



THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM
האוניברסיטה העברית בירושלים

בית הספר למדע יישומי ע"ש פרדי ונדין הרמן
היחידה למדעי הסביבה
המעבדה לטכנולוגיה של טיפול במים

דו"ח מדעי סופי

אצות וחלקיקים מרחפים במי הירקון:
אפיונס, גורלם ובקרתם

מוגש למשרד לאיכות הסביבה



ע"י
פרופ' אבנר עדין

בהשתתפות
פרופ' אינקה דור
סיון חייט
איריס זוהר
לובה רובינשטיין

אפריל 2003

מחקר בנושא

אצות וחלקיקים מרחפים במי הירקון אפיונם גורלם ובקרתם

פרופ אבנר עדין

ראש המעבדה לטכנולוגיה של טפול במים היחידה למדעי הסביבה
האוניברסיטה העברית בירושלים ירושלים
adin_vms.huji.ac.il

תקציר מנהלים

כללי

נחל הירקון הינו הנחל הגדול והחשוב ביותר מבין נחלי החוף בישראל. חשיבותו נובעת בין השאר מהעובדה שהוא עובר בריכוז האוכלוסייה הצפוף ביותר בישראל, גוש דן. משום סמיכות הנחל לאוכלוסייה, חשופה זו למי הנחל ומכאן נגזרת החשיבות הרבה של איכות המים. החומר המרחף במי הירקון מורכב מחלקיקים יציבים (קולואידיים) וחלקיקים ברי שיקוע. אופי החלקיקים נחלק לשתי קבוצות עיקריות: חלקיקים אורגניים הכוללים אצות ומיקרואורגניזמים נוספים וכן חומר אורגני שמקורו במי הקולחין המוזרמים לנחל וחלקיקים מנרליים שמקורם בחומר סחף.

המטרה הכללית של המחקר היתה הגדרת התכונות של האצות והחלקיקים המרחפים האחרים במי הירקון, לימוד מנגנוני ההסעה, ההתלכדות והשיקוע שלהם במי נחל וגיבוש תהליכי טפול לבקרת ריכוזם.

שלב א

(בהשתתפות פרופ' אינקה דור ואיריס זוהר)

שלב ראשון של המחקר התרכז באיסוף הנתונים המאפיינים איכות מי נחל ובאיפיון חלקיקים ואצות במי הירקון. הדיגום התבצע בחודשים נובמבר 98 עד יוני 99, סך של שמונה דיגומים נבחרו 4 תחנות דיגום: אבו רבאח (תחנה 2), תע"ש 3000 (תחנה 4.3), שבע תחנות (תחנה 8) ומורד איילון (תחנה 9). הסיבה לבחירת תחנות אלו, נעוצה בהיותן מייצגות, כל אחת, מקטע נחל אופייני. אבו רבאח מייצגת את קטע הנחל המתוק והנקי, תע"ש 3000 מייצגת קטע נחל מתוק לאחר זיהום משמעותי משפך נחל קנה, שבע תחנות מייצגת קטע נחל מתוק ומזוהם לאחר כניסת נחל שילה והתחנה מורד איילון, מייצגת נחל מזוהם ומלווה משום הקירבה לשפך הים וההשתפלות המתונה ביותר לכיוון הים, ולאחר כניסת נחל איילון. בכל דיגום נמדדו פרופילי טמפרטורה, חמצן מומס וחדירת אור. בדוגמאות שנלקחו מעמק 30–40 סמ' נבדקו עכירות, הגבה וריכוזי כלורופיל. למען איפיון החומר המרחף במי נחל נערכו בדיקות הבאות: ספירת החלקיקים והתפלגותם לפי גודלם, ספירת וזיהוי אצות, ונמדד פוטנציאל דחייה בין החלקיקים, פוטנציאל- , בחודש מאי נערכו בדיקות של מורפולוגיית חלקיקי מי הנחל. לשם שימוש בפרמטרים הנ"ל במודלים מתמטיים לתהליכי שיקוע והסעה, חושבו מקדמי הצורה של החלקיקים, התפלגותם לפי נפחם והקוטר הממוצע של החלקיקים.

