

עבור: מר עזרא רבינס, מנהל מו"פ חקלאי ומנהל קרן המלגות ע"ש ג'יג'י סטרום

דוח התקדמות חצי שנתי במחקר

"מרבדים מיקרוביאליים כביופילטר לטיפול בשפכי חקלאות מים אינטנסיבית"

הקדמה

על רקע העלייה בביקוש העולמי לדגים והירידה בהיקף הדגה, היקף חקלאות המים בעולם נמצא בעלייה מתמדת כבר למעלה משלושה עשורים. המחסור במים ובשטחי גידול, המאפיינים אזורים צפופים כדוגמת מדינת ישראל, כמו גם פיתוח טכנולוגי והצורך בהגדלת היבול, הביאו לפיתוחן של מערכות חקלאות מים אינטנסיביות, המאופיינות בצפיפות גידול גבוהה. חקלאות המים האינטנסיבית תופסת נתח משמעותי מאד בתוך ענף חקלאות המים (כ-50% מתוך שוק של 157 ~ ביליון יורו) שהולך וגדל עם הזמן, בעיקר הודות להתפתחות הטכנולוגית המתמדת שחוזה הענף. אחד האתגרים הקשים העומדים בפני חקלאים העוסקים בחקלאות מים הוא פיתוח ואחזקה של מערכת יעילה לטיפול בשפכים העשירים בנוטריאנטים הנוצרים כתוצאה מהאכלה ומהפרשות הדגים. טיפול לוקה בחסר עלול לפגוע, הן בדגים כאשר נעשה מיחזור של המים והן בסביבה כאשר ישנו שחרור של השפכים.

במחקרים מקדימים שבוצעו ע"י ד"ר גבי בנט וד"ר ליאור גוטמן נמצא כי ביופילטרציה של שפכי דגים באמצעות מרבדים מיקרוביאליים (פריפיטון) המורכבים מאצות, ציאנובקטריה וחיידקים אחרים, המוחזקים במסה אחת משוכבת, עדיפה על פני שיטות ביופילטרציה הקיימות במספר היבטים כגון;

א. קצב ויעילות גבוהים של פינוי חנקן.

ב. יכולת פינוי מגוון צורונים של חנקן (אמוניה, ניטריט, ניטראט) בתהליכים אסימילטוריים ודיסימילטוריים, המתרחשים בו זמנית על אותו ביופילטר.

ג. משרעת מליחות רחבה לגדילה ופעילות המרבד.

ד. יכולת לשנות את הרכב חברת המיקרואורגניזמים במרבד במניפולציות כימיות וסביבתיות לא מורכבות.

ה. יכולת לשנות את הערך התזונתי של המרבד על ידי מניפולציות כימיות וסביבתיות לא מורכבות.

ו. ביומסת המרבד המצטברת יכולה לשמש מזון לדגים שונים (אמנון, דניס, סיכ, קיפון), תוך הפחתה משמעותית בעלות המזון הניתן לדגים.

לאור הגדילה בצריכת הדגים ובייצור בעולם אין ספק שמערכות גידול אינטנסיביות חיוניות להמשך ההתפתחות והן יקטינו בנוסף את היקף הבעיות האקולוגיות הקשורות בתהליכי הייצור. המחסור בשטחי גידול, המאפיינים אזורים צפופים במדינת ישראל מסמן את אזור הדרום כמועמד טבעי, בהובלת פיתוח החקלאות הימית, במיוחד, מערכות גידול אינטנסיביות, בזכות השטחים הרבים הזמינים באזור הדרום והקירבה לים שמהווה יתרון משמעותי מבחינת אספקת מי ים קבועה וזולה.

תוצאות מחקר ראשוניות

אבן הדרך שהוגדרה לסיום השנה הראשונה לפרוייקט היא בניית מתקן גידול דגים בנפח של 200 ליטר, הכולל 10 ק"ג דגי ים טורפים, המחובר למערכת ביופילטר בנפח של 1 מ"ק, והפעלתו תוך הצגת רמת מחזור של 75% לפחות. היות ויעד זה כולל גידול הדגים ברמת אינטנסיביות גבוהה של 50 ק"ג/מ"ק, נדרשו ניסויים מקדימים למדידת רמות תרכובות החנקן השונות (בדגש על אמוניה- NH_3 , שהינו מרכיב טוקסי לדגים אף ברמות נמוכות) ושל נוטריאנטים אחרים, כמו גם של רמות החמצן, המהווה גורם מגביל במערכות שכאלו והדורש את הוספתו. הניסויים המפורטים בהמשך נעשו לטובת מציאת מדדים אלה.

גידול הדגים בצפיפות יעד של 50 ק"ג דגים לקוב מים במערכת פתוחה.

