



חקר ימים ואגמים לישראל בע"מ. ISRAEL OCEANOGRAPHIC & LIMNOLOGICAL RESEARCH LTD.  
המעבדה לחקר הכנרת ע"ש יגאל אלון THE YIGAL ALLON KINNERET LIMNOLOGICAL LABORATORY  
ת.ד. 447 מגדל 14950, ישראל טלפון: 04-6721444; פקס: 04-6724627 E-mail: kll@ocean.org.il P.O.B. 447, MIGDAL 14950, ISRAEL

## **תרחישי קיצון של כנרת במפלסים נמוכים: סיכום ישיבות צוות סיעור מוחות**

**מוגש ליו"ר רשות המים**

**חברי הצוות:**

**המעבדה לחקר הכנרת, חיאל:** תמר זהרי, אסף סוקניק, איליה אוסטרובסקי, ורנר אקרט, טומי ברמן,  
גדעון גל, אורה הדס, יוסי יעקבי, עמי נשרי, ארקדי פררוב, אלון רימר (בהתכתבות).  
**יחידת המעבדות ואגן ההיקוות, חבל הירדן, מקורות:** בני טלטש, דיגו ברגר, רם פורת, מאיר רום.  
**אגף כנרת, רשות המים:** דורון מרקל (רפרנט).

T10/2009

מאי 2009

## תקציר מנהלים

עקב הבצורת בחורפים 2009 – 2004 ושאיבת יתר של מים מהכנרת ירד מפלס האגם בסוף 2008 לשפל כמעט חסר תקדים. בשל צפי של התמשכות מצוקת המים ודלדול המקורות הטבעיים, כינסנו צוות מקצועי לסיעור מוחות בנושא - התרחישים הגרועים העלולים להתקיים בכנרת ודרכי פעולה אפשריות לצמצום הנזקים במידה והתרחישים יתממשו. דו"ח זה מהווה סיכום של דיוני הצוות ומצביע על התהליכים החזויים באגם ועל הסכנות למערכת האקולוגית בשני מצבי קיצון אפשריים: האחד של התארכות רצף השנים השחונות הנוכחי בעוד שלוש שנים שחונות במיוחד (תרחיש 1), השני של עליית מפלס מהירה ומילוי הכנרת במהלך חורף יחיד גשום מהרגיל (תרחיש 2).

הבעיות האקולוגיות שהצוות צפה עקב המשכת רצף שנות הבצורת (תרחיש 1, איור 1) הן של פגיעה באוכלוסיות הדגים ובאוכלוסיות חסרי החוליות בליטוראל, העלמות מינים רגישים ובמקביל פלישת מינים זרים והשתלטותם ו/או התעצמות מינים שוליים שכבר קיימים בכנרת - בכל רמות מארג המזון, העדר פרידיניום ופריחת אצות כחוליות, תהליכים שמתרחשים על פני מספר שנים. מכולן, החמורה ביותר לאיכות המים היא פריחת כחוליות מייצרות רעלנים. עד כה, מערך הטיפול במי הכנרת המופעל על ידי חברת מקורות פועל בהצלחה לסילוק מלא של הרעלנים הנשאבים בזמן פריחת של אצות כחוליות ולא התעוררה בעיית איכות במים המסופקים לצרכנים. מאידך, לא ידוע מהו ריכוז הרעלנים שמעבר לו סילוקם יהיה מוגבל. עצמת פריחת האצות הכחוליות עלולה להתגבר מעבר למה שצפינו עד כה באגם, במיוחד אם בשנה מסוימת טמפרטורת המים תהיה גבוהה יחסית ויגיע לאגם יותר זרחה ממקור חיצוני כמו אבק, כשל מקומי במערכות הטיפול בקולחין באגן ההיקוות, או התגברות שטף חומרי הדשן ממקורות פנימיים. הערכתנו לעוצמה מרבית אפשרית של פריחת כחוליות בכנרת, בריכוזי כלורופיל, היא של עד פי 3.5 מהריכוז המרבי שנרשם בשיא פריחת האפניזומנון ב-1994, עם ריכוזי רעלנים של כ-10 מיקרוגרם לליטר, פי 10 מערך הסף המומלץ. פריחה כזו יכולה להתפתח תוך כ-6 עד 9 שבועות מיום שבו ריכוזי החנקן האנאורגאני המומס יורדים מתחת לערך סף של כ-20 מיקרוגרם חנקן לליטר ולהישאר בשיאה שבועות בודדים. יש להכין תוכניות מגרה לסגירת חופים ואיסור רחצה במועדים בהם מצטברת צופת של אצות רעילות, או כאשר ריכוזי האצות או הרעלנים במים עוברים סף מותר, כפי שנעשה במדינות שונות בעולם.

דיון בכלים אפשריים למזעור הבעיה, שהתבסס על סקר ספרות וניסיונם המקצועי של חברי הצוות, הוביל למסקנה שאין בידנו כלי יעיל למניעת התפתחות פריחת של כחוליות מייצרות רעלנים לאחר שכבר התפתחו באגם תנאים מתאימים להתפתחות פריחת כאלו ומינים לא רצויים פלשו לאגם והתבססו בו. מה שכן ניתן לעשות הוא למנוע החמרת המצב הקיים. הימנעות משאיבה מעבר לכמות המים הזמינים השנתית וצמצום טווח ניווד המפלסים חשובים למניעת החמרת המצב.

מוצע מערך התראה בעל שלש רמות התראה (איור 2), שהאחרונה והמחמירה היא של נוכחות נמשכת של ציאנובקטריה רעילות ורמה גבוהה של רעלנים במים ובעקבות כך המלצה להפסיק לאלתר שאיבה של מים מהכנרת למערכות המספקות מי-שתייה.

בתרחיש השני (איור 3) הצוות בחן את התהליכים הצפויים באגם בעקבות עליית מפלס מהירה של 6-7 מ' בחורף אחד גשום במיוחד. משמעות התרחיש שלאגם יתווספו מים קרים יותר ובעלי מליחות נמוכה יותר בכמות הקרובה ל- 50% מהמים שבאגם. מיהול מאסיבי זה של האגם יגרום לירידה משמעותית במליחות הכנרת. הבעיות העיקריות הנראות לעין בתרחיש של עליית מפלס מהירה קיצונית הן של תמותת דגים, שפל בזואופלנקטון והפחתת היציבות של אוכלוסיות הפיטופלנקטון והזואופלנקטון, תהליכים שמתפרשים על פני מספר שנים. מניסיון העבר למדנו שבעיות תמותת הדגים ושפל הזואופלנקטון הפיכות, תוך שנים ספורות צפויה התאוששות של אוכלוסיות אלו. קשה להתמודד עם בעיית הפחתת יציבות אוכלוסיות הפיטופלנקטון והזואופלנקטון כי אין בידנו כלים לחזות במה תתבטא התערערות יציבות זו. בעבר בוצע דילול סרדינים בעקבות עליות המפלס המהירות של 1991/92 ו- 2002/03, אך לא הוכח שאמצעי זה היה יעיל, ויש לבחון מחדש באם יש לחזור עליו בעתיד.