באופן כללי ניתן לאמר, ששינויים בצפיפות החלקיקים לאורך הנחל היו דומים לאורך הזמן: צפיפות החלקיקים ירדה בתע"ש 3000 לעומת אבו רבאח, נשארה כמעט ללא שינוי בשבע תחנות ועלתה במורד איילון. שינויים גדולים בצפיפות החלקיקים נצפו לאורך הזמן באבו רבאח ובמורד איילון – 60-80%. בתע"ש 3000 ובשבע תחנות ההבדלים היו קטנים יותר – 20-30%. נצפה שינוי משמעותי בהתפלגות גודלי החלקיקים במהלך חודשי התצפית. עיקר המגמה הוא בשינוי הדומיננטיות של הפרקציה הקטנה (2-3 מיקרון ו- 3-5 מיקרון) לטובת הפרקציה 5-10 מיקרון. מידת הדמיון בהתנהגות ריכוזי המוצקים המרחפים לאורך הזמן בין התחנות השונות, אינה רבה. בדך כלל הריכוזים נעו בתחום 15–30 מג"ל, אך בכמה מיקרים הריכוזים הגיעו עד 50, 80 ו-120 מג"ל. שיעור החומר האורגני במוצקים המרחפים, עלה לאורך הנחל ברוב חודשי התצפית: מכ-30% באבו רבאח לכ-80% בתע"ש 3000 ובשבע תחנות ועד לכ-100% במורד איילון. השינויים בהתפלגות הנפחית של החלקיקים, היו רבים לאורך הנחל ולאורך

הזמן. מהתוצאות עולה שיש להתייחס להתפלגות נפחית בכל דיגום בנפרד. מהסתכלות על מקדם הצורה באופן כללי ביותר אפשר לומר שלפי שלושת מקדמי הצורה, רוב החלקיקים באבו רבאח ובמורד אילון קרובים בצורתם לכדוריים, בעוד שבשבע טחנות ובתע"ש 3000 (במיוחד) קיימות אוכלוסיות רבות של חלקיקים, מכדוריים ועד לארוכים וצרים מאוד. מהתוצאות של ספירת האצות וזיהויין של בחודשים נובמבר 1998 ועד יוני 1999, בתחנות השונות של נחל הירקון, בולטת העובדה, שהנחל מאוכלס בעיקר ע"י אצות הסבילות לזיהום. מבחינת מגוון הסוגים, ניתן לראות השתנות עונתית המסתמנת חזק ביותר בתחנת אבו רבאח: בחודש נובמבר המייצג את סוף הקיץ והסתיו נמצאו, 12 סוגים ומספרם הולך וקטן ל- 8 סוגים בחודש דצמבר, ול- 3 בלבד בחודש ינואר. מגמה זו מסתמנת גם בתחנות האחרות.

שלב ב

(בהשתתפות איריס זוהר)

בנחל הירקון אוכלוסיית חלקיקים בעלת אופי אורגני בד"כ, שעיקרם בפרקציות הגודל שקטנות מ- 10μ . עומס חלקיקים גבוה שנצפה בנחל קנה ($TSS=151mg/L$) פוחת במהרה ($40mg/L$ אחרי כ- 150 מ'). שיקוע החלקיקים הוא הסיבה להרחקתם החלקית ממי הנחל, במהלך זרימתו. שיקוע חלקיקים (חלקיקי סחף, אצות, חומר אורגני מרחף במי קולחין), הוא תהליך הכולל גורמים בעלי השפעות שונות וסותרות לעיתים. משקל סגולי וגודל הם גורמים המשפיעים ישירות על שיקוע החלקיקים. לעומת זאת, ריכוזי החלקיקים והחוזק היוני של מי הנחל, משפיעים באופן עקיף על ההרחקה, שכן להם יש השפעה על מנגנון הקואגולציה וההפתה, המביא ליצירת צברי חלקיקים, בעלי מהירות שיקוע גבוהה יותר.

