



ג'ורא ריטבו - החוג למדעי הסביבה, המכללה האקדמית תל חי ומיגל
 rytwo@telhai.ac.il
הילל מלכה - המחלקה לבקר, שה"מ משרד החקלאות
 hilmal@shaham.moag.gov.il

פיילוט לשפכי רפתות

המבוסס על טיפול באמצעות ננומרוכבים

ליאור אבידן, תום קניג, רועי לביא, מנשה לוי - המעבדה לכימיה פיזיקלית סביבתית, מיגל - מכון למחקר מדעי בגליל, קריית שמונה

שפכים רבים בתעשיות הקשורות לחקלאות, וביניהם שפכי רפתות, לרוב אינם מטופלים כראוי ועלולים ליצור מפגע סביבתי חמור. בדיקה שכללה 12 רפתות בארץ, מצאה שהן מייצרות 40-380 ליטר מים מזוהמים ליום לפרה, המכילים עומס אורגני גדול פי 20-50 משפכים ביתיים. הווה אומר שרפת ממוצעת של 300 פרות מייצרת 50-60 מ"ק ליממה של מים מזוהמים ביותר, אשר מתקני טיפול שפכים מתקשים לטפל בהם

פוחח על ידי המעבדה לכימיה פיזיקלית סביבתית במיגל (מכון למחקר מדעי בגליל), אשר הנו מכון מחקר יישומי, הפועל בתחומי הביוטכנולוגיה, התזונה, מדעי הסביבה, מדעי המחשב והחקלאות, ממוקם בקריית שמונה, ופועל בשיתוף פעולה הדוק עם המכללה האקדמית תל חי. במיגל, שהוקם בשנת 1979, מועסקים כ-60 מדענים בעלי תואר דוקטור, מתוך צוות של למעלה מ-150 חוקרים, מהנדסים, ותלמידים לתארים מתקדמים, שלומדים במסגרת מסלולי התואר השני בתל חי או באוניברסיטאות אחרות בארץ (הטכניון, האוניברסיטה עברית, אוניברסיטת בר אילן, אוניברסיטת תל אביב ועוד).

פיתוח הטכנולוגיה החל ב-2011, והיא מיושמת כבר שנתיים בהצלחה במתקן פיילוט ממומן על ידי הקהילה האירופית לטיפול בשפכי בתי בד ויקבים (www.misstow.eu - Misstow).

הטיפולים המקובלים להורדת מוצקים מרחפים (TSS) מורכבים משני שלבים: **קואולציה** - שבו מוסף חומר שמנטרל את מטען החלקיקים, ו**פלוקולציה** - שבו מוסף חומר נוסף המלכד חלקיקים ביחד לחלקיק גדול. לאחר שני השלבים הללו, מתבצע עוד תהליך הפרדה בסינון, שיקוע, הצפה או התקן דומה. מגרעות טיפולים אלו:

1. אין התייחסות לנושא הצפיפות של מזהמים אורגניים, הדומה מאוד לזו של מים.
2. יש צורך בשני מכלים שונים.
3. הזמן שלוקח התהליך הוא יחסית ארוך (1-6 שעות), מה שמביא לכך שמכלי טיפול ההמשך (שיקוע, למשל) חייבים להיות בנפח גדול מאוד, לאגור את השפכים שמצטברים.

ננומרוכבים

הטיפול בננומרוכבים מבצע את שני השלבים בעת ובעונה אחת. תרחיף

מה הבעיה בשפכי הרפת?

