



שפך האסטואר אל הים – מי הנחל המתוקים זורמים אל הים על פני מי הים המלוחים והכבדים שמתחתיהם | באדיבות צוות מחקר אסטואר אלכסנדר

עקות חמצן מתמשכות באסטואר של נחל אלכסנדר

24 ביולי, 2017

גיליון סתיו 2017 / כרך 8(3)

[חזית המחקר](#)

יאיר סוארי

בית הספר למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

לי שיש

בית הספר למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

שריג גפני

בית הספר למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

טל עמית

בית הספר למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

מרב גלבוט

בית הספר למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

ערן ברוקוביץ

בית הספר למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

גיתי יהל

בית הספר למדעי הים, המרכז
האקדמי רופין

על קצה המזלג

- על אף חשיבות הנושא של ניהול נחלים בישראל ושיקומם, תשומת לב מחקרית וציבורית מועטה ניתנת לאזורי האסטואר (המרחב שהנחל נפגש בו עם חוף הים), וזאת למרות החשיבות האקולוגית של סביבה ייחודית זו.
- בחלק גדול מהאסטוארים ישנה בעיה קשה של הזרמת קולחים, שגורמת לירידה ברמות החמצן במים.
- במחקר שנערך באסטואר נחל פולג נמצאו תוצאות מדאיגות: לאורך תקופות משמעותיות ובחלקים לא קטנים מעמודת המים ישנו דלדול חזק בחמצן מומס – פרמטר כימי חשוב במערכות מימיות.
- קביעת תכניות לשיקום נחלי ישראל חייבת להיעשות מתוך היכרות עם סביבת חיים זו, ותוך התאמת אופן ניהולה לתנאים הייחודיים השוררים בה.

המערכת

תקציר

באזור המפגש של נחלי חוף ונהרות חוף עם הים, חודרים מי הים המלוחים, והצפופים למעלה הנחל. באותו זמן זורמים מעליהם לכיוון הנגדי מים מתוקים וצפופים פחות. אזור המפגש נקרא "אסטואר" (Estuary). אסטוארים מתאפיינים בשינויים קיצוניים בתכונותיהם במרחב, ולעתים גם בזמן (כגון מליחות, טמפרטורה וריכוז חמצן), ולכן יש בהם מגוון רב של בתי גידול בשטח מצומצם יחסית. לאסטוארים חשיבות סביבתית בהיותם אזור שיקוע וסינון ביולוגי של מי הנחל, אזור גידול של דגים צעירים, וכן אתרי נופש וביולוי לבני האדם. המחקר המוצג כאן מתמקד באסטואר של נחל אלכסנדר מתוך מטרה להבין את מאפייניהם הייחודיים של האסטוארים בישראל ולאפשר ניהול מבוסס מדע. במסגרת זו מבוצעות בשנתיים האחרונות דגימות חודשיות ממעלה האסטואר ועד מוצאו לים, שנמדדים בהן פרופילים של מדדים כימיים, פיזיקליים וביולוגיים. נוסף על כך, מוצבות באסטואר שתי תחנות ניטור קבועות שיש בהן חיישנים

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

סוארי י, שיש ל, גפני ש ואחרים. 2017. עקות חמצן מתמשכות באסטואר של נחל אלכסנדר. *אקולוגיה וסביבה* 8(3): 44-52.

שאוגרים רצף נתונים של טמפרטורה, חמצן, מליחות ועומק. ממצאים ראשוניים, אחרי 18 החודשים הראשונים של המחקר, מראים כי מי העומק באסטואר סובלים מתנאים של מיעוט חמצן 71% מהזמן, ומי פני השטח נמצאים בתנאים כאלה 56% מהזמן. כמו כן, אסטואר נחל אלכסנדר סובל מתקופות מתמשכות של היעדר חמצן. המחסור בחמצן נגרם מהשייכוט האנכי במי האסטואר בשילוב של העתרה (שמקורה בעיקר בשומרון) הגורמת להתפתחות פיטופלנקטון במי האסטואר, דבר שמגביל את חדירת האור למי העומק. ממצאינו מדגימים עוד, שהזרמה נרחבת של קולחים גרמה לירידה בריכוזי החמצן ולעלייה בריכוזי הכלורופיל ובריכוזי הזרחות והחנקות. בניגוד לכך, צמצום דרמטי של הזרמות הקולחים עד כמעט עצירה מוחלטת של זרימת המים המתוקים לאסטואר הביאה לשיפור ניכר באותם פרמטרים, כך שניתן לראות שכמות חומרי ההזנה המזורמים לאסטואר חשובה יותר מריכוזם.

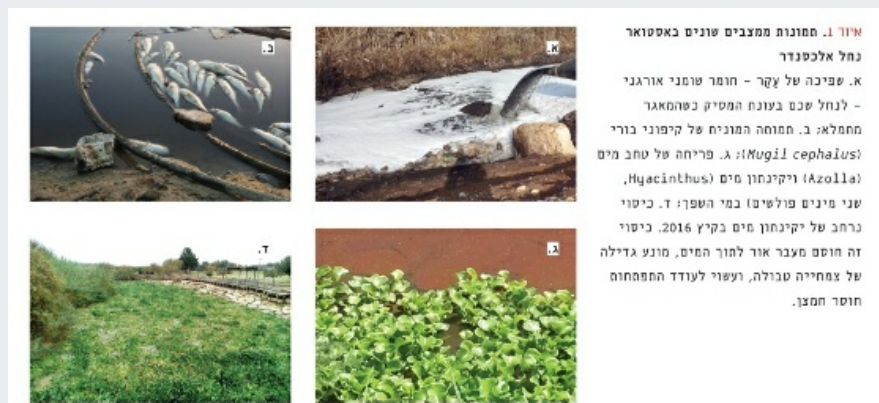
מבוא

בעשורים האחרונים אנו עדים למאמץ עולמי לשיקום נחלים והמערכת האקולוגית שלהם כדי להשיב את המגוון הביולוגי ששכן בהם, ולהחזירם לתפקוד מאוזן ותקין [23,22,20]. בישראל, עם העלייה בצפיפות האוכלוסייה וצמצום השטחים הטבעיים, הצורך בשיקום המערכות הללו דחוף במיוחד [16,8,2]. עד היום התמקדו עיקר מאמצי שיקום הנחלים בארץ במקטעי הנחל העליונים והמרכזיים [27,17,15], בעוד שהמקטעים התחתונים, הנקראים אסטוארים, שהנחלים חוברים בהם לים ומי הנחל הופכים לתערובת של מים מתוקים ומי ים, נותרו מחוץ למוקד ההתעניינות.