### המלצות

1. להגביל את השאיבה השנתית מהכנרת לכמות המים הזמינים ולצמצם את טווח ניווד המפלסים לתחום 208.80 - ועד 213 - מ'
2. לפעול להשבת ניטראטים מעמק החולה או הגברת עומס הניטראט בדרכים אחרות בחודשי הקיץ (נדרשת בדיקה).
3. לפעול לצמצום עומסי הזרחן המגיעים לכנרת ע"י יישום wetland (אגן ירוק/אגן שיקוע), ו/או צמצום שטף האבק (נדרשת בדיקה).
4. הכנת והפעלת נוהל סגירת חופי רחצה למצבים של פריחות של ציאנובקטריה רעילות בכנרת

## **מבוא**

משק המים בישראל נתון כבר מספר שנים במשבר עקב ניצול יתר מתמשך של מקורות המים. גרעון זה במאזן המים עורר בחריפות יתרה שאלות לגבי ההשלכות הצפויות על המערכת האקולוגית של הכנרת ועל איכות מימיה. הדעה הרווחת בין המדענים היא שככל שטווח תנודות מפלס הכנרת גדל מידת היציבות של המערכת האקולוגית פוחתת ועוצמת תגובתה השלילית עלולה להיות קיצונית יותר. מאידך, אין באפשרותנו לחזות באמינות כיצד יגיב האגם למפלס נמוך נתון. עקב הבצורת בחורפים 2009 – 2004 ושאירת יתר של מים מהכנרת ירד מפלס הכנרת בסוף 2008 לשפל כמעט חסר תקדים. בשל צפי של התמשכות מצוקת המים ודלדול המקורות הטבעיים, פנה יו"ר רשות המים למעבדה לחקר הכנרת בבקשה להצביע על התרחישים הגרועים העלולים להתקיים בכנרת ולהציע דרכי פעולה אפשריות לצמצום הנזקים במידה והתרחישים יתממשו. המעבדה לחקר הכנרת התגייסה למשימה על ידי הקמת צוות סיעור מוחות שכלל את כל חוקרי המעבדה בתוספת מומחים מחברת מקורות ומרשות המים. דו"ח זה מהווה סיכום של דיוני הצוות. הדו"ח מצביע על התהליכים החזויים באגם ועל הסכנות למערכת האקולוגית בשני מצבי קיצון אפשריים: האחד של התארכות רצף השנים השחונות הנוכחי בעוד שלוש שנים שחונות במיוחד (תרחיש 1), השני של עליית מפלס מהירה ומילוי הכנרת במהלך חורף יחיד גשום מהרגיל (תרחיש 2). יש להבהיר שהצוות לא ניסה לחזות את המצב הצפוי אלא לדמיין ולתאר את המצב הגרוע ביותר האפשרי, כדי שאפשר יהיה להתכונן ולהיערך אליו. הנחת עבודה היא שהכנרת נמצאת כבר כיום במצב של יציבות אקולוגית מעורערת לעומת מצבה עד אמצע שנות התשעים.

## **מטרות**

1. ברור התרחישים הגרועים ביותר שניתן לחזות עבור הכנרת;
2. עבור כל תסריט – להצביע על כלים תפעוליים אפשריים למזעור הבעיה בכנרת ובמערכת אספקת המים;
3. לפתח מערכת התראה שתאפשר הפעלת הכלים התפעוליים בזמן הנכון (לא מוקדם מדי ולא מאוחר מדי);
4. להמליץ על תוספות נדרשות לניטור ועל הדרכים לפיתוח ויישום כלי הממשק והתפעול הנדרשים למזעור הבעיות הצפויות.

## **שיטות**

לצורך השגת מטרות העבודה הוקם צוות מומחים לסיעור מוחות בנושא תרחישי קיצון של כנרת במפלסים נמוכים. הצוות נפגש אחת לשבוע החל מאמצע ינואר 2009, התקיימו 9 מפגשים בני שעה וחצי עד שעתיים כל אחד. דיוני הצוות התמקדו בבירור הנתונים הקיימים, בהצגת מחקרים וממצאים רלבנטיים, בהעלאת פערי ידע ואי וודאיות, בהצעות לתרחישים הגרועים ביותר ובניסיון להעריך את השלכותיהם על התהליכים העיקריים הפועלים בכנרת. הדיונים הובילו להתמקדות בשני תרחישי קיצון שהוזכרו לעיל.

ההבנות אליהן הגיע הצוות סוכמו בתרשים זרימה עבור כל תרחיש (איורים 1, 2), שבו תיבות המתארות את התהליכים הצפויים וחיצים המקשרים ביניהן. תהליכים בעלי השפעה שלילית ישירה או עקיפה על איכות המים אוגדו בתוך ריבוע אדום. בהמשך, בשיטת "פנל מומחים" כ"א מהמשתתפים דרג את החיצים

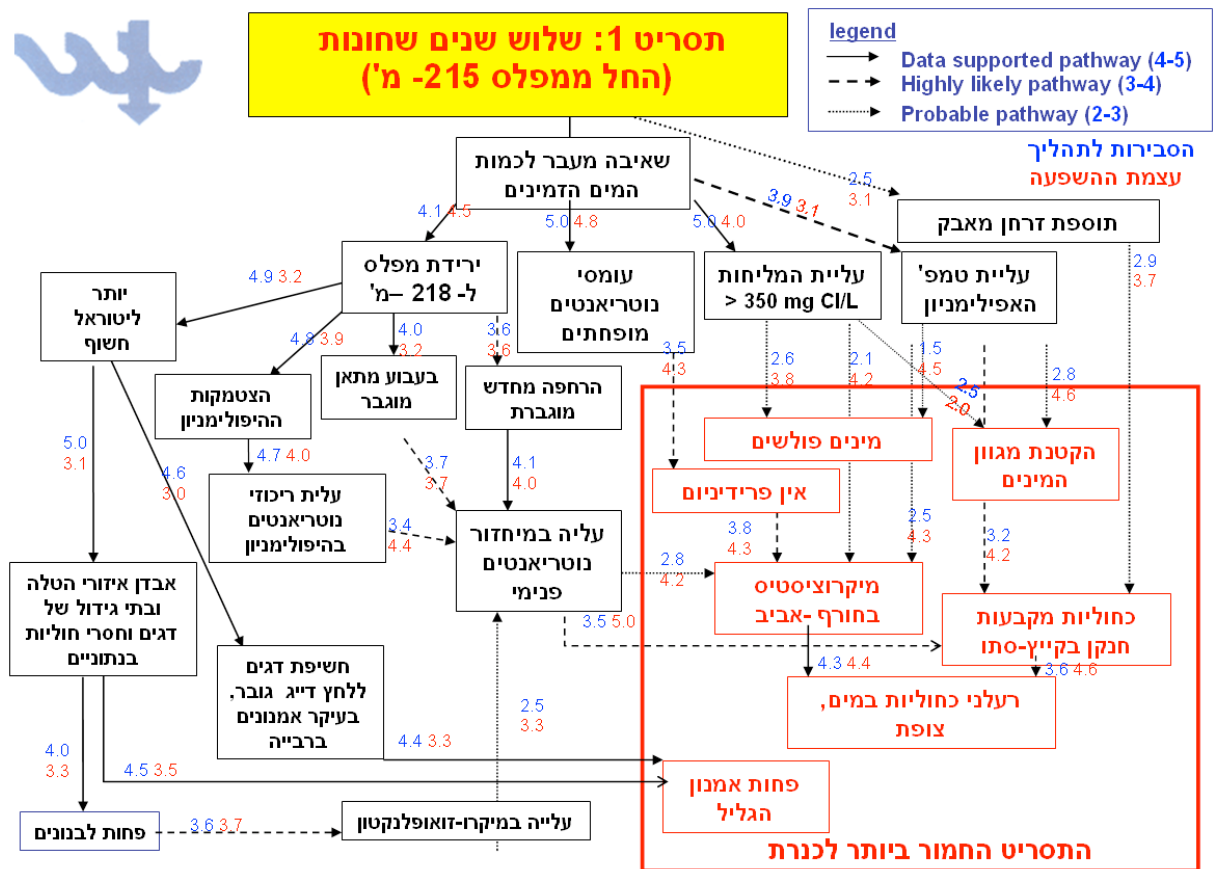
(המציינים קשרים בין תהליכים) שבתרשימי הזרימה על סקלה שנעה בין 1 ל-5 עבור 2 משתנים: א. הסבירות לקיום התהליך (1=סבירות נמוכה ביותר, 5=סבירות גבוהה ביותר); ב. אם התהליך אכן מתקיים – מידת השפעתו על המערכת האקולוגית (1= השפעה מזערית, 5 = השפעה גבוהה). ממוצעי הציונים הועלו על התרשים.

