

<https://doi.org/10.61308/VQRH6905>

Количествен анализ на хранителните разтвори на три аквапонични системи

Милена Кръстанова

Катедра по анатомия, физиология и животновъдни науки,
Факултет по ветеринарна медицина, Лесотехнически университет,
София 1000, България

Кореспондиращ автор: milenakrastanova77@gmail.com

Резюме: Оценено е въздействието на хранителните потоци върху риба тилапия (*Oreochromis niloticus*) и растителни култури в три модела аквапонични системи (система на дълбоководна култура, техника на хранителния филм и лехи със субстрат), поставени при еднакви условия. Извършен е количествен анализ на концентрациите на амоняк, нитрити, нитрати и факторите, от които те зависят (температура на въздуха и водата на рибите, влажност на въздуха, рН и разтворения кислород). Направена е оценка на хранителните разтвори, влияещи върху добива и качеството на продукцията и ефективността на използваните ресурси. Мониторингът и доброто управление на аквапониката са необходими и задължителни изисквания за осигуряване на оптимални условия за симбиозата между риби, полезни бактерии и растения.

Ключови думи: аквапоника; хранителни вещества; жизнен цикъл

Quantitative analysis of the nutrient solutions of three aquaponic systems

Milena Krastanova

Department of Anatomy, Physiology and Animal Sciences, Faculty of Veterinary Medicine,
University of Forestry,
1000 Sofia, Bulgaria

Corresponding author: milenakrastanova77@gmail.com

Citation: Krastanova, M. (2024). Quantitative analysis of the nutrient solutions of three aquaponic systems. *Bulgarian Journal of Animal Husbandry*, 61(3), 48-64 (Bg).

Abstract: The effects of nutrient flows on tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) and plant crops in three model aquaponic systems (deep water culture system, nutrient film technique and substrate beds) placed under identical conditions were evaluated. Quantitative analysis of ammonia, nitrite, nitrate concentrations and the factors on which they depend (air and fish water temperature, air humidity, pH and dissolved oxygen) was performed. The nutrient solutions affecting the yield and quality of the produce and the efficiency of the resources used were assessed. Monitoring and good management of aquaponics are necessary and mandatory requirements to ensure optimal conditions for the symbiosis between fish, beneficial bacteria and plants

Keywords: aquaponics; nutrients; life cycle

ВЪВЕДЕНИЕ

Аквапониката е устойчива производствена система, която използва повторно отпадъчни

води от рециркуляционна система за аквакултури (RAS), обогатени с макронутриенти и микроелементи за органично отглеждане на растителни култури (Rakocy, 1989; Graber

and Junge, 2009; Licamele, 2009; Nichols and Savidov, 2012; Turcios and Papenbrock, 2014). Трите вида в системата аквапоника – риба, растения и микробиота съжителстват в симбиоза. Общата цел е поддържане на оптимално качество на средата (въздух и вода) за оптимален жизнен цикъл на всички организми в нея (Endut et al., 2010; Mansor et al., 2023).

В системите за аквапоника входящите хранителни вещества за растенията са от разтворените рибни отпадъци (екскреция от хриле, урина и фекалии), състоящи се от разтворими и от твърди органични съединения, които се разтварят до йонна форма във водата. Функционирането на аквапоничните системи се основава на динамично равновесие на хранителните цикли на две основни подсистеми – аквакултури и хидропоничния разтвор, богат на макронутриенти и микроелементи (Graber and Junge, 2009; Licamele, 2009; Nichols and Savidov, 2012; Turcios and Papenbrock, 2014; Somerville et al., 2014). За да се поддържа адекватен растеж на растенията, трябва да се наблюдават концентрациите на тези елементи, защото растенията имат специфични изисквания и се нуждаят от сложен баланс от минерални хранителни вещества, които варират по време на периода на растеж, в съответствие с физиологичните етапи, а така също и от растителния вид (Zekki et al., 1996; López-Arredondo et al., 2013; Eck et al., 2019). Тъй като рибите, микроорганизмите и растенията са в една и съща водна верига, параметрите на околната среда като температура, рН, разтворен кислород (DO), минерални концентрации трябва да бъдат зададени в компромисна точка, възможно най-близка до техните съответни оптимални условия на растеж. За да се оптимизира управлението на системите е необходимо тези хранителни цикли да бъдат задълбочено проучени, така че хранителната концентрация да бъде балансирана за нуждите на двете подсистеми.

