



## שער 3

# טכנולוגיות רגישות מים

פיתוח טכנולוגיות מים משולבות חדשניות היכולות להיות מיושמות בנוף  
העירוני על מנת לקדם מרקמים עירוניים רגשי מים





# פרויקט 3.1: פיתוח ביו-פילטר היברידי לטיפול במי-נגר

## עירוני ולשיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות

### 1. מבוא

בישראל הוקדשו מאמצים רבים לפיתוח מקורות מים חלופיים עקב מצוקת המים, תקופות בצורת הארוכות, ושאיבת היתר מן האקוויפר והכנרת. בשנים האחרונות הוקמו מספר מתקני התפלה אשר הקלו על מצוקת המים, וכן יושמו מתקני טיפול והשבת שפכים בהיקף נרחב ומוביל ברמה עולמית. אולם עד כה לא ניתנה שימת לב לניהול מי-שיטפונות במגזר העירוני. אמנם כמות הגשמים בישראל אינה גבוהה, אך בשל פריסתה הדלה נגרמים מדי שנה נזקים ושיבושים רבים עקב הצפות וכן אובדות כמויות מים משמעותיות שאותן ניתן לנצל בשינוי גישת הניהול.

הניסיון באוסטרליה, ובכלל בעולם, מתמקד בביו-פילטר לטיפול במי-שיטפונות הכוללים ריכוזים נמוכים של חומר אורגני ותרכובות חנקן וזרחן. ביישום גישה זו בארץ ניתן להיעזר בניסיון הגלובלי, בעיקר בטיפול במי-שיטפונות בעונת החורף. אולם, יש לכייל את התכנון בהתאם לתנאי הזרימה ולאיכות האופיינית של מי-שיטפונות בישראל. קושי גדול יותר הוא התאמתו של הביו-פילטר לטיפול במשך מרבית השנה לשיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות, והסבתו בתקופת החורף לטיפול "קונבנציונלי" במי-שיטפונות. לצורך כך פותחה גישת היישום הייחודית של ביו-פילטר היברידי כפי שהוצגה לראשונה בכפר סבא (איור 29). פיילוט הביו-פילטר בכפר סבא הציג גישה רב שימושית – היברידית ורב שנתית. כלומר, בחורף הביו-פילטר מיועד לקצור מי נגר, להשהות אותם, לטהר אותם ולהחדירם למי התהום לשם העשרתם, כאשר בקיץ הביו-פילטר מטפל במי התהום המקומיים שבדומה לכל אזור השרון עשירים מאוד בחנקות < 130 מג"ל של ניטראט, כתוצאה מדישון יתר לאור זאת שהשטח העירוני היה בעבר שטח חקלאי מניב. בעקבות זאת בארות רבות הושבתו לאספקת מי שתיה. הביו-פילטר במתכונתו הקיצית הצליח להרחיק 73% של ניטראט ממי התהום בריכוז של 35 מג"ל, דבר שהכניס את תוצאות איכות המים ביציאה מהביו-פילטר לטווח של מחצית ריכוז מותר למי שתיה (70 מג"ל). אולם, משבחנו את הביו-פילטר לזרימה רציפה של ניטראט, נצפה דרדור לערך הרחקה של 25% בלבד.

לכן, מטרת המחקר בפרויקט זה הינה להביא את מערכת הביו-פילטר לאופטימיזציה עבור שתי האפליקציות ובעיקר טיהור מי תהום על בסיס משטר זרימה רציף 24/7, דבר שיאפשר מופע מים לאורך כל השנה, שיקום מאסיבי של מי תהום, העדר צורך בהשקיה לאור התפעול הרציף ויצירת מיקרו-אקלים עירוני על-מנת להנחית את החתימה התרמית בערים.

# 1 קליטת המים

השלב הראשון בתהליך טיהור המים של מערכת הביובילטר מזוהמים והובלתם אל מערכת הביובילטר.

תהליכים מרכזיים:

- קליטת מים מזוהמים באחת מ-3 דרכים: קליטה מתוך צנורות הניקוז העירוניים של מי הגשמים, קליטה ישירה של מי גשמים כשהם נאספים מעל הקרקע (ישירות מהכביש בדרך כלל) וקליטת מי תהום מזוהמים שנשאבים מתוך בארות.
- הובלת המים אל פני השטח של הביובילטר שם ממוקמות שכבות טיהור שמסננות ומטהרות את המים.

# 2 טיהור המים

השלב השני בתהליך טיהור המים הוא סינון וטיהור המים המזוהמים.

