

דו"ח סופי לתכנית מחקר מספר 894-0193-16

שנת המחקר: 2017 – שנה ג' , מתוך 3_שנים

גידול בר-קיימא ושיפור ביצועי דגיגים באמצעות השימוש בפריפטון ימי כמקור מזון טבעי וחיוני וכתוסף למזון מסחרי לגידול דגיג דניס ובורי.

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ולהנהלת ענף דייג ומדגה ע"י:

ליאור גוטמן¹, אנה מילשטיין², אמיר נאורי¹, שנאן הרפז³

¹National Center for Mariculture, Israel Oceanographic and Limnological Research, P.O. Box 1212, Eilat 88112, Israel. lior.guttman@mail.huji.ac.il ; aneori@gmail.com

²Agricultural Research Organization, Fish and Aquaculture Research Station Dor, M.P. Hof HaCarmel, 3082000, Israel. anamilstein@agri.gov.il

³Agricultural Research Organization, P.O.B 15159 Rishon LeZion 7528809, Israel. harpaz@agri.gov.il

תקציר

פילטרים מסוג פריפיטון בעלי פוטנציאל לטיפול בר-קיימא וזול במי פלט מחקלאות ימית הודות לתהליכי הטמעה של נוטריונטים, שימוש בסובסטרטאט זאת ללא צורך באוורור ואפשרות השימוש בביומסה להזנת דגים וחסרי חוליות ימיים. פריפיטון הינו מרבד המכיל אורגניזמים מגוונים המתפתחים על פני מצע טבול בהינתן נוטריונטים ואור ועל כן בעל פוטנציאל לטיפול במי פלט מחקלאות ימית בעלות זולה יחסית המאפשרת גם קצירה קלה של הביומסה ושימושה להזנת דגיגים כמזון הטבעי להם בבתי הגידול והחסר, אולי, במזון מסחרי. במחקר הנוכחי הראנו היתכנות של שימוש בביופילטר מסוג פריפיטון לטיפול בנוטריונטים במי פלט מחקלאות ימית כולל קצבי גידול של הביומסה, קצבי הסרה ויעילות ההסרה של נוטריונטים שונים לאורך השנה בעונות ותנאים שונים. בין היתר פותח מודל לאימוד יעילות ההסרה של נוטריונטים על ידי פריפיטון בהתחשב בכמות הביומסה ובמשך השהייה של נוטריונטים. באמצעות העשרה של מי הפלט בסיליקה הצלחנו להשפיע על ההרכב הביוכימי של הפריפיטון ולהעלות את תכולת השומן בביומסה. בניסויי הזנה ראשוניים על דגיגי מי ים עם פריפיטון הופחת מרכיב המזון המסחרי (כופתיות) בדיאטה של דגיגי קיפון ב- 40% ללא השפעה על משקל סופי, קצב גידול הדגיגים ועל תחלואה. בניסוי הזנה של דגיגי דניס עם פריפיטון נמצא יעיל שיעור החלפה נמוך יותר של עד 25% מהמזון המסחרי על ידי פריפיטון טרי ומולצת בחינה של היתכנות בהטמעת פריפיטון בכופתיות. במסגרת ניסויי גמלון נבחן מערך טיפול עם פריפיטון במי פלט בשימוש ביחידות טיפול מודולריות בנפח/שטח גדול יותר. פריפיטון נמצא יעיל מאוד בהסרה של מגוון צורוני חנקן ובכלל זאת אמוניה וניטראט המהוות מטרד במערכות לחקלאות ימית. הסרה גבוהה של 65% מהניטראט נמדדה ברמות נמוכות של אמוניה במי הפלט כאשר ברמות גבוהות של שני צורוני חנקן אלו לא נראתה העדפה ונמדדה הסרה של שני הצורונים בקצב דומה. גמלון נוסף של המערכת נעשב בניסוי להזנה של דגיגי קיפון בבריכות בנפח 100 מ"ק עם סובסטרטאט לגידול פריפיטון. ביצועי הדגיגים בניסוי זה היו דומים לאלו בניסוי בסקלה קטנה יותר והיתכנות החלפה של 25% מהמזון המסחרי של דגיגי קיפון אושרה גם בניסוי זה ללא השפעה על ביצועי הגדילה של הדגים, תחלואה ואיכות המים.

מעריכים מומלצים לבדיקת הדו"ח

1. דר' עיינה בנט
2. פרופ' דינה זילברג
3. ד"ר גבי בנט

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים : לא

תאריך: מרץ-2018

חתימת החוקר

תוכן עניינים

1.....	מבוא.....
1.....	שיטות וחומרים.....
6.....	תוצאות.....
15.....	דיון ומסקנות.....
18.....	רשימת הפרסומים המדעיים שנבעו מהדו"ח:
Error! Bookmark not defined.	מקורות.....
20.....	סיכום עם שאלות מנחות.....

מבוא

הייצור השנתי של חקלאות ימית עולה בעשורים האחרונים בקצב גבוה. עם זאת, עלויות גבוהות מאפיינות את מערכות גידול הדגיגים (Cardia & Lovatelli, 2007) והן כוללות את עלויות המזון והטיפול במים. מאפייני בעייתי נוסף קשור לשרידות הנמוכה יחסית בשלב גידול זה לעומת שלב הפיטום בכלל, ולגבי דניס ובורי בפרט (Belos et al., 2010).

נצילות נמוכה של חנקן, מרכיב משמעותי במזון מביאה להפרשת כ- 75% מתכולת החנקן במזון כחנקן מומס (~60%) וכחומר חלקיקי השוקע בקרקעית (Lupatsch & Kissil, 1998). חנקן וזרחן אי-אורגניים במי פלט עלולים לפגוע בסביבה ולגרור העשרת יתר (eutrophication) של האקוויפר ומקורות המים אליהם מובלים (Chopin et al., 2001). מלבד העלות, פועל יוצא של תהליכי טיפול מסוג ניטריפיקציה ודניטריפיקציה הינו שחרור של חנקן מהמערכת בצורה גזית (Van Rijn, 1996) במקום שימור וניצול חוזר. שיטות טיפול אחרות מתבססות על תהליכי הטמעה של חנקן על ידי אצות. מגבלה עיקרית בשימוש באצות חד תאיות קשורה לעלות קצירתן ממדיום הגידול. אצות רב תאיות יעילות לסילוק אמוניה אך אוורור מהווה מרכיב עיקרי בהוצאת הגידול (Ben-Ari et al., 2014).

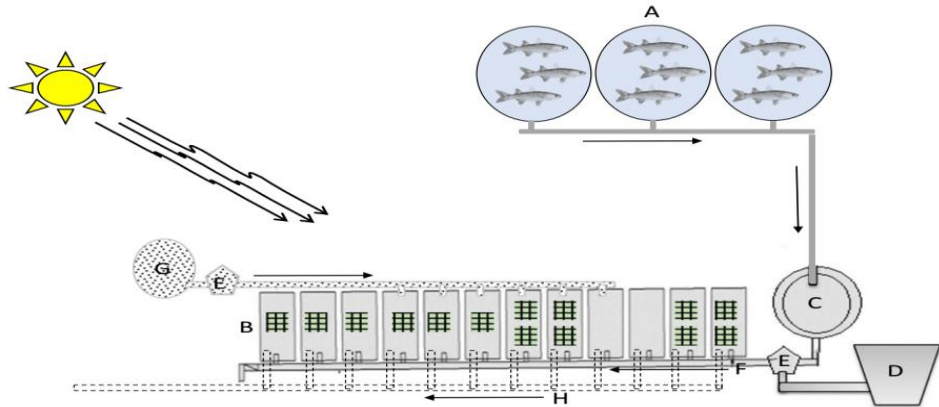
גידול מזון טבעי במזקוזם אפשרי ולא יקר ומצריך קיום של משטחי גידול החשופים לשימש ומים המכילים נוטריינטים. המרבד המתפתח על המשטחים נקרא פריפוטון והיה נושא למחקר רב שנים והישגים בעולם ובישראל, כולל חוקרים בעבודה זו (Milstein 2012). פריפוטון מכיל אצות חד/רב-תאיות, חיידקים, חד-תאיים ובע"ח זעירים (Azim et al., 2005) המתפתחים בהתאם למשאבים הנתונים (נוטריינטים) ובכך מראים ניצול מגוון תצורות של חנקן וזרחן בתהליכי הטמעה ודניטריפיקציה (Axler and Reuter, 1996). התפתחות של פריפוטון בבריכות דגים תורמת לטיפול בנוטריינטים, העשרה בחמצן וכן כמזון טבעי לאורגניזם בבריכות (Milstein et al., 2008). לגידולו, פריפוטון דורש רק אור, מצע התיישבות ואספקת נוטריינטים ואינו מצריך תוספת אוורור. על כן, יכול להוות ביופילטר זול יחסית לטיפול בנוטריינטים מבריכות דגים (Crab et al., 2007). למרות ידע רב הקיים על מערכות גידול בשימוש בפריפוטון במים מתוקים, מידע על ביצועי ביופילטר שכזה לטיפול במי פלט מחקלאות ימית ועל השימוש בפריפוטון להזנת דגיגי מי ים כמעט ולא מצוי. בשנה זו ביקשנו לאפיין גורמים מרכזיים המשפיעים על יעילות הסרת נוטריינטים בביופילטר פריפוטון, לפתח פרוטוקול לגידול פריפוטון בעל הרכב כימי מספק לטובת הזנה (באמצעות שימוש בסיליקה) וניסוי הזנת דגיגים בשילוב בפריפוטון ימי.

שיטות וחומרים

ביופילטר מסוג פריפוטון בסקלה קטנה (שנים א + ב)

סכימה כללית של מערכת ביופילטר פריפוטון ומרכיביה מתוארים באיור 1. המערכת כללה 12 מכלי גידול בנפח 110L כ"א אשר אוכלסו ברשתות פלסטיק לבנות (קוטר חור 2.5mm), המוצעות כמצע יעיל להתפתחות פריפוטון (Milstein et al., 2010). הרשתות הונחו במנה אנכי מפני המים לעומק. מידות כל רשת היו 1.5(w) x 20(l) cm והשטה הכולל היה 0.192m (יחס 1:1 עם שטח פני המכל). הביופילטרים הוזנו במי פלט ממערכת חצי אינטנסיבית לגידול דגי בורי (*Mugil cephalus*) במליחות 4.065%. מי הפלט הועשרו באמוניה וזרחן באמצעות משאבת דישה לקבלת ריכוזים קבועים יחסית של 2.5 mg L^{-1} אמוניה (TAN) ו- 0.5 mg L^{-1} זרחן ($\text{PO}_4\text{-P}$) בכניסה למיכלים. העשרה בסיליקה של חלק מהמכלים נעשתה על ידי מערכת טפטוף נפרדת ממכל העשרה המכיל תמיסה מלאכותית. ריכוזי סיליקה שנבדקו היו – ללא סיליקה ו- 0.5 ו- 2.5 mg L^{-1} . קצב הזרמת מי הפלט דרך

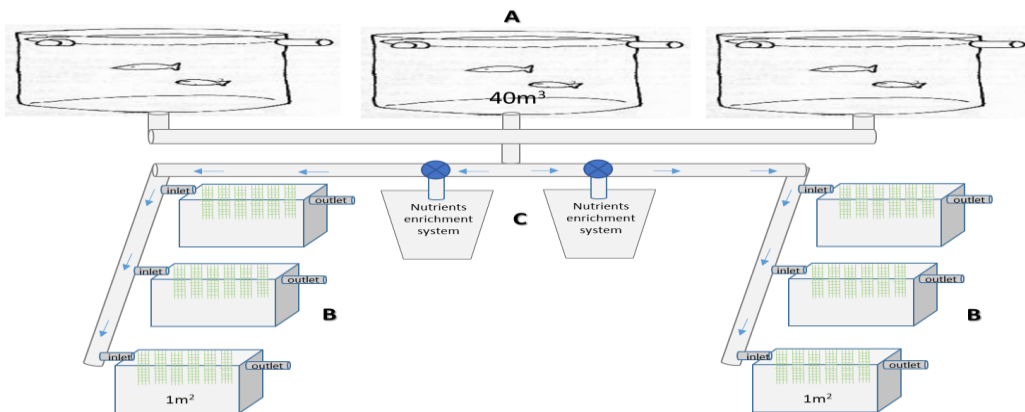
המיכלים כוונו על 45 L h^{-1} למיכל אך נע במהלך הניסויים בין 20 ל- 60 L h^{-1} . פריפוטון התפתח על הרשתות ספונגית ללא אכלוס מראש.