Усвояването на хранителни вещества е много сложен процес. Основните източници на хранителни вещества в една аквапонична система са фуражът и добавената вода

(Schmautz et al., 2016; Delaide et al., 2017). Храната за риба съдържа 30 – 60% протеин и 4 – 10% азот (Santos et al., 2022). Рибата усвоява само 20 – 30% от храната, която става част от рибната биомаса. Отпадъчният азот в аквапоничната система произхожда от неусвоен или усвоен фураж. Усвоеният азот се отделя от рибата под формата на амоняк (NH_3) (Meriac et al., 2014; Santos et al., 2022). Амонякът е токсичен за рибите и трябва да бъде отстранен от системата или рециклиран в нея. Общият амонячен азот (TAN) на системата се състои от йонизиран (NH_4^+) и нейонизиран амоняк (NH_3). Нейонизираният амонячен азот е токсичен за рибите и трябва да се поддържа под 0,8 mg/L за тилапия (Nelson R., 2008). Процесът, при който се преобразува амонякът е биологична нитрификация. Хранителните вещества се трансформират чрез нитрификация в амоний (NH_4^+) и нитрат (NO_3^-) в присъствието на кислород (Graber and Junge, 2009; Zou et al., 2016). При нитрификацията амонякът се окислява до нитрит (NO_2^-) от бактерии от родовете *Nitrosomonas* и археи, окисляващи амоняк (AOA), а след това нитритите се окисляват до нитрат (NO_3^-) чрез действието на бактерии от рода *Nitrobacter* и *Nitrospira* (Bartelme et al., 2017). Нитратът е относително безопасно съединение за рибата (Timmons et al., 2018; Preena et al., 2021). Отстраняването на азотни съединения, особено на амоняк и нитрит от системата, е наложително, поради факта, че тези вещества инхибират растежа на рибите (Timmons et al., 2018). Натрупването на нитрат при по-високи концентрации може да намали растежа на рибата в зависимост от нейния вид и времето на излагане на рибата при тези концентрации на нитрати (Davidson et al., 2014; Monsees et al., 2017). Растежът на дъговата пъстърва намалява при концентрации на нитрати от 100 mg/L, а този на тилапията – при 400 mg/L (Davidson et al., 2014; Mota et al., 2015; Monsees et al., 2017). Производителността на системата и качеството на водата в нея зависят от нитрификацията (Pulkkinen et al., 2018). Балансът между NH_3 и NH_4^+ зависи най-вече от рН и температурата на водата на

аквакултурата. Различните хранителни вещества имат различни състояния, променяйки се с нивата на други параметри като това на рН, нивото на DO, а така и от взаимоотношенията на хранителните вещества едно с друго (напр. наличност на К/Са). Микробиомът в кореновата зона на растенията също влияе върху наличността на хранителните вещества (Orozco-Mosque et al., 2018).

Оптимизирането на хранителните изисквания между видовете в системата аквапоника не е напълно проучено (Barbosa et al., 2015; Lobanov, 2023), което налага необходимост от допълнителни изследвания за определяне на минимални оптимални концентрации на хранителните елементи за растенията, а така също проучвания върху последиците от дефицита на вещества при добива на културите и техните хранителните качества (Lobanov, 2023).

Целта на това проучване е оценка на хранителните потоци върху добива и качеството на аквакултурите. За да оценим въздействието на хранителните вещества върху аквакултурите използвахме количествен анализ на хранителните разтвори и факторите, от които те зависят (температура на въздуха и водата, ниво на рН и DO) на три модела системи за аквапоника, поставени при еднакви условия.

МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

Проучването беше извършено върху аквапонични системи за изпитване в Центъра за аквапоника (ЦА), при Тракийския универ-

ситет – Стара Загора, България. Аквапоничните системи бяха модели: „F5” – Clear Flow Aquaponic Systems®/версия 2020 г. (Фигура 1 А), „LC” – Large Commercial w/LFB Clear Flow Aquaponic Systems® with ZDEP®/версия 2021 г. (Фигура 1 В) и „6x50” – Nursery Clear Flow Aquaponic Systems®/версия 2021 г. на фирмата Nelson и Pade®, Inc. (Фигура. 1 С).