בהיותם אזור מעבר מסביבה ימית לסביבה יבשתית, אסטוארים הם מערכות אקולוגיות דינמיות, מגוונות ויצרניות, והם רגישים מאוד להשפעות סביבתיות [19,12]. אסטואר בריא הוא בית גידול למגוון של צמחים ובעלי חיים רבים, בהם דגים וחסרי חוליות [11], אתר מרכזי להטלה ולגידול צעירים של מינים ימיים ואתר סינון ושיקוע של חומרים כימיים המגיעים מהיבשה.

כדי להבין את האקולוגיה של האסטואר יש להבין את התנאים הפיזיקליים הייחודיים המאפיינים בית גידול זה. האסטואר מוגדר כשטח מחוף הים עד לנקודה במעלה הנחל שבה מי הים אינם מתערבבים עוד במי הנחל המתוקים [14] והוא מתאפיין במפלי (gradients) מליחות חדים: מפל ריכוזים אופקי, ממי ים במליחות של קרוב ל-PSU 40 (PSU ל-PSU 0.2) היא יחידת מליחות סטנדרטיות, השווה לכ-1 גרם לליטר) באזור השפך לים, למים במליחות של כ-PSU 0.2 במעלה הנחל [28,14,13], ומפל ריכוזים (שייכוט) אנכי, ממים מתוקים בחלקה העליון של עמודת המים למים מלוחים וצפופים בחלקה התחתון [18]. צורת המפלים ומידת הערבוב בין מים מתוקים למלוחים משתנות בין אסטוארים שונים, והיא דינמית מאוד גם בתוך אותו האסטואר [26,21]. המבנה הפיזיקלי של האסטואר נקבע על-ידי שילוב של גורמים, ובהם אספקת מים ממעלה הנחל, זרמים, גאוויות וגלים מכיוון הים, והאינטראקציה שלהם עם הטופוגרפיה. גם לגורמים אטמוספריים, כמו רוחות, משקעים ולחץ ברומטרי, יש השפעה על דינמיקה זו [25].

חומר אורגני הוא מצע להתפתחות אוכלוסיות חיידקים הצורכות חמצן, לכן מים שעשירים בחומר אורגני חשופים יותר למחסור בחמצן מומס. נהוג להגדיר חוסר חמצן בשתי רמות: מיעוט חמצן (מחסור מתון, hypoxia, ריכוז חמצן נמוך מ-2 מג"ל) וחוסר חמצן (anoxia, מתחת לריכוז של 0.5 מג"ל). עומס חומרי דשן אי-אורגניים (בעיקר חנקות וזרחות) גורם לשגשוג של מיקרו-אצות המגדילות את ריכוז החומר האורגני, מפחיתות חדירת אור, ועל-ידי כך מונעות התפתחות של צמחיית קרקעית טבולה (איור 1).



איור 1. תמונות ממצבים שונים באסטואר נחל אלכסנדר
א. שפיכה של עקר - חוסר טוּמני אורגני לנחל שכת בעונת המטיק כשהמאגר מחמלא; ב. תמונה המוּנחת של קיפוני בורי (*Mugil cephalus*); ג. פריחה של טחב מים שני מינים פולשים) במי השפך; ד. כיסוי נרחב של יקינחון מים בקיץ 2016. כיסוי זה חוסם מעבר אור לתוך המים, מונע גדילה של צמחייה טבולה, ועשוי לוודד התפתחות חוסר חמצן.

איור 1

תמונות ממצבים שונים באסטואר נחל אלכסנדר

א. שפיכה של עֵקָר - חומר שומני אורגני לנחל שכם בעונת המסיק כשהמאגר מתמלא; ב. תמותה המונית של קיפוני בורי (*Mugil cephalus*); ג. פריחה של טחב מים (*Azolla*) ויקינתון מים (*Hyacinthus*), שני מינים פולשים במי השפך; ד. כיסוי נרחב של יקינתון מים בקיץ 2016. כיסוי זה חוסם מעבר אור לתוך המים, מונע גדילה של צמחייה טבולה, ועשוי לעודד התפתחות חוסר חמצן.

בעוד שבמהלך היום יוצרות המיקרו-אצות חמצן בעומקים שהאור חודר אליהם, בלילה צורכת נשימת האצות והחיידקים חמצן רב מהמים. יתרה מכך, חלק מהאצות שוקעות לקרקעית, ומעלות את העומס האורגני במים העמוקים ואיתו את קצב צריכת החמצן הביולוגית (צח"ב, BOD). שילוב הגורמים הללו עם חמצון תרכובות מחוזרות מביאים למחסור בחמצן במים העמוקים [29]. תהליך זה מוגדר כהעתרה (איטרופיקציה) [10], והוא מונע פעמים רבות מפעילות אדם. באסטוארים, שהשיכוב בהם (שנגרם מהפרשי הצפיפות האנכיים) מונע מעבר מים אנכי והזנה של מי העומק בחמצן מפני השטח, מחרף המחסור בחמצן במי העומק.

מחסור בחמצן מוביל לתמותת דגים וחסרי חוליות, מקטין את התאמת בית הגידול למגוון של בעלי חיים, מוביל לצמצום גודל אוכלוסיות ולירידה בעושר המינים ובמגוון המינים (איור 1). שינויים אלה גוררים ירידה ביציבות ובתפקוד של המערכת האקולוגית, ובהמשך לירידה באספקת שירותי המערכת, כמו מים נקיים, אזור לרחצה וסילוק מזהמים [24]. אסטוארים, בהיותם ממוקמים לאורך קווי החוף המאוכלסים בצפיפות, חשופים תכופות להעתרה [24].

נחל אלכסנדר הוא אחד מנחלי האיתן הגדולים לחופה של ישראל, ואורכו כ-44 ק"מ. תחילתו בהרי השומרון, והוא נשפך לים התיכון בין היישובים מכמורת ובית ינאי. יובליו העיקריים הם נחל שכם ונחל תאנים [6]. אפיקו של נחל אלכסנדר מתחלק לשני אזורים גאוגרפיים. בחלקו העליון זורם הנחל באזור הרי שומרון, המכסים כ-65% מאגן הניקוז של הנחל. בחלקו התחתון, המשתרע מטול כרם במזרח ועד למוצא הנחל לים, הנחל זורם באזור מישורי בעל שיפוע מתון, ומהירות הזרימה בדרך כלל אטית ביותר. באזור ההררי הנחל ויובליו הם אכזב, בעוד שאת החלק הנמוך והאיתן של הנחל הזינו בעבר מספר מעיינות. מאז קום המדינה מנוצלים כל מי המעינות שזרמו לנחל אלכסנדר ומוטים לצורכי האדם, ובמקומם הוזרמו לנחל שפכים וקולחים ברמות שונות של טיפול.