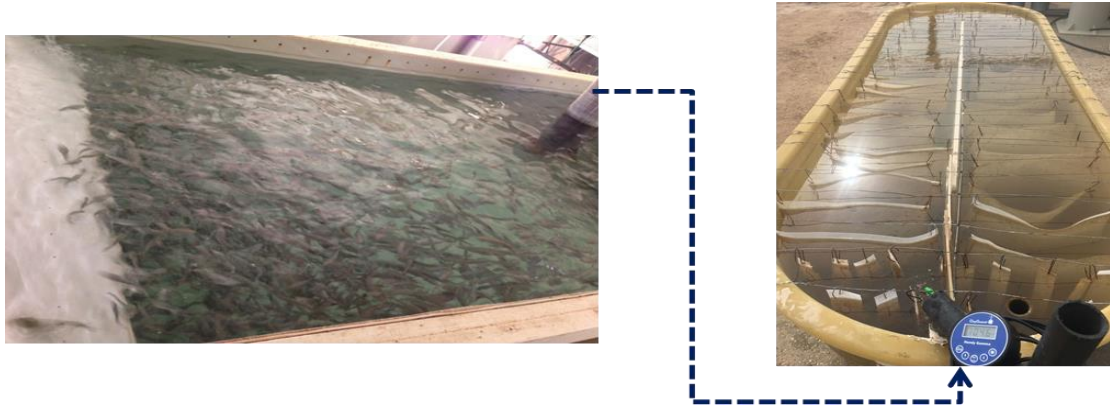
איור 1. סכימה כללית של מערכת הגידול/ביופילטרים המורכבת מבריכות הדגים (A); מיכלי גידול פריפוטון (B); מסנן גס (C); מיכל העשרת נוטריינטים ומשאבת מינון (D - E); ומיכל העשרה בסיליקה.

גמלון של מערכות ביופילטר פריפוטון לקנ"מ גדול יותר (up-scaling) (שנה ג)

נבחנו שתי מערכות בסקלה גדולה יותר. מערכת אחת כללה 6 יחידות טיפול של ביופילטר פריפוטון במיכלים מסוג דולב בנפח של 700L ובגודל של 1m^2 כ"א אשר הוזנו במי פלט של מערכת חצי אינטנסיבית המתוארת לעיל (איור 2). במערך זה 3 מהביופילטרים הוזנו במי פלט בעלי רמת אמוניה נמוכה וניטראט גבוה בעוד הגותרים הוזנו במי פלט המיכלים אמוניה וניטראט ברמה גבוהה (2.5 mg L^{-1}) ודומה. המערכות אוכלסו ברשתות דומות בצפיפות ביחס 2:1 בין שטח פני המכל לשטח הפנים של הסובסטר/רשתות, בהתאמה. לאחר שבועיים של התפתחות הביומסה נמדדו במהלך 30 שעות ובפרקי זמן כל 6 שעות ריכוזי הנוטריינטים בכניסה וביציאה מכל יחידת טיפול. מערכת נוספת כללה ביופילטר בודד במיכל במבנה אליפטי בגודל 3m^2 אשר הוצמד למערכת אינטנסיבית לגידול דגי דניס (*Sparus aurata*) בבריכה בנפח 4m^2 (איור 3) ביומסת הדגים במערכת הייתה 200 kg , קרי צפיפות של 50 kg m^{-3} . הביופילטר אוכלס בסובסטר/רשתות (רשתות) בשטח פנים כולל של 5m^2 .



איור 2. סכימה כללית של מערכת מגומלנת (up-scaled) של ביופילטר פריפוטון לטיפול במי פלט. המערכת מורכבת מבריכות הדגים (A); מיכלי גידול פריפוטון (B); ושתי מערכות העשרה בנוטריינטים של מי הפלט (C) לקבלת רמות שונות של אמוניה בכניסה לביופילטרים.



איור 3. תמונה של מערכת מגומלנת (up-scaled) של ביופילטר פריפיתון לטיפול במי פלט בנפח ביופילטר של 3m^3 . המערכת מורכבת מבריקה לגידול אינטנסיבי של דגי דניס בצפיפות של 50 kg m^{-3} הדגים (שמאל) וביופילטר מסוג פריפיתון (ימין) המוזן ישירות ממכל גידול הדגים.

דיגום ושיטות מדידה

דיגום הניסוי במערך הביופילטרים הקטנים נערך אחת לשבוע ביום ושעה קבועים. במערך הטיפול המגומלן בוצעו הדיגומים והמדידות לאחר שבועיים של גידול הפריפיתון ולמשך 30 שעות רצופות תוך דיגום מים אחת ל-6 שעות ודיגומי ביומסה בתום הניסוי.

ספיקת המים נמדדה בברזי היציאה מכל מיכל. טמפרטורת המים וחמצן מומס (DO) נמדדו בשימוש באלקטרודה ניידת (OxyGuard), pH נמדד באלקטרודה קבועה. ריכוזי נוטריינטים נמדדו בחלקי המערכת השונים ובכניסה וביציאה מכל ביופילטר. הדוגמאות הועברו לאחר סינון לאנליזה באוטואנלייזר מדגם Skalar של רמות אמוניה (TAN), ניטריט, ניטראט וזרחן על פי שיטות מוצעות במי ים. חנקן וזרחן כללי (Total N/TotalP) נמדדו במכשיר בדוגמאות לא מסוננות.

קצבי ההסרה ויעילות ההסרה של נוטריינטים חושבו על פי הנוסחאות:

$$\text{Removal Rate (mg m}^{-2} \text{ hour}^{-1}) = (C_i - C_o) * FR / S$$

$$\text{Removal Efficiency (\%)} = (C_i - C_o) / C_i * 100$$

כאשר C_i = ריכוז בכניסה למיכל (mg L^{-1}); C_o = ריכוז ביציאה מהמיכל (mg L^{-1}); FR = קצב הזרימה של המים (ספיקה) דרך המיכל (L h^{-1}); ו- S = שטח המצע לגידול במיכל.

קצב ההסרה השעתי חושב והוכפל ב-12 על מנת לאמוד את קצב ההסרה היומי בשעות האור. דיגום ביומסה התבסס על פרוטוקול מוצע (Stevenson et al., 1999) עם מודיפיקציות לפריפיתון ימי הכוללות שטיפה עדינה של המלחים ושימוש במדחס אוויר להורדת הפריפיתון הצמוד לרשתות. רצועות הרשת שנדגמו הוחלפו בחדשות לשמירה על שטח קבוע של מצע במיכל. גידול בפריפיתון נמדד באמצעות אנליזות משקל יבש (DW) ומשקל יבש ללא אפר (AFDW) לאחר ייבוש ב- 100°C ושריפה ב- 550°C , על פי פרוטוקול (APHA, 1995). קצב גידול

יומי של פריפיתון (Specific growth rate - SGR) חושב על ידי שימוש בנוסחה של Rosenberg et al. (1984):

$$\text{SGR (\%)} = 100 \times [\ln (W_t / W_0)] / t$$

כאשר W_t (g AFDW) = ביומסה ביום דיגום נתון; W_0 = הביומסה ביום הדיגום הקודם; ו- t = מספר הימים בין שני הדיגומים.

ההרכב הביוכימי של הביומסה נמדד כמותית על ידי אנליזות חלבון (Jones, 1931), שומן (Folch et al., 1957) וקרבוהידרטים (Dubois et al., 1956).

ניסויי הזנה של דגיגי קיפון (*Mugil cephalus*) ודניס (*Sparus aurata*) עם שילוב פריפיטון

בניסוי ראשון של הזנת דגיגי קיפון בפריפיטון נבדקה החלפה של 25% ו-40% (כחומר יבש) של מזון מסחרי מכופתת על ידי פריפיטון שגודל על מי הפלט. בשיעור החלפה של 40% מהמזון המסחרי נבחנו שני סוגי פריפיטון שגדל על מי פלט ללא ועם העשרה של מי הפלט בסיליקה. כבקורת הוזנו הדגיגים במזון מסחרי בלבד (100%). כל טיפול נעשה בארבע חזרות באקווריומים בנפח 65 L כ"א (איור 4). בתחילת הניסוי הוכנסו לכל אקווריום 37 דגיגים במשקל התחלתי של 2 g. הדגים הוזנו בדיאטות השונות (עם וללא החלפה של פריפיטון ברמות שונות) בתחשיב כמות מזון של 2% ממשקל גוף ליום.

ניסוי דומה על דגיגי קיפון במשקל התחלתי דומה נערך בשלב הגמלון בו גודלו הדגים במערכת גידול במיכלים בבריכה בנפח 100 מ"ק. בשלב זה, נבדקה החלפה של 25% מהמזון המסחרי על ידי פריפיטון המוגש טרי על רשתות לעומת מזון מסחרי. מזון מסחרי של דגיגי קיפון בניסויים הכיל 35% חלבון (crude protein) ו-15.8% ליפידים (crude fats). פריפיטון שהחליף את המזון המסחרי הכיל 36.7% חלבון ו-1.5% ליפידים.

ניסויי הזנת דגיגי דניס בפריפיטון התבצע במיכלים קוניים בנפח עבודה של 150 L בשימוש בדגיגים במשקל התחלתי של כ-10 גרם. בניסוי זה שיעור החלפה על ידי פריפיטון עמד על 12.5% ו-25%.

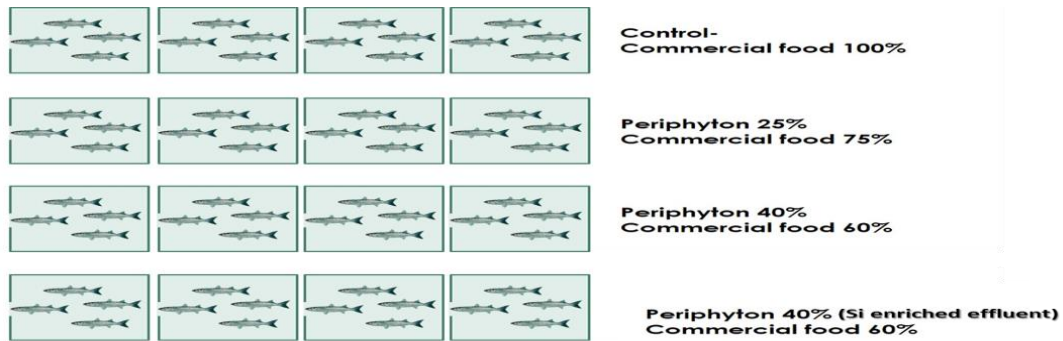
כל הפריפיטון לטובת ניסויי ההזנה בנפח קטן יותר גודל על מי פלט ממערכת חצי אינטנסיבית כמתואר לעיל בביופילטרים ייעודיים (דולבים בנפח 700 L כ"א - לא מוצג). הפריפיטון הוגש לדגים אחת ליומיים על ידי הכנסת רשתות גידול עם ביומסת פריפיטון עליהן על פי התחשיב של כמות חומר יבש הנדרש להשלמה – קרי זה שהופחת ממרכיב המזון המסחרי. גודל הרשת הנדרש נקבע על פי מדידות ביומסה של פריפיטון לשטח רשת. אחת לשלושה-ארבעה שבועות נעשתה שקילה של הדגים ועדכון טבלת ההזנה בהתאם לשינויים.

מתוצאות הניסוי חושבו אחוז שרידות הדגים בכל אחד מהטיפולים וכן קצב הגידול הספציפי (SGR=specific growth rate) של הדגים על פי הנוסחה:

$$SGR = 100 \times [\ln (W_T/W_0)] / t$$

כאשר W_T = ביומסה סופית (גרם); W_0 = ביומסה התחלתית (גרם) ו- t = משך הזמן בין שני הפרמטרים.

גמלון של ניסוי הזנה נעשה בבריכות גידול בנפח 100 מ"ק. לבריכה אחת הוכנסו רשתות מצע לטובת התפתחות של פריפיטון ולטובת זאת גם הועשרה הבריכה טרם הכנסת הדגיגים במי פלט ממערכת אינטנסיבית לגידול דגים (איור 5). לאחר 3 שבועות כאשר הרשתות הראו התפתחות יפה של ביומסת פריפיטון הוכנסו לבריכה דגיגי הקיפון (*Mugil cephalus*) במשקל התחלתי של כ-2 גרם. בריכה דומה שימשה כביקורת אליה הוכנסו דגיגים ללא תהליך מקדים של גידול פריפיטון על מצע התיישבות (ללא רשתות פלסטיק).



איור 4. סכימה כללית של מערך ניסויי הזנה של דגיגי בורי (*Mugil cephalus*) בדיאטות שונות עם וללא החלפת מזון מסחרי בפריפיטון ברמות שונות של החלפה. כל טיפול נעשה בארבע חזרות. נפח המיכלים השתנה בין המערכות בניסויי ההזנה הראשוניים (65L) למערכת המגומלנת ($1m^3$). השיפולים המתוארים באיור רלוונטיים לניסוי ההזנה הראשוניים במערכות בנפח קטן יותר. ניסוי הזנה של דגיגי דניס (*Sparus aurata*) בשימוש בפריפיטון התבצע במערך ניסוי דומה עם שיעורי החלפה של 12.5% ו-25%.



