



חוות סנפירים בע"מ

חנקות בבריכת הנוי: מקורות, השפעות ושליטה פרקטית

ד"ר גל הרצוג, חוות סנפירים בע"מ

עריכה: חופית הרצוג

הוגש לפרסום: 3/5/2026

תקציר

בריכת נוי היא מערכת מים מלאכותית, בה מתקיים מאזן ביולוגי וכימי עדין. הפרשות הדגים, מזון ושאריות אורגניות יוצרים עומס חנקני תמידי על המערכת, אשר בתורה נדרשת להמיר תרכובות חנקן רעילות לרעילות פחות, על מנת למנוע תחלואה ותמותת דגים. התהליך המרכזי, המאפשר הפחתה זאת, הוא חלק ממחזור החנקן בטבע ומכונה "ניטריפיקציה" או חנקון. בתהליך, מתבצע חמצון של אמוניה רעילה לתוצרים רעילים פחות. התהליך מתרחש בעיקר בתוך ביופילם, שכבת מיקרואורגניזמים הצמודה למשטחים, המתפתחת על פני משטחים מוצקים. מטרתו של מאמר זה, הוא לא רק להעמיק את הידע של בעלי בריכות הנוי, בכל הנוגע לסיכון והתמודדות עם הצטברות חנקות רעילות אלא גם לתת בידיהם כלים פרקטים להתמודדות עימם.

מבוא

בריכת נוי היא אמנם האלמנט המרשים והמרכזי בכל גינה, אך בה בעת היא מערכת אקולוגית מורכבת המחייבת שמירה על איזון עדין ומתמשך. הפרשות הדגים (פסולת מטאבולית), שאריות המזון ופסולת אורגנית

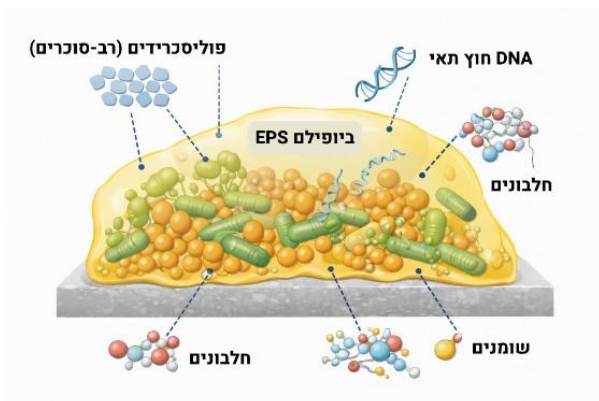
הנופלת לבריכה, מתפרקים ויוצרים עומס חנקני על המים, בעיקר דרך אמוניה (NH_3) – אמוניה חופשית). אמוניה, חודרת בקלות דרך הזימים ופוגעת במאזן היונים וביכולת הנשימה של הדג. זוהי חנקה רעילה מאוד עבור הדג ודי בריכוז של 0.02-0.05 PPM, על מנת לגרום לנזק. באופן טבעי, בגופי מים מבוצע תהליך המכונה "מחזור החנקן" ובתוכו תהליך ה"ניטריפיקציה" (חנקון). בשלב הראשון של התהליך, האמוניה מחומצנת לניטריט (NO_2^-). גם הניטריט הוא חומר רעיל, אשר גורם להיווצרות המוגלובין מחומצן. המוגלובין שזוה (מטהמוגלובין), אינו מסוגל להעביר חמצן ביעילות לרקמות וכך פוגע בהובלת החמצן במערכת הדם של הדג. רעילותו של ניטריט, מתחילה סביב 0.1 PPM, דהיינו, נמוכה בסדר גודל מזו של האמוניה. השלב הבא בתהליך הניטריפיקציה, הוא חמצון הניטריט לניטראט (NO_3^-). הניטראט הוא חומר רעיל פחות בטווח הקצר, אך הצטברות שלו וחשיפה לרמות של 100 PPM ומעלה, עשויות

לפגוע בגדילה, במערכת החיסון וביכולת הרבייה של דגים.