האסטואר של נחל אלכסנדר ארוך יחסית (6.5 ק"מ), ומשתרע מאזור החוף מזרחה עד לכביש 4, ליד קיבוץ מעברות. באזור זה נע רוחבו של הנחל בין 10 ל-35 מטרים, ועומקו נע בין מטר לשניים וחצי מטרים. בנקודת המפגש של האסטואר עם קו החוף קיים שרטון חול דינמי, המגביל את קצב תחלופת המים בין האסטואר לים.

האסטוארים בישראל, למרות היותם סביבות ייחודיות ועשירות, נחקרו מעט עד היום. באסטואר אלכסנדר מתבצעות מדי שנה באביב ובסתיו דגימות מים על-ידי המכון לחקר ימים ואגמים [5] ועל-ידי אגף מים ונחלים במשרד להגנת הסביבה [4]. שתי התכניות מתמקדות בפרמטרים הביוגאוכימיים, ומודדות ריכוזי מזהמים ולא שטפים. החל בתחילת המעקב בשנות ה-70 של המאה ה-20 ועד תחילת העשור הנוכחי הייתה מגמת שיפור (ירידה) מתמשכת בריכוזי חומרי ההזנה ובצח"ב בנחלי החוף בכלל, ובנחל אלכסנדר בפרט. מגמה זו, שנבעה מהקמת מתקני טיהור שפכים (להלן – מט"ש) מרכזיים, מטיפול במקורות זיהום נקודתיים, ומגברת ההשבה של קולחים לחקלאות, נעצרה לאחרונה בנחל אלכסנדר, ואף התהפכה. המזהם העיקרי של נחל אלכסנדר כיום הוא שפכים מהרשות הפלסטינית שמגיעים ממט"ש טול כרם וממט"ש דיר שרף הממוקם ממערב לשכם. השפכים מטופלים בצורה חלקית ביותר במט"ש החירום ביד חנה, וקולחים מוזרמים להשקיה בעמק חפר. כשהמליחות בשפכים המגיעים אל המט"ש עולה לרמה שאינה מתאימה לשימוש חקלאי, הקולחים מוזרמים ישירות לנחל שכם, ומשם הם מגיעים לנחל אלכסנדר [8].

בעבר (בטרם שונה חוק המים והוגדרה זכות הטבע למים) החליטו הגורמים המוסמכים כי שיקום הנחלים בישראל יתבצע על-ידי הזרמת קולחים ברמת טיפול גבוהה [9]. במסגרת זו קיימת למעשה דרישת מים להזרמה של כ-25 אלף מ"ק ליום (תשעה מיליון מ"ק בשנה) של קולחים מטופלים לאלכסנדר (רשות הטבע והגנים – מידע שלא פורסם). בפועל מוזרמות כמויות משתנות של מי מט"ש יד חנה לנחל, בספיקות שעלו מכ-8,000 מ"ק ליום ב-2010 לכ-15,000 מ"ק ליום ב-2015 (נתונים שלא פורסמו, מט"ש יד חנה, 2016). המים המוזרמים לאסטואר אינם מוזרמים על סמך זכות הטבע למים, אלא כברירת מחדל.

בגלל הבצורת של חורף 2013–2014 נשאבו רוב הקולחים שהוזרמו ממט"ש יד חנה לנחל אלכסנדר והופנו להשקיה, ולאסטואר הגיעו כמויות מים מועטות. במהלך אביב 2015, לעומת זאת, עקב הצטברות עודפי קולחים במט"ש חדרה הוזרמו ממנו לנחל אלכסנדר כמויות גדולות מאוד של מי קולחים מטופלים. במסגרת מאמר זה אנחנו משתמשים בשונות במאפייני ההזרמה בין השנים 2013 ו-2014 לבחינת ממשקי ניהול שונים לאסטואר של נחל אלכסנדר וכמקרה בוחן לאסטוארים בישראל.

החל בינואר 2014 אנו עורכים מחקר שמאפיין את המדדים הפיזיקליים, הכימיים והביולוגיים המשפיעים על איכות מי האסטוארים של נחל אלכסנדר ונחל תנינים והסביבה הימית הסמוכה לשפך. מטרת המחקר היא הבנת הגורמים הפוגמים בבריאותה של מערכת האסטוארים ובניית תשתית מדעית לגיבוש דרכי פעולה לשיקום הנחל והאסטואר.

מטרת פרסום זה היא לתאר את גורמי העקה העיקריים במערכת האקולוגית של נחל אלכסנדר ולבחון באופן ראשוני את יעילותה של מדיניות הזרמת קולחים ככלי לשיפור המערכת האקולוגית [8].



יקינתון המים מתפשט בתנאים של ריבוי חומרי הזנה. ברקע: גדות שעברו חישוב | באדיבות צוות מחקר אסטואר

שיטות

דגימות חודשיות

אחת לחודש בוצעו בחמש תחנות ממעלה האסטואר ועד מוצאו (במרחקים של 0, 0.5, 3, 5.5 ו-6 ק"מ מקו החוף), פרופילי עומק של טמפרטורה, מליחות, חמצן, עכירות וזהירה של כלורופיל באמצעות רגש אלקטרוני (CTD). בכל נקודה נלקחו גם דגימות מים לפני השטח וסמוך לקרקעית (כשעומק המים אפשר זאת) למדידת כלורופיל במיצוי, חומר מרחף אורגני ואי-אורגני וצח"ב. למדדים אלה בוצעו האנליזות מיד בתום הדגימות. נוסף על כך, סוננו מי דגימה דרך ממברנת פוליקרבונט (0.2 מיקרון) לצורך אנליזות כימיות של ריכוזי זרחה (PO₄), אמוניום (NH₄), חנקית וחנקה (NO₂, NO₃) מומסים. חנקן אי-אורגני (DIN) כללי חושב כסכום של אמוניום, חנקית וחנקה. המים הוקפאו עד לשלב האנליזה.

את הפרוטוקולים המלאים לאנליזות המים וכן את כל הנתונים המוצגים להלן ניתן למצוא [באתר הפרויקט](#).

דגימות רציפות

חיישנים אוגרי נתונים קבועים הוצבו באסטואר בשתי תחנות, האחת בראש האסטואר מתחת לכביש 4, והשנייה במורד האסטואר מתחת לגשר בכביש המוביל ליישוב מכמורת. בתחנות אלה מוקמו חיישנים למליחות ולחמצן בפני השטח (חיישנים צפים) וסמוך לקרקעית. המדידה התבצעה בתדירות של אחת לחמש דקות. כל חודש נפרקו נתוני החיישנים, והתבצע כיוול מחודש של הרגשים.