איור 5. בריכות גידול דגיגים בנוכחות פריפיטון – שלב גמלון. בריכת הגידול אוכלסה ברשתות פלסטיק כמצע התיישבות וגידול של הפריפיטון (תמונות עליונות) טרם הכנסת דגיגים הזונה הבריכה במי פלט ממערכת אינטנסיבית לחקלאות ימית לטובת אספקת נוטריינטים להתפתחות הביומסה. התפתחות ביומסה על הרשתות בתמונות התחתונות.

ניתוחים סטטיסטיים

ניתוחים סטטיסטיים של התוצאות נעשו בשימוש בתוכנת STATISTICA 8. השפעות משתנים כגון העשרה בסיליקה נעשו באמצעות מבחן ANOVA. קיום של הבדלים משמעותיים נותחו במבחן (P Tukey $value < 0.05$). מודלים לרגרסיה פולינומיאלית רבת משתנים שימשו להצגת קורלציה בין גידול בביומסה, משך

השהייה של מי הפלט במיכלים ויעילות ההסרה של TAN ו-DIN. תנובה יומית של פריפיטון והסרת נוטריינטים פר ביומסה מוצעים על פי מקדמי הרגרסיה של משוואות הקורלציה בין מדדים אלו. נתונים מספריים ואחוזים עברו טרנספורמציות log ו- arcsine, בהתאמה, לטובת נרמול לניתוח הסטטיסטי.

תוצאות

ביצועי פריפיטון לשימוש כביופילטר לטיפול במי פלט (שנים 1-2)

ביצועי פריפיטון מבחינת גידול והסרת נוטריינטים נבדקו ביחידות בטיפול השונות בסקלה קטנה (110L). נעשה מעקב שבועי אחר ביצועי הפריפיטון בעונות שונות תוך בחינה של השפעה של: מנח וצפיפות הסובסטרט והשפעה של טמפרטורה בעונות השונות על ביצועי הגדילה והסרת נוטריינטים. כן נבחנו ההשפעה של העשרת מי הפלט בסליקה על ביצועי הפריפיטון ועל ההרכב הביוכימי של הביומסה. טבלה 1 מסכמת את הניסויים שבוצעו במערכות הקטנות.

בניסוי ביחידות הטיפול הגדולות נבחנו יעילות יחידת הטיפול בהסרת שני צורוני חנקן אמוניה וניטראט ברמת נמוכה וגבוהה של אמוניה במי הפלט וכן נבחנו הסרת זרחן על ידי הפריפיטון.

Experiment	Start date	Duration (days)	Studied Parameters	Effluent flow rate (L h ⁻¹)	Water temperature (°C)	TAN inlet concentration (mg L ⁻¹)	PO ₄ inlet concentration (mg L ⁻¹)	DIN inlet concentration (mg L ⁻¹)
1	Spring	35	Substrate orientation ¹ silica enrichment (low) ³	29.4 (± 9.1)	28.9 (±1.4)	2.35 (±0.95)	0.33 (±0.27)	2.42 (±1.2)
2	Summer	16	Substrate orientation ¹ silica enrichment (low) ³	37.4 (± 3.6)	33.3 (±2.1)	3.97 (±0.2)	0.96 (±0.15)	4.00 (±0.2)
3	Autumn	9	Substrate area ² silica enrichment (low) ³	60.0 (±20.1)	30.2 (±0.5)	3.51 (± 0.26)	0.54 (± 0.05)	3.61 (± 0.33)
4	Autumn	49	Substrate area ² silica enrichment (low) ³	43.3 (±18.4)	27.1 (±1.2)	2.60 (±0.37)	0.6 (±0.08)	2.82 (±0.29)
5	Spring	35	Substrate area ² silica enrichment (high) ⁴	53.1 (±19.2)	28.3 (±1.8)	1.97 (±0.25)	0.45 (±0.07)	2.11 (±0.26)

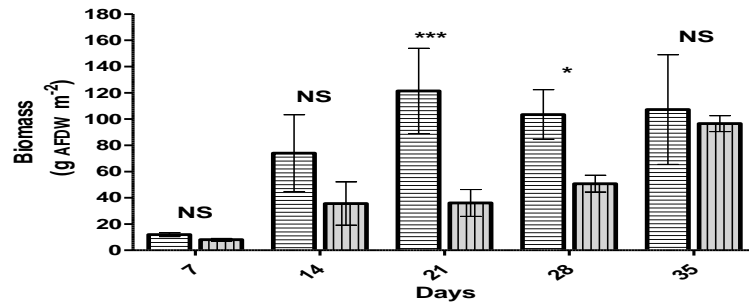
טבלה 1. ריכוז נתוני הניסויים השונים שנעשו על ביופילטר פריפיטון בקנ"מ קטן (110 L) כולל עונת הניסוי, משך הניסוי, הפרמטרים שנבדקה השפעתם ונתוני זרימת מים ונוטריינטים.

מנח וצפיפות סובסטרט:

השפעת המנח נבדקה בניסוי במשך של 35 ימים באביב. ביומסת הפריפיטון כ- DW ו- AFDW היתה גבוהה יותר באופן מובהק במנח האופקי לעומת מנח אנכי ($p < 0.01$). הבדל משמעותי ביותר נמדד ביום 21 עם 121 לעומת 36 g AFDW m⁻² במנח אופקי לעומת אנכי, בהתאמה (איור 5). לא אובחנה השפעה משמעותית של מנח הרשת על הסרת אמוניה על ידי פריפיטון ($p = 0.07$) (טבלה 2).

השפעת צפיפות הרשתות לגידול פריפיטון במיכל נבחנו במשך 49 ימים בעונת הסתיו. הכפלה של כמות הרשתות במיכלים והעלאת הצפיפות מיחס של 1:1 ל- 2:1 בין שטח פני מכל:שטח פנים סובסטרט, בהתאמה, לא הראתה השפעה על הגידול פר יחידת שטח של סובסטרט ($p = 0.14$, טבלה 2). קרי, הביומסה הכוללת במכל עם צפיפות רשתות כפולה הוכפלה בקירוב. ביומסה גבוהה יותר במכלים עם צפיפות סובסטרט גבוהה יותר הביאה לשיפור משמעותי ($p < 0.001$) של יעילות ההסרה של TAN במיכלים אלו (טבלה 2). עם זאת, לאחר 42 יום הגיעה יעילות ההסרה של TAN בשני הטיפולים ל- 80% (איור 6). השפעה משמעותית נמצאה לשני הפרמטרים - משך הגידול ושטח הסובסטרט במבחן מסוג ANOVA cross effect ($p < 0.001$, area*time). מבחן מסוג

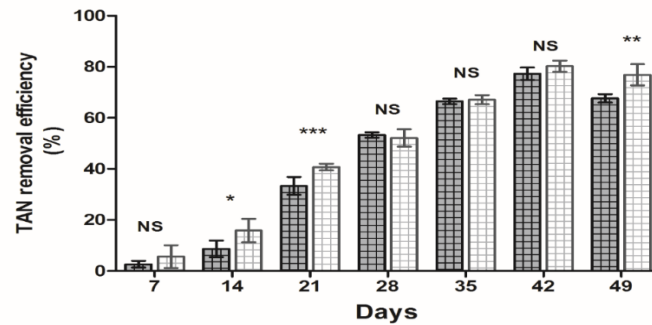
Tukey's post-hoc אבחן השפעה משמעותית של צפיפות הסובסטרט על יעילות הסרת TAN לטובת מיכלים בעלי צפיפות גבוהה יותר של סובסטרט בימים 14, 21 ו-49.



איור 5. השפעת מנח הסובסטרט בביופילטר, אופקי (□) או אנכי (▨), על ביומסת פריפיון (כ- AFDW) פר יחידת שטח של סובסטרט/רשת. התוצאות הן ממוצע. N=3. NS= not significant (* P<0.05, *** P<0.001).

Variation source	df	MS	F	P	df	MS	F	P	df	MS	F	P	
Substrate orientation	DW				AFDW				TAN removal efficiency				
	Position	1	0.69	77.49	<0.001	1	0.86	42.62	<0.01	1	429	5.74	0.07
	Time	4	1.02	62.95	<0.001	4	1.06	31.76	<0.001	3	708	7.05	<0.01
	Orientation *Time	4	0.04	2.82	0.06	4	0.03	0.97	0.45	3	387	3.84	<0.05
Error	16	0.01			16	0.03			12	100			
Substrate area	Area	1	0.019	0.51	10.5	1	50.10	2.83	0.14	1	0.06	22.7	<0.001
	Time	6	0.77	16.47	10.00<	6	0.94	20.30	<0.001	6	1.12	1039	<0.001
	Area *Time	6	0.016	0.34	10.9	6	0.005	0.12	0.99	6	0.01	9.23	<0.001
	Error	36	0.047			36	0.046			48	20.00		

טבלה 2: ניתוח השפעת מנח סובסטרט, זמן הגידול וצפיפות הסובסטרט על גידול ביומסה של פריפיון ועל יעילות ההסרה של אמוניה.

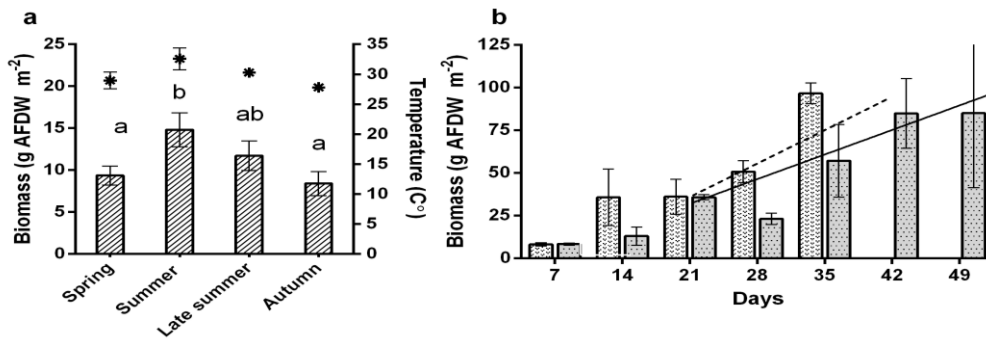


איור 6. השפעת צפיפות הסובסטרט על יעילות הסרה של TAN בביופילטר פריפיון. רשתות פלסטיק הונחו אנכית כסובסטרט ביחס 1:1 (▨) ו-2:1 (□) בין שטח פנים מיכל:שטח פנים סובסטרט, בהתאמה. התוצאות הן ממוצע. N=3. NS= not significant (* P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001).

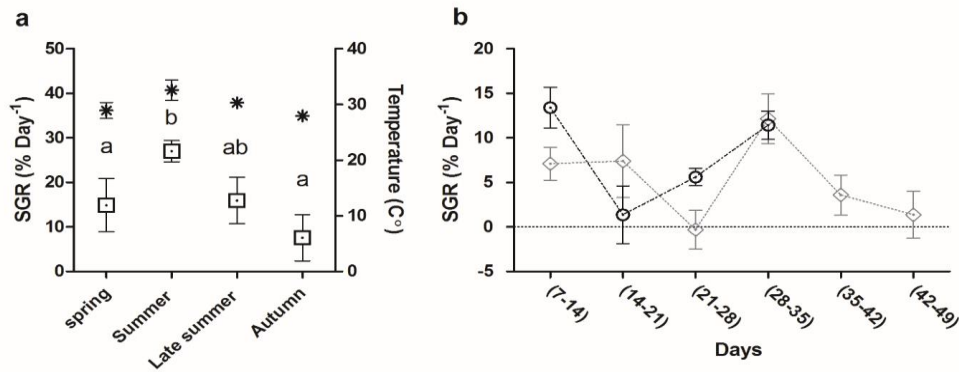
עונתיות

פריפיון גודל בהצלחה על מי פלט מחקלאות ימית בעונות שונות לאורך השנה בטמפרטורת מים בין 24 – 36°C. ביומסת הפריפיון כ- AFDW עלתה במהלך משך הגידול בכל העונות. לאחר שבוע, ביומסת הפריפיון הגבוהה ביותר של 13 g AFDW m⁻² (פר יחידת שטח של סובסטרט/רשת) נמדדה בקיץ, משמעותית גבוהה יותר מ- 9.3

ו- $7.8 \text{ g AFDW m}^{-2}$ שנמדדו לאחר שבוע באביב ובסתיו, בהתאמה (איור 7). בהשוואה בין תקופות גידול ממושכות יותר של פריפיתון באביב ובסתיו (35 ו-49 יום, בהתאמה), לא נמצא הבדל משמעותי בביומסה בשלושת השבועות הראשונים עם כ- 32 g AFDW m^{-2} לאחר 21 יום. לאחר מכן, גידול גבוה יותר נמדד באביב עם ביומסה של $96.5 \text{ g AFDW m}^{-2}$ לאחר 35 יום, גבוה מהביומסה שנמדדה לאחר 49 יום בסתיו (איור 7). קצב הייצור היומי של פריפיתון היה $2.4 \text{ g AFDW m}^{-2}$ ($r^2=0.71, n=30, p<0.0001$) באביב לעומת רק $1.9 \text{ g AFDW m}^{-2}$ ($r^2=0.70, n=40, p<0.0001$) (איור 8). קצב הגידול היומי (SGR) במשך השבועיים הראשונים היה גבוה משמעותית בקיץ עם גידול של 27% ליום בביומסה (-AFDW) ונמוך ביותר בסתיו עם גידול של 7.1% ליום (איור 8) במשך אותה תקופה. נמצאה השתנות במדד זה לאורך משך הגידול (איור 8) בניסויים הארוכים יותר באביב ובסתיו. באביב קצב הגידול הגבוה ביותר של $13.4\% \text{ d}^{-1}$ נמדד בין השבוע הראשון לשני וערך מעט נמוך יותר בשבוע החמישי. בסתיו נמדד קצב גידול יומי דומה ($7.1-7.4\% \text{ d}^{-1}$) בשלושת השבועות הראשונים עם SGR הגבוה ביותר בשבוע החמישי של הגידול שלווה בירידה מיום 35 ואילך (איור 8).