תהליכים מרכזיים:

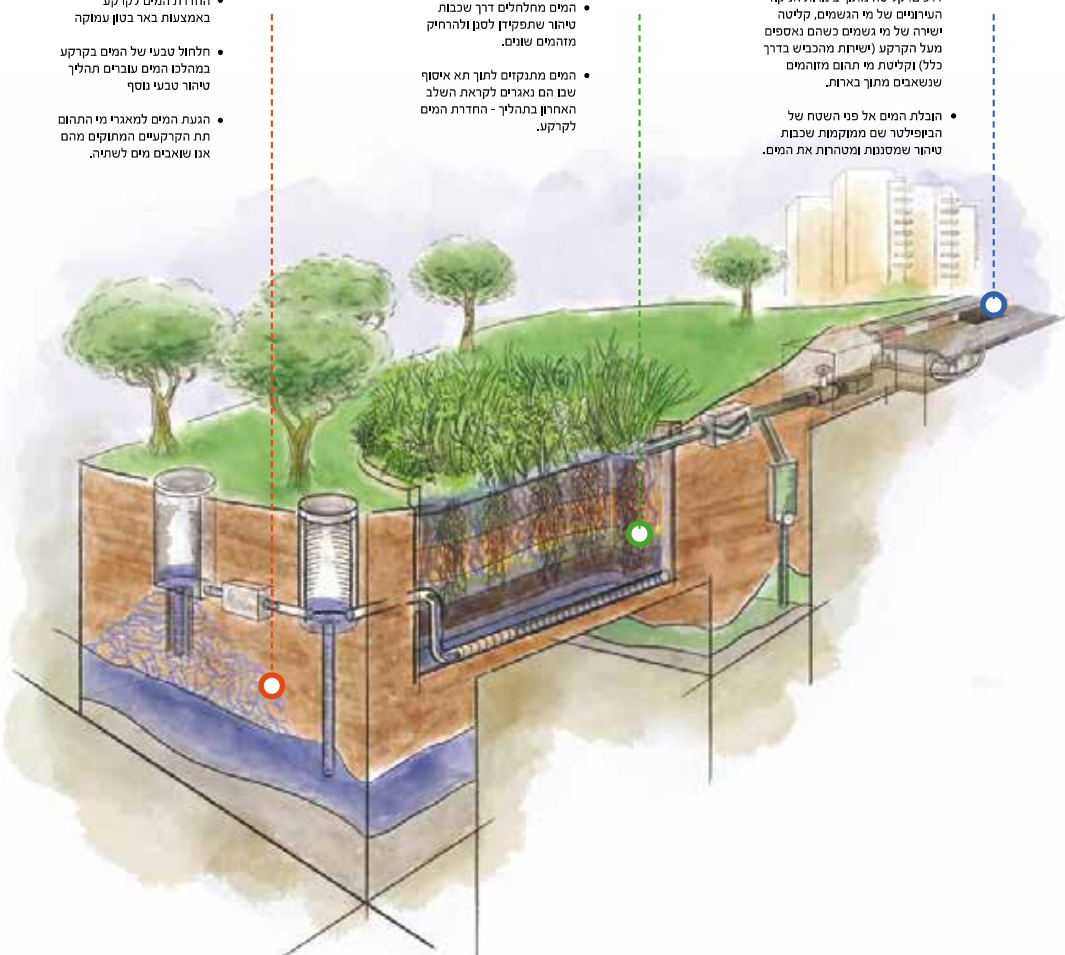
- המים המזוהמים מזורמים לתוך פני השטח של מערכת הביובילטר המכוסה בצמחים יחודיים.
- המים מחלחלים דרך שכבות טיהור שתפקידן לסנן ולהרחיק מזוהמים שונים.
- המים מתנקטים לתוך תא איסוף שם הם נאגרים לקראת השלב האחרון בתהליך - החדרת המים לקרקע.

# 3 החדרת המים

השלב השלישי בתהליך טיהור המים הוא החדרת המים שטוהרו על ידי המערכת אל הקרקע. המים מחלחלים אל הקרקע עד להגעתם למאגרי מי התהום.

תהליכים מרכזיים:

- החדרת המים לקרקע באמצעות באר בטון עמוקה.
- חלחול טבעי של המים בקרקע במהלכו המים עוברים תהליך טיהור טבעי נוסף.
- הגעת המים למאגרי מי התהום תת הקרקעיים המתוקנים מהם אנו שאובים מים לשתייה.



## איור 29: גישת הפיתוח והיישום של ביו-פילטר היברידי בישראל

החלק של אוניברסיטת בן-גוריון מתמקד בפיתוח מערכות כאלה לטיפול במי-שיטפונות בעונת החורף ולשיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות בתקופת הקיץ. זו גישה ייחודית לישראל ממפני שהאקלים בארץ מאופיין בתקופת יובש ארוכה (כשמונה חודשים). לכן, אי אפשר ליישם בפשטות את הגישה שפותחה במדינות אחרות (כאוסטרליה) אשר בהן פרוס המשקעים הוא על פני כל השנה. זאת אומרת שמבנה הביו-פילטר ואופן תפעולו שונים בשתי תקופות אלו מחייבים מחקר ופיתוח יסודי.