חשוב לציין, כי תהליך הניטריפיקציה, צורך חמצן ומוריד את ערכי ההגבה (pH) ולכן יש לו השפעה ישירה על הכימיה של המים.

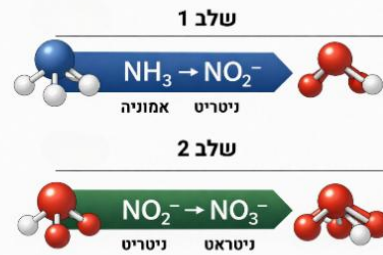
ביופילם – הליבה הביולוגית של הפילטר

הפעילות הביולוגית בפילטר, מתרחשת באופן כמעט בלעדי ע"פ משטחים ורק מקצתה במים עצמם. מיקרואורגניזמים נצמדים למצע ויוצרים שכבת ביופילם. ביופילם הוא קהילה מיקרוביאלית המוטמעת במטריצה חוץ תאית הנקראת EPS (Extracellular Polymeric Substances). מטריצה זאת מורכבת בעיקר מ: פוליסכרידים (רב סוכרים) ו- DNA חוץ תאי.



תמונה 2: מבנה סכימתי של ביופילם (EPS).

מבנה זה, מאפשר למיקרואורגניזמים להיצמד למשטח ולהגן על עצמם משינויים בסביבה. הביופילם הוא אקו-סיסטמה שלמה ובה מבוצעים מספר רב של תהליכים. מטבע הדברים, השכבות החיצוניות של הביופילם, חשופות מאוד לחמצן, למים ולחומרי הזנה ולכן בהן מבוצעת עיקר הניטריפיקציה. בשכבות הפנימיות יותר, ישנה זמינות נמוכה יותר לחמצן וחומרי הזנה ולכן בהן מבוצעת פעילות אנארובית (דלת חמצן) ותהליכים מיקרוביאליים איטיים יותר. בנוסף לניטריפיקציה, ביופילם משתתף במגוון גדול של תהליכים, בניהם: פירוק חומר אורגני, מינרליזציה של חומרים, קיבוע מיקרואורגניזמים מועילים במערכת ועוד.



תמונה 1: מסלול הניטריפיקציה (חנקן).

בשל הרעילות הגבוהה של החנקות במים, יש לשמור על איזון מקסימלי תוך הפעלה סדירה של מחזור החנקן בדגש על תהליך הניטריפיקציה.

מי מבצע את תהליך הניטריפיקציה?

מחקרים מולקולריים הראו, כי במערכות פילטריציה רבות, חיידקים מהסוג *Nitrosomonas* (ולעיתים *Nitrosospira*), מבצעים את חמצון האמוניה לניטריט. זהו למעשה התהליך החשוב ביותר בניטריפיקציה, כיוון שהאמוניה היא החנקה הרעילה ביותר וגם כיוון שהיכולת של ה- *Nitrosomonas* להמיר אמוניה לניטריט לוקח את הזמן הרב ביותר בתהליך ולכן זהו השלב שקובע את קצב הראקציה כולה (DeLong 1996, Hovanec et al., 1998). עד שנת 2000, היה מקובל לחשוב כי על השלב הבא בתהליך (חימצון ניטריט לניטראט), אחראיים חיידקי ה- *Nitrobacter*. לימים הסתבר, כי החיידקים הדומיננטיים, המחמצנים אמוניה לניטריט, משתייכים לקבוצת ה- *Nitrospira* (Damis et al., 2001), ב- *Schamm et al., 1998*. *al.*, גילו, כי ישנו חיידק מסוים ממשפחת ה- *Nitrospira* המסוגל בעצמו לבצע מעבר של אמוניה לניטריט וממנו לניטראט, קרי, חיידק אחד המסוגל לבצע את התהליך כולו.