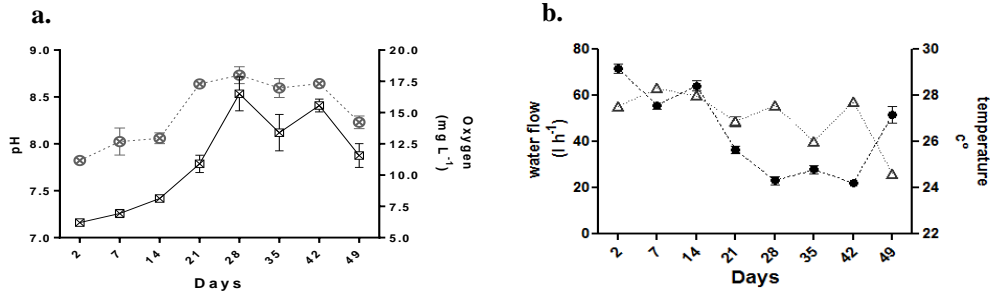
איור 7. השפעת העונתיות והטמפרטורה (*) על ייצור פריפיתון על שטח סובסטרט נתון בביופילטר בשבוע הראשון של עונות שונות (a) ובמהלך תקופת ההרצה של הביופילטר (b) באביב (⊠) ובסתיו (▣). התוצאות הן ממוצע. N=3.



איור 8. השפעת העונתיות והטמפרטורה (*) על קצב הגידול היומי (SGR % d⁻¹) של פריפיתון בשבוע השני של גידולו בביופילטר בעונות שונות (a) ובמשך תקופת ההרצה של הביופילטר (b) באביב (⊙) ובסתיו (⊕). התוצאות הן ממוצע. N=3.

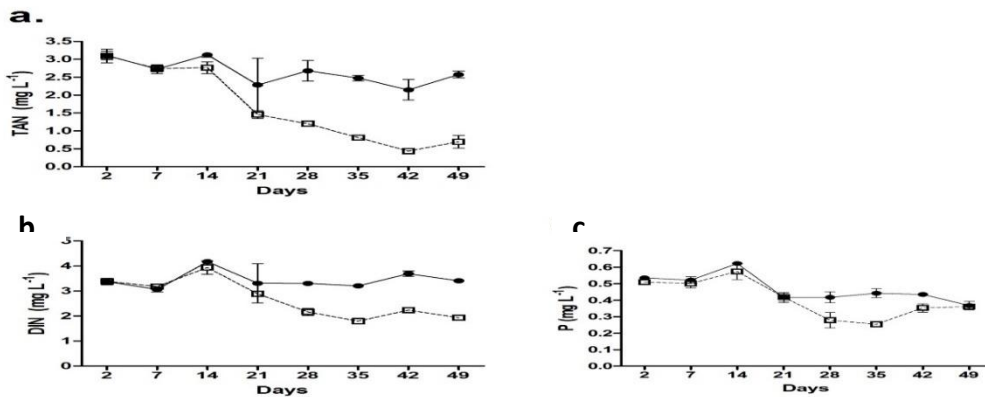
איכות מים וביצועי הסרת נוטריינטים על ידי ביופילטר פריפיתון (שנים 1-2)

במהלך הרצות מערכת הטיפול במי פלט באמצעות פריפיתון נלקחו דוגמאות מים על בסיס שבועי ובשעה קבועה לטובת אנליזות נוטריינטים בכניסה וביציאה מהביופילטרים. מתוצאות הרצת המערכת בסתיו, כדוגמא, פריפיתון הראה תרומה להעלאת חומציות מי הפלט והעשרתם בחמצן במהלך תקופת הגידול, זאת גם כאשר חלו שינויים בטמפרטורת המים בביופילטר ובקצב הזרמת מי הפלט דרך הביופילטרים במהלך התקופה (איור 9).



איור 9. שינויים ב: a. pH (⊗) וחמצן (⊠) וב- b. קצב זרימת המים דרך מיכלי הפריפטון (Δ) וטמפרטורת המים (●). הערכים הינם ממוצע, n=6.

במהלך תקופת הגידול נמדדו גם הבדלים בין ריכוזי נוטריינטים שונים בכניסה וביציאה מהמכלים (איור 10). הסרה של אמוניה (TAN) נמדדה החל מיום 7 עם גידול בכמות TAN המוסרת לאורך המשך הגידול. בהשוואת ריכוזי חנקן מומס (DIN = TAN+NO_x) נראו ריכוזים נמוכים יותר ביציאה מהמכלים מיום 7 עם הבדלים גדולים יותר בין הכניסה ליציאה עם המשך הגידול. גם ריכוזי זרחן (PO₄-P) ביציאה מהמכלים היו נמוכים יותר מיום 7 עם שינויים משמעותיים יותר בין הכניסה ליציאה מיום 28 ואילך עד יום 49 בו לא היה שינוי כמעט בין הריכוזים בשתי הנקודות.



איור 10. שינויים שבועיים בריכוזי TAN (a), DIN (b), ו-PO₄-P (c) בכניסה (●) וביציאה (⊠) ממכלי הפריפטון לאורך הגידול בעונת הסתיו. התוצאות הן ממוצע, n=3.

לאורך תקופת ההפעלה של הביופילטרים קצבי ההסרה היומיים של TAN על ידי פריפטון פר יחידת שטח של סובסטרט נעו בין 0.1 – 1.2 g N m⁻² d⁻¹ ושל DIN בין 0.1 – 1.3 g N m⁻² d⁻¹. נמצאה קורלציה בין העלייה בביומסה לאורך תקופת הגידול לבין קצבי הסרה של TAN ו-DIN בביופילטרים (איור 11) עם גרסיה לא ליניארית הנתמכת במשוואת רוויה דומה לקצבי הסרה של שתי פרמטרים אלו (p=0.4):

$$N \text{ (TAN) removal rate (mg N m}^{-2} \text{ day}^{-1}) = -1.0E-04 * \{BM(s)\}^2 + 0.021 * BM(s) + 0.016$$

(r² = 0.75, n = 76, p < 0.001);

כאשר BM = ביומסה נתונה על הסובסטרט כ- g AFDW m⁻²

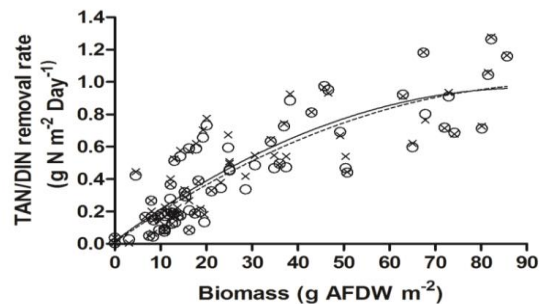
חישובי יעילות ההסרה של נוטריינטים הראו הסרה מקסימלית של 79% של TAN ו-44% של DIN ביום 42 ו-35 של הגידול, בהתאמה. הסרה מקסימלית של 40% מהזרחן נמדדה ביום 35. מאנליזה פולינומיאלית מרובת משתנים של התוצאות יוצר מודל המציג את ההשפעה של שני גורמים: כמות הביומסה ומשך זמן השחייה של

נוטריינטים/מי הפלט בביופילטרים על יעילות ההסרה של TAN ו-DIN (איור 12). הקורלציות באנליזות מודל אלו מסבירות ב- 88% וב- 87% ($p < 0.001$) את ההשתנות ביעילות ההסרה של TAN ו-DIN, בהתאמה, כתוצאה משינויים בביומסה ומשך השהייה. המשוואות הפולינומיאליות הריבועיות הבאות הוצאו לאימוד יעילות ההסרה:

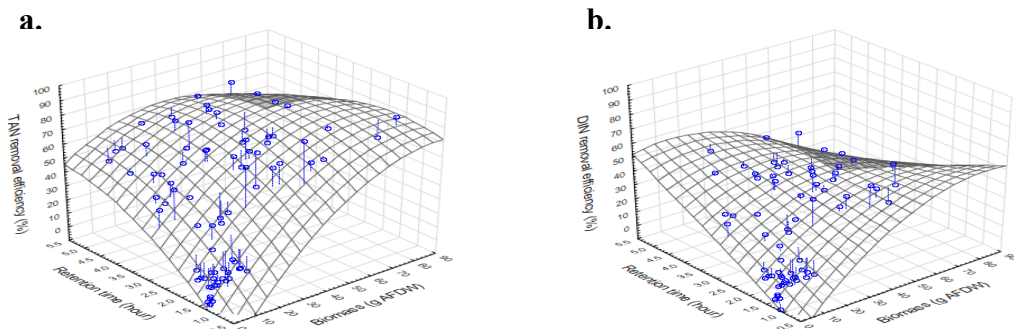
$$\text{TAN removal efficiency (\%)} = -47 + 2.4 * \text{BM} + 30 * \text{RT} - 0.01 * \text{BM}^2 - 0.2 * \text{BM} * \text{RT} - 2.5 * \text{RT}^2$$

$$\text{DIN removal efficiency (\%)} = -26.1 + 1.9 * \text{BM} + 15.6 * \text{RT} - 0.01 * \text{BM}^2 + 0.06 * \text{BM} * \text{RT}$$

כאשר BM = ביומסה נתונה במיכל (g AFDW) ו-RT = משך שהיית נוטריינטים (מים) במיכלים (h).
 לכמות הביומסה הייתה השפעה גדולה יותר על יעילות ההסרה של TAN לעומת השפעת משך השהייה עם מקדם קואפישיאנט b של 1.6 לעומת 1.2, בהתאמה. כך גם לגבי יעילות ההסרה של DIN עם מקדם קואפישיאנט b של 2.0 לכמות הביומסה לעומת 0.9 למשך השהייה. שימוש במודל הנ"ל לא היה יעיל להסבר יעילות ההסרה של פוספאט ($r^2 = 0.28$) ויכל להסביר רק 50% מההשתנות ביעילות ההסרה על פי נתוני ביומסה ומשך שהייה (לא מוצג).



איור 11. קצב ההסרה של TAN (o) ו-DIN (x) כפונקציה של עלייה בביומסה על שטח סובסטרנט נתון מתוך נתוני מדידות במשך 49 ימים בעונת הסתיו. קווי רגרסיה לא ליניארית (least-square) הותאמו לנתונים (קו שחור עבור TAN ומקווקו עבור DIN).



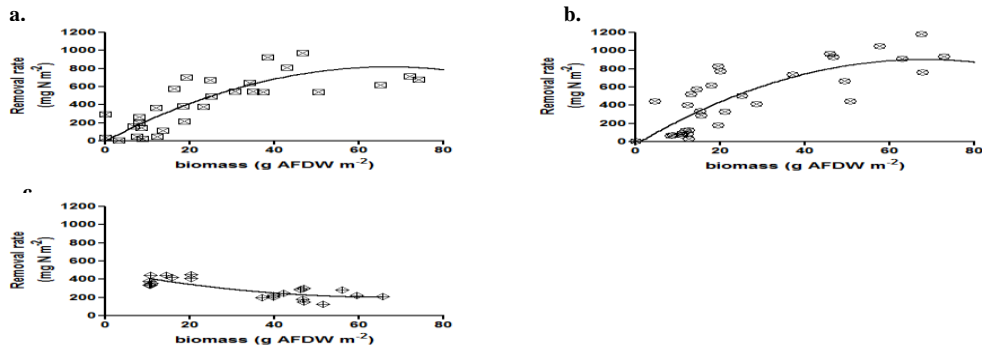
איור 12. מודל רגרסיה פולינומיאלית של יעילות ההסרה של TAN (a) ושל DIN (b) בביופילטרים כתלות בכמות הביומסה ובמשך השהייה של נוטריינטים. עקומות שטח ריבועיות הותאמו לנתונים להצגה גרפית.