## 2. מטרת המחקר

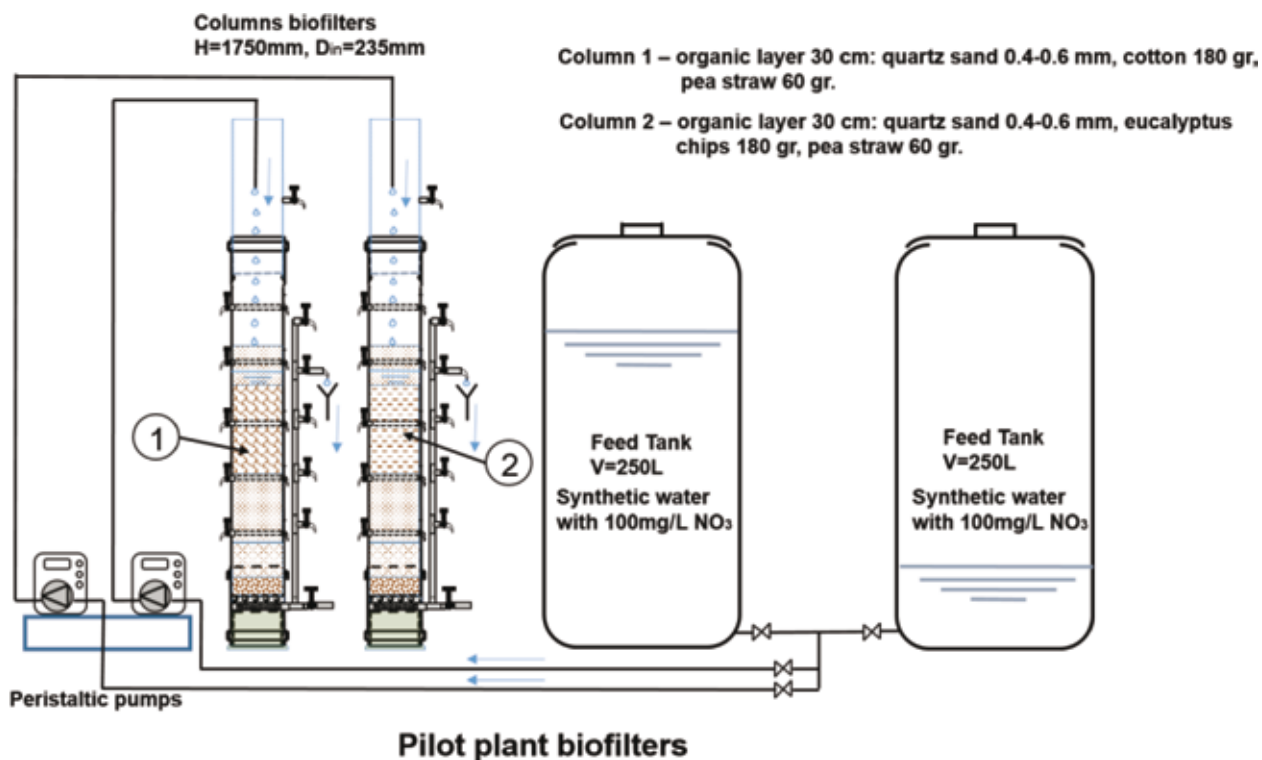
מטרת המחקר באופן כללי היא לקבוע כללי תכנון ותפעול של ביו-פילטר היברידי להשגת איכות מים נדרשת, לאורך כל השנה (שתי תקופות שונות מבחינת איכות המים המטופלים, דהיינו, טיפול במי-שיטפונות בתקופת החורף, ושיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות בתקופת הקיץ – כפי שמגולם באיור 29), תוך שימור הביומסה (צמחיה וחיידקים) ובזרימה רציפה. באופן פרטני, השאיפה היא להגדיר משתנים תכנוניים כגון: תצורת מצע הסינון, סוג התוסף האורגני, עומס הידראולי, צורת תפעול, סוג הצמחיה המועדף, וכן משתני תפעול כגון: אקלום המצע, צורת הזנה, והנחיות תחזוקה.