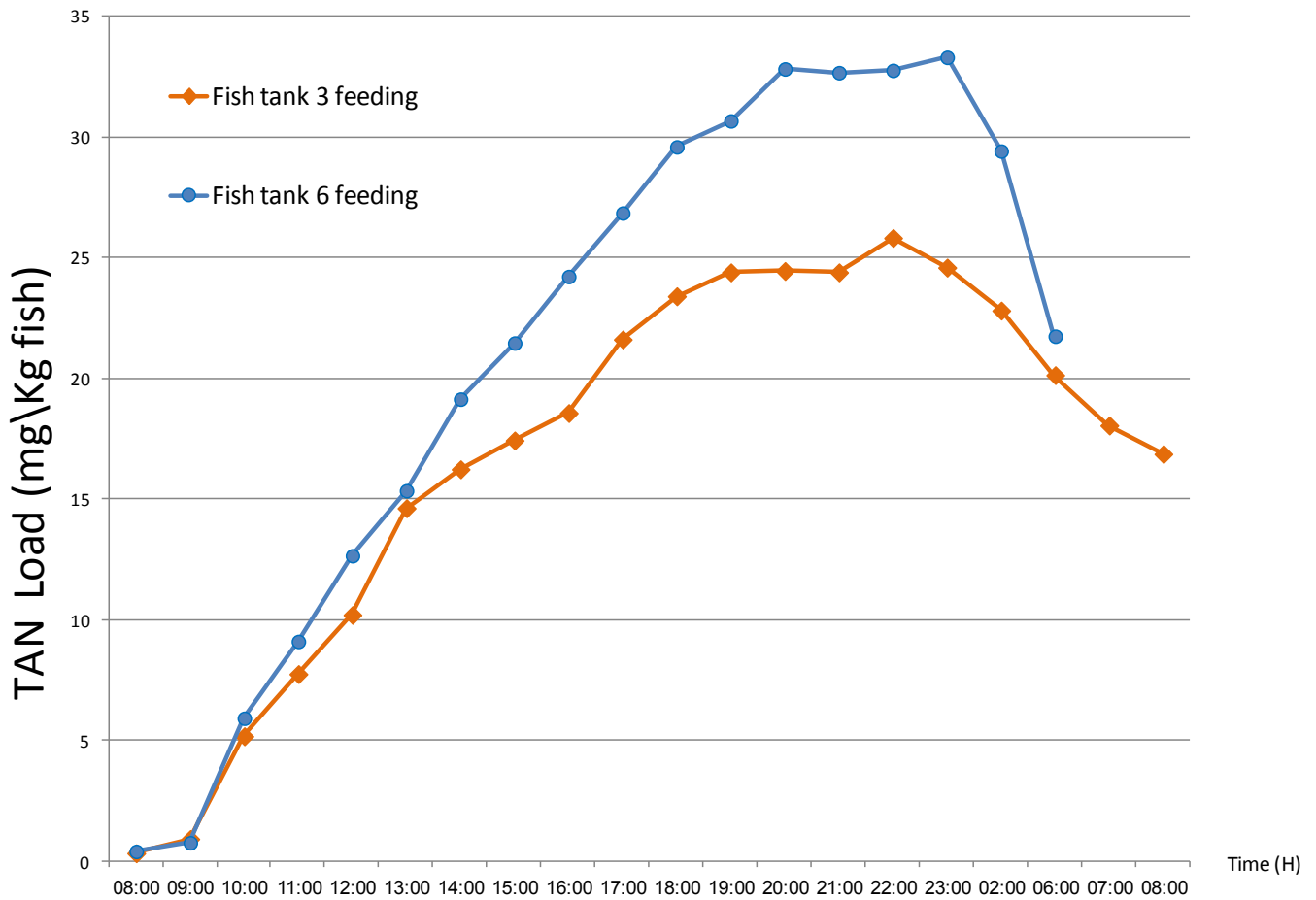
נכון להיום, מערך גידול הדגים מונה שני מכלים בנפח כולל של 420 ליטר כל אחד, עם שיעור החלפת מי הגידול בסד"ג של 17 פעמים ביממה (למעט בזמן הניסויים), אספקת אוויר וחמצן בטווח ריכוזים של 6-8 mg/L והזנת הדגים במזון המכיל 48% אחוז חלבון, בכמות אוכל יומית של 2% ממשקל גופם. עד כה לא נצפו אירועי תחלואה מיוחדים (מאושר בבדיקות פתולוגיה תקופתיות לאבחון טפילים) ותמותת דגים הייתה מינימלית (<1%). לטובת המשך העבודה תוקם מערכת בקרה ואוטומציה לשמירה על רמות החמצן, ה-pH והטמפרטורה.

במסגרת הניסוי הראשון, שנועד לבחון את היתכנות גידול הדגים בצפיפות של 50 ק"ג/קוב, אוכלסו תחילה כל אחד מהמכלים ב-4 ק"ג דגים (98 דגים במשקל ממוצע של 0.2 ± 39 גר') אשר הושארו להסתגלות למשך שבועיים. לאחר תקופת זו, הועברו למכלים בכל שבוע עוד ק"ג אחד של דגים עד לצפיפות של 10 ק"ג דגים ל-200 ליטר, בהתאם לצפיפות המיועדת של 50 ק"ג/קוב מים. במהלך הוספת הדגים השבועית נשמרה רמת החמצן על הערכים הנ"ל וכמות המזון עודכנה בכל פעם שהוספו דגים, לשמירה על כמות האוכל היומית הנ"ל-2% ממשקל הדג ליום.

הפרשת חנקות וזרחות ומדדי איכות מים כתלות במשטר הזנה

מתוך ניסיון להעריך את כמות הנוטריאנטים המופרשת מהמזון ומהפרשות הדגים, ביצענו ניסוי בו נלקחו דגימות מים ממכל הדגים (62 דגים במשקל ממוצע של 0.7 ± 72 גר' לדג, סה"כ ביומסה 4.5 ק"ג, 200 ליטר) ומנקודת היציאה של מכל הדגים, כל שעה למשך 24 שעות (למעט בין 00:01-05:00). בנוסף, נלקחו גם מדדי חמצן, טמפרטורה ו-pH ממכל הדגים. במסגרת הניסויים הוגבלה ספיקת המים לדגים ל-25 ליטר לשעה, הדגים קיבלו אוויר מועשר בחמצן, באופן בלתי מוגבל והוזנו במכל אחד 3 פעמים ביום בשעות 08:00, 12:00 ו-16:00 ובמכל השני סה"כ 6 פעמים ביום, ז"א, בנוסף גם בשעות 10:00, 14:00 ו-17:00. סה"כ ניתנה אותה כמות אוכל בשני המכלים השונים. בגרף מס' 1 ניתן לראות את כמות ה-TAN המצויה במיכל הגידול, המיוחסת לק"ג דג, בחתך שעותי.