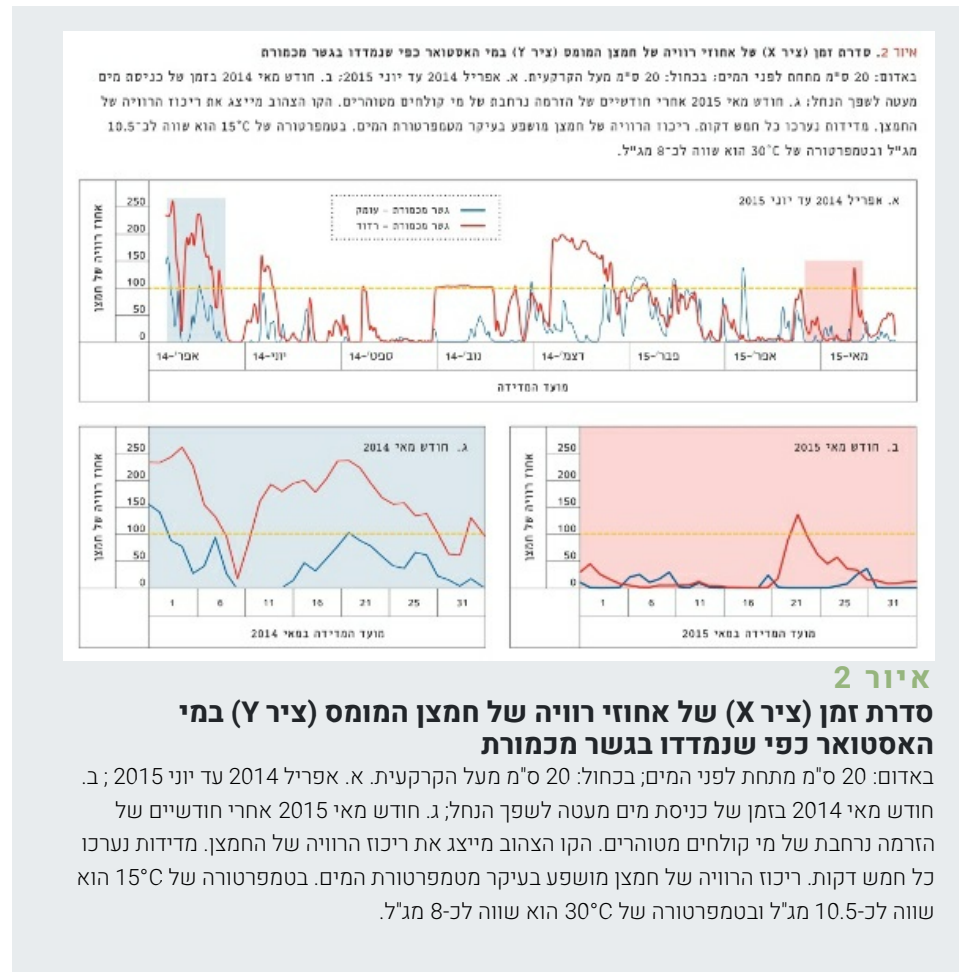
איסוף נתונים מגופים חיצוניים

נתוני הזרמות מי קולחים לנחל וריכוזי חומרי הזנה במים אלה התקבלו ממדידות שנעשו במט"ש יד חנה (נתונים שלא פורסמו, החברה הכלכלית עמק חפר, 2016). ספיקות המים לאסטואר נמדדו על-ידי רשות המים בתחנה ההידרומטרית ליד אלישיב, כמתיים מטר במעלה הנחל מהכניסה לאסטואר.

השוואה בין השטפים החודשיים של חומרי הזנה ביציאה ממט"ש יד חנה לשטפים החודשיים בכניסה לאסטואר אפשרה להעריך את קצבי צריכת חומרי הדשן במעלה הנחל. השטפים חושבו כמכפלת הריכוז בספיקת המים עבור חנקן אי-אורגני כללי DIN (הסכום של חנקה, חנקית ואמוניה) וזרחות. השטפים המגיעים מהמט"ש חושבו מהכפלת ספיקות המים בכל חודש במדידות הריכוזים החודשיים. השטפים בכניסה לאסטואר חושבו על-ידי הכפלת ספיקות המים באזור כביש 4 בריכוזי ה-DIN והזרחות. ספיקות המים נמדדות מספר פעמים ביום, ולכן השתמשנו בחציון הספיקות לביצוע החישוב.

תוצאות

תוצאות המדידות הרציפות בגשר מכמורת (איור 2א) מלמדות כי האסטואר של נחל אלכסנדר סובל ממיעוט חמצן בקרקעית לפרקי זמן ארוכים של ימים עד שבועות (71% מהזמן). מיעוט החמצן מתפשט לעתים תכופות עד פני השטח (56% מהזמן). יתרה מכך, תנאי חוסר חמצן שררו בתכיפות סמוך לקרקעית (61% מהזמן) ואף בפני השטח, ונמשכו לעתים מספר ימים רצופים (איור 2א). עם זאת, הנתונים מראים גם פרקי זמן ממושכים של ריכוזי חמצן גבוהים בפני השטח ואף במים העמוקים (איור 2ב, 2ג). לעתים נצפו גם ריכוזי חמצן בעומק שגבוהים מהריכוז בפני השטח. בפני השטח, ובעיקר בקיץ, תועדו תנודות יממיות חדות בריכוז החמצן, שנעות לעתים בין 200% רוויה ביום ל-0% רוויה בלילה. תנודות אלה נגרמות מיצרנות ראשונית גבוהה בשעות האור לעומת צריכה (נשימה) בשעות הלילה (איור 2ב).