Обекти на изследването бяха риба тилапия (*Oreochromis niloticus*), растителни култури (маруля (*Lactuca sativa*), кейл (*Brassica oleracea var. acephala*) и домати (*Lycopersicon esculentum*) и вода от трите основни аквапонични системи: система на дълбоководна култура (RAFT), техника на хранителния филм (NFT) и лехи със субстрат (MGB).

Аквариумите на системите бяха заредени с риби тилапия – F5 с 40 бр., със средно тегло от 0.08 kg (обща биомаса 3,2 kg), LC с 995 бр. със средно тегло от 0.62 kg (обща биомаса 616,9 kg) и „6x50” с 490 риби, със средно тегло от 0.07 kg (обща биомаса 34.3 kg). Рибите бяха хранени с фураж без хранителни добавки, в количество около 2.0% от телесното им тегло. Доставеният от Германия, Aller Aqua (Tilapia Aller Vona Float) рибен фураж представляваше плуващи пелети с големина от 3 и 4.5 mm и съдържаше 42.0% суров протеин; 28.2% NFE, 12.0% сурови мазнини; 6.8% пепел, 3.0% фибри и съдържанието на тежки метали не надхвърляше за олово – 1 mg/kg, кадмий – 0.2 mg/kg, живак – 0.5 mg/kg и арсен – 5.0 mg/kg. Хранителната дажба беше разпределена в три подавания (9:00, 12:00 и 15:00).



Фигура 1. Аквапоничните системи, използвани в проучването. (А): F5, (В): LC and (С): 6x50

Figure 1. The aquaponic systems used in the study. (A): F5, (B): LC and (C): 6x50

След пускане на системите в режим на изпитване изследвахме условията на средата (температура и влажност на въздуха в оранжерията) и ги отчитахме ежедневно чрез високотехнологична система за интелигентен контрол чрез сензори. За мониторинга използвахме визуализация на данните и директна връзка с интерфейсна система на компютър. Всеки ден температурата на водата, рН и DO бяха измервани с цифрови измерватели – сонди чрез автоматичен контрол. Параметрите във водните разтвори: азот-амониев ($\text{NH}_3\text{-N}$), йон-селективен нитрит ($\text{NO}_2\text{-N}$) и йон-селективен нитрат ($\text{NO}_3\text{-N}$) следяхме периодично чрез ръчен контрол. Получените стойности за азот-амониев умножавахме по 1.2 за да получим стойностите на нейонизиран амоняк уравнение (1). Получените стойности за азот-нитритен умножавахме по 3.3, за да получим стойностите на нитритите (2), а на азот-нитратен по 4.4 – за тези на нитратите (3).

$$\text{Нейонизиран амоняк (NH}_3\text{) mg/L} = \text{Азот-амониев (NH}_3\text{-N) x 1.2} \quad (1)$$

$$\text{Nitrite (NO}_2\text{-N) mg/L} = \text{Nitrite-N (NO}_2\text{-N) x 3.3} \quad (2)$$

$$\text{Nitrate (NO}_3\text{-N) mg/L} = \text{Nitrate-N (NO}_3\text{-N) x 4.4} \quad (3)$$

Използвахме тестове за сравнение Octa-Slide 2 (*Octa-Slide 2 Comparator Tests*) на LaMotte Aquaponics Kit Code 3637. За тестовите фактори $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ и $\text{NO}_3\text{-N}$ прилагаме следните методи: салицилатен метод за $\text{NH}_3\text{-N}$, диазотиране/сдвояване за $\text{NO}_2\text{-N}$ и редукция на цинка за $\text{NO}_3\text{-N}$. Обхватът и чувствителността на методите бяха: от 0.0 до 2.0 mg/L за $\text{NH}_3\text{-N}$; от 0.05 до 0.8 mg/L за $\text{NO}_2\text{-N}$ и от 0.25 до 10.0 mg/L за $\text{NO}_3\text{-N}$. За тестване на токсичния нейонизиран амоняк (NH_3) използвахме метода на Trussel (1972).

Получените данни бяха обработени чрез дескриптивна статистика. Разпределението им за нормалност беше проверено чрез Kolmogorov-Smirnov & Lilliefors test. За доказване на достоверните разлики в стойностите на параметрите между трите системи беше използван непараметричен анализ за независи-

ми извадки Mann-Whitney U test, и Wilcoxon Match pair test за зависими променливи за доказване на значимите разлики в стойностите измерваните параметри вътре в системите.