העשרה בסליקה

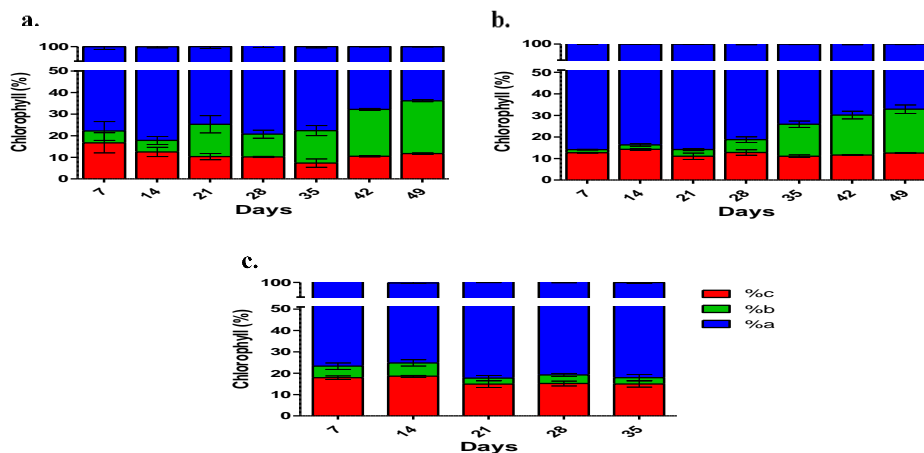
העשרת מי הפלט בסליקה השפיעה על ביצועי הפריפיון. סליקה סופקה למי הפלט באופן קבוע בשתי רמות: 0.5 ו-2.5 mg L⁻¹ ובטיפול הביקורת ללא העשרה. עלייה בגידול ביומסה נראתה בכל הטיפולים - ללא סליקה ועם סליקה בריכוזים השונים. עם זאת, בריכוז גבוה של סליקה העלייה בגידול הביומסה הייתה רק בשלושת השבועות הראשונים עם ביומסה דומה לאחר מכן (לא מוצג). בהשוואת הקורלציות בין כמות הביומסה לבין קצב ההסרה של TAN על ידי פריפיון (איור 13) נראה כי ללא סליקה ובריכוז נמוך של יסוד זה הקורלציה דומה עם

עלייה לינארית בקצב ההסרה עם העלייה בביומסה עד לערך של כ- $60 \text{ g (AFDW) m}^{-2}$ כאשר לאחר זאת קצב ההסרה נשאר סביב $0.8 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ או יורד מעט. בשימוש בסיליקה בריכוז גבוה מתקבלת תמונה שונה המראה קורלציה הפוכה עם קצב ההסרה הגבוה ביותר כאשר הביומסה נמוכה וקצב נמוך יותר כשהביומסה עולה (איור 12). עם זאת, קצב ההסרה של TAN בשימוש בסיליקה לא השתנה בצורה משמעותית לאורך הגידול בביומסה ועמד בין $0.12 - 0.45 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

בחנית פרופיל הכלורופילים בפריפטון שגודל על מי פלט עם וללא העשרה של סיליקה ובהעשרה ברמות שונות (איור 14) הראתה השפעה סיגניפיקנטית של ההעשרה בסיליקה על כלורופיל b ($p < 0.005$) עם דחייה של העליה בכלורופיל זה בשבועיים בהעשרת מי הפלט בריכוז הנמוך של סיליקה לעומת טיפול הביקורת. יתרה מכך, בהעשרת מי הפלט בריכוז גבוה תכולת כלורופיל b בפריפטון הייתה נמוכה מ- 2.5% במהלך כל תקופת הגידול (איור 13). השפעה סיגניפיקנטית דומה ($p < 0.005$) הייתה לסיליקה גל על כלורופיל c אשר תכולתו עלתה כאשר סיליקה מוספת למי הפלט בריכוז הגבוה.



איור 13. קורלציה בין גידול ביומסת פריפטון לבין קצב ההסרה של TAN בריכוזים שונים של סיליקה במי הפלט. ללא סיליקה (a) ועם סיליקה בריכוז 0.5 (b) ו- 2.5 mg L^{-1} (c).



איור 14. השפעת סיליקה בריכוזים שונים על פרופיל הכלורופילים בביומסת הפריפטון. הנתונים מוצגים כאחוז מתוך כלל תכולת הכלורופיל בפריפטון שנקצר בעונת הסתיו לאחר שהזון במי פלט ללא סיליקה (a), ובמי פלט עם ריכוז סיליקה של 0.5 mg L^{-1} (b) ושל 2.5 mg L^{-1} (c). התוצאות הינן ממוצע, $n=3$.

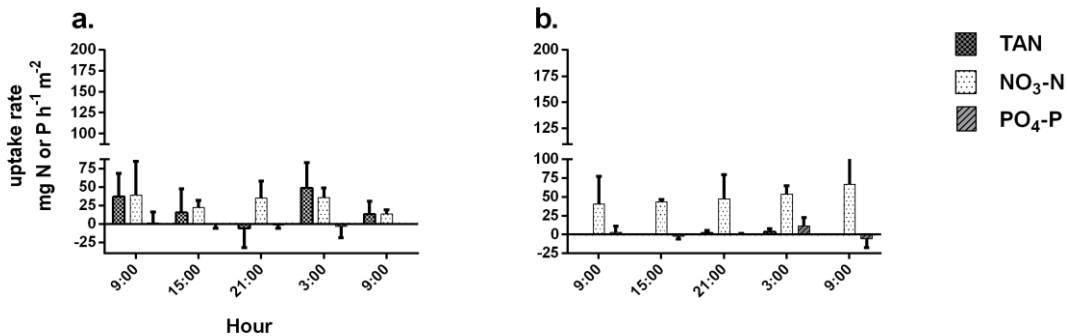
(של ביופילטר פריפטון לטיפול במי פלט (שנים ב + ג) up-scaling גמלון) ביצועי פריפטון להסרת נוטריינטים ממי פלט מחקלאות ימית נבחנו גם במערכת up-scaled בשטח נפח ביופילטר גבוהים יותר של 1 m^2 ו- 700 L , בהתאמה (איור 2). מערכת up-scaled נוספת שנבחנה הייתה בדמות ביופילטר בודד נפח של 3 m^3 שהוצמד למערכת גידול אינטנסיבית בנפח 5 m^3 (איור 3).

עומס הנוטריינטים השונים בכניסה וביציאה לביופילטרים שנחשפו לריכוזי אמוניה שונים במי הפלט ואחוז ההסרה המחושב בטיפולים אלו מוצגים בטבלה 3.

בבחינה של ביצועי הסרת נוטריינטים שונים על ידי פריפיטון במהלך היום בחשיפה למי פלט עשירים ועניים באמוניה נראה כי בקיום של שני צורוני החנקן במי הפלט ברמות שומות קצב ההסרה שלהם על ידי הפריפיטון דומה ללא ההעדפה משמעותית לצורון חנקן מסוים (איור 15). עם זאת, כאשר ריכוז אמוניה במי הפלט הופחת ל- 0.3 mg L^{-1} (עומס יומי של $0.16 \text{ g TAN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) קצב ההסרה של TAN היה נמוך משמעותית לעומת הסרת $\text{NO}_3\text{-N}$ (איור 15). יעילות הסרה של אמוניה כאשר זו קיימת בריכוז נמוך במי הפלט גדלה פי שתיים מ- 28% להסרה של 67% מה-TAN והסרת ניטראט וכלל החנקן ממי הפלט התייעלו פי ארבע עד להסרה של 63% מהניטראט ו- 60% מכלל החנקן (טבלה 3).

Treatment	TAN			$\text{NO}_3\text{-N}$			TN			$\text{PO}_4\text{-P}$		
	inlet ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	outlet ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	removal efficiency (%)	inlet ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	outlet ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	removal efficiency (%)	inlet ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	outlet ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	removal efficiency (%)	inlet ($\text{g P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	outlet ($\text{g P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	removal efficiency (%)
TAN-rich effluent	1.95 ± 1.56	1.44 ± 1.06	28.03 ± 18.41	4.96 ± 1.82	4.2 ± 1.54	15.32 ± 7.1	7.63 ± 2.85	6.2 ± 2.32	18.7 ± 7.7	0.91 ± 0.28	0.87 ± 0.2	2.99 ± 2.08
TAN-poor effluent	0.16 ± 0.06	0.06 ± 0.03	66.94 ± 14.56	2.26 ± 0.11	0.83 ± 0.26	63.20 ± 3.04	2.3 ± 0.9	0.90 ± 0.87	60.33 ± 26.04	0.77 ± 0.02	0.7 ± 0.03	9.21 ± 3.11

טבלה 3 עומס יומי של TAN, $\text{NO}_3\text{-N}$, total N (TN) ו- $\text{PO}_4\text{-P}$ בכניסה וביציאה מביופילטר פריפיטון שהוזן במי פלט בעלי תכולה גבוהה לעומת נמוכה של TAN.



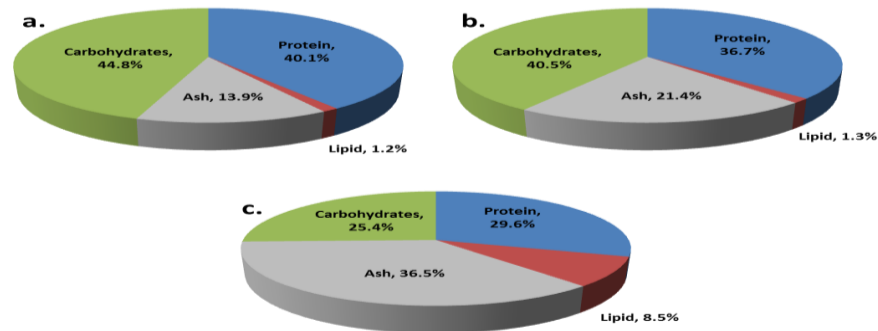
איור 15. ביצועי פריפיטון בהסרת אמוניה, ניטראט וזרחן ממי פלט לאורך שעות היממה בהינתן ריכוזי אמוניה גבוהים (a) או נמוכים (b) במי הפלט. ריכוזי ניטראט וזרחן במי הפלט היו קבועים.

תוצאות ראשוניות ממערכת ביופילטר מסוג פריפיטון בשקלה גבוהה אף יותר ואשר מצומדת למערכת אינטנסיובית לגידול דגי ים הראתה כי כבר לאחר כשבועיים של הזנת הביופילטר בנוטריינטים ממערכת הדגים נמדדת הסרה גבוהה של 60% מהאמוניה (כ- TAN) מהכניסה לביופילטר כאשר הריכוזים הממוצעים בכניסה וביציאה של הביופילטר עמדו על 1.5 ו- 0.6 mg L^{-1} , בהתאמה.

שימוש בפריפיטון להזנת דגיגים (שנים ב + ג)

הרכב ביוכימי של הפריפיטון

העשרה בסיליקה השפיעה משמעותית על ההרכב הביוכימי של הפריפטון (איור 16). כל סוגי הפריפטון הראו תכולת חלבון של מעל ל- 30% כאשר עם העלייה בריכוז הסיליקה במי הפלט נראתה ירידה באחוז הקרבוהידרטים וחלבון. העשרה בריכוז גבוה של סיליקה העלתה משמעותית את תכולת הליפידים בפריפטון ל- 9%. תכולת האפר בפריפטון שהועשר בסיליקה היה גבוה משמעותית עד ל- 36.5% ממשקל יבש של הביומסה בריכוז סיליקה הגבוה ביותר.

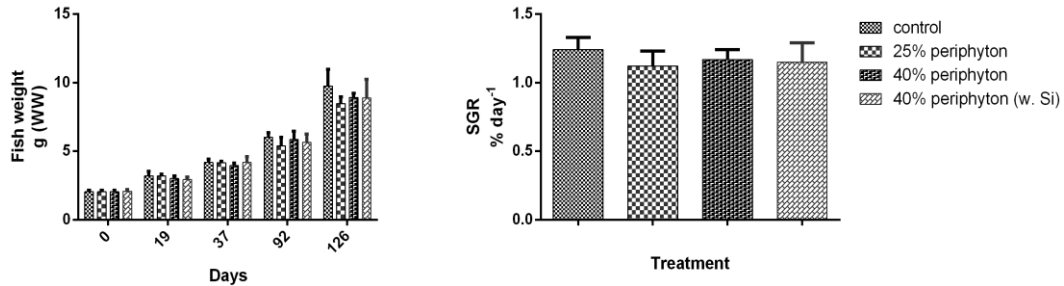


איור 16. השפעת העשרת מי הפלט בסיליקה על ההרכב הביוכימי של פריפטון. a. ללא סיליקה; b. עם סיליקה בריכוז 0.5 mg L^{-1} ; c. עם סיליקה בריכוז 2.5 mg L^{-1} .