### תרחיש 1: בצורת ל-3 שנים נוספות

התרחיש העיקרי שבו התמקד הצוות הוא עצירת גשמים חריפה למשך שלשה חורפים רצופים, כאשר נקודת ההתחלה היא מפלס 215- מ'. יש לציין שעם תחילת הדיונים באמצע ינואר 2009 התחזית הייתה לחורף השחון ביותר בהיסטוריה של הכנרת ומים זמינים בכמות שלילית. בגלל ההשפעה של הבצורות המתמשכות על שפיעת מקורות הירדן ובעיקר נחל הדן, הדיונים נסבו סביב התרחיש שמצב קיצון זה ימשך 3 חורפים נוספים. מצב זה השתנה עקב גשמי פברואר החזקים במיוחד וכיום תרחיש קיצוני כזה נראה פחות סביר. עם זאת בחרנו להמשיך ולברר לעצמנו מה למיטב הבנתנו אנו צופים שיתרחש בתרחיש קיצוני זה.

מגוון התהליכים העלולים להתרחש כתוצאה ממצב כזה מסוכם באיור 1. תהליכי התגובה המתוארים בהמשך עשויים להתרחש במהירות או להתפרש על פני מספר שנים, תלוי בתהליך, מרכיב הזמן לא מוצג באיור זה. בהנחת שלוש שנים שחונות עם המשך שאיבה מעבר לכמות המים הזמינים, המפלס צפוי להמשיך ולרדת באופן משמעותי, לצורך הדיון הנחנו ירידה למפלס 218 – מ'. כתוצאה מכך (חיצים בצד השמאלי ביותר של התרשים באיור 1) רצועות ליטוראל רחבות נוספות יחשפו, ויאבדו אזורי הטלה של דגים ובתי גידול אבניים של יצורים בנתונים. הצלחת הרבייה של הלבנון תהיה נמוכה, ואמנונים ברבייה יהיו חשופים ללחץ דייג גבוה. ביחד, תהליכים אלו יובילו לפחיתה באוכלוסיות אמנון הגליל וחסרי חוליות של הליטוראל, תוצאה שהצוות כלל בין התופעות השליליות בתחום המסגרת האדומה. כל התהליכים הללו דורגו ברמת סבירות גבוהה (4-5) עם עוצמת השפעה בינונית (3.0 – 3.5).

המפלסים היורדים גורמים בסבירות גבוהה לצמצום נפח ההיפולימניון (שכבת המים התחתונה, החשוכה, קרה ונטולת חמצן ולכן יש בה מיעוט של פעילות ביולוגית) בקצב גבוה מזה של צמצום נפח האפילימניון (שכבת המים העליונה, המוארת והחמה יותר, בה מתרכזים רב החיים באגם) ולריכוזים עולים של מומסים בהיפולימניון. המפלסים היורדים גורמים גם (בסבירות קצת פחות גבוהה) לעלייה בבעבוע מתאן מהקרקעית ולהרחפה מוגברת של משקעים מקרקעית הכנרת, תהליך שגורם לתוספת נוטריאנטים שאחרת היו לא היו מגיעים לעמודת המים. משמעות הדבר: הגברת התרומה הפנימית יחסית לתרומה ממקורות חיצוניים לאגם. במקביל, צפוי שהזואופלנקטון יתרבה אם אוכלוסיית הלבנונים תפחת ויגרום למיחזור מוגבר של נוטריאנטים. הריכוזים הגבוהים בהיפולימניון, בעבוע המתאן וההרחפה תורמים להגברת מיחזור הנוטריאנטים הפנימי באגם במפלסים נמוכים. העשרה בנוטריאנטים ממקורות פנימיים באגם מפצה על ההפחתה הודאית בכניסות נוטריאנטים מאגן ההיקוות בשנים שחונות, ומונעת ירידה ביצרנות האגם. תוספת הנוטריאנטים ממקור פנימי תעודד (בסבירות בינונית אך בעוצמת השפעה מרבית) התפתחות אצות, ובמקרה הגרוע אצות כחוליות (ציאנובקטריה). אצות אלו עלולות לייצר רעלנים הפוגעים באיכות המים כמי גלם למי שתייה, ומייצרות צופת שפוגעת בתפקודו של האגם כאתר תיירות, קייט ונופש.



**איור 1.** מגוון התהליכים הצפויים בתרחיש של 3 שנים שחונות באופן קיצוני הבאות לאחר שהאגם נמצא כבר במפלס -215 מ' והמשך שאיבה מהאגם מעבר לכמות המים הזמינים. התיבות מראות התרחשויות צפויות באגם והחיצים את הקשרים הנסיבתיים ביניהן. הריבוע האדום מאגד בתוכו את התהליכים עם השפעות שליליות ישירות או עקיפות על איכות המים. המספרים הכחולים ליד כל חץ מציינים את הסבירות לקיום התהליך בתנאים הני"ל על סקלה של 1 (סבירות נמוכה מאד) עד 5 (סבירות גבוהה מאד). המספרים האדומים מציינים את השפעתו של התהליך על המערכת האקולוגית על סקלה של 1 (השפעה מזערית) עד 5 (השפעה גבוהה ביותר). הערכים נקבעו על ידי פנל של 10 מומחים. החיצים בקווים מלאים מצביעים על תהליכים בסבירות גבוהה, כאלו שקבלו ציון של 4 או יותר. החיצים המקווקווים קבלו ציון בין 3-4, החיצים המנוקדים קבלו ציון סבירות פחות מ-3.

