) דלקים ושמיים זולגים בקלות רבה יותר למי הנחל. קרינת השמש הישירה גוברת מהיעדר צל, מה שמוביל לעלייה בטמפרטורת המים, לירידה בריכוז החמצן המומס, ובתנאים של העשרה במינים עלול להוביל לפריחת אצות מוגברת. דילול עצים רחבי-עלים בנחל עלול לפגוע באספקת נשר העלים שמגיע למים. נשר זה הוא חלק מהמערכת האקוואטית ומשפיע עליה במגוון דרכים; חסרי חוליות רבים, למשל, ניזונים מגריסת עלים (למשל מיני בריומאים, גדותאים או חיפושיות). בעלי חיים רבים החיים בגוף המים מוצאים מחסה בצמחיית הגדות הסמוכה או בגדות הבוציות או האבניות עצמן; למשל יצורים החיים במים כמו סרטני נחלים. חרקי מים שלעיתים מתגלמים בבוץ בתווך שבין המים ליבשה, וכבוגרים מעופפים, מתרבים, מסתתרים מטורפים ונעים לאורך ציר הנחל – בתוך צמחיית הגדות. דו-חיים מעבירים את חייהם כראשנים במים ובשלב מאוחר יותר נעים באופן חופשי בין המים ליבשה. גדות מוסדרות ומבוטנות בשיפועים חדים מונעים מדו-חיים להתנהל בחופשיות ופוגעים בסיכויי השרידות או הרבייה שלהם.

הפצת מחלות

היחלשות זרימות בנחלים מעודדת ריכוז גבוה של מחוללי מחלות במנגנונים שונים, הנובעים מפגיעה בהסעתם וביכולת המיהול שלהם. כפי שנכתב לעיל, אירועי גשם קיצוניים מגבירים את הסיכון בגלישת ביוב וקולחים בדרגות טיפול שונות לנחלים, ובכך חשיפתם לציבור הרחב. חיידקי *E. coli* צואתיים נבדקים תדיר ונמצא שכמותם עולה בשיעור ניכר לאחר אירועי גלישת ביוב לנחלים. זוהי דרך נוספת בה מחלות עלולות להתפשט במרחב ולהגיע לבני אדם, דוגמת מטיילים ורוחצים. הועלו השערות (למשל מילשטיין והרשקוביץ 2018)

שהתפרצות מחלת העברת (leptospirosis) בגולן בקיץ 2018 קשורה להיחלשות הזרימות בנחלים (המחלה מועברת באמצעות יונקים, כמו בקר, ומקורות מים). מחלות רבות מופצות באמצעות יתושים, מקרה פרטי של חרקי מים שמהווים מטריד לבני אדם וידועים כמפיצי פתוגנים שונים. **מרבית מיני היתושיים בישראל נמנים על המשפחה Culicidae, משגשים במקווי מים עומדים או בזרימה חלשה מאוד, ועל כן צפויים להיות נפוצים יותר בתרחיש של ירידה בספיקה והיחלשות זרימות. בטמפרטורות גבוהות יותר יתוש האנופלס מתפתח מהר יותר ויכולתו להפיץ את מחלת המלריה עולה (Bayoh and Lindsay 2007).**

ספרות

אוזן א'. (2010). שיקום ושימור הנחלים ובתי הגידול הלחים בישראל: מדיניות רשות הטבע והגנים. פרסומי חטיבת המדע רשות הטבע והגנים.

גזית א'. (2017). מה צופן העתיד לנחלי ישראל. אקולוגיה וסביבה 8(4).

טל א'. (2017). והארץ מלאה, התמודדות עם פיצוץ אוכלוסין בישראל. בני ברק: הוצאת הקיבוץ המאוחד.

סקוטלסקי א' ופרלמוטר מ'. (2012). געגועים לנחל. אגף שמירת טבע, החברה להגנת הטבע

יוסף, י', בהר"ד, ע', אוזן, ל', אוסטינסקי-צדקי, א', כרמונה, י', חלפון, נ', פורשפון, א', לוי, י', סתיו, נ' (2019). שינוי האקלים בישראל מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורה והמשקעים. דו"ח מחקר מס' 0000075-2019-0804-4000, השירות המטאורולוגי הישראלי

סוקניק א'. ו סקוטלסקי א'. (2017). זכות הטבע למים? דילמות בשיקום נחלי ישראל לנוכח השינויים במשק המים. אקולוגיה וסביבה 8(4): 68-75.

Arcement GJ, Schneider VR (1989) Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. US Geological Survey Water-Supply Paper 2339

Hershkovitz Y et al. (2018) Stream types of the Lake Kinneret (Sea of Galilee) watershed.
International Journal of River Basin Management 16:133–143

Iliopoulou-Georgudaki J et al. (2003) An application of different bioindicators for assessing water quality: a case study in the rivers Alfeios and Pineios (Peloponnisos, Greece).
Ecological Indicators 2:345–360

Markert B et al. (1999) The use of bioindicators for monitoring the heavy-metal status of the environment. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 240:425–429