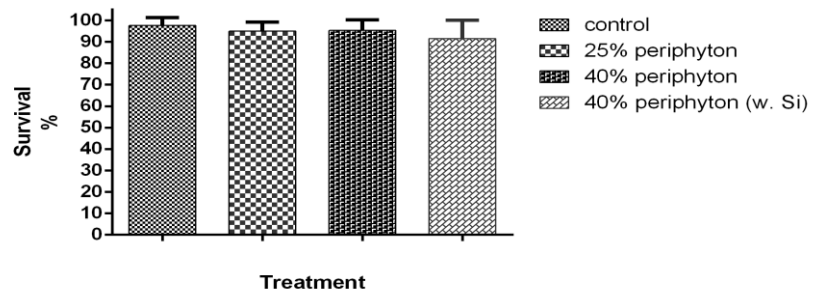
ניסויי הזנת דגיגים מי ים קיפון (*Mugil cephalus*) ודניס (*Sparus aurata*)

נבחנה החלפה של מרכיב מזון מסחרי בדיאטה של שני סוגי דגיגים מי ים באמצעות פריפטון המוגש טרי על גבי סובסטרט הגידול ואשר גודל על מי פלט מחקלאות ימית. בניסוי הראשון עם דגיגים קיפון (*Mugil cephalus*) כללו משטרי ההזנה השונים הפחתה של 25% ושל 40% ממרכיב המזון המסחרי (כופתיות כחומר יבש) והשלמת חלק זה על ידי הפריפטון. בהפחתה של 40% מהמזון המסחרי נבחנו שני סוגי פריפטון כזה ששגדל על מי פלט מועשרים בסיליקה ועל מי פלט ללא העשרה שכזו. במשך 18 שבועות הניסוי כל הדגים הקפצו לפחות פעמיים את גודלם ההתחלתי ממשקל התחלתי ממוצע של 2.05 g ללפחות 8.2 g ועד ל- 10.4 g (wet weight) עם SGR בין $1.1 - 1.25 \text{ d}^{-1}$ (איור 17). לא נמצא הבדל משמעותי במשקלי הדגים ובקצב הגידול היומי (SGR) בין הדיאטות השונות. שרידות הדגיגים בניסוי זה הייתה גבוהה מעל 90% ללא הבדל בין הטיפולים (איור 18) וללא מופעי תחלואה משמעותיים. בחינה של פרמטרי איכות כגון צבע הדגים לא הראתה הבדל בין הטיפולים (לא מוצג). הרכב ביוכימי של דגיגים קיפון בתום הניסוי לא הראה השפעה של סוג הדיאטה על ערכי חלבון (46% - 44.1%), ליפידים (34.6% - 32.5%), קרבוהידרטים (5.2% - 4.7%) ואפר (3.3% - 2.9%). בניסוי להזנת דגיגים דניס (*Sparus aurata*) שערך 93 ימים גדלו הדגים על מזון מסחרי או בהחלפה של 12.5% - 25% על ידי פריפטון. כל קבוצות הטיפול גדלו ממשקל התחלתי של כ- 10 גרם עד למשקל סופי של כ- 70 גרם. בהזנה בפריפטון בשיעור של 25% נמדדו ערכי גדילה מעט נמוכים יותר לעומת הטיפולים האחרים עם משקל סופי של $69.7(\pm 6)$ גרם ו-SGR של $2.38(\pm 0.4)$ ליום אם כי עבור שני הפרמטרים לא נמצא שוני מובהק בין הטיפולים השונים ($p < 0.05$). דגיגים דניס לא הראו הבדלים במופע ובצבע הגוף. גמלון של ניסוי הזנה נעשה בכריכות גידול בנפח 100 מ"ק (איור 17). לבריכה אחת הוכנסו רשתות מצע לטובת התפתחות של פריפטון ולטובת זאת גם הועשרה הבריכה טרם הכנסת הדגיגים במי פלט ממערכת אינטנסיבית לגידול דגים. לאחר 3 שבועות הרשתות הראו התפתחות יפה של ביומסת פריפטון והוכנסו דגיגים. ביצועי גדילה, שרידות והרכב ביוכימי של הדגיגים מוצגים בטבלה 4. בשימוש במצע לפריפטון בכריכות דגיגים קיפון הראו

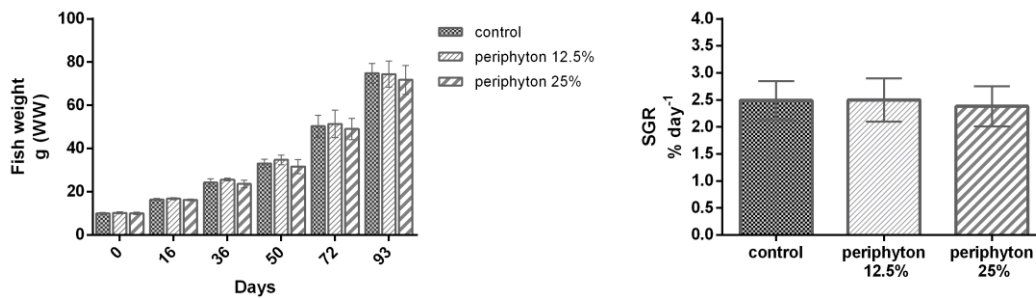
ביצועי שרידות וגדילה דומים לאלו שבטיפול הביקורת למרות ההפחתה בכמות המזון המסחרית עד לכדי שימוש רק ב 83% מכמות המזון שניתנה בטיפול הביקורת, קרי הפחתת שימוש במזון מסחרי בשיעור של 27% ללא פגיעה בביצועי הגדילה בבריכות בהן נוכחות פריפטון על מצעי הגידול. ביצועי הגדילה של דגי קיפון עם וללא פריפטון כללו קצב גידול יומי של כ- 1.95%. הרכב ביוכימי של דגים שהווננו עם פריפטון הראה תכולת חלבון גבוהה יותר מטיפול הביקורת ($p < 0.01$) בעוד תכולת הליפידים הייתה נמוכה יותר בהזנה עם פריפטון (טבלה 4).



איור 17. משקל רטוב בגרם ו-SGR של דגי קיפון (*Mugil cephalus*) בהזנה עם פריפטון כתחליף למזון מסחרי ברמות שונות של החלפה ושימוש בשני סוגי פריפטון (עם וללא העשרת מי פלט בסיליקה).



איור 18. שרידות דגי קיפון (*Mugil cephalus*) בהזנה עם פריפטון כתחליף למזון מסחרי ברמות שונות של החלפה ושימוש בשני סוגי פריפטון (עם וללא העשרת מי פלט בסיליקה).



איור 19. משקל רטוב בגרם ו-SGR של דגי דניס (*Sparus aurata*) בהזנה עם פריפטון כתחליף למזון מסחרי ברמות שונות של החלפה.

Treatment	Fish biochemical composition								
	Initial fish number	Initial weight (g/individual)	Final weight (g/individual)	SGR (% day ⁻¹)	Total amount of commercial feed (g)	Survival (%)	Protein (%)	Lipids (%)	Ash (%)
Control – no periphyton	500	2.12 ± 0.03	7.68	1.95 ± 0.7	5576.8	95	47 ± 1.1	40.5 ± 0.5	9 ± 0.4
With periphyton	500	2.04 ± 0.03	7.39	1.94 ± 0.4	4112.6	96	50 ± 0.8	37 ± 1.8	9.6 ± 1.7

טבלה 4. ביצועי גדילה ושרידות, כמות מזון מסחרי והרכב ביוכימי של דגיגי קיפון (*Mugil cephalus*) בניסוי הזנה מגומלן עם וללא פריפיתון.

דיון ומסקנות

שימוש בביופילטרים "צמחיים", מבוססי תהליך הפוטוסינתזה, לטיפול במי פלט מחקלאות ימית מהווה עניין רב ביותר בשל היתרונות הרבים של ביופילטרים אלו בהעשרת המים בחמצן, העלאת pH וההטמעה של תרכובות חנקן וזרחן בביומסה במקום סילוקם לסביבה והעשרתה בנוטריינטים. פילטרים אלו יכולים להוות חלופה למערכות טיפול המבוססות על חיידקים לתהליכי ניטריפיקציה ודניטריפיקציה בהן חנקן משוחרר לאטמוספירה. הביומסה הצמחית מהווה מוצר לתעשיות שונות (Shpigel et al., 1993) ובמערכות משולבות מסוג IMTA כדוגמת אלו שבפרוייקט זה נראה השימוש באצות רב תאיות להזנת דגים, קיפודי ים ורכיכות ובכך העלאת היכול הכללי של המערכת ושימוש בביומסה המטפלת במי הפלט. בבחינת ביופילטרים צמחיים, פריפיתון יכול להוות חלופה זולה ופשוטה יותר לאצות חד-תאיות המאופיינות בעלות קצירה גבוהה (Pragya et al., 2013) או לאצות רב תאיות אשר עלויות אוורור מהוות הוצאה עיקרית בתפעול (Ben-Ari et al., 2015), ואשר אינן מטפלות באופן יעיל בניטראט (Syrett, 1981).

בפרוייקט הנוכחי הוכחה היתכנות לגידול של פריפיתון ימי על מי פלט מחקלאות ימית ונמדדו ביצועי גדילה והסרת נוטריינטים שונים ממי הפלט על ידי ביופילטר מסוג פריפיתון ימי בתנאים שונים לרבות טמפרטורות ומליחויות, מנחי גידול וצפיפות סובסטראט בביופילטר וכן בחשיפה להרכבי נוטריינטים שונים. הביומסה שיוצרה גם נבחנה מבחינת תכולתה הביוכימית ושימשה לבחינת הפוטנציאל להורדת מרכיב המזון המסחרי בהזנה של שני סוגי דגיגים של מי ים נפוצים בסל המזון הישראלי – קיפון (*Mugil cephalus*) ודניס (*Sparus aurata*) כולל הוכחת היתכנות לגמלון של מערכות גידול דגי ים עם פריפיתון.

ממצאי הפרוייקט מראים כי ניתן לגדל פריפיתון על מי פלט מחקלאות ימית במהלך כל השנה. לא נראה כי ההשפעה על הגידול מקורה בשינויים בטמפרטורת המים שכן טמפרטורה זו יחסית קבועה במהלך כל השנה באזור הניסוי ושינויים בה נמדדו גם במהלך כל תקופת גידול. על כן, משוער כי שינויים עונתיים בקצב ותנובת הביומסה קשורים למשך ועוצמת האור במהלך היום, כמתואר באצות רב תאיות (Neori et al., 2000) ולהרכב האוכלוסייה המשתנה כמתואר בפריפיתון ימי מפרוייקט זה (Levy et al., 2017).

מביצועי ההסרה של TAN ו-DIN על ידי הביופילטרים פותח מודל המציע את הקשר בין עלייה בביומסה ו/או במשך השהייה של נוטריינטים לעלייה ביעילות ההסרה של TAN ו-DIN על ל- 80% ו- 60%, בהתאמה. המודל אמנם מראה כי הסרה של 100% מהחנקן (TAN/DIN) על ידי פריפיתון עשויה להיות קשה להשגה אך זאת בדומה לביופילטר מסוג אצות רב תאיות (Neori et al., 2003). על פי המודל ניתן להעריך כי הסרה של 70% TAN ממי הפלט יכולה להיות מושגת על ידי פריפיתון בביומסה של 30 g עם משך שהייה של נוטריינטים של 5

שעות או לחליפין עם ביומסה גבוהה יותר של 100 g ומשך שהיית נוטריינטים קצרה יותר של שעה אחת בלבד. מודל זה ללא ספק מאפשר המשך הגמלון של ביופילטר מסוג פריפיטון לטיפול במי פלט מחקלאות ימית תוך התייחסות לגורמים אלו להחלטות תפעוליות כולל שטח הסובסטרט ושטף מי הפלט המיושם בכל זמן נתון בהתאם לעומס הנוטריינטים, שהינו תוצר ישיר של העלייה בביומסה דגים במערכת. שינוי ביעילות ההסרה של חנקות שונות כתלות בעומס והרכב הנוטריינטים במי הפלט ידוע גם ממערכות אצות רב תאיות (Neori et al., 2003) בהן קיים יחס הפוך בין קצב ויעילות הסרה של TAN כך שבשטף גבוה הנוטריינטים זמינים ויכולים להיות מטופלים בביופילטר עד לרווייה של יכולת ההסרה, משמע קצב ההסרה עולה אך יעילות ההסרה מוגבלת ויורדת. בהורדת השטף (משך שהייה עולה) קצב ההסרה יורד אך יעילות ההסרה גבוהה, כנראה עקב 'הרעבה' של האצות (Neori et al., 2003). הדילמה, אם כן היא שעבור ביומסה נתונה קצב ההסרה של TAN נמצא ביחס הפוך ליעילות ההסרה.