בחירת מערכת סינון לשפעול ניטרפיקציה

מרבית מערכות הפילטריציה מבוססות על סינון בשלושה אספקטים: סינון מכאני (הוצאת הרפש מהמערכת), סינון ביולוגי (שימוש בבקטריות לפירוק החומר האורגני ודטוקסיפיקציה של חנקות), סינון כימי (שמירה על הכימיה של המים). לאור ההבנה המצטברת בתהליכי ניטרפיקציה ופירוק חומרים אורגנים, פותחו כמה סוגים של פילטרים המקובלים בתהליכי סינון בבריכות נוי:

פילטר טריקל/ טפטוף/ מגדל (Shower / Trickle) - זהו פילטר המורכב בד"כ מקומות או ארגזים המונחים זה על גבי זה ומבוסס על העיקרון שהמים מטפטפים או זורמים בשכבה דקה ע"ג המדיות החשופות לאוויר



תמונה 3: פילטר טריקל.

זרימת המים לקומה הראשונה מבוצעת בכח המשאבה וממנה לשכבות הנמוכות יותר בגרביטציה. היתרון המרכזי בשיטה, הוא שרמת החמצן וכמות הביופילם גבוהים ולכן מבוצע בה, תהליך ניטרפיקציה יעיל פר שטח סינון. חשוב לשים לב כאשר בונים פילטר שכזה, שאכן הטפטוף יבוצע על כל שטח הפנים של המדיה הביולוגית ולא רק על חלקה, לטובת ניצולת מקסימלית.

פילטר מצע נע (Moving Bed) - הפילטר מורכב ממיכל מים בו נמצאת מדיה פלסטית צפה בעלת שטח פנים גדול, הנמצאת בתנועה

מתמדת. את התנועה מבצעים באמצעות מכולל גלים או משאבת אוויר חזקה. המים מגיעים למערכת באמצעות משאבה, ויוצאים ממנה אל הבריכה בגרביטציה. למערכת זאת מספר יתרונות הנובעים מהתנועה הקבועה של המדיה והחמצון החזק. עצם התנועה גורמת להיווצרות של רוברד ביופילם דק במיוחד, ולכן לתהליכי ניטרפיקציה יעילים מאוד ואכן פילטר שכזה יעיל במיוחד עבור עומסים ביולוגיים גבוהים. עם זאת, כיוון ששכבת הביופילם דקה ואינה מכילה כמעט רוברד אנאורגני, תהליכי פירוק הרפש במערכת שכזאת, בד"כ יעילים פחות.



תמונה 4: פילטר מצע נע.

פילטר לחץ (Canister filter, Bead filter) - זהו למעשה אחד הפילטרים המקובלים ביותר לסינון בריכות נוי בארץ. מי הבריכה מגיעים אל הפילטר בכח משאבה וממנו מוזרמים אל בריכת הנוי בחזרה. פילטר זה מכיל בד"כ ספוגים (אך לא בהכרח), ומצעים בקטריאלים כדוגמת חרוזי פלסטיק/ ביובולס/ קרמיקה או סלעים געשיים.

סיום תהליך הניטריפיקציה- הצטברות ניטראט

עד כה, תארנו בפירוט כיצד אמוניה רעילה מאוד הופכת לניטריט, הרעיל גם הוא, אך פי 10 פחות. משם ישנו חמצון נוסף ההופך את הניטריט לניטראט- חומר רעיל פחות מאמוניה פי 10,000-1,000,000. כיוון שניטראט הוא התוצר האחרון בתהליך הניטריפיקציה, הוא נוטה להצטבר. ריכוזים גבוהים של ניטראט, עשויים לגרום לפגיעות במערכות החיסון והרבייה של הדג, לצד ירידה בקצב הגדילה ואף לתמותה. לכן, במיוחד בבריכות בהן העומס הביולוגי רב, מומלץ לבצע אחד או יותר מהבאים:

1. החלפות מים (בדי"כ תוך סילוק רפש)- זוהי למעשה הדרך הפשוטה והבטוחה ביותר להיפטר מעודפי הניטראט. למעשה אנחנו מדללים את רמות הניטראט במים, באמצעות הזרמה של מים דלי ניטראט. יש לשים לב שבמקרה של הכנסת מי רשת רבים לבריכה, יש צורך להשתמש בחומר אנטי כלור כדי למנוע פגיעה בזימים (Herzog, G 2019).
2. גידול צמחי מים- צמחים משתמשים בניטראט כמקור חנקן לבניית רקמות. זהו מנגנון ספיחה טבעי שגם יוצר לבריכה מראה אסטטי במיוחד. אין משמעות גבוהה, אם אנו בוחרים להשתמש בצמחי מים בתוך הבריכה או מעבירים את מי הבריכה במערכת אקוואפוניית (Bog filter) או באזור Wetland, כל זמן שהמים עוברים דרך שורשי צמחים (Phyto-filtration).
3. דה- ניטריפיקציה- מערכות מתקדמות יותר, נעזרות בתהליך