РЕЗУЛТАТИ

От направената дескриптивна статистика бяха определени средните стойности (mean), стандартните отклонения (SD), стандартната грешка на средната (SE), броя на данните за определените измервани параметри, ексцентрицитет (Skewness) и асиметрия (Kurtosis) на разпределението на данните. Използвахме Kolmogorov-Smirnov & Lilliefors test за проверка за нормалност на разпределенията. От направения тест установихме, че разпределенията за всички получени стойности на измерваните параметри се различават от нормалното разпределение. Броят на данните за всеки изследван параметър беше различен, което наложи използването на непараметричен Wilcoxon Match pair test за зависими променливи за доказване на значимите разлики на определените измервани параметри вътре в системите и непараметричен Mann-Whitney U test за независими променливи за доказване на значимите разлики в съответните параметри между трите системи.

От мониторинга на трите аквапонични системи установихме, че средните температури на въздуха за всичките месеци са в диапазона между долната и горна граница на оптималните температури, при които има максимален растеж на растенията в граници от 14.4 до 25.5°C, а специално за маруля – до 30°C (Nelson, 2008; Yamori et al., 2022). (Фигура 1).

За месец Януари средната стойност на температурата на въздуха (mean \pm SD)°C беше значимо по-ниска (17,14 \pm 2.95; 17.51 \pm 3.09; 17.54 \pm 2.88)°C за трите системи (F5, LC и 6x50) (p = 0.0198, Mann-Whitney U test) (табл. 1, отбелязана със *), в сравнение с оптималните стойности (21.13 \pm 0.32)°C на температура на въздуха (взети по литературни

данни). Общият ход на измерените средни температури на въздуха за трите аквапонични системи след месец Февруари беше възходящ и те нарастваха до пика в месец Юни. Не установихме достоверна разлика в средните им стойности до пиковите стойности през месец юни. Измерената стойност на средната температура в пика през месец юни за система F5 (32.57 ± 5.26)°C беше значимо по-висока ($p = 0.0039$, Mann-Whitney U test) в сравнение с оптималната (22.71 ± 0.56)°C (Таблица 1, отбелязано със **), а така също и с измерената средна стойност за системата LC (26.65 ± 2.62)°C ($p = 0.01762$, Mann-Whitney U test) (Таблица 1, отбелязано с !).

За последния месец на наблюдение, средните стойности на температурите на въздуха за системи F5 и LC (33.68 ± 4.08 ; 32.11 ± 2.63 , съответно)°C бяха значимо по-високи ($p = 0.005778$, $p = 0.00589$, Mann-Whitney U test) от средната стойност на оптималната (23.34 ± 2.62)°C и на тази за система 6x50 (23.40 ± 2.21)°C (Таблица1, отбелязано с ^^). Не установихме достоверна разлика в средните температури на въздуха между двете системи F5 и LC за същия месец.

От данните при мониторинга на температурата на водата на рибите не установихме достоверни разлики в температурите за трите системи в сравнение с оптималните за ти-

Таблица 1. Данни за температура на въздуха (средна стойност \pm SD)°C за всичките месеци на изследване

Table 1. Air temperature data (mean value \pm SD)°C for all study months

Месец	Система			Оптимална температура
	F5	LC	6x50	
1	$17.14 \pm 3.09^*$	$17.51 \pm 3.09^*$	$17.54 \pm 2.88^*$	21.1 ± 0.32
2	22.6 ± 2.32	22.54 ± 4.00	22.69 ± 4.04	21.5 ± 1.08
3	24.4 ± 2.58	24.36 ± 2.96	24.3 ± 3.29	21.8 ± 2.03
4	22.8 ± 3.03	22.83 ± 3.46	22.83 ± 3.46	22.1 ± 1.56
5	30.87 ± 3.79	25.17 ± 2.45	25.17 ± 2.45	22.4 ± 2.43
6	$32.57 \pm 5.26^{**}$	$26.65 \pm 2.62!$	26.65 ± 2.62	22.7 ± 3.02
7	$33.68 \pm 4.08^{**^^}$	$32.11 \pm 2.63^{**^^}$	23.4 ± 2.52	23.3 ± 2.54

Със * са отбелязани достоверните разлики спрямо оптималната температура с ! спрямо системата LC и с ^ – спрямо система 6x50

Таблица 2. Данни за температура на водата на рибите (средна стойност \pm SD)°C за всичките месеци на изследване