## 3. שיטות העבודה

### 3.1 – הרצת מודל משופר של ביופילטרים לדניטרפיקציה (תצורת קיץ)

לצורך המחקר תוכננו ונבנו מספר קולונות על פי ההמלצות האוסטרליות כפי שמתואר באיור 30. כל קולונה עשויה PVC, גובהה 121 ס"מ וקוטרה 23.5 ס"מ. לאורך הקולונה ישנן 5 נקודות דיגום הנמצאות באזורים שונים של הקולונה. בסיסי הקולונות מולאו בסומסום בזלת (5 מ"מ) על מנת לתת תמיכה מכאנית למצע הקולונות. מעליו מולאו הקולונות בחול קוורץ מדורג בשלוש שכבות: תווך גדול למטה (2.5-3.5 מ"מ), תווך ביניים (0.8-1.5 מ"מ), ושכבה עליונה (0.6-0.8 מ"מ). לכל קולונה צינור יציאת מים חיצוני מתחתית הקולונה העולה כלפי מעלה ומאפשר שליטה בדרגות רוויה שונות של המצע (ליצירת אזור אנוקסי לתהליך הדניטרפיקציה). בראש הקולונה מחובר חלק מפרספקס שקוף בגובה 54 ס"מ לתמיכה בצמחיה (סה"כ גובה המבנה 175 ס"מ). החלק העליון של שכבת החול הקטן ביותר, בגובה 30 ס"מ שימש כ"שכבה העוברת" לקיום דניטרפיקציה. עד לראשו נשמרה רוויה ועורכבו בו שני מקורות הפחמן: כותנה ושכבי עץ.

מעל האזור הרווי היה האזור הלא רווי. אזור זה בגובה 30 ס"מ הכיל רק חול קוורצי. אזור זה נועד לצרוך את החמצן המומס במים כך שריכוזו יהיה נמוך עם הכניסה לאזור הרווי. צינור היציאה יצא כאמור מבסיס הקולונה והורם לגובה מטר. באופן זה נשמר האזור הרווי במים. ההזנה התבצעה בטפטוף מלמעלה. צינור ההזנה חובר אל שני מיכלים אשר מולאו במי ברז בנפח של 250 ליטר בכל מיכל. לכל מיכל הוספו 40.72 גרם  $KNO_3$  כך שריכוז הניטרט במיכלים היה 100 מג"ל. ההזנה התבצעה באמצעות משאבות *Masterflex L/S compact drive*. הספיקה ווסתה לשני ערכי עומס הידראולי שנוסו עד כה, 18 ו-36 מ"מ לשעה. תמונה של מערכת הניסוי ניתנת באיור 31.



איור 30: תמונת מערכת הפילוט עם שתי קולונות דניטריפיקציה במצעי כותנה/קש ושבי עץ/קש



(a)



(b)

איור 31: תמונת מערכת הפילוט עם שתי קולונות דניטריפיקציה ללא צמחים (a) ועם צמחי ווטיבר (b) צילום: צוות המחקר

### 3.2 – הרצת מודל משופר של ביופילטרים לטיפול במי-שיטפונות (תצורת חורף)

לצורך המחקר הוקמו והופעלו קולונות נוספות במטרה לדמות את השלב של טיפול במי-שיטפונות (עונת החורף). מבנה הקולונות וסוג מצעי החול זהה לתכנון של קולונות הדניטריפיקציה (ראה סעיף 4.1). אולם האזור הרווי בניסויי סינון מי-השיטפונות קטן יותר, כדי ליישם אזור אירובי גדול יותר לתהליכים של פירוק חומר אורגני וניטריפיקציה. על פי ניסיון קודם באוסטרליה ובכפר סבא, יש חשיבות להשארת אזור רווי בתחתית הקולונה. אזור זה גורם להארכת זמן השהייה בקולונה, מאפשר יישום תהליך אנוקסי של דניטריפיקציה (לחיזור ניטריטים הנוצרים בניטריפיקציה באזור האירובי), וכן מהווה מקור רטיבות לשורשי הצמחייה בהפוגות הארוכות של הזנת מי-שיטפונות.

הדמיית הטיפול במי-שיטפונות נעשה באמצעות הזנה של תמיסה סינתטית שמדמה הרכב אופייני של מי-שיטפונות באזור העירוני בישראל, על פי תדירות אופיינית של משקעים. לצורך תכנון שני פרמטרים אלו (הרכב המים ותדירות השיטפונות), נעשה שימוש בנתונים שנאספו על ידי שתי קבוצות המחקר האחרות (הטכניון והאוניברסיטה העברית) אשר עשו דיגום וכיול באזור כפר-סבא. באזור מזרח כפר סבא הם דגמו את מוצא האגן הכולל מגוון של כ-25 תתי אגנים שונים, אשר מתוכם שלושה תתי אגנים עם שימושי קרקע שונים: מגורים, תעשייה זעירה וכביש. לאחר ניתוח תוצאות עונת הגשמים הקודמת ללא הגשם הראשון ועונת הגשמים הנוכחית יחד עם הגשם הראשון, הם אפיינו את הרכב מי הנגר, תדירותם ועוצמתם.