בקטריאלי, אנארובי (דל חמצן) כדי להפוך ניטראט (NO_3^-) מחוזר לגז חנקן (N_2) אשר נפלט בחזרה מהמים לאוויר. בחלק גדול מההסברים על מיחזור של חנקות, "שוכחים" לספר שזהו תהליך יעיל במיוחד בגידול דגים. התהליך קורה בשכבות עמוקות של מצע הבריכה/ כאשר ישנו ביופילם עבה/ פילטרים אנארוביים ייעודיים. היתרון המרכזי הוא שמערכת יעילה שכזאת, חוסכת החלפות מים רבות. יש לשים לב שהבניה של פילטר כזה חייבת להיות נכונה, שאם לא כך, עשויים להיפלט ממנו גזים רעילים למערכת.

4. שיטות נפוצות פחות: ספיחת ניטראט באצות ושימוש בחומרי שרף מחליפי יונים לספיחה (Ion exchange resins).

מדוע מגדלים מקצועיים משתמשים בשברי קונכיית בפילטר?

ניטריפיקציה צורכת אלקליניות (היכולת לבצע חציצה= בופריות למים) ולכן כאשר מבוצעת במערכת אינטנסיבית, גורמת לירידה ב-KH (קשיות קרבונטית). במערכות עם עומס ביולוגי גבוה, ירידה זו עלולה להוביל לירידת pH ולקריסה של הביו-פילטר. למעשה, ברגע שאין למים יכולת חציצה (בופריות= KH) טובה, כל שינוי קטן, עלול להוביל לירידה דרסטית ב pH. לכן, בגידול של ביומסה רבה במערכת קטנה, חשוב לשמור על KH יציב באמצעות: תוספת ביקרבונט, שימוש במדיה גירנית, כדוגמת קונכיית, החלפות מים וניטור קבוע של ערכי המים.

להעריך את נפח המדיה הדרוש לטיפול בעומס זה.

מדיה פלסטית בתנועה במערכת Moving Bed – במחקרים שבוצעו במערכת סינון שכזאת, דווח על קצבי ניטרופיקציה אופייניים של כ-300 גרם TAN למ"ק מדיה ליום בתנאי תפעול טובים (Malone & Pfeiffer, 2006). לכן עומס של כ-0.025 גרם TAN ליום דורש תיאורטית 0.08 ליטר מדיה עבור כל דג (כ-80 מ"ל). עם זאת בתכנון מעשי מקובל להשתמש במקדם ביטחון של פי 2 כדי לקחת בחשבון תנודות בטמפרטורה, הזנה גבוהה יותר, והצטברות מוצקים. לכן, ההמלצה המעשית היא 0.16 ליטר (160 מ"ל) מדיה פלסטית Moving Bed לדג קומט או קוי אחד בגודל כ-15 ס"מ.

מדיה קרמית במצע קבוע (fixed bed) במערכות בהן המצעים סטטיים, קצבי הניטרופיקציה נמוכים מעט יותר. בד"כ מדובר בטיפול בעד 120 גרם TAN למ"ק ליום (Eding et al., 2006). בהתאם לכך, עומס של 0.03 גרם TAN ליום דורש תיאורטית כ-0.25 ליטר מדיה (250 מ"ל). גם כאן יש צורך במקדם ביטחון תפעולי ולכן בתכנון מעשי מומלץ להשתמש בכ-0.5 ליטר מדיה קרמית לדג בגודל זה.

* יש לשים לב כי הכתוב לעיל הוא חישוב תאורתי בלבד ונועד לספק אומדנים בחישוב עומסים.