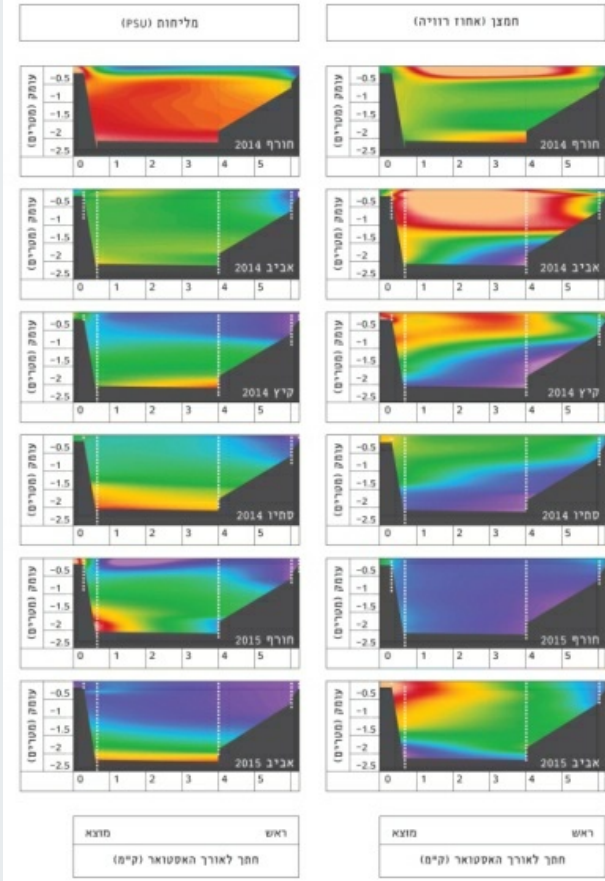


איור 2

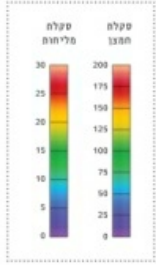
סדרת זמן (ציר X) של אחוזי רוויה של חמצן המומס (ציר Y) במי האסטואר כפי שנמדדו בגשר מכמורת

באדום: 20 ס"מ מתחת לפני המים; בכחול: 20 ס"מ מעל הקרקעית. א. אפריל 2014 עד יוני 2015; ב. חודש מאי 2014 בזמן של כניסת מים מעטה לשפך הנחל; ג. חודש מאי 2015 אחרי חודשיים של הזרמה נרחבת של מי קולחים מטוהרים. הקו הצהוב מייצג את ריכוז הרוויה של החמצן. מדידות נערכו כל חמש דקות. ריכוז הרוויה של חמצן מושפע בעיקר מטמפרטורת המים. בטמפרטורה של 15°C הוא שווה לכ"5 10.5 מג"ל ובטמפרטורה של 30°C הוא שווה לכ"8 מג"ל.

בחורף 2014 (ינואר-מרץ) ריכוז החמצן במי האסטואר כולו היה קרוב ל-100% רוויה. בתקופה זו היו מי הנחל מלוחים (25-30 יחידות מליחות), צפופים ומחומצנים בגלל חדירה מוגברת של מי ים לאסטואר, בעוד שמי הנחל המתוקים (0-15 יחידות מליחות) והקלים צפו בשכבה דקה מעליהם. בהמשך, בתקופת האביב (אפריל-יוני 2014), פחתה חדירת מי הים לאסטואר, ובו בזמן התחילה להיווצר שכבת מים ענייה בחמצן (50% סמוך לקרקעית, בעיקר במקטע המרכזי של האסטואר, באזור גשר הצבים. בקיץ 2014 (יולי-ספטמבר) הלכה השכבה הענייה בחמצן והתעבתה לכדי חצי מעומק האסטואר, ומי האסטואר נעשו מלוחים פחות (0-15 יחידות מליחות, עד עומק 1.5 מטר). בסתיו 2014 (אוקטובר-דצמבר) רוב מי האסטואר היו מתוקים ומעוטי חמצן. בחורף 2015 החלה עלייה ברוויית החמצן, מי גשם נכנסו ממעלה הנחל, ובו-בזמן גברה גם כניסת מי הים. המליחות בחורף 2015 נשארה נמוכה (0-15 יחידות מליחות), עובדה המצביעה על קישוריות ים-נחל נמוכה. בתקופה זו ריכוזי החמצן המומס נשארו נמוכים (0-50% ברוב עמודת המים) בהשוואה לריכוזים שנמדדו בחורף 2014. לעומת זאת, באביב 2015 התחילו להיווצר מחדש תנאי השיכוך של עמודת מי האסטואר (איור 3).



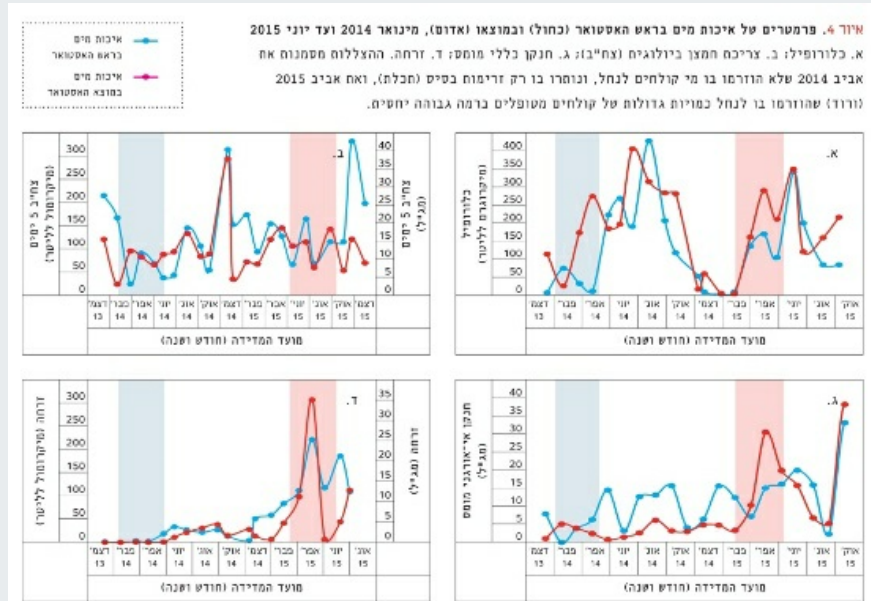
איור 3. ממוצעים חודשיים של נמוני חמצן ומליחות לאורך אקסטר אלכסנדר, ממוצא האקסטר לים (משמאל) ועד ראשו במעלה הנחל (מימין)
 נקודות הדגימה בפועל מיוצגות כנקודות לבנות. נערכה אינטרפולציה בין נקודות הדגימה בעזרת חוכנת Ocean Data View. ציר X – מרחק מהים; ציר Y – עומק. ערכי רוויית החמצן והמליחות מוצגים לפי מדרג הצבעים המוצג במקרא. חורף 2014 (ינואר-מרץ); אביב 2014 (אפריל-יוני); קיץ 2014 (יולי-ספטמבר); סתיו 2014 (אוקטובר-דצמבר); חורף 2015 (ינואר-מרץ); אביב 2015 (אפריל-יוני).