הועלתה גם דעה שבשנות בצורת מתגברת אספקת זרחן שמקורו באבק. מומלץ לאסוף ולבחון נתונים שיאשרו טענה זו. זרחן ממקור של אבק עשוי לתרום להתפתחות בלתי רצויה של אצות בכלל ושל כחוליות בפרט.

תופעות נוספות שקשורות להפחתה בכניסות המים לאגם הן עלייה במליחות (בוודאות) ובטמפרטורת האפילימניון (בסבירות גבוהה). שתי תופעות אלו משמעותן שינוי בתנאי הסביבה באגם, וסביר שישפיעו על הרכב המינים של אוכלוסיות החי והצומח באגם, על ידי העלמות מינים רגישים ופלישת מינים בעלי יתרון בתנאים החדשים שיווצרו. הופעת והתבססות מינים פולשים מפחיתה את יכולתנו לחזות במדויק תרחישים

אקולוגיים באגם. אמנם מליחיות גבוהות נצפו בכנרת בשנות ה-60 לפני הפעלת המוביל המלוח, אך מחוסר נתונים לא ידועה השפעתן על אוכלוסיות החי והצומח שבאגם. תופעה נוספת אותה ניתן לקשר להפחתת הכניסות מאגן ההיקוות היא העדר פריחת פרידיניום בשנים שחונות. פריחה זו נחשבת לתופעה המרכזית שאפיינה את תקופת היציבות באגם (1969-1993) ומהווה סמן ליציבות זו.

### סיכום התרחיש ומשמעויותיו

לסיכום תרחיש זה, הבעיות האקולוגיות שאנו צופים עקב המשכת רצף שנות הבצורת והמשך ירידת המפלס הן של פגיעה באוכלוסיות הדגים ובאוכלוסיות חסרי החוליות בליטוראל, העלמות מינים רגישים ובמקביל פלישת מינים זרים והשתלטותם ו/או התעצמות מינים שוליים שכבר קיימים בכנרת - בכל רמות מארג המזון, העדר פרידיניום ופריחת אצות כחוליות, תהליכים שמתרחשים על פני מספר שנים. מכולן, החמורה ביותר מבחינת איכות המים היא פריחת כחוליות מייצרות רעלנים, כמו מיקרוציסטיס (בחורף-אביב) ואפניזומנון (בקיץ-סתיו).

פריחת אצות כחוליות מייצרות רעלנים היא בעיה שקיימת כבר עכשיו בכנרת. עד כה, מערך הטיפול במי הכנרת המופעל על ידי חברת מקורות פועל בהצלחה לסילוק מלא של הרעלנים ממי הכנרת הנשאבים בזמן פריחת של אצות כחוליות, ולא התעוררה בעיית איכות במים המסופקים לצרכנים. מאידך, לא ברור מהו ריכוז הרעלנים שמעבר לו סילוקם יהיה מוגבל.

לדעתנו, כושר הנשיאה של הכנרת לביומסת אצות כחוליות מוגבל על ידי רמת הזרחן, הנמוכה יחסית במי הכנרת. עם זאת, קיימת אפשרות להגברת עוצמת פריחת הכחוליות מעבר למה שצפינו עד כה באגם, במיוחד אם בשנה מסוימת טמפרטורת המים תהיה גבוהה יחסית ויגיע לאגם יותר זרחה ממקור חיצוני כמו אבק, כתוצאה מכשל מקומי במערכות הטיפול בקולחין באגן ההיקוות של הכנרת, או עקב התגברות גיוס הנוטריאנטים ממקורות פנימיים. כדי להעריך מה עלולה להיות העוצמה המקסימלית של כחוליות בכנרת חילצנו מנתוני הניטור (ממוצעים חודשיים מתחנה A בעומקים 0 – 10 מ' לתקופה 1970-2009) קשר לינארי מובהק בין ריכוזי הזרחן הכללי לבין ריכוזי הכלורופיל באפילימניון, המתבטא בנוסחא:

$$R^2 = 0.43, CHL = 0.98TP - 5.38$$

על בסיס קשר זה ובהנחה שכל הכלורופיל יהיה של אצות כחוליות, ניתן לחזות פריחה מרבית בריכוז ממוצע של כ- 70 מיקרוגרם כלורופיל לליטר כאשר ריכוז הזרחן הכללי מגיע לערך מרבי של 75 מיקרוגרם P לליטר, הממוצע החודשי הגבוה ביותר שנרשם במים העליונים של הכנרת. ריכוז כלורופיל מרבי זה הוא פי 3.5 מהריכוז (20 מיקרוגרם לליטר) שנמדד בשיא פריחת האפניזומנון ב-1994, הפריחה המאסיבית ביותר שנצפתה עד כה. ריכוז מרבי זה שווה ערך לכ-10 מיליגרם כחוליות (משקל יבש) לליטר או 10 מיקרוגרם רעלני כחוליות לליטר. זהו ערך גבוה בסדר גודל מהמומלץ, ופי 5 מהערכים שנמדדו במי הכנרת עד כה. בהנחת זמן דור של 3 ימים פריחה כזו יכולה להתפתח ממצב של חוטים בודדים למ"ל תוך כ-8 שבועות, ובמצב הגרוע להישאר בשיא עוצמתה מספר שבועות בודדים, עד לגמר הנוטריאנטים והשתנות תנאי הסביבה.

לפריחות מאסיביות של כחוליות רעילות השלכות גם לגבי השימוש בכנרת כאתר קייט ונופש: פריחת כחוליות והתרכזותן כצופת בחופי רחצה עלולה לגרום לחשיפת קייטנים, ילדים במיוחד, לרעלני כחוליות (בבליעת מים

או במגע בעור או בעיניים). נכון להיום, מיני הכחוליות שפורחות בקיץ כאשר חופי הרחצה פתוחים אינן מייצרות צופת, צופת רעילה נצפית בכנרת בעיקר חודשים פברואר עד אפריל. אך גם ללא היווצרות צופת, ציאנובקטריה רעילות בריכוזים שמעל לסף המומלץ של 1 מיקרוגרם לליטר מהוות סיכון לבריאות הציבור. יש להיערך (בשיתוף עם משרדי הממשלה) למצבים של פריחות של ציאנובקטריה רעילות בכנרת בעונת הרחצה ולהכין נוהל לסגירת חופים במקרים אלו.

### **כלים תפעוליים אפשריים למזעור הבעיה**

דנו בשתי דרכים עיקריות לצמצום עצמת הפריחות של אצות כחוליות: (1) הפחתת ריכוזי הזרחן במים (ישפיע על כלל הכחוליות, כאלו שמקבעות חנקן וכאלו שאינן מקבעות חנקן); (2) הגדלת ריכוזי החנקן במים (ישפיע על כחוליות מקבעות חנקן בלבד). שני כיוונים אלו עוסקים במניעת הבעיה עוד לפני שהחלה.