על בסיס אפיון זה תוכננה תמיסת ההזנה שהורכבה ממספר מלחים על מנת ליצור את הריכוזים האופייניים של חנקן (5 מג"ל אמוניום כ-N), זרחן (2 מג"ל פוספאט כ-P), אשלגן (5 מג"ל כ-K), נתרן (20 מג"ל כ-Na), כלוריד (20 מג"ל כ-Cl), חומר אורגני (5 מג"ל מלח חומצה אצטית כ-TOC), אלקליניות (30 מג"ל כ-CaCO<sub>3</sub>), ו-pH (7). תמיסת ההזנה הורכבה מ-80% מים מזוקקים ו-20% מי-ברז. כדי לווסת את ההגבה נעשה שימוש בנתרן בי-פחמתי אשר מוסיף אלקליניות ונתרן ברמה דומה למה שהתקבל באפיון בכפר-סבא.

בשלב הראשון נבחרו לניסוי שלושה סוגי צמחים על פי ניסיון קודם וזמינות/תפוצה בישראל: טולבגיה, אגפנגוס, ווטיבר (ראה איור 32).



איור 32: סוגי הצמחים שנבדקים לטיפול במי-שיטפונות (משמאל: אגפנגוס, טולבגיה, ושני צמחי ווטיבר) צילום: צוות המחקר

## 4. תוצאות

### 4.1 – הרצה של הביופילטרים המשופרים לסימולציה של שיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות (תצורת קיץ)

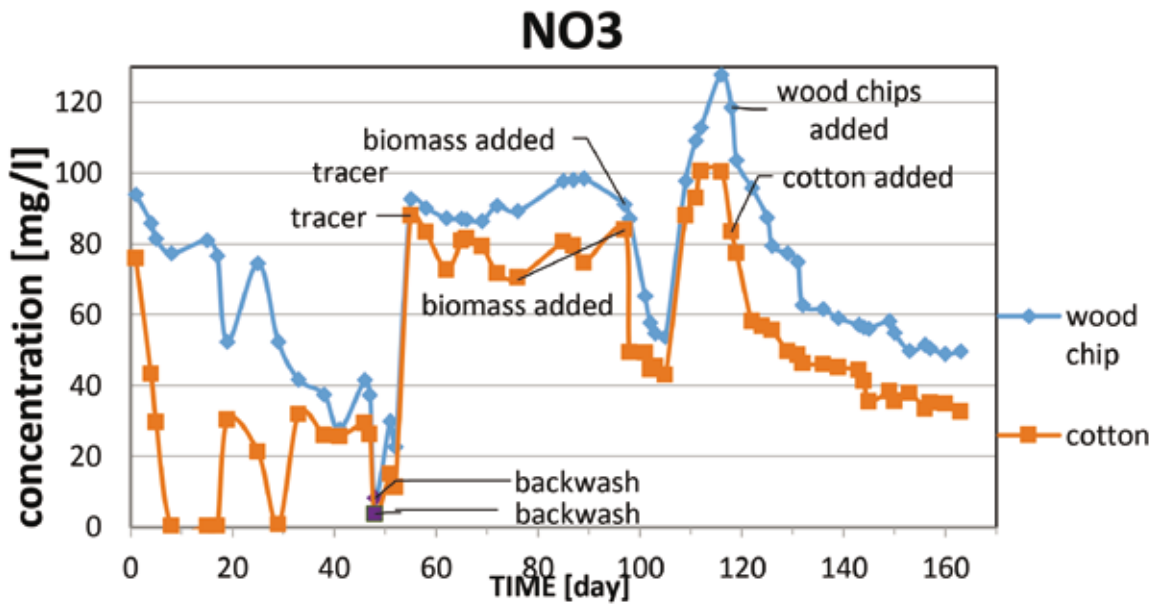
על פי המתואר בסעיף 3.1, הורצו שתי קולונות כביופילטרים לקיום דניטריפיקציה לטיפול רציף בתמיסה סינטטית המדמה מי-תהום מזוהמים בחנקות. נבדקה האפקטיביות של שני מקורות פחמן: כותנה לעומת שבבי עץ אקליפטוס. בשימוש בכותנה, החומר האורגני המנוצל לדניטריפיקציה מגיע מהידרוליזה הכותנה לסוכרים. השימוש בשבבי עץ אקליפטוס וכן תכנון והקמת הקולונות, מבוססים על הניסיון האוסטרלי מבחינת המבנה הפנימי של הקולונות והסידור המדורג של שכבות החול.

#### 4.1.1 – הרחקת ניטרט

תיאור מפורט של השתנות ריכוזי הניטרט לאורך תקופת הניסוי שבה בוצעו מספר שינויים תפעוליים, ניתן באיור 3.3. התוצאות שהתקבלו היו משביעות רצון מבחינת הרחקת הניטרט והחומר האורגני בקולחי המערכת. בהשוואת זמן ההתאקלמות בין שתי הקולונות ניתן לראות כי קולונת הכותנה התאקלמה כבר בשבוע הראשון לתחילת הניסוי. לעומת זאת, לקולונת שבבי האקליפטוס נדרש זמן התאקלמות ארוך יותר והרחקת הניטרט הייתה מתונה יותר ביחס לקולונת הכותנה. עם הזמן ניתן לאבחן ירידה הדרגתית בריכוזי הניטרט ביציאה מהקולונה עד לערכים של כ-20 מג"ל (יעילות הרחקה 80%). אולם אובחנה גם עלייה בהפסד העומד שהתבטאה בהצטברות של נוזל מעל פני המצע. תופעה זו הצריכה שטיפה נגדית כדי לשחרר את בועות החנקן (ביום ה-48).