המדדים שמשמשים לבחון את מידת זיהום המים בחומר אורגני הם "צריכת חמצן ביוכימית" (צח"ב-BOD) ו"צריכת חמצן כימית" (צח"כ-COD). השני, לרוב מהווה מדד מהיר ואמין יותר לבדיקה. פרמטר נוסף המהווה גורם מגביל לפינוי השפכים הוא, סך המוצקים המרחפים (TSS). אף שמייחסים חשיבות מאוד גדולה לצח"כ, הורדת כמות המוצקים המרחפים, חשובה ואף הכרחית, לצורך המשך טיפול יעיל במתקן טיפול השפכים. כללי תאגידי המים לשפכי תעשייה קובעים ש-COD > 800 mg/L ו/או TSS > 400 mg/L נחשב כבר ל"שפכים חורגים". עלייה מעל 2,000 mg/L ב-COD, או מעל 1,000 mg/L ב-TSS, מהווה כבר למעשה "שפכים אסורים". באותו סקר של שפכי רפת שהוזכר קודם, נמצאו ערכים של COD > 10,000 mg/L, TSS > 4,000 mg/L.

המתקן הוקם במימון קרן המחקר של מועצת החלב וקרן המחקר של שה"מ (משרד החקלאות), ובסיועם של קולחי גליל עליון וקיבוץ כפר בלום

פתרונות אפשריים לבעיה

לנוכח רגולציה גוברת בתחום שפכי הרפתות בארץ, נעשים בשנים האחרונות מאמצים רבים לאיתור פתרון טכנו-כלכלי מתאים. בין הטכנולוגיות הנבחנות, קיימות שיטות הפרדה פיזיקו-כימיות שונות, לעתים, בשילוב עם טיפול ביולוגי. טיפול בשפכים באמצעות ננומרוכבים לשם הורדת מוצקים מרחפים,

תוך כדי המחקר פותחה מתודה שמאפשרת קביעה אמינה ומדויקת של סוג המשקע (קואגולוקולנט) הדרוש והמינון שלו, המוגנת אף בפטנט. איור 2. מראה הוספת 2.5 מ"ל לליטר של תרחיף המכיל 5% ננומרוכבים. המספרים באיור מתארים את היחס בין הפולימר למינרל. ניתן לראות שנומרוכבים עם 240 מ"ג פולימר לגרם חרסית נותן, במינון הנבדק, תוצאת הצללה מצוינת, בזמן שהורדה או עלייה ביחס פולימר/חרסית פוגמת בתוצאה. לשם קביעת הסוג והמנה האופטימליים, מתבצעת מדידת מטען של תרחיף השפכים באמצעות מכשיר מסוג *Streaming current detector*. התאמת הטיפול והמינון מתבצעת על סמך שקלול של מנת הקואגולוקולנט הדרושה לנטרל את המטען הנמדד.

השימוש בננומרוכבים מאפשר לקבל ירידה של שני סדרי גודל בעכירות וב-TSS, בטיפול אחד, תוך 1-2 דקות. אך יתרון נוסף בטיפול הוא יצירת חלקיקים ("פלוקים") מספיק גדולים ויציבים, כך שניתן להפרידם באמצעות סינון יחסית גס (למשל 0.212 מ"מ). בבדיקות שנערכו מול קואגולנטים ופולקולנטים מסחריים בטיפול בשפכי רפת, התברר שאמנם כל הטיפולים מצליחים להצליח את השפכים לפני הפרדה, אם ממתנינים מספר שעות (אף שהננומרוכבים עושים זאת מיד!). אך בניסיון לסנן את השפכים, הפלוקים בטיפולים המסחריים המקובלים מתרסקים ועוברים את המסנן, והטיפול נכשל.

כפי שניתן לראות בטבלה המצורפת, למעשה רק הטיפול באמצעות ננומרוכבים מצליח להניב תוצאות מעולות לאחר סינון, של הורדת עכירות ו-TSS בצורה כמעט מושלמת. בדוגמה הספציפית המוצגת בטבלה, אף הורדת ה-COD כמעט מוחלטת. טבלה 1. מראה שאף הערכת העלות של הטיפול דומה לטיפולים אחרים, אך עם הבדל עצום ביעילות.