#### *(1) הקטנת ריכוזי הזרחן הזמין במים.*

פעולות רבות להפחתת עומסי הזרחן המגיעים לכנרת מאגן ההיקוות כבר נעשו. מקורות הזיהום הנקודתיים העיקריים באגן ההיקוות (ברכות דגים, רפתות, שפכים עירוניים ותעשייתיים ועוד) כבר זוהו וטופלו, המדיניות הסביבתית כבר גובשה ומיושמת. נותרו ללא טיפול מקורות זיהום לא נקודתיים. הדרך הנהוגה היום בעולם לסילוק מקורות זיהום לא נקודתיים היא על ידי אגנים ירוקים (wetlands) המוקמים במעלה ומסננים את המים המגיעים לאגם מאגן ההיקוות שלו. באגנים ירוקים אלו קצב זרימת המים מואט, החלקיקים שוקעים והנוטריאנטים נצרכים על ידי הביוטה. בעבר, אגם החולה שימש כאגן שיקוע ומסננת טבעית למי נהר הירדן, עם יבוש החולה המסננת הטבעית סולקה. יש מקום להקים צוות חשיבה שיבחן לעומק את האפשרות להקים אגן ירוק/שיקוע באזור שפך הירדן/משושים או בעמק החולה, תוך השוואת התועלות (הפחתת עומסי הנוטריאנטים) כנגד החסרונות (קרקעות, אבדן מים בהתאדות).

יש מקום גם לברר אם הזרחן המגיע לכנרת באבק מקורו מקומי או אזורי. במידה וחלק ניכר מהאבק מקומי, ייתכן ותמצא דרך למזער עומס זה. חשוב לברר גם באם עומסי הזרחן מאבק גדלים בשנים שחונות.

דרך נוספת להקטנת הזרחן אותה יש מקום לשקול, בשלב ראשון באופן תיאורטי על ידי הרצת מודל כנרת, היא של שאיבת מים מההיפולימיניון כדרך ליצוא זרחן זמין מהאגם, אם כי דרך זו נראתה לצוות כלא מעשית.

#### *(2) הגדלת ריכוזי החנקן במים בקיץ*

דרך זו מתייחסת לפריחות הקיץ, לאצות הכחוליות הפורחות בחורף אין יכולת קיבוע חנקן. הצוות דן בדרכים אפשריות להגדלת ריכוזי החנקן במים בתחילת הקיץ, כאשר מתחילה התפתחות של כחוליות מקבעות חנקן. קצב התפתחות כחוליות אלו מתגבר בכנרת כאשר ריכוזי החנקן האנאורגאני המומס באפילימיניון יורד מתחת לכ-20 מיקרוגרם לליטר (סוקניק, נשרי והדס, 2004), לרוב במאי או יוני. תוספת לאגם של כ-40-50 טון חנקה או אמון בתזמון נכון (כאשר ריכוזי החנקן האנאורגאני המומס מתקרב ל-20 מיקרוגרם לליטר) יכול להערכתנו לבטל את יתרון היחסי של האצות מקבעות חנקן ולמנוע או למזער את פריחותן.



לפני ביצוע פרויקט שיקום החולה, עמק החולה שימש מקור משמעותי של חנקה לכנרת. יש מקום לבדוק דרכים להשבת החנקה מעמק החולה לאגם בחודשים מאי – יוני, אם בחודשים אלו עמק החולה יכול לשמש מקור לניטראט. שקלנו גם אפשרות של ביטול החציץ שמונע זרימת מי תהום מעמק החולה לכנרת, אך פעולה זו תגרום להעמקת מפלס מי התהום בעמק החולה והשבת הבעיות האקולוגיות שנפתרו עם התקנת החציץ.

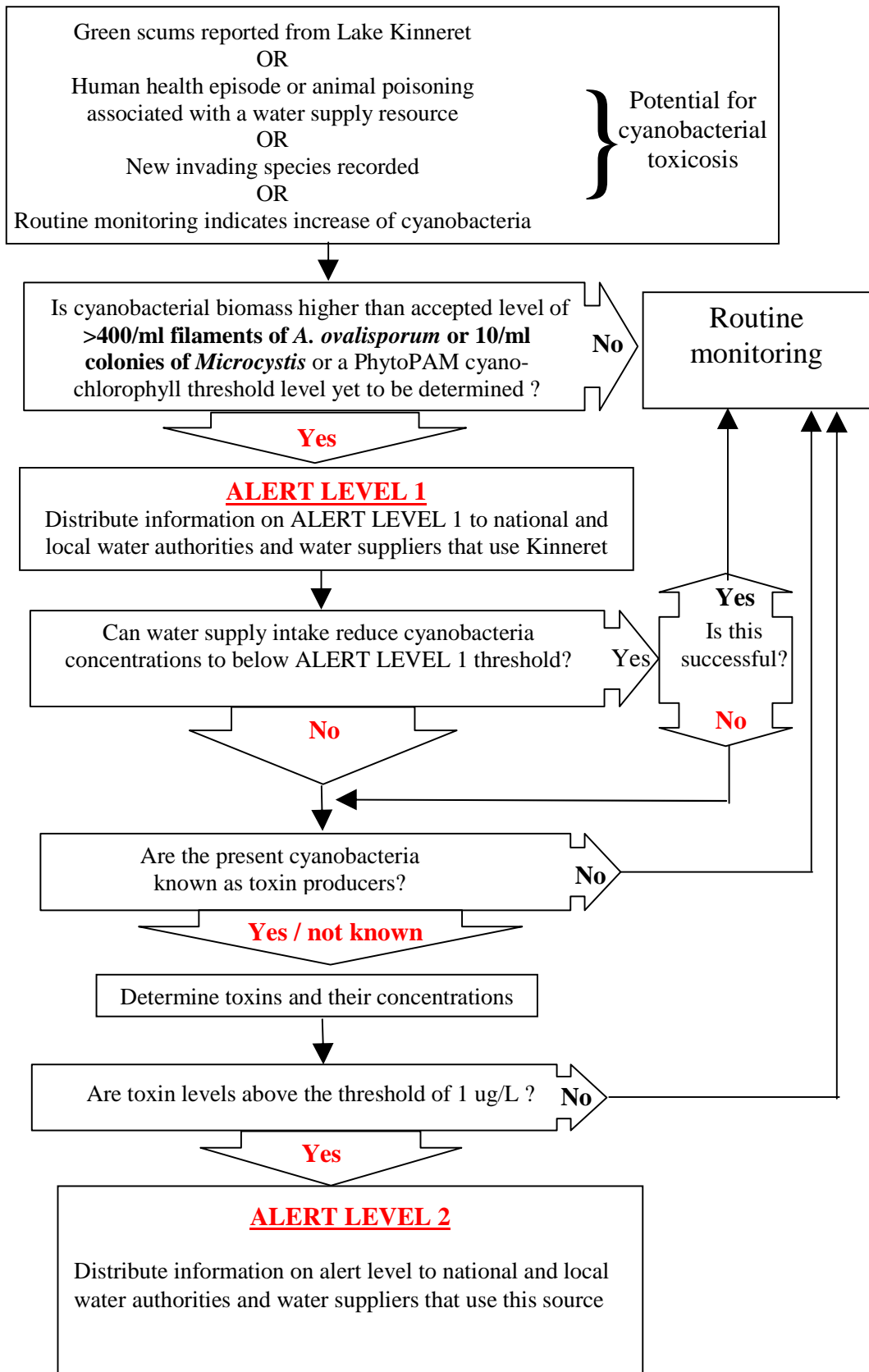
דרך חלופית של תוספת חנקן נטו, ללא תוספת זרחן, היא על ידי זריעת האגם בחנקן (כאמון, חנקה או שניהם) בתחילת הקיץ ובמהלכו כדי לבטל את יתרון האצות הכחוליות מקבעות החנקן ולעודד גידול אצות מקבוצות אחרות. הדעות היו חלוקות לגבי כלי זה. חלק סברו שאין להשתמש באמצעי קיצוני זה כיון שאין דרך לחזות מה יהיו התוצאות, אין באפשרותנו לבצע ניסויים בהיקף קטן שניתן יהיה אח"כ ליישם לכל אגם, ואין לבצע ניסויים בסדר גודל של האגם כולו. אחרים סברו שאפשר לנסות באופן חד-פעמי בקיץ אחד ולעקוב בצמוד אחרי ההשפעות שסביר שלא יתמשכו לשנים הבאות. גם כאן יש מקום להקים צוות חשיבה שיבחן לעומק את הייתכנות של דרך פעולה זו, יתרונותיה וחסרונותיה.