ההשפעה של עומס והרכב נוטריינטים שונים במי הפלט על ביצועי פריפיטון נבחנו בפרוייקט הנוכחי באופן ראשוני ביחידות טיפול מגומלנות. עבור TAN נראה דפוס זהה לזה הקיים באצות המטמיעות עם קצב לקיחה גבוה יותר של 0.5 לעומת $0.1 \text{ g TAN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ בעומס TAN גבוה לעומת נמוך, בהתאמה (טבלה 3). דבר זה מעיד ככל הנראה, כמו גם משוואת הסילוק הדומה עבור TAN ו-DIN, על הטמעה כמנגנון עיקרי לסילוק TAN על ידי פריפיטון. יעילות ההסרה שנמדדה עמדה בקנה עם הטענות הקודמות בהיותה ביחס הפוך לקצב ההסרה של TAN וגבוהה יותר בעומס TAN נמוך. גבוהה בעומס נוטריינטים נמוך עם זאת, עבור הסרה של TN נראה דווקא כי בעומסי נוטריינטים שונים (נמוך וגבוה פי 3) נמדד קצב הסרה דומה של על $1.4 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, ללא קשר לתכולת TAN נמוכה במי הפלט. יעילות הסרה גבוהה משמעותית של TAN נמדדה ממי פלט עשירים ב- $\text{NO}_3\text{-N}$ ועניים ב-TAN, ככל הנראה בשל תהליכי דיטרופיקציה בביומסה המתועדים לגבי פריפיטון גם בספרות קודמת (Axler and Reuter, 1996; Sanli et al., 2015). הסרה של שני צורוני החנקן TAN ו- $\text{NO}_3\text{-N}$ על ידי פריפיטון ימי, כפי המתואר כאן מהווה יתרון משמעותי של ביופילטר מסוג זה לחקלאות ימית. במערכות רבות TAN ו- $\text{NO}_3\text{-N}$ קיימים ברמה דומה במי הפלט בשל תהליכי ניטרופיקציה במיכלי הגידול ובצנורות (Hu et al., 2012; Krom et al., 1995). בעוד TAN מועדפת אנרגטית להטמעה על ידי אצות, אלו יעברו לסילוק צורוני חנקן מחומצנים ($\text{NO}_x\text{-N}$) רק בריכוז TAN נמוך מאוד עד לכדי $<0.03 \text{ mg L}^{-1}$ (Syrett, 1981). פריפיטון במחקר זה הראה הסרה טובה של $\text{NO}_3\text{-N}$ בקצב הסרה דומה לזה של TAN כאשר שני הצורונים ברמה גבוהה במי הפלט. יתרה מכך, הסרה מוגברת של $\text{NO}_3\text{-N}$ על ידי פריפיטון נמדדה כבר בריכוז TAN $<0.3 \text{ mg L}^{-1}$, ערך הגבוה בסדר גודל מזה שצוין לעיל עבור אצות.

בפרוייקט הנוכחי הראנו כי ניתן להשפיע, לפחות באופן חלקי, על הרכב האוכלוסיה והתכולה הביוכימית של פריפיטון ימי באמצעות העשרה בסיליקה. שינויים בהרכב הביוכימי של הפריפיטון מושרים באמצעות סיליקה אך כנראה קשורים גם כן לשינויים בהרכב הביולוגי בביומסה. קיום של אצות רב תאיות בפריפיטון שגדל ללא העשרה בסיליקה מביא לתכולת חלבון גבוהה של 40%, בדומה למחקרים קודמים במלח"י שהראו תכולה דומה ב-Ulva הגדלה על מי פלט (Ben-Ari et al., 2014; Neori et al., 2003). השפעה עיקרית של סיליקה הייתה על העלייה בתכולת הליפידים בפריפיטון, כנראה בשל העשרת הפריפיטון בצורניות עם תכולת ליפידים גבוהה (Khatoon et al., 2009). חרף הירידה בתכולת החלבון ל-30% בפריפיטון שגדל בנוכחות סיליקה בריכוז גבוה, תכולת חלבון זו ואחרות שנמדדו בסוגי הפריפיטון השונים ברות השוואה ואף גבוהות מאלו שנמדדו בפריפיטון ממים מתוקים עם תכולת חלבון של 23-26% (Azim et al., 2002). פריפיטון בעל תכולת חלבון גבוהה יחסית יכול להוות יתרון לשימוש כתחליף חלקי למזון דגים. ניסויי הזנה בדגיגי קיפון איששו את הפוטנציאל

של פריפיטון ימי כמקור מזון טבעי בדיאטה של דגי מי ים. מחקרים רבים על דגי מים מתוקים תומכים בשימוש בפריפיטון המגודל בבריכות הדגים (מזוקום) והתוצאות שהושגו במחקר הנוכחי מאשרות פוטנציאל של הפחתה של לפחות 40% מהמזון המסחרי (כופתיות) בדיאטה בשלב גידול על ידי שילוב פריפיטון בדיאטה במקום המזון המסחרי שמופחת. 40% החלפה של מזון מסחרי תועדה גם בדגי אמנון בבריכות עפר (Milstein et al., 2008) ועל כן ביקשנו לבדוק טכנולוגיה זו גם בדגי מי ים. קצבי הגידול של דגי קיפון כפי שנמדדו במחקר הנוכחי, כולל בניסוי הגמלון, עם וללא החלפת המזון המסחרי בפריפיטון תואמים תוצאות מחקרים קודמים בהם דווחו SGRs בין 1.67 – 2.11 לדגי קיפון בגודל התחלתי דומה של 2 גרם ועד לגודל סופי של כ- 4.5 גרם תוך שימוש במרכיבי חלבון שונים בכופתיות (Luzzana et al., 2005). SGR גבוה יותר חושב עבור ניסוי הגמלון (לעומת סקלה קטנה) ככל הנראה בשל טמפרטורות גבוהות יותר בניסוי זה. שימוש באצות רב תאיות כמקור חלבון בכופתיות של קיפונים הראה SGR בין 1.89 – 2.4 (Wassef et al., 2001), ערכים המתאימים לתוצאות שלב הגמלון במחקר זה. עם זאת, ביצועי דגי קיפון במחקר זה התקבלו בשימוש במזון מסחרי ובפריפיטון בעל תכולת חלבון נמוכים יותר (רמת חלבון ממוצעת בדיאטה של כ- 28%) לעומת מזון עתיר חלבון (40%) ששימש להזנת דגי קיפון במחקרם של Wassef et al. (2001). יש לציין כי בניסוי אחר שביצענו לאחרונה התקבלו תוצאות יפות גם לגבי הזנת דגי סיכן (*Siganus rivulatus*) עם פריפיטון כתחליף למזון מסחרי (לא מוצג). בעבודה זו נראה כי ניתן להשתמש בפריפיטון גם להזנה של דגי דניס תוך הפחתה של 25% ממרכיבים בדיאטה המסחרית. ניסוי שנערך על תקופת זמן קצרה יותר (לא מוצג) הראה קצבי גידול ומשקל נמוכים כאשר נעשתה החלפה של 40% מהמזון המסחרי על ידי פריפיטון. על כן, ערך החלפה של 25% נראה סביר ויחסוך בעלויות המזון גם לתקופה ארוכה יותר כפי שנמצא במחקר הנוכחי. חסכון שכזה ושימוש בפריפיטון כמרכיב במזון דגי דניס הינו בעל פוטנציאל רב לטובת חסכון בעלויות המזון ומתאים לממצאים קודמים במלח"י של חוקרים בפרוייקט זה בהם נעשה שימוש באצת ה- *Ulva* כביומסה צמחית עתירת חלבון להחלפת מרכיב קמח דגים במזון מסחרי של דגי דניס (Shpigel et al., 2017). השימוש בפריפיטון במחקר זה תרם גם להרכב ביוכימי של הדגים עם תכולת חלבון גבוהה יותר לעומת שימוש במזון מסחרי. למיטב ידיעתנו זהו תיעוד ראשון בנושא. יתרה מכך, אנליזה של פרופיל חומצות אמינו בפריפיטון (לא מוצג) הראתה כי פריפיטון שגדל על מי פלט מחקלאות ימית מכיל רמות גבוהות של חומצות אמינו מסוג Lysine ו-Threonine עם רמות של 8 ו- 4.2 μg/g בביומסה, בהתאמה, המתאימות לאלו בדיאטות מסחריות של דגים צמחוניים שונים. תוצאות הפרוייקט מעודדות ביותר לגבי פוטנציאל השימוש הכפול בביופילטר פריפיטון הן לטיפול במי פלט והן להזנת דגים אלו. מבחינה יישומית, מחקר זה פותח את האפשרות של ניתוק הפריפיטון מבריכות גידול הדגים והשימוש בו כביופילטר למי הפלט ותוצאות המחקר תורמות להמשך פיתוח של יחידות טיפול אלו לטובת העלאת הביומסה הנוצרת ושיפור ביצועי הסרת נוטריינטים. בכך, יתאפשר הגדלת נפח המים המטופלים או לחליפין טיפול במי פלט של מערכות בעלות ביומסה גבוהה יותר. ביחידת הטיפול הנפרדת, כפי שנעשה בפרוייקט זה, ניתן גם לקבוע את מועדי וקצב קצירת הביומסה הנוצרת בביופילטר כך שתוכל לשמש להזנת דגים בחווה עצמה או לחליפין כמקור חלבון בדיאטה של דגים שונים. שליטה במועדי הקצירה בסנכרון עם שמירה על איכות המים תוביל לאפשרות מיחזור של מי הפלט, או חלקם, חזרה ליחידות הגידול. לחליפין, שימוש בטכנולוגיה יכול להיעשות גם בבריכות פתוחות לגידול דגי ים במים מליחים או במפרצים לטובת הפחתת מרכיב מזון מסחרי ותוך שמירה על איכות מים גבוהה, כפי שהוצע בעבר בבריכות גידול של דגי מים מתוקים.

1. Levy, A., Milstein, A., Neori, A., Harpaz, S., Shpigel, M., & Guttman, L. (2017). Marine periphyton biofilters in mariculture effluents: Nutrient uptake and biomass development. *Aquaculture*, 473, 513-520.
2. Milstein, A., Levy, A., Neori, A., Harpaz, S., Shpigel, M., & Guttman, L. (2018). Water quality, ecological processes and management procedures in a periphyton biofiltration system in mariculture: a statistical analysis. *Aquaculture Res.* 49(4), 1491-1503.
3. Guttman, L., Boxman, S.E., Barkan, R., Neori, A., and Shpigel, M. (2018). Combinations of *Ulva* and periphyton as biofilters for both ammonia and nitrate in mariculture fishpond effluents. *Algal Res.* 34: 235-243.

References

- APHA (1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th edn. American Public Health Association, Washington, DC.
- Axler, R., Reuter, J. (1996). Nitrate uptake by phytoplankton and periphyton: Whole-lake enrichments and mesocosm-15N experiments in an oligotrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* 41, 659–671.
- Azim, M.E., Beveridge, M.C.M., van Dam, A.A., & Verdegem, M.C.J. (2005). Periphyton and aquatic production: an introduction. In: Azim, M.E., Verdegem, M.C.J., van Dam, A.A., Beveridge, M.C.M. (Eds.), *Periphyton — Ecology, Exploitation and Management*. CABI Publishing, Wallingford, pp. 1–13.
- Azim, M.E., Verdegem, M.C.J., Rahman, M.M., Wahab, M.A., Van Dam, A.A., & Beveridge, M.C.M. (2002). Evaluation of polyculture of Indian major carps in periphyton-based ponds. *Aquaculture*. 213, 131–149.
- Bellos ,E., Leopoulos, V., Menicou, M., & Charalambides, M. (2010). Production Planning in the Aquaculture Industry: A Simulation-based Approach. In *Proc. 24th Annual European Simulation and Modelling Conf* pp. 25-27.
- Ben-Ari, T., Neori, A., Ben-Ezra, D., Shauli, L., Odintsov, V., & Shpigel, M. (2014). Management of *Ulva lactuca* as a biofilter of mariculture effluents in IMTA system. *Aquaculture*. 434, 493–498.
- Cardia, F., Lovatelli, A. (2007). A review of cage aquaculture: Mediterranean Sea. *FAO Fisheries Technical Paper*, 498, 159.
- Chopin, T., Buschmann, A.H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., Kraemer, G.P., Zertuche-González, J.A., Yarish, C., & Neefus, C. (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability. *J. Phycol.* 37, 975–986.
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2007). Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*. 270, 1–14.
- Dubois, M., Gilles, K., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., & Smith, F. (1951). A colorimetric method for the determination of sugars. *Nature*. 168, p. 167.
- Folch, J., Lees, M., Sloane-Stanley, G.H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *J. Biol. Chem.* 226, 497–509.
- Hu, Z., Lee, J.W., Chandran, K., Kim, S., & Khanal, S.K. (2012). Nitrous oxide (N₂O) emission from aquaculture: a review. *Environ. Sci. Technol.* 46, 6470–80.
- Jones, B.D. (1931). Factors for converting percentages of nitrogen in foods and feeds into percentages of protein. United States Department of Agriculture Circular No. 183. Washington, D.C., Government Printing Office.
- Khatoon, H., Banerjee, S., Yusoff, F.M., & Shariff, M. (2009). Evaluation of indigenous marine periphytic *Amphora*, *Navicula* and *Cymbella* grown on substrate as feed supplement in *Penaeus monodon* postlarval hatchery system. *Aquac. Nutr.* 15, 186–193.
- Krom, M., Ellner, S., Rijn, J. Van, & Neori, A. (1995). Nitrogen and phosphorus cycling and transformations in a prototype 'non-polluting' integrated mariculture system, Eilat, Israel.