איור 3 ממוצעים תלת-חודשיים של נתוני חמצן ומליחות לאורך אקסטר אלכסנדר, ממוצא האקסטר לים (משמאל) ועד ראשו במעלה הנחל (מימין)

נקודות הדגימה בפועל מיוצגות כנקודות לבנות. נערכה אינטרפולציה בין נקודות הדגימה בעזרת תוכנת Ocean Data View. ציר X – מרחק מהים; ציר Y – עומק. ערכי רוויית החמצן והמליחות מוצגים לפי מדרג הצבעים המוצג במקרא. חורף 2014 (ינואר-מרץ); אביב 2014 (אפריל-יוני); קיץ 2014 (יולי-ספטמבר); סתיו 2014 (אוקטובר-דצמבר); חורף 2015 (ינואר-מרץ); אביב 2015 (אפריל-יוני).

ריכוזי הכלורופיל במי האקסטר גבוהים ביותר, ומראים השתנות עונתית, פריחה באביב ובתחילת הקיץ וירידה בריכוזי הכלורופיל מאמצע הקיץ לסוף החורף (איור 4א). גם השתנות הצח"ב מצביעה על קשר עונתי. בשתי השנים (2014 ו-2015) נמדדו ערכי הצח"ב הגבוהים ביותר בחורף, והירידה בצח"ב הייתה מהירה. הערכים במעלה האקסטר גבוהים יותר מממוצא לים (איור 4ב), כנראה בשל תהליכי פירוק חומר אורגני ותרכובות מחזורות שהתרחשו במהלך שהיית המים באקסטר ובגלל מיהול במי ים.



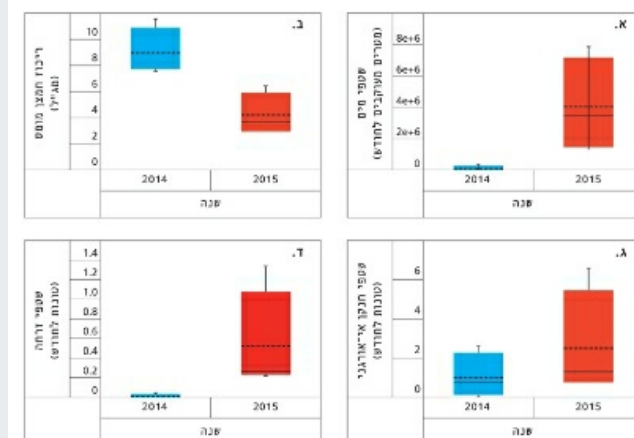
איור 4
פרמטרים של איכות מים בראש האסטואר (כחול) ובמוצא (אדום), מינואר 2014 ועד יוני 2015

א. כלורופיל; ב. צריכת חמצן ביולוגית (צח"ב); ג. חנקן כללי מומס; ד. זרחה. ההצללות מסמנות את אביב 2014 שלא הוזרמו בו מי קולחים לנחל, ונותרו בו רק זרימות בסיס (תכלת), ואת אביב 2015 (ורוד) שהוזרמו בו לנחל כמויות גדולות של קולחים מטופלים ברמה גבוהה יחסית.

ריכוזי חנקן אי-אורגני DIN, (איור 4ג) וזרחה (איור 4ד) היו בדרך כלל גבוהים יותר במעלה האסטואר לעומת מוצא לים. במרבית חודשי המחקר כ-50% מה-DIN שנכנס לאסטואר נצרך לפני שהגיע לים. (איור 4ג), ובריכוז הזרחה שנכנס לאסטואר יוצא ממנו נמצאה תנדותית (איור 4ד). ריכוז הזרחה במוצא האסטואר היה נמוך בהשוואה לריכוז במעלה האסטואר, אולם בחודשים אוגוסט-נובמבר 2014 ואפריל-יוני 2015 ריכוז הזרחה במוצא האסטואר היה גבוה לעומת המעלה (איור 4ד).

בחודשים פברואר ומרץ 2015 הוזרמו לנחל אלכסנדר כ-22,000 מ"ק ליום של מי קולחים מטופלים ברמה שניונית ממט"ש חדרה (יובל סבר – מידע בעל פה), כמות כפולה מזו המוזרמת לאסטואר בדרך כלל. כמות זו נוספה להזרמות ממט"ש יד חנה ולזרימות הבסיס (איור 4א).

בעוד שריכוזי חומרי ההזנה באביב 2015 לא היה גבוה משמעותית מהריכוזים באביב 2014, השטפים שלהם (מכפלת ריכוזי חומרי ההזנה בספיקת המים) היו גבוהים הרבה יותר (איור 4ג, איור 4ד). בשנת 2014 נעו שטפי החנקן האי-אורגני בין 0.1 ל-2 טונות לחודש, ואילו בשנת 2015 נעו שטפי החנקן בין 6 ל-11 טונות בחודש. שטפי הזרחן בשנת 2014 היו נמוכים מ-100 ק"ג לחודש, ואילו בשנת 2015 נעו בין 200 ל-1,300 ק"ג לחודש. בד בבד עם שטפי חומרי ההזנה הגבוהים בשנת 2015 חלה גם ירידה בריכוזי החמצן באסטואר. בעוד שריכוזי החמצן הממוצעים באסטואר נעו בין 8 ל-12 מ"ג חמצן לליטר באביב 2014 ואירועי מיעוט חמצן וחוסר חמצן היו נדירים, עם עליית ההזרמות ב-2015 ירדו הריכוזים בצורה ניכרת (3-6 מ"ג לליטר), ואירועי חוסר חמצן נעשו שיכיחים.



איור 5. נמונים מסכמים 2014 ו-2015: תקופה מורגבת הזרמות לעומת תקופה מעוטת הזרמות

א. שטפי מים חודשיים שזרמו אל הור השפך; ב. ריכוזי חמצן וממוצע על כל השפך; ג. שטפים חודשיים של חנקן אי-אורגני; ד. זרחה בכניסה לשפך ליד ג'ית 4. בכל עמודה מוצגים הערך המרבי, המזרני (נקודת אכזיב), הממוצע (בקו מקוקו), החציון (בקו רציף) והרכיבים (החוסר השטח הצבעוני) עבור ינואר עד אפריל של שנת 2014 ומכללה לעומת 2015 (אדום). השטפים חוטבו כמפלח הריכוז שנמדד בראש האסטואר במהלך החודש בסכום הספיקות החודשי מסודרות רשות המים.