עבודת המחקר בשלב זה הוקדשה למעקב אחר תהליכי שיקוע החלקיקים בנחל הירקון. הדבר בוצע במעבדה, בעמודה שקופה, בעלת רוחב של כ- 30 ס"מ ואורך בשימוש של כ- 170 ס"מ. בתחילה, נערכו ניסויי שיקוע על כל אחת מארבע התחנות המייצגות שנבחרו בשנת המחקר הקודמת. בהמשך נערך ניסוי מקיף יותר על מים מהתחנה שבע טחנות. מים מהנחל הובאו למעבדה ונערכו עליהם מדידות שונות כמו עכירות התחלתית, פוטנציאל, מוצקים מרחפים ועוד. עיקר המעקב אחר שיקוע החלקיקים במים היה באמצעות מונה חלקיקים, שמודד את סך החלקיקים ואת התפלגותם לפי פרקציות גודל. תנועת החומר האורגני נבחנה בקנה מידה קטן בהרבה (משורה בת שני ליטר) ובאמצעות קריאת בליעת אור UV ומדידות פחמן אורגני כללי (TOC).

ניסויי השיקוע בתחנות השונות הראו כולם תופעה של תנודות חריפות בריכוזי החלקיקים, במקום הרחקה רציפה שלהם מגוף המים. קצב השיקוע השתנה בין התחנות ואף בין העונות: לאחר 10 שעות שיקוע, נמצא כי קצב הרחקת החומר המרחף היה בין 10% בשבע טחנות בקיץ ל- 50% באבו רבאח בחורף. ניתוח נתוני השיקוע בניסוי שנערך בשבע טחנות במאי 2000, הביא למסקנה כי תהליכי קואגולציה והפתה מתרחשים באופן משמעותי בעמודת המים. הדבר מסתמך בעיקר על ניתוח התפלגות גודלי החלקיק לאורך הניסוי, השוואת תוצאות מונה החלקיקים לעכירות והמעקב אחר שיקוע החומר האורגני. גורמים אחרים העלולים להיות מעורבים בתהליכי ההפתה בנחל: האצות בנחל הירקון אינן מעודדות משמעותית שיקוע חלקיקים באמצעות פוליסאכרידים חוץ תאיים, משום העדר חלקיקים מינרליים ביחס מתאים לאצות ובריכוז מספק. מכאן, שלאצות רק השפעה שלילית על הרחקת חומר מרחף ממי הנחל בהיותן בעלות משקל סגולי נמוך. העכירות, המבטאת את ריכוז החלקיקים, היתה בינונית למדי (כ- 25 NTU) ולא הבטיחה התנגשויות רבות בין החלקיקים. פוטנציאל ה- מלמד על יציבות יחסית של החלקיקים (ממוצע של כ- -17 mV) וכך גם ריכוזים גבוהים של חומר אורגני מסיס במי הנחל. כך גם נמצא כי נוכחות חלקיקים מינרליים מגבירה את שיעור הרחקת החומר האורגני מהמים.

5 סיכום

5 תאור איכותי של מערכת הנחל

מקורות הירקון נובעים מים שפירים שנשאבים ברובם לשימוש מי שתייה, ומיעוטם זורם בערוץ. המים מכילים ריכוזי חלקיקים גבוהים. החלקיקים ממקור סחף ובהתאם מאופיינים בכדוריות טובה למדי (מאפיין חלקיקים שעברו בלייה תוך כדי הסחפותם בזרם) וכן הם בעיקר מינרליים, דבר שמכתיב מהירות שיקוע גבוהה ואכן נמצאה בוצה עמוקה בחלק הנקי של הנחל. בהמשך נכנס נחל קנה המורכב מקולחין