- Mar. Ecol. Prog. Ser. 118, 25–36.
- Levy, A., Milstein, A., Neori, A., Harpaz, S., Shpigel, M., & Guttman, L. (2017). Marine periphyton biofilters in mariculture effluents: Nutrient uptake and biomass development. *Aquaculture*, 473: 513-520.
- Lupatsch, I., Kissil, G. (1998). Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (*Sparus aurata*) culture using a nutritional approach. *Aquat. Living Resour.* 11, 265-268.
- Luzzana, U., Valfrè, F., Mangiarotti, M., Domeneghini, C., Radaelli, G., Moretti, V. M., & Scolari, M. (2005). Evaluation of different protein sources in fingerling grey mullet *Mugil cephalus* practical diets. *Aquaculture international*, 13(4), 291-303.
- Milstein, A., Peretz, Y., & Harpaz, S. (2008a). Comparison of periphyton grown on different substrates as food for organic tilapia culture.
- Milstein, A., Peretz, Y., & Harpaz, S. (2008b). Culture of organic tilapia to market size in periphyton-based ponds with reduced feed inputs. *Aquaculture Research*, 40(1), 55–59.
- Milstein, A. (2010). Promotion of natural food development in earthen ponds, to reduce industrial feeds without affecting tilapia growth. *Fisheries and Fishbreeding in Israel* 41(1):1372-1374 (in Hebrew)
- Milstein, A. (2012). Periphyton-based aquaculture: underwater hard surfaces in fish ponds promote development of natural food for fish. *Indian Journal of Social and Natural Sciences* 1(1):93-99.
- Neori, A., Msuya, F.E., Shauli, L., Schuenhoff, A., Kopel, F., & Shpigel, M. (2003). A novel three-stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrated mariculture. *J. Appl. Phycol.* 15, 543–553.
- Neori, A., Shpigel, M., & Ben-Ezra, D. (2000). A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. *Aquaculture*, 186(3-4), 279-291.
- Pragya, N., Pandey, K. K., & Sahoo, P. K. (2013). A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 159-171.
- Redfield, A.C. (1963). The influence of organisms on the composition of sea-water. *sea* 26–77.
- Rosenberg, G., Probyn, T.A., & Mann, K.H. (1984). Nutrient uptake and growth kinetics in brown seaweeds: response to continuous and single additions of ammonium. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 80, 125–146
- Sanli, K., Bengtsson-Palme, J., Nilsson, R.H., Kristiansson, E., Alm Rosenblad, M., Blanck, H., & Eriksson, K.M. (2015). Metagenomic sequencing of marine periphyton: taxonomic and functional insights into biofilm communities. *Front. Microbiol.* 6, 1192.
- Shpigel, M., Guttman, L., Shauli, L., Odintsov, V., Ben-Ezra, D., & Harpaz, S. (2017). *Ulva lactuca* from an Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) biofilter system as a protein supplement in gilthead seabream (*Sparus aurata*) diet. *Aquaculture*, 481, 112-118.
- Shpigel, M., Neori, A., Popper, D.M., & Gordin, H. (1993). A proposed model for “environmentally clean” land-based culture of fish, bivalves and seaweeds. *Aquaculture* 117, 115–128.
- Stevenson, R.J. and Bahls, L.L. (1999) *Periphyton Protocols In: Barbour, M.T., Gerritsen, J., Snyder, B.D. and Stribling, J.B. 1999. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish, Second Edition, EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.*
- Syrett, P.J. (1981). Nitrogen metabolism of microalgae. In: Platt, T.J. (Ed.), *Physiological Bases of Phytoplankton Ecology*. Can. Fish. Res. Board Bull. 210. Ottawa, Canada, pp. 182–210.
- van Rijn, J. (1996). The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—A review. *Aquaculture* 139, 181–201.
- Wassef, E. A., El Masry, M. H., & Mikhail, F. R. (2001). Growth enhancement and muscle structure of striped mullet, *Mugil cephalus* L., fingerlings by feeding algal meal-based diets. *Aquaculture Research*, 32, 315-322.

סיכום עם שאלות מנחות

<p>מטרות המחקר תוך התייחסות לתוכנית העבודה.</p> <p>מטרות המחקר בתוכנית העבודה היו: פיתוח פרוטוקול לגידול פריפוטון בחינת ביצועי פריפוטון לטיפול במי פלט מחקלאות ימית בתנאים שונים בחינת השימוש בפריפוטון כתחליף חלקי למזון מסחרי בדיאטה של דגיגי קיפון ודניס גמלון מערכת ביופילטר פריפוטון וניסוי הזנה במערכת מגומלנת לדגיגי קיפון</p>
<p>אלו ממטרות המחקר הושגו בעבודת המחקר הנוכחית</p> <p>הושגו כל המטרות שנקבעו לתקופת המחקר. בנושא פיתוח פרוטוקול של פריפוטון כביופילטר אף הושגה התקדמות מעבר למצופה וכך גם בנושא השפעת ריכוזי סיליקה על הביומסה.</p>
<p>עיקרי התוצאות.</p> <p>פריפוטון גדל בהצלחה בניסויים השונים בתנאים שונים כאשר מוזן במי פלט ממערכת לחקלאות ימית. עלייה בביומסה של פריפוטון ובמשך השהייה של נוטריונטים תרמה לשיפור יעילות ההסרה של TAN ו- DIN עד לכ- 80% הסרה. בעזרת מודל רב משתנים שפותח מהמידע שנאסף ניתן לאמוד את כמות הביומסה ומשך השהייה הדרושים לקבלת יעילות הסרה נתונה. הסרה של אמוניה הייתה עיקרית על פני תרכובות חנקן אחרות ונעשתה בעיקרה בתהליכי הטמעה. העשרת השפכים בסיליקה בריכוז 2.5 mg L^{-1} הורידה את קצבי ההסרה של TAN לבין $0.12 - 0.45 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, לעומת קצב מירבי של $1.2 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ שנמדד בריכוז סיליקה נמוך יותר וללא סיליקה, כנראה בשל קיום גורם מגביל אחר. הקורלציה של עלייה ביעילות ההסרה עם העלייה בביומסה (עד לרוויה מסויימת) שנמדדה בטיפול ללא סיליקה ובשימוש בסיליקה בריכוז נמוך הייתה הפוכה בריכוז גבוה של סיליקה. העשרה של מי הפלט בסיליקה הורידה את תכולת החלבון והקרבوهידרטים בביומסה אך אלו היו עדיין גבוהים. עם זאת, העלתה משמעותית את תכולת הליפידים בביומסה. ניסוי הזנה של דגיגי קיפון (בורי) הראה החלפה של 40% מהמזון המסחרי בדיאטה על ידי פריפוטון שגודל על מי פלט ללא השפעה על ביצועי הדגיגים מבחינת קצבי הגידול, שרידות ותחלואה. בניסוי גמלון הוכח כי ניתן להשתמש בפריפוטון לגידול דגיגי קיפון תוך הפחתה של 25% מכמות המזון המסחרי, קרי חסכון משמעותי בעלויות תפעול. גם עבור דגיגי דניס הוכח כפריפוטון יכול לשמש כתחליף למזון מסחרי.</p>
<p>מסקנות מדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרות המחקר לתקופת הדו"ח?</p> <p>מטרות המחקר הושגו ואף נעשתה עבודה מעבר ליעדי ההצעה. המחקר הנוכחי מראה את הפוטנציאל בהמשך פיתוח של מערכת טיפול במי פלט מסוג פריפוטון. בשל הוריאביליות של פריפוטון בהסרה של צורוני חנקן שונים מומלץ לבדוק ההיתכנות לשימוש בביופילטר מסוג זה ביופילטר להסרת ניטראט במי פלט של מערכות אינטנסיביות. פרוטוקולים לגידול של פריפוטון כולל בהעשרה בסיליקה יכולים להיות שמישים לטובת תכנון יחידות טיפול בהתאם לעומס החנקן במערכת, כמות ביומסה של פריפוטון ומשך השהייה של נוטריונטים ביחידת הטיפול. ניסויי הזנה של דגיגים עם פריפוטון כתחליף חלקי למזון מסחרי מראות את הפוטנציאל של טכנולוגיה זו בדגי ים עם יכולת הפחתה של כמות ניכרת של מרכיב המזון המסחרי והחלפתו בפריפוטון אשר עלויות גידולו על מי פלט נמוכות (דורש רק אור ונוטריונטים ממי הפלט) ומהווה, על פי אופן הגשתו במחקר זה, תחליף מזון טרי וטבעי ללא עלויות עיבוד טרום שיווק הקיימות בייצור מזון מסחרי. להמשך מחקר מומלץ לבדוק הטמעה של פריפוטון בכופתיות המזון לטובת הפחתת מרכיבים יקרים ולא ברי קיימא בדיאטה (קמח דגים). הטמעה שכזו תאפשר גידול של פריפוטון במערכות גדולות וארועי קצירה שאינם תכופים לעומת הנעשה בהגשה של פריפוטון טרי.</p>
<p>בעיות שנותרו לפתרון ו/או שינויים (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים) שחלו במהלך העבודה; התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרות המחקר בתקופה שנותרה לביצוע תוכנית המחקר?</p> <p>שימוש בפריפוטון טרי המוגש לדגים על בסיס קבוע מצריך כח אדם ל"חקלאות פריפוטון". יש לבדוק הטמעה של פריפוטון ממערכות הטיפול בכופתיות המזון.</p>
<p>הפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח: פרסומים בכתב - צייטט ביבליוגרפי כמקובל בפרסום מאמר מדעי; פטנטים - יש לציין שם ומס' פטנט; הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום, תאריך, צייטוט ביבליוגרפי של התקציר כמקובל בפרסום מאמר מדעי.</p>

חלק מתוצאות המחקר פורסמו בעיתונים מדעיים מובילים בתחומי העבודה בפרוייקט:

Levy, A., Milstein, A., Neori, A., Harpaz, S., Shpigel, M., Guttman, L. 2017. Marine periphyton biofilters in mariculture effluents: Nutrient uptake and biomass development. *Aquaculture*, 473: 513-520.

Milstein, A., Levy, A., Neori, A., Harpaz, S., Shpigel, M., & Guttman, L. (2018). Water quality, ecological processes and management procedures in a periphyton biofiltration system in mariculture: a statistical analysis. *Aquaculture Res.* 49(4), 1491-1503.

Guttman, L., Boxman, S.E., Barkan, R., Neori, A., and Shpigel, M. (2018). Combinations of Ulva and periphyton as biofilters for both ammonia and nitrate in mariculture fishpond effluents. *Algal Res.* 34: 235-243.

תוצאות המחקר הוצגו בשני כנסים בינ"ל מובילים של World Aquaculture Society (WAS):

Guttman L, Levy A., Neori A and Milstein A. periphyton- based biofilter a Periphyton biofilter for treatment mariculture effluent: a new concept in Integrated Multi Trophic Aquaculture. LAQUA16 World Aquaculture Society Conference On Latin-American Aquaculture. Nov-2016, Lima, Peru.

Guttman L. Periphyton- based biofilter for mariculture effluent treatment. Potential for sustainable land- based mariculture. World Aquaculture. Feb-2016. Las Vegas, US.

פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)

X ללא הגבלה (בספריות ובאינטרנט)

האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחי? כן