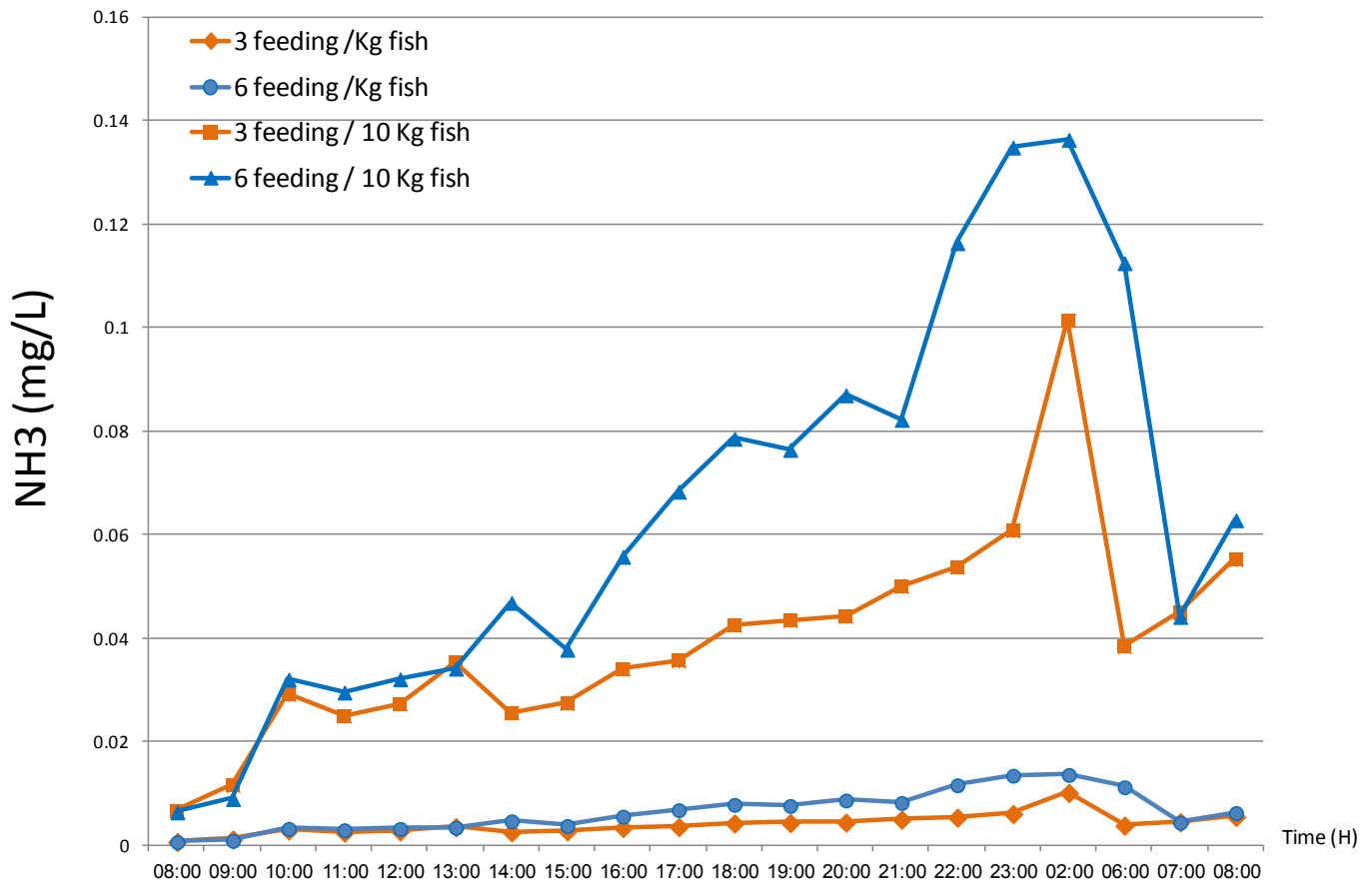
גרף מס' 1: עומס TAN לק"ג דגים.



מגרף מס' 1 ניתן לראות שאין הבדל משמעותי בפרופיל ה-TAN בין שני משטרי האכלה שצינו קודם, ובשני המקרים השיא בכמות ה-TAN במיכל הגידול הוא בסביבות 22:00. בנוסף, נראה כי בניגוד לצפי, עקום עומס ה-TAN במשטר 3 האכלות היא יותר שטוח. ע"ס מדידות ה-TAN שביצענו בניסוי זה מצאנו שסה"כ כמות ה-TAN שצפויה להיות מיוצרת על ידי 10 ק"ג דגים ליום עומדת על סד"ג של 3.4 גרם TAN.

בגרף מס' 2 ניתן לראות את הפרופיל היממתי של ריכוזי NH_3 במיכל הגידול, המיוחסת ל-1 ק"ג דגים ול-10 ק"ג דגים, בשני משטרי האכלה השונים.

גרף מס' 2 – פרופיל NH_3 .