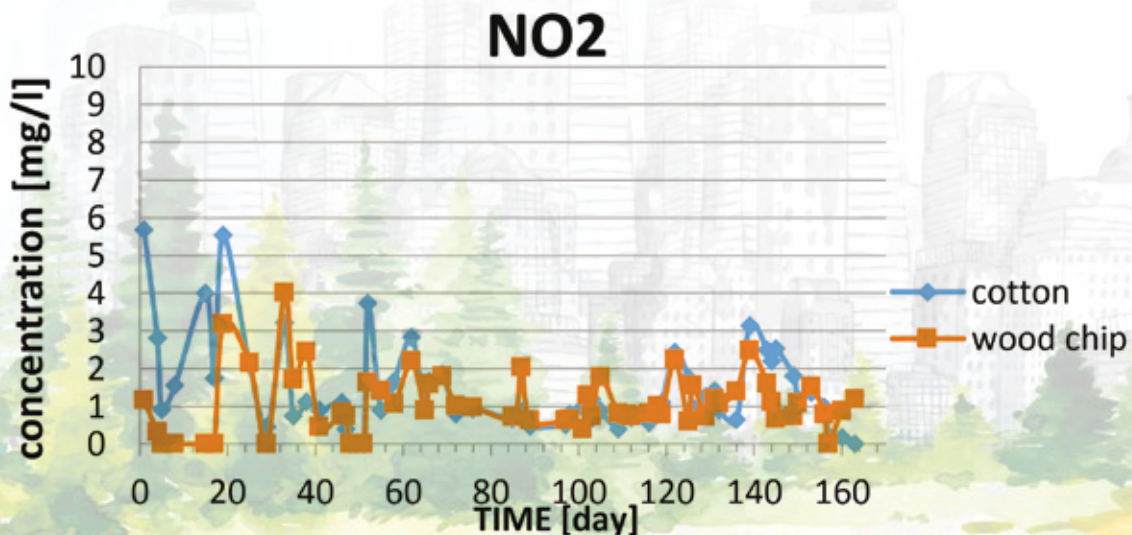
עקב הפעלת השטיפה הנגדית במהירות גבוהה מדי שגרמה לשטיפת הביומסה והחומר האורגני מן הקולונות, נגרמה עלייה בריכוז הניטרט ביציאה מהקולונות לסביבות 90 מג"ל. גם ביצוע מבחן נותב תוך שימוש בברומיד בהעמסה חד פעמית גבוהה יחסית תרם להידרדרות בתפקוד הקולונות. לכן, על מנת לאושש את פעולת הקולונות נעשתה תוספת ביומסה בצורה הדרגתית (ראו באיור 3.3 יום 98). כמו כן ביום ה-118 של ההפעלה הוספו 30 גרם מכל מקור (ללא קש אפונה) לשתי הקולונות בתוספת מנה נוספת של ביומסה מאוקלמת.





איור 33: ערכי ניטרט ביציאה מקולונות הכותנה ושבבי העץ לאורך הזמן

פעולה זו השיבה את פעילות הקולונות והרחקת הניטרט חודשה בשנית. באיור 33 ניתן לראות ירידה בריכוז הניטרט עד התייצבות הקולונות על ערכי ניטרט של  $\sim 35 \text{ mg/L}$  בקולונת הכותנה וכ-  $50 \text{ mg/L}$  בקולונת שבבי העץ. בסיכומו של שלב הפעלה ארוך זה של כשישה חודשים בהזנה רציפה, ניתן להסיק כי לקולונת הכותנה יעילות טובה יותר מאשר לקולונת שבבי העץ. לאחר התייצבות המערכת הוחלט להגדיל את ספיקת המשאבות פי 2, ולבדוק את יעילות הרחקת הניטרט במצב זה. נתוני עומס הידראולי זה ( $36 \text{ מ}^3 \text{ לשעה}$ ) מראים עד כה תוצאות דומות.