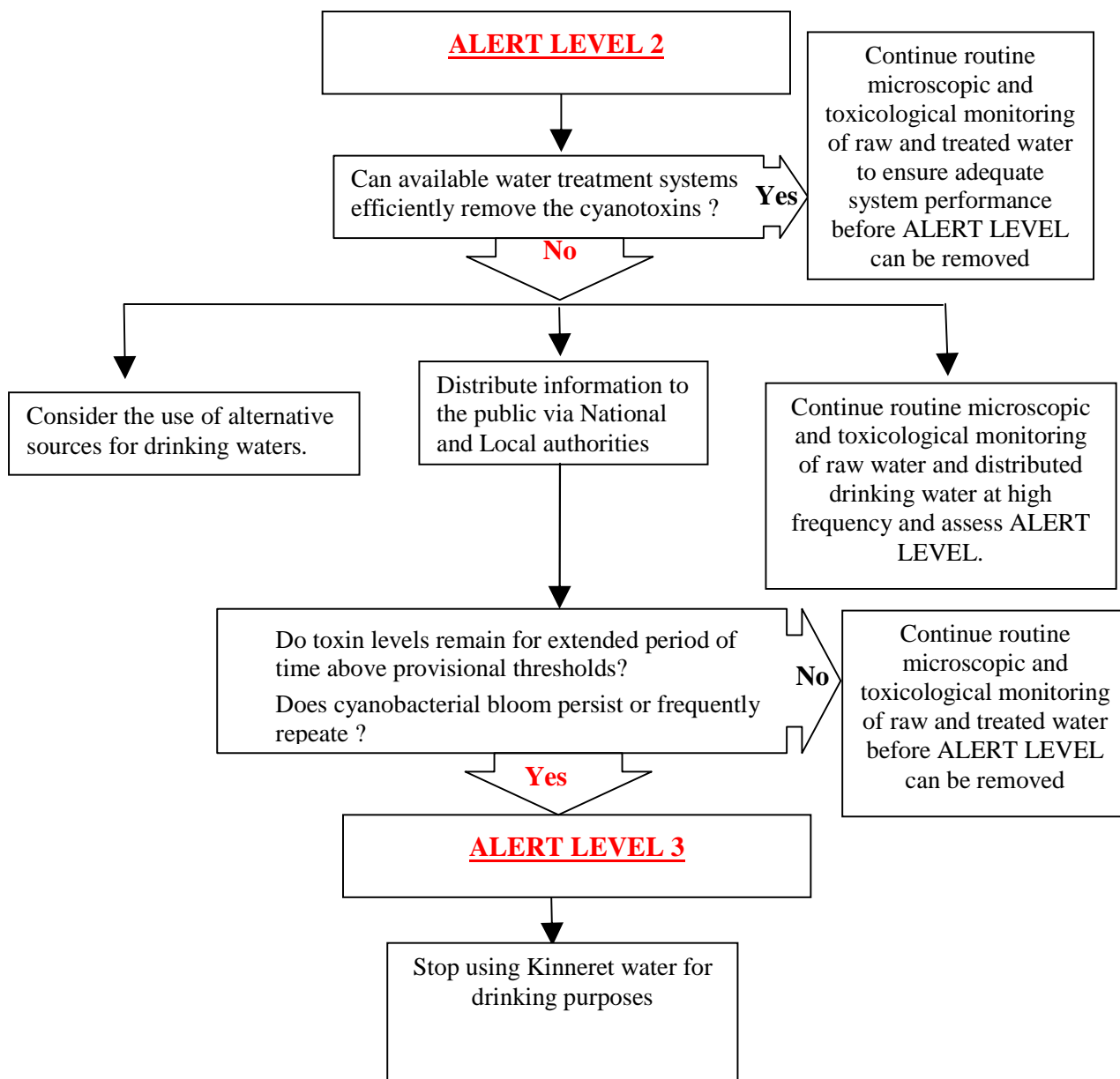
כלים נוספים בהם השתמשו באגמים אחרים להפחתת עוצמת פריחת של ציאנובקטריה כמו פיזור הרביציד, איטום הקרקעית, סילוק סדימנטים עתירי נוטריאנטים, אוורור ההיפולימניון, ביטול השכוב (דסטרטיפיקציה), אולטרה-סאונד, שיקוע ואינאקטיבציה של זרחן – לא ישימים לכנרת בגלל גודלה ו/או שימושה כמקור למי שתיה. מניפולציה של שרשרת המזון שנוסתה באגמים שונים בעולם, גם היא לא בהכרח תביא לתוצאות החזויות הרצויות ומסוכן לנסותה.

מסקנת הצוות לאחר סקירת האופציות המדווחות בספרות ועל סמך הכרתנו את הכנרת היא שאין בידנו כלי יעיל למניעת התפתחות פריחת של כחוליות מייצרות רעלנים לאחר שכבר התפתחו באגם תנאים מתאימים להתפתחות פריחת כאלו ומינים לא רצויים פלשו לאגם והתבססו בו. מה שכן ניתן לעשות הוא לנסות שלא לאפשר החמרת המצב הקיים וזאת על ידי הימנעות משאיבה מעבר לכמות המים הזמינים. יש לציין שלא בטוח שניתן יהיה להחזיר את הגלגל אחורה ולחזור למצב של מיעוט אצות כחוליות כמו בשנות ה-80 ותחילת שנות ה-90, אך לפחות תמנע החמרת המצב הנוכחי. המלצתנו לרשות המים היא להימנע מניוד מפלסי הכנרת מעבר לתחום שבין 209- ל- 213- מ'. בעתיד הלא רחוק התפלה מוגברת תאפשר שמירה על עקרון תפעול זה.