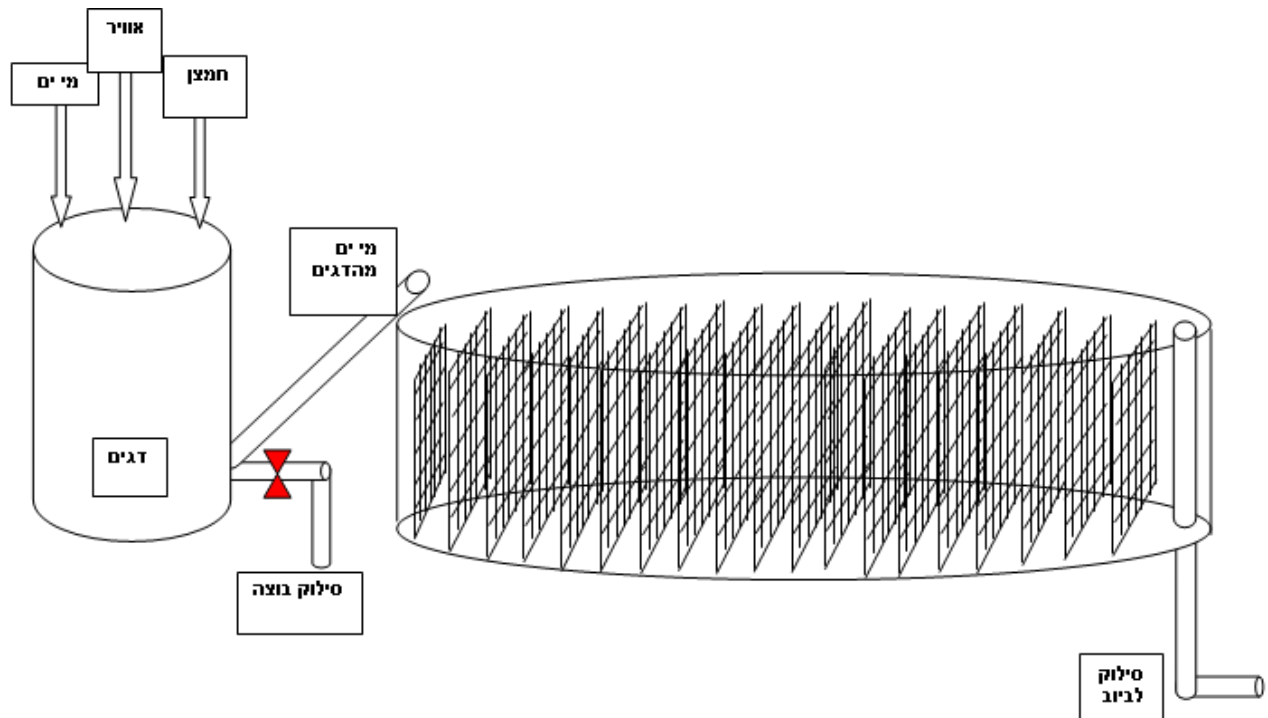


מגרף מס' 2 ניתן לראות כי : 1. פרופיל עומס NH_3 , גם הוא דומה בין שני משטרי ההאכלה, עם שיא בסביבות 24:00. 2. עקום ריכוזי NH_3 במשטר 3 האכלות, גם הוא שטוח יותר. 3. ערכי NH_3 לא עלו מעל ריכוז של 0.14 mg/L בשום שעה ביום, גם בחישוב לצפיפות דגים גבוהה.

ביסוס מערכת ביופילטר.

מערך ביופילטר מסוג פריפיתון כלל מכל Raceway בעומק של 40 ס"מ ובנפח של 1 קוב בתוכו נתלו 32 רשתות פלסטיק לבנות גמישות, כל אחת בשטח של 40 ס"מ X 35 ס"מ- שטח כולל של מצע $\sim 4.5\text{m}^2$). המים ממכל הדגים הוזרמו למכל הביופילטר דרך overflow שקבע את גובה המים במכל הדגים וממנו לביוב דרך overflow שקבע את גובה המים במכל הביופילטר- ראה סכמת ניסוי ותמונה מס' 1. נעשה מעקב שבועי אחר התפתחות הפריפיתון וסיפון של חומר אורגני ששקע בתחתית המכל.

סכמת מערך הניסוי של מכל הדגים והביופילטר.

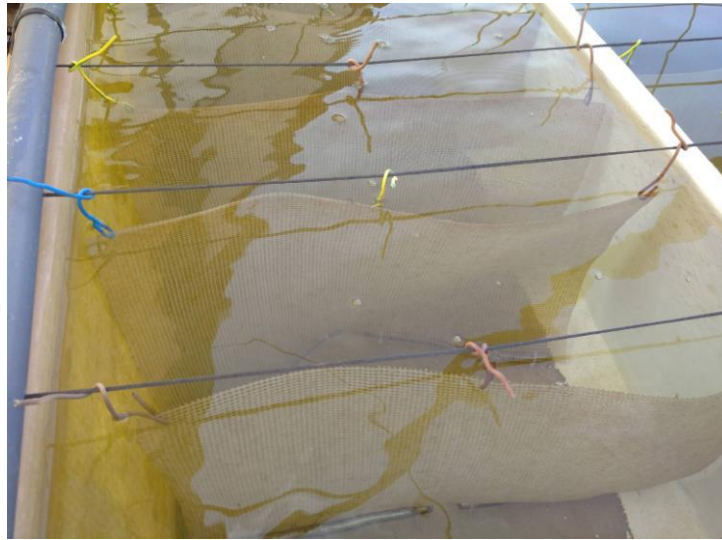


הניסוי החל בתחילת חודש פברואר ובתום השבוע הראשון להקמת הביופילטר נוצרה שכבה דקה ועדינה של פריפیتון על רוב הרשתות- ראה תמונה מס' 2. התבססות נרחבת של הפריפיתון על הרשתות נעשתה כ- 3 שבועות מהקמת המערכת- ראה תמונה מס' 3. לאחר 5 שבועות החלו להופיע אצות כמו אולווה וחוטיות אחרות ונוצר צורך להסיר מפני המים את האצות באופן יומי בכדי למנוע הצללה על הרשתות נושאות הפריפיתון בעומק עמודת המים.

תמונה מס' 1: מערך הניסוי של מכל הדגים והביופילטר בזמן הקמת המערכת.