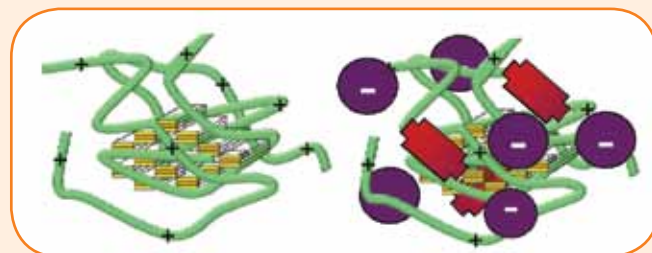
ראוי להדגיש, שמידת הצלחה בהורדת ה-COD תלויה מאוד בכמות החומר האורגני החלקיקי לעומת המומס: בשפכי רפתות הורדה זו נעה בין 95%-70% בשפכי יקבים (לצורך השוואה), שבהם כמות החומר האורגני המומס גדולה יותר, הורדת ה-COD היא רק 10%-30% אף שהצללה מצוינת.

טבלה 1. שפכי רפת מטופלים בננומרוכבים (NC16Z) לעומת טיפולים מסחריים כמו אלום (9) או קואגולנט מסחרי (FL45). ניתן לראות עכירות לפני סינון ועכירות, TSS, ו-COD לאחר סינון ברשת של 0.212 מ"מ. השורה השנייה מראה תוצאות סינון ללא הוספת חומרים

	לאחר סינון בנפה 0.212 מ"מ לפני סינון				
	אמדן מחיר €/מ ³	עכירות (NTU)	עכירות (NTU)	TSS (mg/l)	COD (mg/l)
גולמי לא מסונן		2200		4480	5463
גולמי מסונן			1510	2900	1520
NC16Z 2.5%, 16 ml/L	1.36	11	10	73	60
Alum 40%, 2 ml/L	1.00	19	1480	3630	1790
FL45- PD 40%, 0.6 ml/L	1.73	44	807	3230	1160

ננומרוכבים מוסף בכמויות ובעלויות דומות לאלו שבטיפולים הרגילים, אך ההוספה מתרחשת במכל יחיד (במקום בשניים) ופרק זמן של שניות (במקום דקות או שעות). התוצאות המתקבלות הן סילוק, כמעט מוחלט, של מוצקים מרחפים במים ממקורות שונים, וכך מתאפשר המשך טיפול יעיל יותר. במהלך פיתוח פתרון זה בוצעו בדיקות במגוון סוגי שפכים קשים (בתי בד, יקבים, רפתות, מחלבות, הצללת מים עם תכולת אצות גבוהה, ועוד). בכל המחקרים הללו הוכחה, הלכה למעשה, היכולת להוריד את העכירות ואת הכמות המוצקים המרחפים בשני סדרי גודל ואף יותר. במקביל הוגשו שבעה פטנטים בנושא.

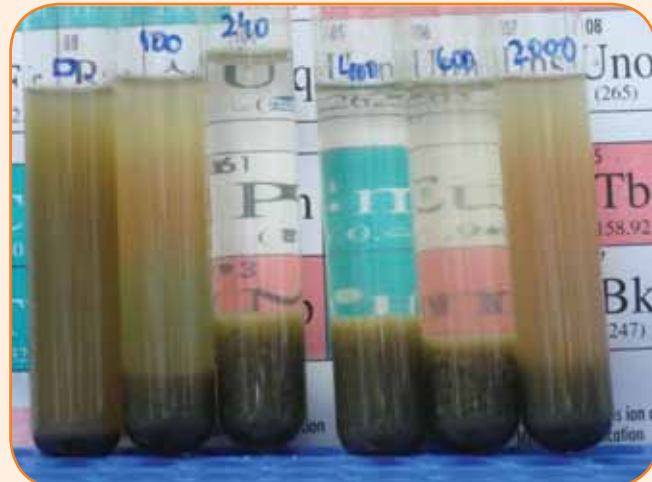
איור 1: איור של ננומרוכב על בסיס מינרל חרסית ושרשראות פולימרים טעונים. האיור משמאל מראה את החלקיק עצמו, והאיור מימין ממחיש ננומרוכב שקשר אליו חלקיקים מרחפים מהשפכים