### **קביעת מדיניות ניטור ותפעול באירועים של פריחת של אצות כחוליות רעילות**

מערך הניטור בכנרת באחריות המעבדה לחקר הכנרת ערוך לזיהוי ולמעקב אחר התפתחות פריחת של אצות כחוליות רעילות. מתכונת הפעילות מתבססת על הניטור השגרתי, הגברת תדירות הניטור לפי הצורך, ושיתוף פעולה והעברת מידע בין מערך הניטור לבין הגורמים האחראיים לשאיבה ואספקת המים מהכנרת. הקשר בין מערך הניטור ומערכת אספקת מי שתיה מהכנרת מבוסס על *מודל רמות אler* (Alert Levels Model), שהוצע על ידי Bartram ועמיתיו (1999) והותאם לצורכי מערכת אספקת מים מהכנרת ע"י פורת ועמיתיו בדוח "אצות כחוליות ורעלניהן בכנרת ובמוביל הארצי" שפורסם ב 2001. איור 2 מציג גרסה מותאמת לכנרת של עץ החלטות המבוססת על עבודתם של פורת ועמיתיו.





**איור 2:** עץ החלטות המתאר מודל רמות ההתראה לניטור וניהול פריחות של אצות כחוליות בכנרת והשפעתן על מערכת אספקת המים מהאגם (לפי Bartram *et al.* 1999 ופורת ועמיתיו 2001).

המודל של פורת ועמיתיו נועד להדריך את הרשויות והגופים האחראים על אספקת מי השתייה בצעדי הניטור והניהול שיש לנקוט בשלבים שונים של היווצרות והתפתחות פריחות של אצות כחוליות בכנרת כמקור מי גלם למערכת אספקת מי שתייה. המודל הותאם למתכונת פעילות מערך הניטור ומוצג עם סימון של החלטות ניטור וניהול התואמות את מערך אספקת המים בכנרת באירועים של פריחת כחוליות. בשל תדירות הניטור במערך

הקיים הוסרה רמת ההתראה הראשונית במודל של פורת ועמיתיו, רמת הערנות - vigilance level, ומוצע מערך בעל שלש רמות התראה (איור 2), שהאחרונה והמחמירה היא של נוכחות נמשכת של ציאנובקטריה רעילות ורמה גבוהה של רעלנים ובעקבות כך המלצה להפסיק לאלתר שאיבה למערכות המספקות מי-שתייה. בשל ההשפעות האפשריות של ציאנובקטריה על בריאות הקייטנים בחופי הכנרת מוצע לשקול הכנת מערך ניטור והתראה לרוחצים במקביל למערך המוצג כאן עבור מי שתייה.

## **תרחיש 2: עליית מפלס של 6-7 מ' בחורף גשום במיוחד**

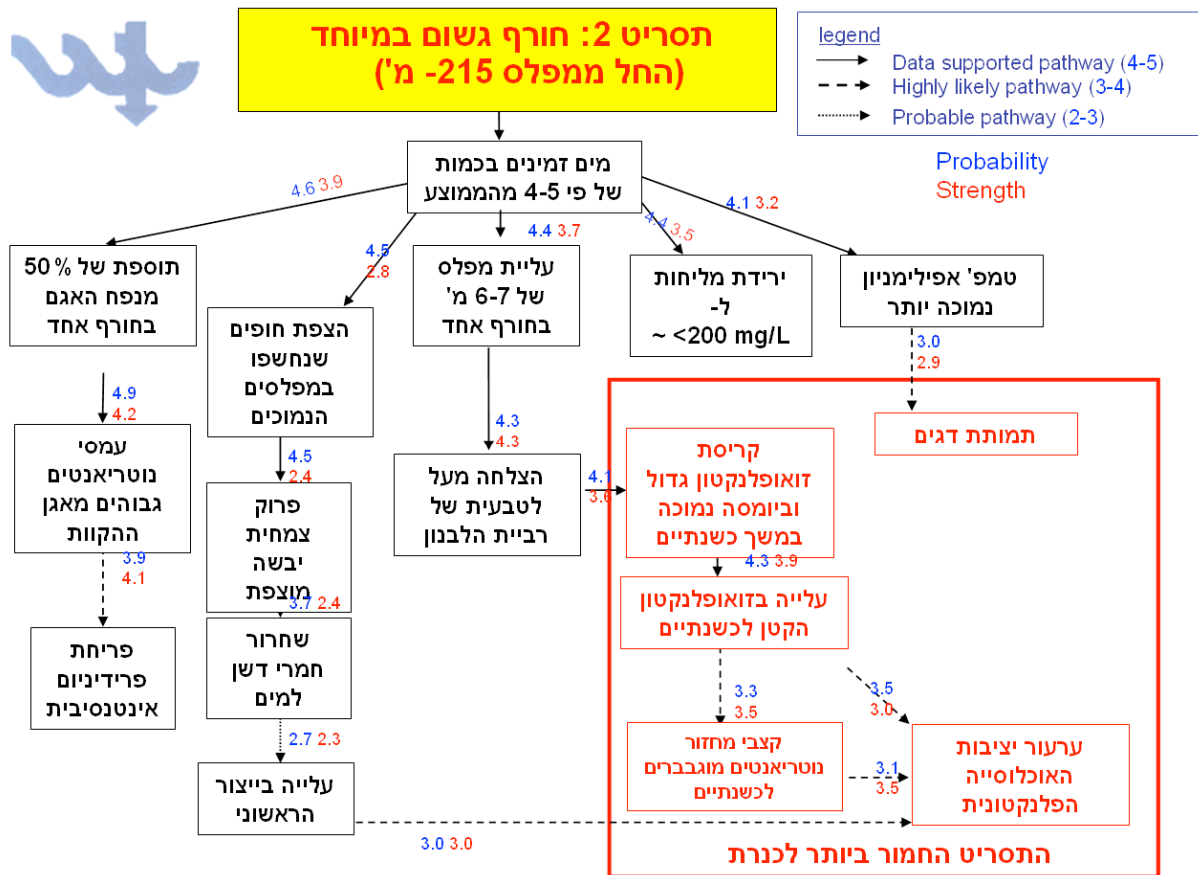
תרחיש שני שדורש חשיבה והערכות הוא התרחיש של עליית מפלס מהירה מאד בחורף אחד גשום במיוחד, כפי שכבר ארע בעבר בחורפים 1991/2 ו-2002/3, אך הפעם עליית המפלס תהיה קיצונית עוד יותר ממה שנצפה בעבר, ממפלס 215- או 216- מ' עד ל-208.80 מ' כלומר עליה של יותר מ-6 או 7 מ'. לפי העקום ההיפסומטרי לכנרת, נפח האגם במפלס 209- מ' הוא 4300 מליון קוב ובמפלס 216- מ' הוא כ-3000 מליון קוב. כלומר ההפרש הוא של 1300 מליון קוב מים. כניסת מים בכמות כזו נרשמה בעבר ולכן היא אפשרית. משמעותה שהמפלס יעלה מבלי לפתוח את סכר דגניה, ולמים שנמצאים באגם יתווספו מים קרים יותר ובעלי מליחות נמוכה יותר, בכמות הקרובה ל- 50% מהמים שבאגם. מיהול מאסיבי זה של האגם יתרחש במשך 4-5 חודשים.