תמונה מס' 2: מרבדי הפריפיתון שבועיים מתחילת הניסוי



תמונה מס' 3: מרבדי הפריפיתון שלושה שבועות מתחילת הניסוי



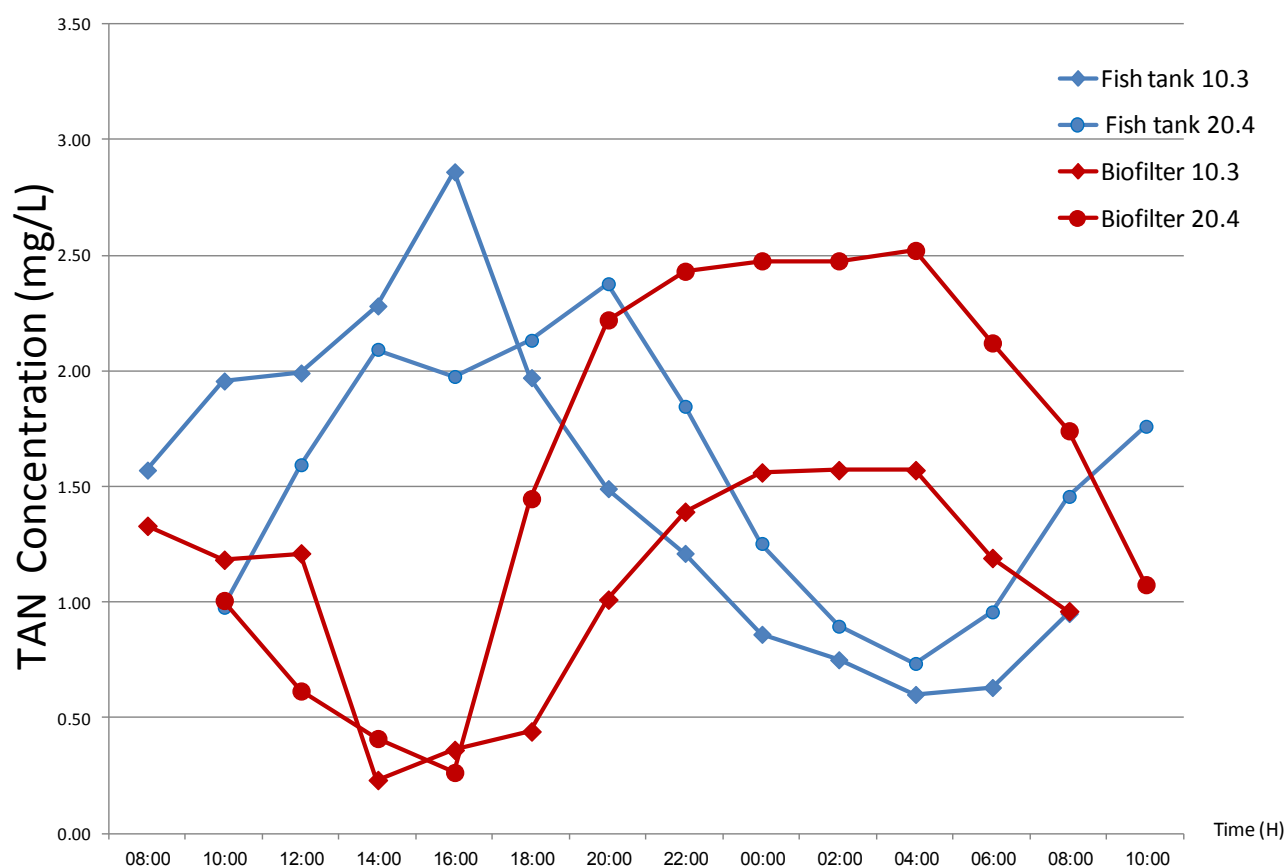
קביעת רמות סילוק נוטרינטים ע"י הביופילטר

על מנת לכמת את קצב ויעילות סילוק הנוטריאנטים ע"י הביופילטר, נעשו שני ניסויים, בהפרש של כחודש, בהם נלקחו דגימות מנקודת היציאה ממכל הדגים ומנקודת היציאה ממכל הביופילטר, כל שעותיים, למשך 24 שעות רצופות. ניסוי מס' 1 נערך בתאריך 10/3/20 עם מכל דגים בנפח של 220 ליטר, בתוכו היו 67 דגים במשקל ממוצע של 8.1 ± 181 גר' לדג, סה"כ 12.1 ק"ג דגים.