איור 5

נתונים מסכמים 2014 ו-2015 : תקופה מרובת הזרמות לעומת תקופה מעוטת הזרמות

א. שטפי מים חודשיים שזרמו אל תוך השפך; ב. ריכוזי חמצן (ממוצע על כל השפך); ג. שטפים חודשיים של חנקן אי-אורגני; ד. זרחה בכניסה לשפך ליד כביש 4. בכל עמודה מוצגים הערך המרבי, המזערי (קווים אנכיים), הממוצע (בקו מקוקו), החציון (בקו רציף) והרבעונים (תחום השטח הצבעוני) עבור ינואר עד אפריל של שנת 2014 (תכלת) לעומת 2015 (אדום). השטפים חושבו כמכפלת הריכוז שנמדד בראש האסטואר במהלך החודש בסכום הספיקות החודשי ממדידות רשות המים.

דיון ומסקנות

הערתה אורגנית^[1] נגרמת בדרך כלל בעקבות פעילות אדם, ונחשבת לאחת הסיבות העיקריות להתפתחות מצבי מיעוט חמצן וחוסר חמצן מתמשכים באסטוארים ברחבי העולם. נמצא כי ניתן לשפר מצב זה על-ידי הפחתת עומסי חומרי הזנה והעומס האורגני דרך טיפול מתקדם יותר בקולחים המוזרמים לאסטוארים^[9, 24].

נוסף על העומס האורגני, גם לתנאים הפיזיקליים יש השפעה על ריכוז החמצן המומס במים. לדוגמה, עליית טמפרטורת המים יכולה להאיץ את קצב צריכת החמצן, ויצירת גוף מים מלוח בקרקעית האסטואר יכולה למנוע ערבול מי עומק לפני שטח, דבר שמעלה את הסיכוי ליצירת תנאי חוסר חמצן בקרקעית. בחורף גורמים גלי הים והשיטפונות בנחל לשבירה של שרטון החול ולזרימת מים דו-כיוונית מהירה יותר בין הנחל לים. בתנאים אלה קצב התחלופה של המים המתוקים (ממעלה הנחל) והמלוחים (מהים) במי האסטואר מהיר יחסית, ותחלופה מוגברת זו מאפשרת עלייה בריכוז החמצן המומס במים למרות קצב צריכה גבוה. בקיץ, עם בנייתו המחודשת של שרטון החול, יורד קצב תחלופת המים באסטואר. בתנאים אלה קצב כניסת החמצן לאסטואר כתוצאה מזרימה של מים מחומצנים נמוך מקצב צריכתו (בעיקר על-ידי אוכלוסיות החיידקים), וריכוז החמצן המומס קרוב לקרקעית יורד. סמוך לקרקעית האסטואר עוצמת התאורה נמוכה מאוד, והמים מלוחים וצפופים, כך שהם אינם מתערבלים עם המים שבפני השטח. במים אלה לא מתקיימים תהליכים משמעותיים של ייצור ראשוני המייצרים חמצן מחד גיסא, ומאידך גיסא אין חדירת מים מחומצנים בזרימה, כך שמי העומק נותרים מחוסרי חמצן במהלך רובה המוחלט של עונת הקיץ. לנוכח ממצאים אלה נראה שהטיפול במצבי מיעוט חמצן וחוסר חמצן מחייב הגברה של הזרמת מים עשירים בחמצן נוסף על הפחתת העומס האורגני במערכת, בעיקר בתקופות חמות. השינויים העונתיים בריכוזי החמצן המומס במי האסטואר בולטים בעיקר באזור גשר הצבים (מרכז האסטואר) ובחלקו העליון, ופחות בחלקו התחתון הקרוב לים. באזור גשר הצבים נמשך חוסר החמצן שמתפתח בקיץ מספר חודשים, בעיקר במי הקרקעית.

מספר תופעות ידועות מצביעות על מצב ירוד של מערכת מימית. ריכוזים גבוהים של כלורופיל ושל פיטופלנקטון הם התסמינים הראשונים המצביעים על ירידה באיכות המים בעקבות העשרה בחומרי הזנה. במצבים קיצוניים יתווספו תסמינים של רמות נמוכות של חמצן מומס, היעלמות צמחייה טבולה והופעת מיקרו-אצות רעילות לסביבה^[9]. באסטואר אלכסנדר נמדדו רמות כלורופיל גבוהות, רמות חמצן נמוכות, ומאז שמי הנחל זוהמו לא מתפתחת צמחייה טבולה שהייתה אופיינית לאסטואר בעבר^[3].

נחל אלכסנדר שהפך למוביל שפכים לא מטופלים וקולחים מתאפיין במים עניים בחמצן ועמוסים בחומרי הזנה. כפועל יוצא מכך, ניתן להעריך שהאסטואר מתקשה בקיום מערכת אקולוגית בריאה ומאוזנת. ייתכן שכניסת מי הים הרוויים בחמצן מאפשרת קיום תהליכים חיוניים תלויי חמצן. אף על פי כן, כשכניסת הים נעצרת, מי האסטואר נמצאים במצבי עקת חמצן מתמשכים שעשויים להוביל לתמותת בעלי חיים (איור 1ב).

מרבית השפכים של ישראל מופנים למט"שים ומנוצלים כמשאב יקר לחקלאות. טיפול שלישוני וטיפול באגנים ירוקים בקולחים המוזרמים לנחל הירקון, למשל, הביא לשיפור ניכר בתפקוד המערכת האקולוגית של הנחל. ריכוזי החמצן של קולחים אלה קרובים לרוויה (ביום ובלילה), והם גבוהים יותר אפילו מריכוזי החמצן במי הנחל הנקיים המגיעים מהמעלה^[7, 3]. גם באסטוארים הקישון והירקון נעשו פעולות דרסטיות לשיפור איכות המים^[3]. לעומת זאת, נחל אלכסנדר מקבל כמויות גדולות של קולחים באיכות ירודה שמקורם בנפות שכם וטול כרם של הרשות הפלסטינית, ובמצבו הנוכחי הוא מהווה מפגע אקולוגי.

ממצאי המחקר תומכים במידה רבה בהנחה שתנאי חוסר החמצן ישתפרו אם תהיה הזרמה גדולה יותר של מים מחומצנים באיכות טובה, או אם תשתפר מידת הקישוריות בין האסטואר לים, מהלך שיביא לכניסת מים מלוחים ומחומצנים מהים, בעיקר בהשוואה למצב בחודשי הקיץ כיום. להערכתנו, כדאי לבחון פתיחה יזומה של שרטון החול כצעד ממשקי בתקופות של עקת חמצן חמורה.