איור 3 מציג את התהליכים הצפויים בתרחיש כזה. התחזית היא שמליחות הכנרת תרד בחורף כזה לפחות מ-200 מ"ג כלוריד לליטר. ירידת טמפרטורת המים עקב כניסת נפח משמעותי של מים קרים עלולה לגרום לתמותת דגים מאסיבית, כפי שקרה חורף 1991/92 בו טמפרטורת המים ירדה ל-12 מעלות. יחד עם שיטפונות החורף יגיעו לאגם עומסים גבוהים של חומרי דשן ומזהמים שהצטברו באגן ההיקוות בשנות היובש, ואם טמפרטורת המים לא תהיה נמוכה במיוחד (כמו שקרה בחורף 2002/03 בו טמפרטורת המים הייתה כ-14-15 מעלות) סביר שתתקבל פריחה מאסיבית של אצת הפרידיניום. עליית המפלס מהירה תגרום גם להצלחה חריגה של רביית הלבנון. מניסיון העבר הצלחת רבייה זו גוררת בעקבותיה שפל בביומסת הזואופלנקטון הגדול, וגידול בביומסת הזואופלנקטון הקטן למשך כשנתיים. משמעות הדבר, הגברת קצב מיחזור הנוטריאנטים על ידי זואופלנקטון, מה שעשוי לגרום לשינויים בהרכב המינים והפחתה ביציבות אוכלוסיות פלנקטון למיניהן.

השפעות נוספות של חורף עם כמות מים זמינים גבוהה פי 4-5 מהממוצע היא של הצפת החופים שנחשפו בשנות המפלס הנמוך על הצמחייה שבהם, התפרקות הצמחייה הנרקבת ושיחרור חמרי דשן למים שתורמים להגדלת הייצור הראשוני ולערעור היציבות של אוכלוסיות הפלנקטון.

**סיכום התרחיש וכלים תפעוליים:** הבעיות העיקריות הנראות לעין בתרחיש של עליית מפלס מהירה קיצונית הן של תמותת דגים, שפל בזואופלנקטון והפחתת היציבות של אוכלוסיות הפיטופלנקטון והזואופלנקטון. מניסיון העבר למדנו שבעיות תמותת הדגים ושפל הזואופלנקטון הפיכות, תוך מספר שנים צפויה התאוששות

של אוכלוסיות אלו. עם בעיית הפחתת יציבות אוכלוסיות הפיטופלנקטון והזואופלנקטון קשה להתמודד כי אין בידנו כלים לחזות במה תתבטא התערערות יציבות זו. בעוד שבעבר בוצע דילול סרדיניים בעקבות עליות המפלס המהירות של 1991/92 ו-2002/03, לא הוכח שאמצעי זה היה יעיל ויש לבחון מחדש באם יש לחזור עליו בעתיד.



**איור 3.** מגוון התהליכים שצפויים להתרחש בכנרת בתרחיש של עליית מפלס של 6-7 מ' בחורף אחד. הסבר כמו לאיור 1.

### המלצות

1. להגביל את השאיבה השנתית מהכנרת לכמות המים הזמינים ולצמצם את טווח ניווד המפלסים לתחום -213 ועד 208.80 מ'.
2. לפעול להשבת ניטראטים מעמק החולה או הגברת עומס הניטראט בדרכים אחרות בחודשי הקיץ (נדרשת בדיקה).
3. לפעול לצמצום עומסי הזרחן המגיעים לכנרת ע"י יישום wetland (אגן ירוק/אגן שיקוע), ו/או צמצום שטף האבק (נדרשת בדיקה).
4. הכנת והפעלת נוהל סגירת חופי רחצה למצבים של פריחות של ציאנובקטריה רעילות בכנרת

## מחקרים ועבודות נדרשים

1. הקמת צוות חשיבה שיבחן את ההיבטים השונים של הדרכים שהוצעו להקטנת עומסי הזרחן (אגני שיקוע) או הגדלת ריכוזי החנקן בקיץ (זריעת חנקן ישירות לכנרת) ויגיש דו"ח.
2. מחקר שמטרתו לברר האם האבק המגיע לכנרת מקורו מקומי או איזורי, האם זרחן זה מהווה מקור משמעותי לזרחן בכנרת והאם עומס הזרחן מאבק מתגבר בשנים שחונות (הוגשה תכנית עבודה חלקית). ניסויי פוטנציאל גידול אצות כנרת ובעיקר ציאנובקטריה בתוספת אבק.
3. שימוש במודל כנרת להרצת תרחישי קיצון ובמקביל שימוש בידע הפיסיקלי להערכה חצי כמותית של תרחישים אלה על איכות המים. למשל הערכת הריכוז (או הביומסה) המקסימלית של כחוליות ומשמעותה. בדיקת תוצאות תרחיש של שאיבת מים מההיפולימניון. (הוגשה תכנית עבודה)
4. סקר/עבודה שתבחן קריטריונים של איכות מים לקייטנים בחופי רחצה, במיוחד בכל הנוגע לפריחת אצות, ותיתן המלצות מדיניות (בשיתוף עם משרד הבריאות). גיבוש דוח שימליץ על מדיניות לכנרת. ניטור מוגבר במי החופים
5. סקר מקיף של תשתית הליטוראל במפלסים נמוכים ובניית תכנית ניטור שגרתי לאזור הליטוראל (הוגשה תכנית עבודה)
6. סקר חסרי החוליות בליטוראל במפלסים נמוכים תוך לימוד הביולוגיה של מינים פולשים (כמו סרטן כחול) ומינים שמהווים מטריד (כמו עלוקות) (הוגשה תכנית עבודה)
7. ביולוגיה של דגי כנרת במפלסים נמוכים לעומת מפלסים גבוהים
8. כימות העברת נוטריאנטים מההיפולימניון לאפילימניון על ידי תהליך ערבוב שוליים, כתהליך המגביר מיחזור פנימי במפלסים נמוכים (בביצוע).

ספרות מצוטטת:

טלטש ב, פורת ר, סוקניק א, הדס א, כרמלי ש. 2001 אצות כחוליות ורעלניהן בכינרת ובמוביל הארצי. דו"ח מסכם למחקר "השפעת תהליכי טיפול במים על סילוק רעלים של כחוליות".

סוקניק, א, נשרי, ע, הדס א. 2004. האם ניתן לחזות קיבוע חנקן ע"י אצות כחוליות (ציאנובקטריה) בכנרת? חדשות כנרת גליון 27.

Bartram, J., Burch M, Falconer I.R., Jones G. and Kuiper-Goodman, T. 1999. Situation assessment, planning and management. In: I. Chorus and J. Bartram, Editors, Toxic Cyanobacteria. in Water, E & FN Spon, London, pp. 179-220