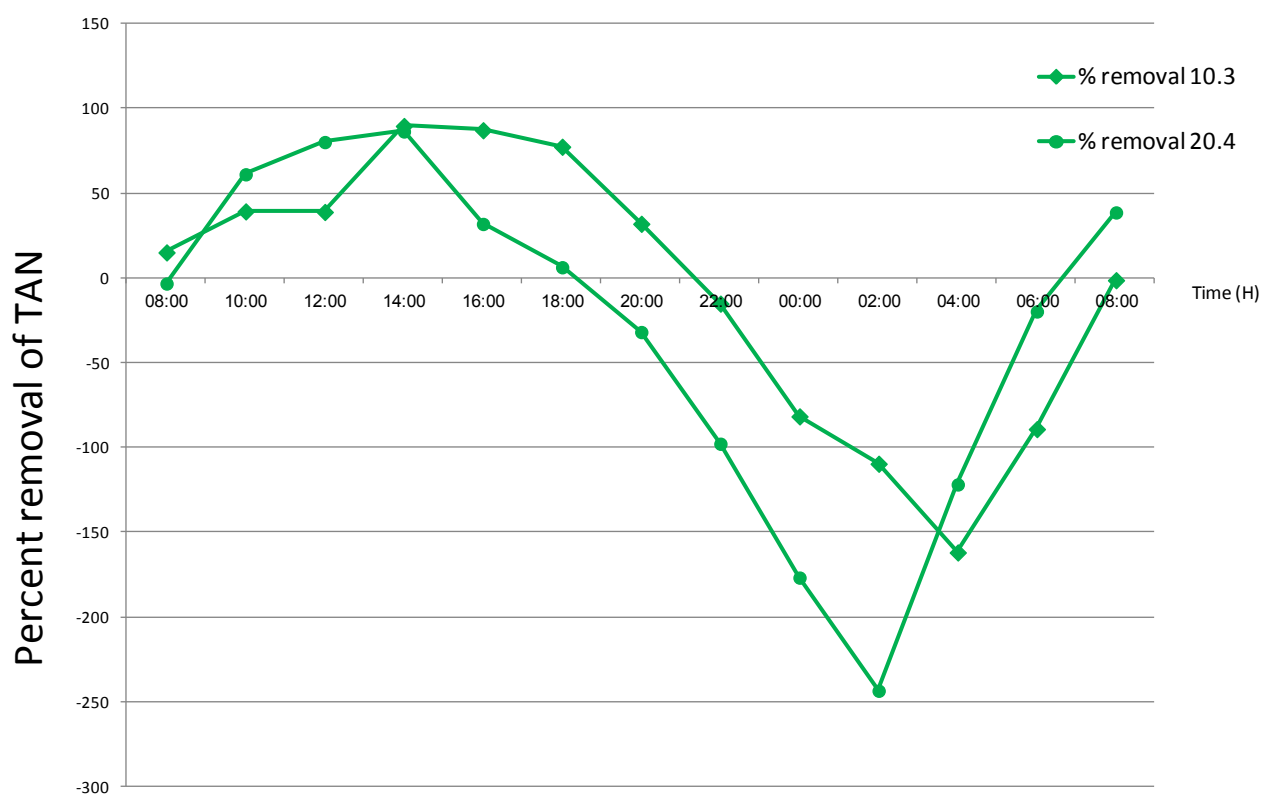
ניסוי מס' 2 נערך בתאריך 20/4/20 עם מכל דגים בנפח של 220 ליטר, בתוכו היו 47 דגים, במשקל ממוצע של 15.2 ± 252 גר', סה"כ 11.8 ק"ג דגים. מדגימות המים שנאספו כל שעתיים נמדדו ריכוזי TAN, פוספט, ניטריט וניטראט. בנוסף, בעת הדגיגום נלקחו מדדי חמצן, טמפרטורה, ו-pH ממכלי הדגים והביופילטר. במסגרת הניסויים הוגבלה (לילה לפני) ספיקת המים הנכנסים למכל הדגים לכדי 96 ליטר לשעה, הדגים קיבלו חמצן מועשר ואוויר באופן בלתי מוגבל והוזנו 4 פעמים ביום בשעות 7:00, 10:00, 13:00, ו-17:00. תוצאות הניסויים מוצגות בגרפים מס' 3-7.

מתוצאות הניסויים המוצגות בגרף מס' 3, ניתן לראות פרופיל יממתי של ריכוז ה-TAN ביציאה ממכל הדגים (קו כחול) וביציאה מהביופילטר (קו אדום) בשני הניסויים- הראשון, ב-10/03/20, עם מרבדי פריפיתון שגודלו במשך 5 שבועות והשני, ב-20/4/20, עם אותם מרבדי פריפיתון שגודלו בסהכ במשך 11 שבועות. הגרף מציג מעין תמונת מראה בין ריכוז ה-TAN במכל הדגים ובין ריכוזו בביופילטר שמשתנה כתלות בפעילות הפוטוסינתזה שמשתנה כתלות בשעות היום. ניתן גם לראות מגמה זהה לאורכם של שני הניסויים, אך שמסתכלים על אחוז סילוק ה-TAN על ידי הביופילטר (גרף מס' 4), ניתן לראות שיעילות סילוק ה-TAN בניסוי הראשון, מה-10/3, גבוהה יותר מאשר בניסוי המאוחר יותר ב-20/04, דבר שעלול להעיד על רוויה בביצועי הסרת הנוטריאנטים על ידי הביופילטר או תופעה אחרת שבגינה התרחשה הירידה ביעילות. זו הסיבה גם שאנחנו מכנים אותם שני ניסויים ולא שתי חזרות של אותו ניסוי.