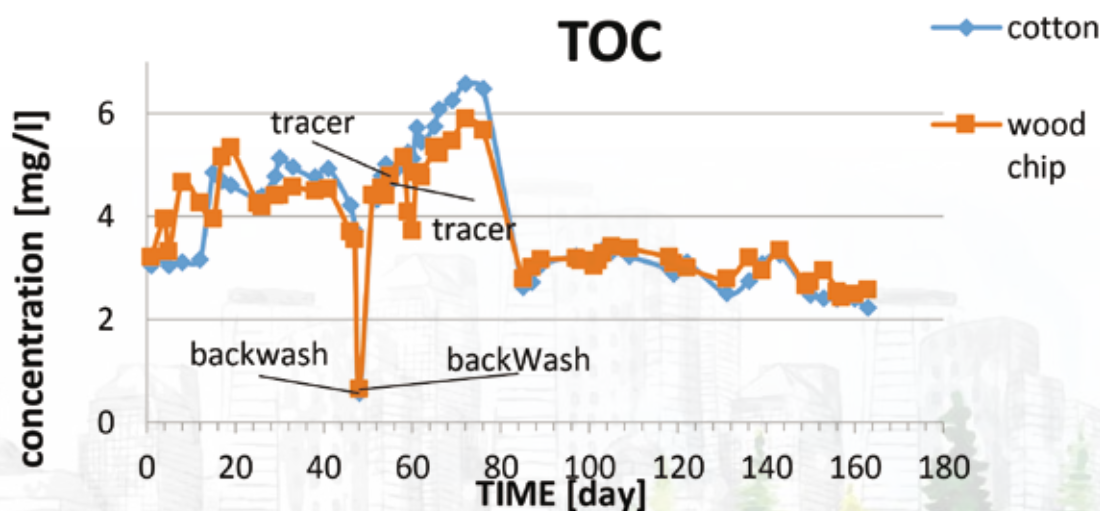
איור 34: ערכי ניטריט ביציאה מקולונות הכותנה ושבבי העץ לאורך הזמן

## 4.1.2 – יצירת ניטריט

התמיסה הסינתטית שהוכנה להזנת שתי הקולונות לא כללה ריכוזי ניטריט. ניטריט מהווה תרכובת ביניים בתהליך הדניטריפיקציה. ניטריט הוא חומר מסוכן יותר מניטרט (סף ההשפעה על כחלת הרבה יותר נמוך) ולכן חשוב מאוד שלא יצטבר במערכת בשלב הדניטריפיקציה. משלבי המחקר בשנה הראשונה הסקנו כי הצטברות ניטריט במערכת קשורה ביחס שבין ריכוז החומר האורגני לריכוז החנקן וכן לעומס ההידראולי במערכת. לכן בשלב זה של הניסויים הקטנו את העומס ההידראולי ביחס לשנה הראשונה במטרה להגיע לדניטריפיקציה טובה אך לא להרחקה מוחלטת של הניטרט. במצב זה התקבלו ריכוזי ניטריט נמוכים ביציאה מהקולונה (איור 34).

## 4.1.3 – גורל החומר האורגני

מאיור 35 ניתן ללמוד כי עבור שתי הקולונות כמעט שלא נצפתה הצטברות של TOC (ריכוז חומר אורגני). בתמיסת ההזנה הסינתטית כמובן שלא הוכנס חומר אורגני. לאחר השטיפה הנגדית ניתן לראות כי ריכוז החומר האורגני במערכת ירד משמעותית וזאת בעקבות יציאה של כותנה ושכבי עץ מהקולונות. לאחר ההוספה הראשונה של ביומסה שוב עלו ערכי ה-TOC במערכת, אך לאחר ניסוי הנוטב (ניסוי שבו מזריקים חומר שניתן לעקוב אחר תנועתו בתוך הקולונה) שוב הייתה ירידה בערכים.

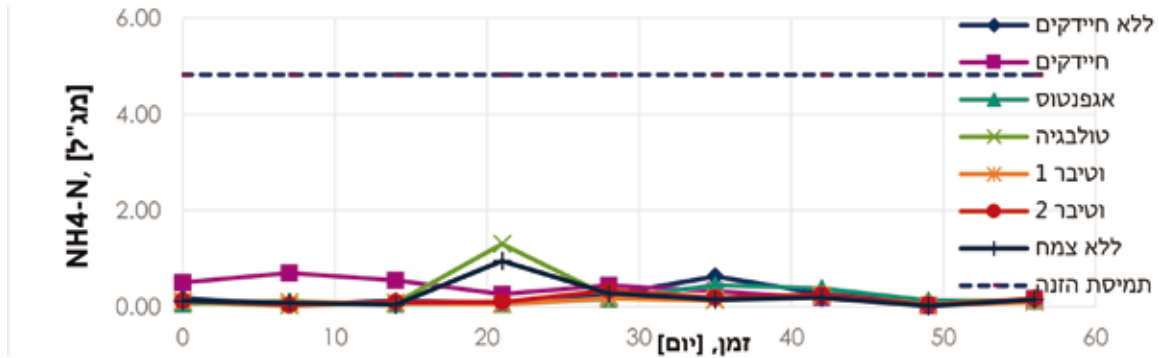


איור 35: ערכי TOC ביציאה מקולונות הכותנה ושכבי העץ לאורך הזמן

זמן קצר לאחר ניסוי הנוטב (יום 75) ריכוז החומר האורגני במערכת שוב ירד בפתאומיות אך עדיין ריכוזו היה כזה שאפשר לקולונות לפעול ביעילות. ניתן לראות כי לאחר אותה ירידה בערכי ה-TOC, נשמר ריכוז החומר האורגני קבוע עד לסיום תקופת הניסוי ועמד על כ- 3mg/L.