ברמה בינונית ומשפכים ביתיים ברמה נמוכה. התוצאה היא עומס אורגני כבד על הנחל וכן עומס חלקיקי כבד. הדבר מתבטא מכאן והלאה בתנאים כמו: ריכוזי חמצן מומס נמוכים בעיקר עם העומק, חדירות אור נמוכה, וקיום אוכלוסיות אצות מסוג ה"סבילות לזיהום". בסמיכות לכניסת נחל קנה מתרחש שיקוע של חלק גדול מהחומר המרחף, דבר הבא לידי ביטוי בבוצה עמוקה (עשרות ס"מ) ובריכוז חלקיקים נמוך יחסית כבר כמאה מטר לאחר כניסת נחל קנה. החלקיקים במורד כניסת נחל קנה מאופיינים במגוון צורות בין השאר צינוריות ואליפסואידליות, דבר המעיד על השפעתו החזקה של נחל קנה מאחר ומי קולחין מאופיינים במורפולוגייה זו. בהמשך הזרימה מהירה מעט יותר ומאפשרת שיקוע מועט, דבר המתבטא בבוצה רדודה.

סיבה אפשרית נוספת לשיקוע מועט היא עומס החומר האורגני המומס והחלקיקי המביא לייצוב החומר המרחף, דבר שמתבטא גם בקוטר חלקיק קטן. ובכל זאת לאורך מקטע זה מתקיימים תהליכי ספיחה בין החומר האורגני לבין חלקיקים מינרליים שבחלקם ככל הנראה הורחפו וחזרו לגוף המים, הדבר מתרחש בוודאי עוד יותר בסכר תע"ש המהווה הפסקה בזרימה ומאפשר זמן שהות לשיקוע מסוים. התוצאה של כך היא פינוי מסוים של החומר האורגני כך שבאזור שבע טחנות העומס האורגני נמוך יותר ותהליכי קואגולציה והפתתה מתרחשים. מאחר ושיעור התרחשות ההפתתה משתנה, כך גם מתקבלת באזור אוכלוסיית חלקיקים מגוונת גודל וצורה. אופי הזרימה איטי וקיים זמן שהייה לפני זרימה מעבר לסכר שבע טחנות. היות החומר האורגני בעיקרו, מתבטא במהירות שיקוע נמוכה ביותר. בהמשך מתקיים מפגש בין שלושה גופי מים: מי הירקון, מי נחל איילון (בזמנים שקיימת בו זרימה) ומי הים החודרים לכיוון היבשה בערוץ הנחל. התוצאה היא אומנם עלייה משמעותית בחוזק היוני (מתבטא בעלייה משמעותית בהולכה החשמלית) ונמדדה במקום בוצה עמוקה, אולם בחורף משום מיהול המים, החוזק היוני אינו רב כ"כ ככל הנראה ובהתאם לתהליכי הקואגולציה מצומצמים ונמצאה מהירות שיקוע נמוכה. ריכוזי חלקיקים גבוהים ביותר נמדדו בתחנה זו (בדומה לאבו רבאח) וגם הם מאופיינים בכדוריות טובה למדי. לא ברור מקורם אך יש לשער שחלקם הובלו ע"י נחל איילון, חלקם ממקור מי הים וחלקם הורחפו מהקרקעית אולי משום מערבוליות שנוצרה בעת מפגש הנחלים.

שלב ג

(בהשתתפות סיון כהן)

בשלב זה נבחנו תהליכי הטיפול להרחקת חלקיקים לשם שימוש חוזר פוטנציאלי במי הנחל המטופלים, כגון השקיית גינות ציבוריות, מזרקות נוי וכו'. מי נחל הירקון ששימשו לניסויים אלה, נדגמו בחודשים ינואר עד נובמבר 2001 מסכר "שבע טחנות" ונשאבו מעומק ממוצע של 30-40 ס"מ. אזור דיגום "שבע טחנות" ממקום במורד הנחל לפני מורד אילון ומכיל מים מזוהמים, שעדיין אינם מעורבבים עם מי הים, אך העומס האורגני בו נמוך יותר לעומת נקודות כניסת זיהום לנחל. במסגרת המחקר נבדקה יעילותם של שני סוגי טיפול פיסיקוכימיים שונים: סינון מגע ואולטרא פילטריציה (UF). מדדי היעילות שנבדקו הם: עכירות, פוטנציאל זיטא, בליעת UV-254 nm לבדיקת נוכחות חומר הומי, ספירת חלקיקים, PSD, TSS, ברזל ואלומיניום שאריתיים. המחקר כלל שלושה שלבים עיקריים: מבחני הפתתה (jar tests) מבחני סינון מגע עם ברזל כלוריד ומבחני סינון עם ממברנות UF בעלות MWC0 של 4-50 kDa.