גרף מס' 3: פרופיל ריכוז TAN במכל הדגים ובביופילטר

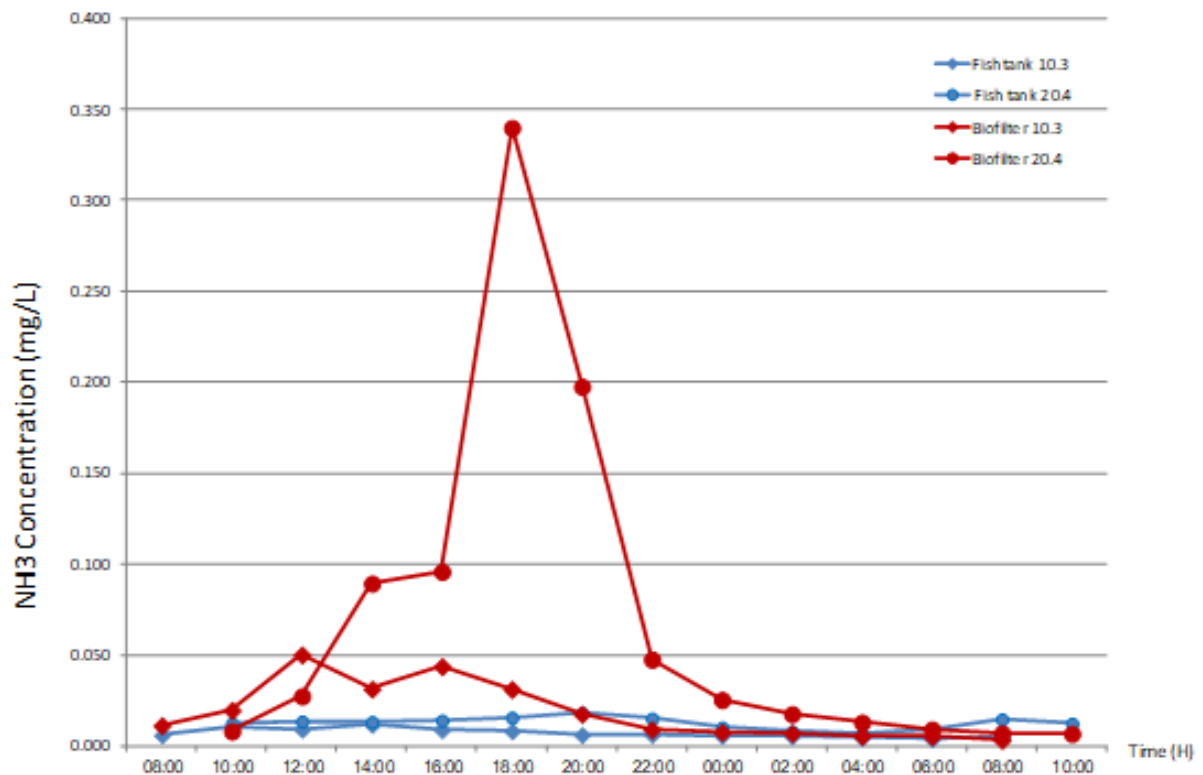


גרף מס' 4: יעילות הביופילטר בסילוק ה-TAN.



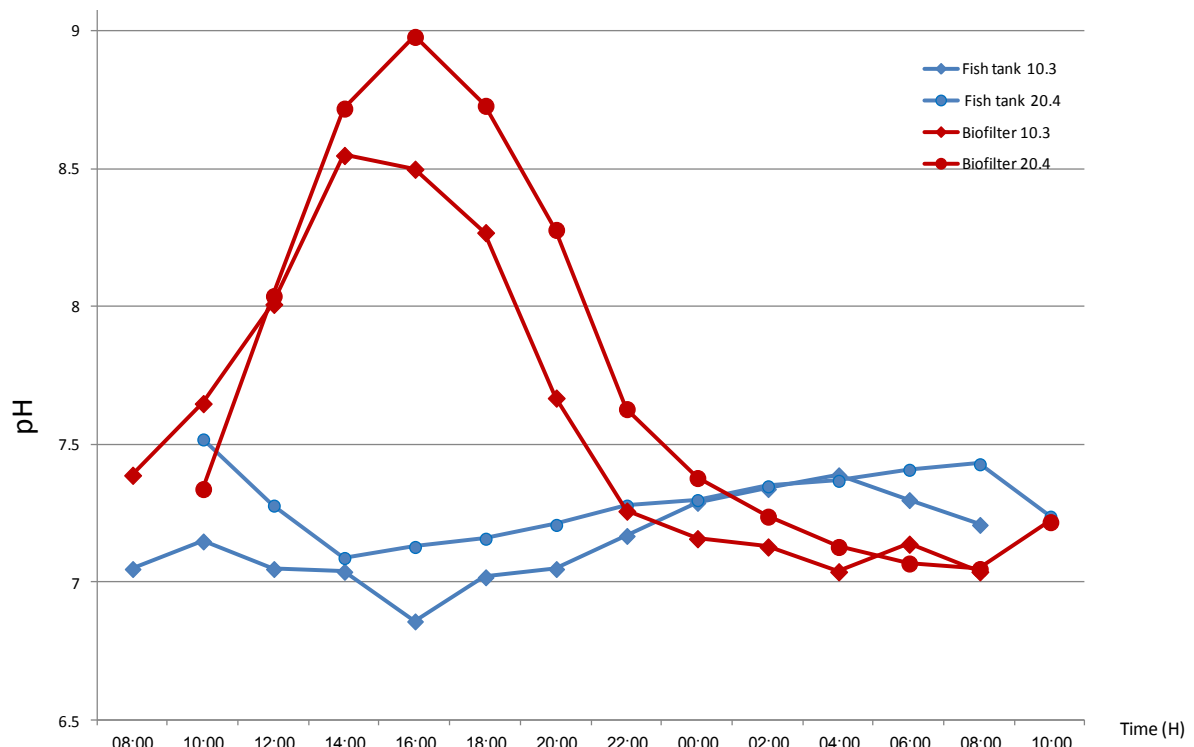
בגרף מס' 5 ניתן לראות את ריכוזי NH_3 ביציאה ממכל הדגים וממכל הביופילטר. הריכוזים חושבו בעזרת מדדי ה-TAN, ה-pH והטמפרטורה. בגרף מס' 5 ניתן לראות שבעוד שריכוזי NH_3 במכל הדגים נמצאים בטווח ריכוזים שאינו רעיל, ריכוזי ה- NH_3 שנמדדו במכל הביופילטר, בניסוי מהתאריך 20/4/20, בין 16:00 ל-22:00, גבוהים משמעותית. ריכוזי NH_3 גבוהים אלו נגזרים בעיקר מערכי pH בסיסים מאוד שמגיעים אפילו עד לערך 9 ומטים את האיזון בין NH_3 ל- NH_4^+ לטובת ה- NH_3 עד ריכוזים ברמת רעילות לדגים. ייתכן ויש לייחס תוצאה זו לפעילות הפחותה של הביופילטר ב-20/4/20.

גרף מס' 5: פרופיל NH_3 במכל הדגים ובמכל הביופילטר, בשני הניסויים.