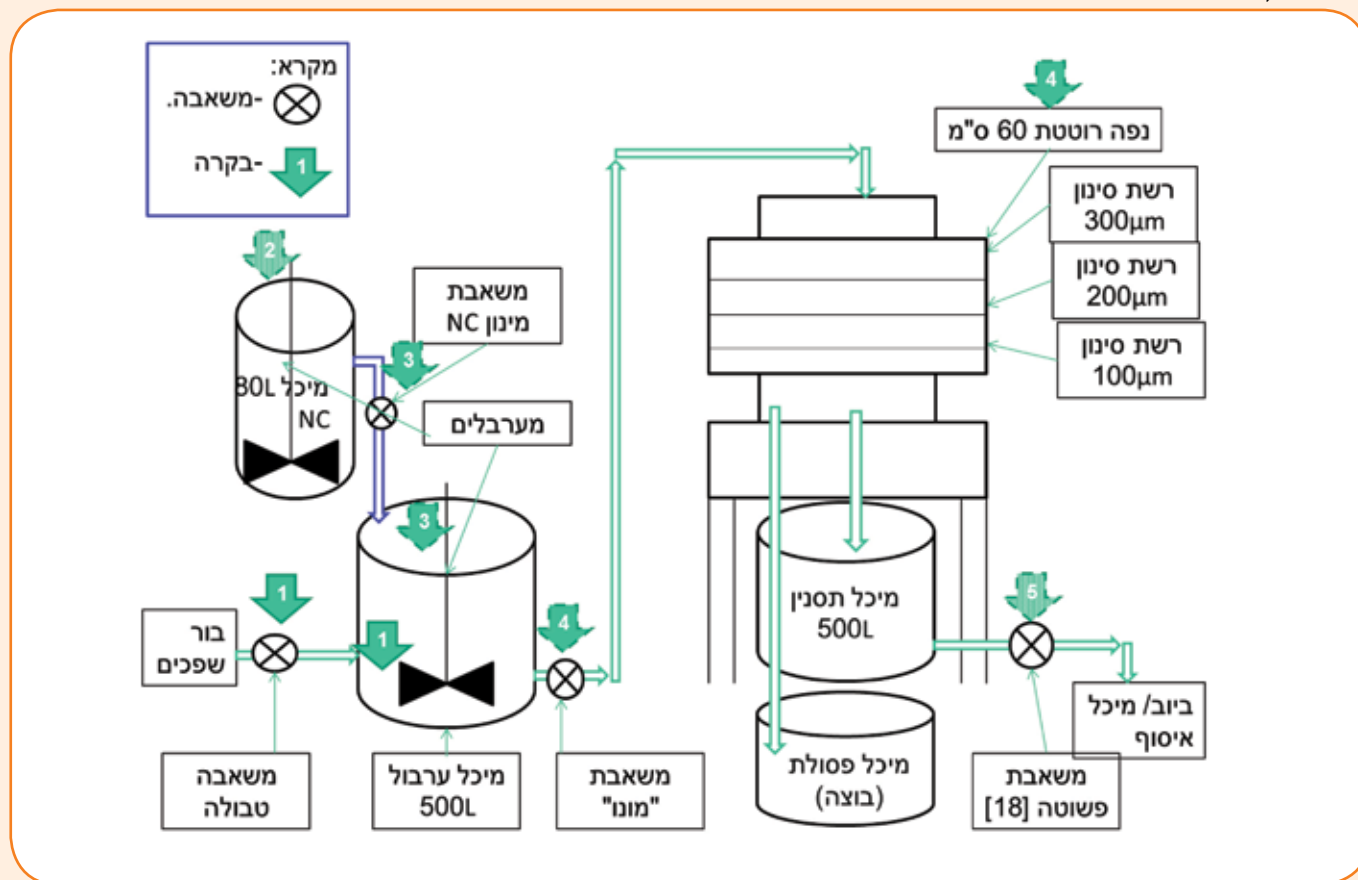
עקרון הפעולה מתבסס על השימוש בננומרוכבים (nanocomposites), המהווים שילוב של מינרלי חרסית עם פולימרים (איור 1). השימוש בתרחיף של חלקיקים אלו מאפשר להתגבר על שלוש תופעות שונות במקביל:

- המטענים של זנבות הפולימר נקשרים למטענים שבחלקיקים המרחפים (קולואידיים) שבשפכים ומנטרלים אותם, וכך מתבטלים כוחות הדחייה בין קולואידיים שנמצאים בתרחיף בשפכים
- הרבה קולואידיים מתחברים במקביל לחלקיק "ננומרוכב" אחד, עם "זנבות" של פולימרים. כך נוצר חלקיק גדול המצליח להתגבר על כוחות החיכוך ההידרודינמי המפריעים לו לנוע בתרחיף (איור 1, מימין).
- החלקיק המינרלי הצפוף יותר מהווה "עוגן הפרדה" בעל צפיפות גבוהה פי 3 מצפיפותם של חלקיקים קולואידיים אורגניים.

איור 2. הדגמה של טיפול בשפכי רפת. ניתן לראות את הטיפול האופטימלי באמצעות ננומרוכבים המבוססים על 240 מ"ג פולימר לגרם חרסית (הסבר נוסף בטקסט)



איור 3: תרשים המתקן: משמאל (למטה) מכל הטיפול עם המערבל. מעליו מכל תרחיף הננומרוכבים. מימין הנפה ומתחתיה מכל איסוף השפכים לאחר הפרדתם. החיצים מראים את התקני הניטור והבקרה: 1. משאבה טבולה בבור השפכים מקבלת מזרימה שפכים למכל הטיפול (2) מערבול במכל הננומרוכבים. מפעילה את המערבל ושומרת על תרחיף הומוגני. (3) משאבת הננומרוכבים מזריקה מנה מבוקרת, תוך ערבול מכל הטיפול. (4) משאבת ריקון מכל הטיפול, מופעלת כדקה אחרי שהזרקת הננומרוכבים מסתיימת. (5) מצוף מהפעיל משאבה לריקון המכל מתחת לנפה והעברת השפכים ללא TSS להמשך צנרת הביוב



איור 4: צילום של מתקן הפיילוט: משמאל (מקדימה) מכל הטיפול ובראשו מערבול. מאחוריו מכלי הננומרוכבים. מימין הנפה ומתחתיה מכל איסוף השפכים לאחר הפרדתם. משמאל לשולחן עליו עומדת הנפה - ניתן לראות את המשאבה שמעבירה ממכל הטיפול לראש הנפה



מתקן הפיילוט

על בסיס פיתוח זה הוקם בתחילת 2014 מתקן פיילוט אשר מטפל בשפכי רפת כפר בלום. המתקן (ראה איורים 3, 4) מבוסס על מכל עם ערבול שאליה מוזרק תרחיף הננומרוכבים במינון הדרוש. לאחר כדקה, השפכים עם הפלוקים מועברים במשאבה לנפה רוטטת. הבוצה מופרדת למכל צדדי, ומפונה ביחד עם שאר מוצקי הרפת, בזמן שהשפכים המטופלים מוזרמים למערכת השפכים של היישוב.

המתקן הוקם במימון קרן המחקר של מועצת החלב וקרן המחקר של שה"מ (משרד החקלאות), ובסיועם של קולחי גליל עליון וקיבוץ כפר בלום, אשר בנוסף, העמיד לרשות הניסוי מתקנים וכוח אדם. המתקן נמצא בהליכי בחינה ראשוניים, ומטפל כרגע בכ-0.5-1.0 מ"ק ליום. התוצאות מבטיחות מאוד, ותוך מספר שבועות ייכנס לפעילות אוטומטית באמצעות בקרה ממוחשבת ויגיע, אם הכול התנהל כשורה, לכ-6-8 מ"ק ליום.

מתקן הפיילוט, במידה ויסתבר שהוא מצליח להביא את השפכים לרמה הרצויה מבחינת TSS ואף מבחינת COD, יוכל לשמש דוגמה למתקנים דומים וגדולים יותר שיטפלו במלוא התפוקה היומית של רפת ממוצעת. ■