מבחני ההפתתה נועדו תחילה לבחינת יעילותם של אלום וברזל כלוריד. ברזל כלוריד נמצא יעיל בתחום הגבות רחב יותר, 4.5-8.5, בהשוואה לזה של אלום, 5.5-8.5. חשיבות העבודה עם רמת הגבה נמוכה התגלתה בהרחקת חומר אורגני מומס ממי הירקון, כפי שנמדד בבליעת UV-254 nm, דבר שהיווה יתרון לשימוש בברזל כלוריד. כמו כן, מינון ברזל כלוריד שנדרש להרחקת עכירות יעילה היה, לרוב, נמוך יותר מאלום. לאור ממצאים אלה, הוחלט לשלב סינון מגע של מי הירקון עם ברזל כלוריד, כאשר מבחני הפתתה שקדמו לכל מבחן סינון סייעו בקביעת המינון הדרוש, מאחר ואופי מי הירקון נתון לשינויים תכופים.

מבחני סינון מגע התבצעו דרך שתי עמודות בעלות מצע רדוד בעומק 20 ס"מ, בהן נבדקה במקביל יעילותם של שני מצעי חול בעלי גדלי גרגר שונים: מצע "עדין" שקוטרו הממוצע 0.8 מ"מ, ומצע "גס" בעל קוטר של 1.2 מ"מ. המצע העדין הראה יעילויות הרחקה טובות יותר, בעוד שהמצע הגס הראה התפתחות הפסדי עומד מתונה יותר. נבחנו מהירויות גישה בתחום 5-15 מ"שעה, כאשר מהירות הביניים

של 10 מ"שעה נמצאה כיעילה מכולן, והביאה להרחקת עכירות של כ- 90% עם 5 מג"ל בלבד של ברזל כלוריד. הורדת ההגבה של מי הירקון ל- 5.5-5 שיפרה את התהליך ועכירות התסנין הגיעה לערך מינימלי של 1.1 יע"ן.

מבחינה-UF התבצעו במערכת DE מעבדתית שכללה אלמנט ערבול בתא הסינון, בתחתיתו הוצבו דפי ממברנות בקוטר 5 ס"מ. ניסויים אלה, אשר כללו את בחינת שילובו של טיפול קדם ע"י קואגולציה עם ברזל כלוריד, הביאו להרחקת עכירות יעילה, לרוב לערכים הנמוכים מ- 0.15 יע"ן, ללא תלות במינון ובקוטר הממברנה, וגם ללא טיפול קדם. בניסויי UF לאחר טיפול קדם, בו שונתה ההגבה ל- 5, התרחשה הרחקת חומר הומי טובה יותר. בניסויים שנערכו ללא טיפול קדם או לאחר קואגולציה מקדימה ללא שינוי רמת ההגבה, נצפתה השפעה דומיננטית של קוטר הממברנה (MWCO). ככל שגודל הנקבים קטן יותר, כך עלתה יעילות ההרחקה, כך ש-UF דרך ממברנה בעלת MWCO של 4 kDa הביאה להרחקת חומר הומי בשיעור של 60-65% לעומת הרחקה של 30-35% עם ממברנת 50 kDa. יחד עם זאת, השטף דרך ממברנת 4 kDa הוא הנמוך ביותר.

5 המלצות מעשיות

5 שפור איכות המים בנחל עצמו

כדי לשפר את איכות מי הנחל בכלל וכן להאיץ את תהליכי ההפתחה המסייעים בטיהורו העצמי, יש להפחית את העומס האורגני לפני כניסתו. הדבר יכול להעשות ע"י "אגנים ירוקים" בתוואי נחל קנה, לפני השפכו לירקון, או לחילופין בסינון איטי באותו מקום. בקטעי נחל בעלי זרימה איטית מאד או אף מים "עומדים", ניתן לטפל ע"י סחרור דרך תעלות מרבג ("דיאליזת נחל"). אמצעים אלו יביאו להרחקת חלקיקים (אורגניים ומינרליים) מהמים והפחתת הנוטריינטים המסייעים בפריחת אצות.