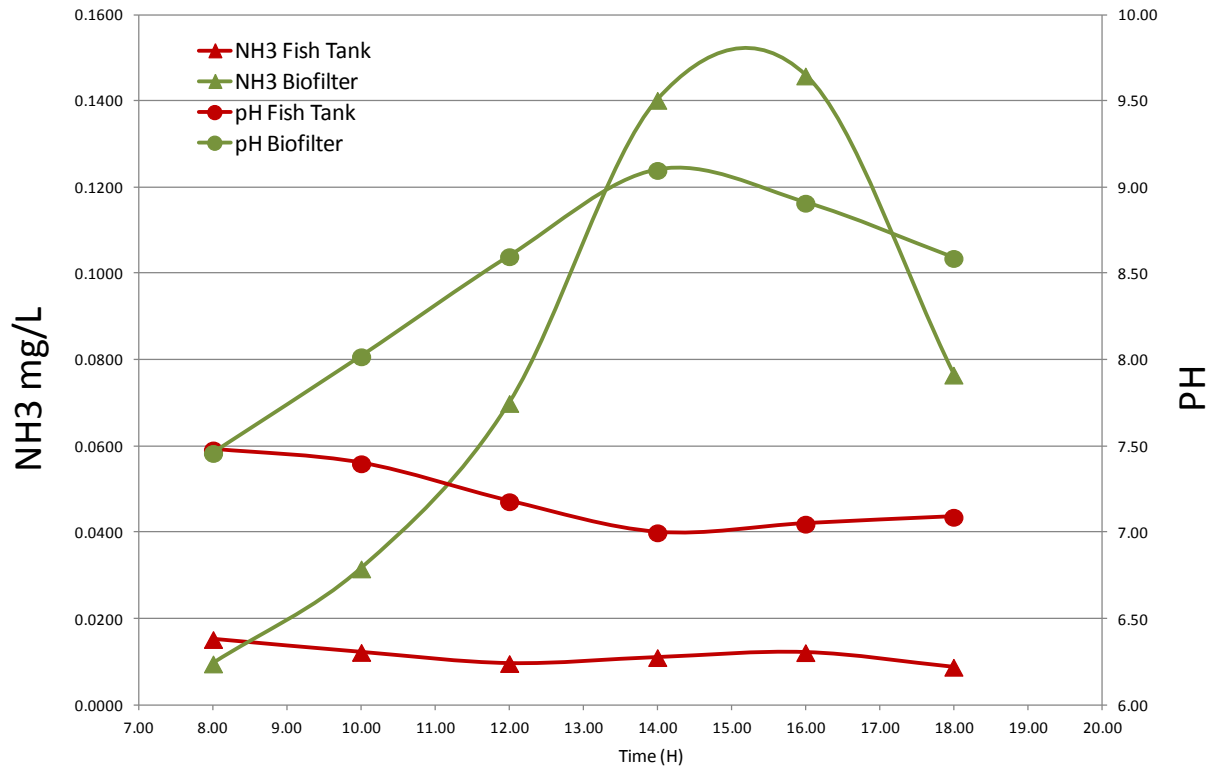
בגרף מס' 6 ניתן לראות את פרופיל ה-pH לאורך היממה ביציאה ממכל הדגים וביציאה ממכל הביופילטר. כמו שנאמר קודם ניתן לראות שרמת ה-pH בביופילטר עולה משמעותית עד 9, בעוד שה-pH במכל הדגים נשאר קבוע יחסית לאורך היום. שינוי זה ב-pH של המים בביופילטר גורם לריכוז ה- NH_3 שיוצא מהביופילטר (ובהמשך אל הדגים) להגיע לרמות רעילות.

גרף מס' 6: פרופיל pH במכל הדגים ובביופילטר במשטר הזנה של 4 פעמים ביום



על מנת לבחון את השפעת פרופיל ההזנה על מדדי ה-pH והאמוניה, נעשה ניסוי דומה לניסויים הקודמים שבו נלקחו דגימות כל שעתיים למשך 12 שעות בלבד, אך פרופיל ההזנה שונה, כך שאותה כמות אוכל ניתנה, במקום 4 פעמים במשך היום, רק פעמיים, בשעה 7:00 ו-13:00. תוצאות ניסוי זה מוצגות בגרף מס' 7.

גרף מס' 7 – פרופיל pH במכל הדגים ובביופילטר במשטר הזנה של פעמיים ביום.



מתוצאות ניסוי זה עולה כי שינוי משטר ההאכלה מארבע האכלות לשתי האכלות ביום לא משנה את פרופיל ה-pH ופוטנציאליות, לא מקטין או מונע ריכוזי NH_3 גבוהים בביופילטר, אולם, בהשוואה לגרף מס' 5, המציג את רמות ה- NH_3 בניסויים מה-10/3/20 וה-20/4/2, רמת האמוניה המכסימלית בניסוי זה נמצאת קרוב יותר לניסוי מה-10/3/20, מאשר לזה מה-20/4/20, שהציג תוצאות פחות טובות.

המשך עבודה מתוכנן

נכון להיום, החלו כבר הניסויים של מחזור המים בין מערכת הביופילטר למכל הדגים לטובת סגירה של המערכת. כיוון העבודה הוא הקטנה הדרגתית של כמות המים הנכנסת למערכת (מרמת מחזור נמוכה ועד להשגת היעד), תוך מחזור גבוה של המים בין מכל הדגים למכל הביופילטר. תוך כדי הניסויים ננטר באופן רציף את רמת הנוטריאנטים השונים, ה-pH והחמצן. בתחילה, קצב ההזרמה של מי ים חדשים יעמוד על כ-6 החלפות ביממה (240 ליטר לשעה) וקצב ההחזרה של מים מהביופילטר למכל הדגים יעמוד על כ-24 החלפות ביממה (480 ליטר לשעה) עד התייצבות המערכת. לאחר מכן, ספיקת מי הים החדשים תוקטן באופן הדרגתי עד להגעה למקסימום מחזור המים האפשרי במערך הנתון.