תקן איכות המים בנחלים מתבסס על ההנחה ששיפור של איכות המים יתאפשר בעיקר על-ידי הורדה של ריכוזי המזהמים במים המוזרמים לאסטואר. עם זאת, מתוצאות המחקר, ובעיקר מההשוואה בין אביב 2014 לאביב 2015, משתמע שגם ירידת עומסים הנובעת מהפחתת כמות המים המטופלים שנכנסים לאסטואר, תשפר את

המצב. ירידת העומסים תגרום לעלייה בריכוזי החמצן המומס, שבעקבותיה צפוי להתרחש שיפור בתפקוד המערכת האקולוגית. נראה כי הסיבה להרעת התנאים שנצפתה באסטואר באביב 2015 היא העומסים המוגדלים של חומרי ההזנה, שמקורם בתוספת המים המטופלים שהוזרמו לנחל אלכסנדר, אף על פי שאיכות הטיפול הייתה גבוהה באופן יחסי. תקינה שמבוססת על ריכוז של איכות המים להזרמה לנחלים אינה עונה על צרכיהן של המערכות האקולוגיות, ויש להתחשב לא רק בריכוז חומרי ההזנה בקולחים, אלא גם, ובעיקר, בעומס שהם יוצרים למערכת.

מקורות

1. אגמי מ. 1973. השפעת הזיהום של מי נחל אלכסנדר והירקון על צמחייתם. טבע וארץ **15**: 242-247.
2. אוזן א. 2010. שיקום ושימור הנחלים ובתי הגידול הלחים בישראל: מדיניות רשות הטבע והגנים. פרסומי חטיבת המדע.
3. גפני ש ויוגב ט. 2015. סחרור מים בנחל הירקון: תמונת מצב לפני התחלת הסחרור ובחינת השפעת השיפור באיכות הקולחים על המקטע התיכון של הנחל. הוגש לרשות נחל הירקון. יוני 2015.
4. המשרד לאיכות הסביבה. 2011. ניטור מים ונחלים, ד"ח פעילות. אגף מים ונחלים.
5. חרות ב, שפר ע, גורדון נ, ואחרים. 2014. התכנית הלאומית לניטור מימי החופין של ישראל בים התיכון – דו"ח מדעי לשנת 2012. דו"ח חיא"ל 62/2013H.
6. רשות המים, השנתון ההידרולוגי 2014.
7. Arnon S, Avni N, and Gafny S. 2015. Nutrient uptake and macroinvertebrate community structure in a highly regulated Mediterranean stream receiving treated wastewater Nitrogen and phosphorus uptake in highly regulated Mediterranean stream receiving treated wastewater. *Aquatic Sciences* **77**: 623-637.
8. Bar Or Y. 2000. Restoration of the rivers in Israel's coastal plain. *Water, Air, and Soil Pollution* **123**: 311-321.
9. Bricker SB, Longstaff B, Dennison W, et al. 2008. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: A decade of change. *Harmful Algae* **8**: 21-32.
10. Chislock MF, Doster E, Zitomer RA, and Wilson AE. 2013. Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge* **4**: 10.
11. Day JW Jr, Crump BC, Kemp WM, and Yanez-Arancibia A. 2013. *Estuarine Ecology*, 2nd ed. New Jersey: Wiley-Blackwell.
12. Ducrotoy JP and Elliott M. 2006. Recent developments in estuarine ecology and management. *Marine Pollution Bulletin* **53**: 1-4.
13. Eyre B and Balls P. 1999. A comparative study of nutrient behavior along the salinity gradient of tropical and temperate estuaries. *Estuaries* **22**: 313-326.
14. Fleming J. 1816. Observations on the junction of the fresh waters of rivers with the salt water of the sea. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **8**: 507-513.
15. Gafny S, Goren M, and Gasith A. 2000. Fish assemblage in a coastal Mediterranean

- stream (Yarqon, Israel) receiving domestic effluent. *Hydrobiologia* **422/423**: 319-330.
16. Gafny S, Talozzi S, Al-Sheikh B, and Ya'ari E. 2010. Towards a living Jordan River: An environmental flows report on the rehabilitation of the lower Jordan River. EcoPeace/Friends of the Earth Middle East. Amman, Bethlehem and Tel Aviv.
 17. Gasith A, Bing M, Raz Y, and Goren M. 1998. Fish community parameters as indicators of habitat conditions: The case of the Yarqon stream, a lowland polluted stream in a semiarid region (Israel). *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **26**: 1023-1026.
 18. Huzzey L and Brubaker JM. 1988. The formation of longitudinal fronts in a coastal plain estuary. *Journal of Geophysical Research* **93**: 1329-1334.
 19. Kennish MJ. 2000. Estuary restoration and maintenance: The national estuary program. CRC Press.
 20. Lake PS. 2001. On the maturing of restoration: Linking ecological research and restoration. *Ecological Management & Restoration* **2**: 110-115.
 21. Lockwood APM, Sheader M, and Williams JA. 1998. Life in estuaries, salt marshes, lagoons and coastal waters. In: Summerhayes CP and Thorpe SA (Eds). *Oceanography, an illustrated guide*. New York: John Wiley & Sons.
 22. Naiman RJ, Magnuson JJ, McNight DM, and Stanford JA. 1995. The freshwater imperative – a research agenda. Island Press, Alstone, Washington. DC, USA.
 23. Postel S and Richter B. 2003. Rivers for life: Managing water for people and nature. Washington, DC: Island Press.
 24. Rabalais NN, Turner RE, and Wiseman Jr WJ. 2002. Gulf of Mexico Hypoxia, A.K.A. "The dead zone". *Annual Review of Ecology and Systematics* **33**: 235-263.
 25. Sierra JP, Sanchez-Arcilla A, Gonzalez del Rio J, et al. 2002. Spatial distribution of nutrients in the Ebro estuary and plume. *Continental Shelf Research* **22**: 361-378.
 26. Stephens R and Imberger J. 1996. Dynamics of the Swan River Estuary: The seasonal variability. *Marine and Freshwater Research* **47**: 517-529.
 27. Touch K and Gasith A. 1989. Effects of an upland impoundment on structural and functional properties of a small stream in a basaltic plateau (Golan Heights, Israel). *Regulated Rivers: Research and Management* **3**: 153-167.
 28. Van Damme S, Struyf E, Maris T, et al. 2005. Spatial and temporal patterns of water quality along the estuarine salinity gradient of the Scheldt estuary (Belgium and The Netherlands): Results of an integrated monitoring approach. *Hydrobiologia* **540**: 29-45.
 29. Villate F, Iriarte A, Uriarte I, et al. 2013. Dissolved oxygen in the rehabilitation phase of an estuary: Influence of sewage pollution abatement and hydro-climatic factors. *Marine Pollution Bulletin* **70**: 234-246.