5 טפול במי הנחל למטרות השבה

שימוש חוזר במי הנחל יכול להתבצע באמצעות טיפול (בהתאם ליעד השימוש) במים במורד הנחל, לפני העירוב עם מי הים. ממבחינה הסינון שתוארו לעיל עולה כי ניתן לטפל במי הירקון במספר דרכים:

- א. סינון מגע עם קוטר מצע 0.8 מ"מ, ללא שינוי הגבה של מי הירקון עם ברזל כלוריד או עם הורדת ההגבה ל- 5.5.
- ב. סינון מגע עם קוטר מצע 1.2 מ"מ, עם מינון ברזל כלוריד כפול מזה ששימש למצע העדין.
- ג. אולטרא פילטריציה עם ממברנות 20, 50 kDa, כולל קואגולציה מוקדמת באמצעות ברזל כלוריד והורדת הגבה ל- 5, למניעת fouling מוגבר. ניתן לוותר על שלב השיקוע בטיפול הקדם.
- ד. אולטרא פילטריציה עם ממברנת 4 kDa, ללא טיפול קדם וללא הורדת רמת ההגבה של מי הירקון. אולם הספיקות דרך מערכת כזו הינן נמוכות.

יש לזכור, כי טיפול הקדם נמצא יעיל כאשר הוא לווה בהורדת רמת ההגבה של מי הירקון ל- 5, וכי קואגולציה עם 30 מג"ל, גורמת לירידה נוספת ברמת ההגבה בתום מבחן ההפתחה ל- 4.23, בעוד שבהגבה הגבוהה הירידה היא עד 7.6 בלבד, דבר עליו יש לתת את הדעת כשמדובר על מי הזנה ל-UF.

ניתן להשביח את מי הירקון עד לרמת העכירות הנדרשת בהנחיות משרד הבריאות להשקייה עירונית ואף בהנחיות המחמירות של ה-EPA. רמות העכירות הנמוכות שהתקבלו במבחינה סינון המגע מכשירות את התסנין לחיטוי יעיל, ואילו באמצעות UF ניתן להרחיק חיידקים וטפילי מעיים, שקוטרם עולה על 0.1 מיקרון, ללא צורך בחיטוי. מוצע להקים מתקן חלוץ שבו תערכנה גם בדיקות מיקרוביאליות. במתקן כזה ניתן גם לנסות שיטות חדשניות חסרות כימיקלים כגון אלקטרו-פלוקולציה כטיפול קדם ו-UV למטרות חיטוי סופי. הערכה כלכלית מדוייקת הייתה מחוץ למטרות עבודה זאת, אך ניתן להצביע על כך שבעוד שסינון חול זול יותר מסינון אולטראפילטריציה, באחרון טמון יתרון איכותי-תברואי ניכר לגבי שימושים עירוניים כגון פרק גני יהושע ורצוי לבדקו במתקן חלוץ בשטח.

אזור "שבע טחנות" יכול לשמש אתר מתאים לטיפול במי הירקון, מאחר והוא מצוי במורד הנחל, לפני חדירת מי הים, כך שהקמת מתקן טיפול באזור זה תהווה הפרעה מינימלית להתפתחות המערכת האקולוגית בנחל. כמו כן, לאורך הנחל מתקיימים תהליכי טיהור עצמי הבאים לידי ביטוי בשיפור מדורג באיכות המים במורד הנחל עד שבע טחנות, דבר המקל על הטיפול בהם. מה גם שאופי הזרימה באזור זה

בתקופה היבשה הוא איטי וקיים זמן שהייה לפני זרימה מעבר לסכר שבע טחנות, כך שקטע זה יכול לשמש כמאגר וויסות לפני הפניית מי הנחל לטיפול.