סיכום

פילטר ביולוגי בבריכת נוי הוא מערכת אקולוגית מורכבת המבוססת על פעילות קהילות מיקרוביאליות. הבנה של מחזור החנקן, מבנה הביופילם והקשר בין עומס ביולוגי לפילטרציה מאפשרת תכנון נכון של מערכות מים יציבות. בבריכות נוי, בהן מגדלים קוי או קומט בצפיפות גבוהה,



תמונה 8: מערכות פילטרציה גדולות.

חישוב עומס ביולוגי וגודל פילטר נדרש

ישנה מורכבות רבה בחישוב עומסים ביולוגיים בבריכה והתאמה של פילטרציה, כיוון שמעורבים בו כמות גדולה של משתנים, בניהם: טמפרטורת המים, רמת חומציות המים (pH) ורמת החציצה (KH), כמות הדגים, סוג הדגים, משקלם, קצב תנועת המים, כמות ההאכלה, סוג המזון, תדירות ההאכלה ועוד. החישובים הבאים, הם הערכות בלבד ומטרתם לתת "תחושה" ו"סדרי גודל" שיתרמו לתכנון מערכות סינון מותאמות:

בתחום מערכות מחזור מים (RAS) כל 1 ק"ג של מזון יבש הנצרך על ידי דגים, מוביל ליצירה של כ-25–35 גרם Total TAN (Ammonia Nitrogen) (Timmons & Pfeiffer, 2006 & Ebeling, 2010; Malone). אם ניקח כדוגמה, דג קומט (*Carassius auratus*) או קוי (*Cyprinus rubrofuscus*) באורך כ-15 ס"מ ששוקל בממוצע כ-100 גרם. דג שכזה יאכל במערכות גידול מקצועיות כ-1-2% ממשקלו ביום. על בסיס ניתוח הרגלים של מגדלים חובבים בבריכה ביתית, נניח כי מגדל ממוצע, יאכיל דג כזה פעם ביום בכ-1% מזון ממשקל גוף הדג, ולכן הצריכה היא של 1 גרם מזון ביום (בערך 1/2 עד 1/3 כפית מזון כופתיות ביום). בהנחה של 30 מ"ג TAN לכל גרם מזון (מזונות חובבים מקובלים בשוק), הדג ייצר בערך 30 מ"ג TAN ביום. כעת ניתן

לזכור להיפטר ממנו באחת או יותר מהשיטות שהוצעו. תכנון נכון של נפח המדיה הביולוגית ביחס לעומס המזון ואופן פיני החנקות, הם מהגורמים החשובים ביותר ליציבות ארוכת טווח של הבריכה.

מערכות Moving Bed או Shower נחשבות יעילות במיוחד משום שהן מאפשרות חמצון גבוה, שטח פנים פעיל גדול ועמידות גבוהה לסתימות. נזכיר כי הצטברות ניטראט, ברפש ובכלל, גם הוא מסוכן לאורך זמן ולכן חשוב

ביבליוגרפיה

Hovanec, T. A., & DeLong, E. F. (1996). Comparative analysis of nitrifying bacteria associated with freshwater and marine aquaria. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(8), 2888-2896.

Hovanec, T. A., Taylor, L. T., Blakis, A., & DeLong, E. F. (1998). Nitrospira-like bacteria associated with nitrite oxidation in freshwater aquaria. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(1), 258-264.

van Rijn, J., Tal, Y., & Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 364-376.

Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A., & Klapwijk, A. (2006). Design and operation of nitrifying trickling filters. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 234-260.

Watten, B. J., & Sibrell, P. L. (2006). Comparative performance of fixed-film biological filters. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 198-213.

Herzog, G (2015). [אמוניה- הרוצח השקט](#). from Snapirim farm website

Herzog, G (2019). [כלור- הוא במים והוא בא להרוג](#). from Snapirim farm website

Herzog, G (2019). [מגדלים מים- שמירה על ערכי מים תקינים](#). from Snapirim farm website

Herzog, G (2023). [הקיץ כאן, העדר חמצן בבריכת הנני!](#). from Snapirim farm website