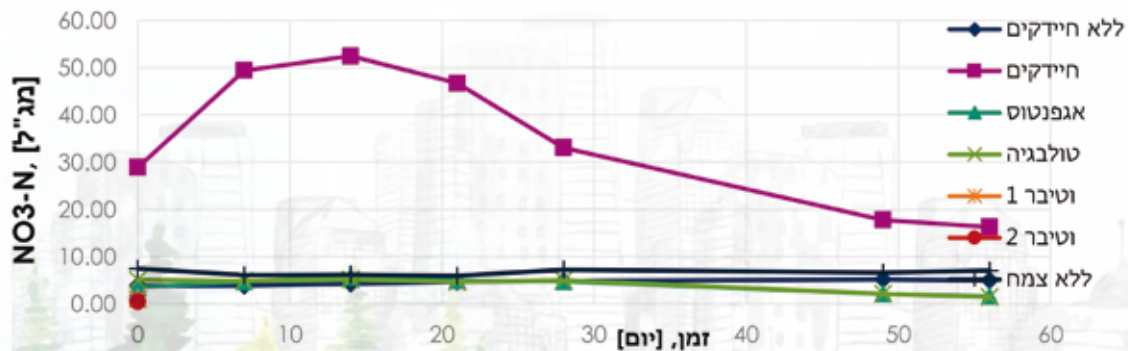
#### 4.2 – הרצה של ביופילטרים להדמיית טיפול במי-שיטפונות (תצורת חורף)

על פי המתכונת המתוארת בסעיף 3.2, הורצו שבע קולונות במקביל על פי הפירוט הבא: 1. מודל אוסטרלי ללא צמחיה וחיידקים, 2. מודל אוסטרלי ללא צמחיה ועם חיידקים ממט"ש לצורך אקלימציה, 3. עם צמח אגפנטוס, 4. עם צמח טולבגיה, 5. עם צמח וטיבר, 6. קולונה נוספת עם צמח וטיבר, 7. ללא צמחיה (ביקורת).



איור 36: ערכי אמוניה ביציאה מהקולונות בתפעול להדמיית טיפול במי-שיטפונות

הקולונות מופעלות כבר מספר חודשים לאחר אקלימציה עם הזנה יומית של 1 ליטר במנה אחת. בשלב שני נעשה מעבר לשתי מנות שבועיות של שני ליטר לכל קולונה, ובהמשך ייבחנו נתוני שיטפונות אופייניים לישראל. תוצאות הרחקת האמוניה, והניטרט ניתנות באיורים 36 ו-37.



איור 37: ערכי ניטרט ביציאה מהקולונות בתפעול להדמיית טיפול במי-שיטפונות

**5. מסקנות**

- א. כותנה גולמית הוכחה כמקור פחמן יעיל לתמיכה בתהליך הדניטריפיקציה מפני שהיא גורמת לשחרור השארית הקטנה ביותר של חומר אורגני לתמיסה, וייצור הניטריט הוא מינימלי.
- ב. בהרצה ארוכת טווח של שתי קולונות במתכונת תכנון שכבות המצע על פי הגישה האוסטרלית, עם שני תוספים של מקור חומר אורגני מוצק (כותנה לעומת שבבי עץ) הופגנה יעילות טובה של דניטריפיקציה. זה מצביע על פוטנציאל יישום גישה זו לשיקום מי תהום מזוהמים בניטריטים.
- ג. העומס ההידראולי הוא פרמטר תפעולי קריטי המשפיע על יעילות הריאקציות הביולוגיות ועל גלישת תוצרים בלתי רצויים לקולחים.
- ד. לא כדאי להרחיק לחלוטין את הניטרט מפני שעלולים להיווצר תנאים אנארוביים שיגרמו לחיזור סולפאטים (המצויים במי-תהום) לסולפידים.
- ה. בהרצה ראשונית של קולונות לטיפול בהרכב אופייני של מי-שיטפונות בעומס שבועי מתון וקבוע התקבלו תוצאות הרחקה טובות של תרכובות חנקן.
- ו. בטיפול בתמיסת מי-שיטפונות לא אובחנו עד כה הבדלים בין קולונות עם וללא צמחים.
- ז. תוספת חיידקים ממט"ש עירוני לצורך החשת אקלימציה לא תרמה באופן משמעותי לתפקוד המערכת.