Table 2. Fish water temperature data (mean value \pm SD)°C for all study months

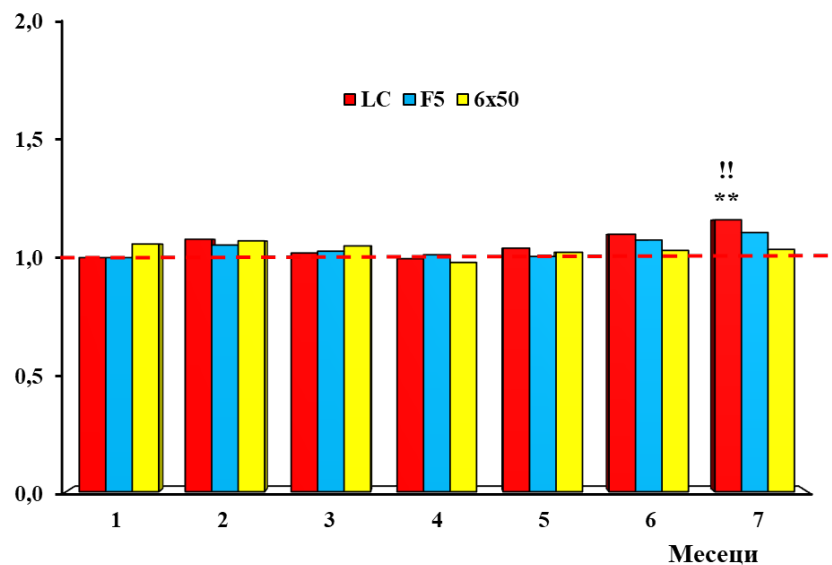
Месец	Система			Оптимална температура
	F5	LC	6x50	
1	24.74 ± 0.44	23.57 ± 2.21	24.94 ± 0.90	25.51 ± 0.79
2	24.42 ± 1.34	25.42 ± 0.85	25.25 ± 0.50	26.21 ± 1.68
3	23.81 ± 1.15	24.36 ± 0.82	24.3 ± 0.40	26.21 ± 2.56
4	23.45 ± 1.48	23.46 ± 1.08	23.08 ± 2.03	25.91 ± 2.86
5	23.69 ± 2.69	24.52 ± 0.91	24.11 ± 0.70	25.93 ± 2.37
6	25.34 ± 1.23	25.93 ± 1.88	24.34 ± 0.87	26.32 ± 2.02
7	26.11 ± 2.16	25.93 ± 0.56	24.43 ± 0.88	26.64 ± 2.74

лапия – 25.5 – 26.6 °C през целия период на наблюдение (Таблица 2) (Nelson, 2008).

Температурата на водата на рибите за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца през 2023 г. не се различаваше достоверно от оптималната температура за нормално развитие на тилапията, но беше под температурния диапазон за максимален растеж на рибата (Таблица 2). Само за последния месец от изследването температурата на водата на рибите за аквапоничната системата 6x50 беше най-ниска (24.43 ± 0.88)°C в сравнение с температурите на останалите две системи F5 (26.11 ± 2.16)°C и LC (25.93 ± 0.56)°C и оптималната температура (26.64 ± 2.74)°C, но-разликите в температурите не бяха достоверни (Таблица 2).

За да оценим степента на промените за температура на водата на рибите в трите наблюдавани аквапонични системи разделихме полу-

чените стойности на температурата на водата на рибите за всеки от изследваните месеци на стойността на температурата за първия месец на системата LC, за да получим относителните промени за всяка една от системите за съответните месеци. По този начин изравнихме изходните условия, за да оценим реалните промени в отделните системи. Установихме, че за първите 6 месеца от проучването има малки промени в трите аквапонични системи, които не се отличаваха значимо от стойността единица за система LC. През 7-ия месец от изследването относителните промени в температурата на водата на рибите в аквапонична система LC бяха значимо по-високи ($p = 0.001762$, Wilcoxon Match paired test) както от тези за 1-ия месец на изследване, така и от останалите 2, 3, 4, 5 и 6 месеца от проучването (Фигура 2, отбелязано с **). За 7-ия месец относителните промени на температурата на



Фигура 2. Относителни промени за температурата на водата на рибите за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца през 2023 г. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики (** - $p < 0.01$) в относителните промени за 7-ия месец на системата LC и останалите месеци, а с ! (!! - $p < 0.01$), - тези между LC и останалите системи F5 и 6x50 за 7-те месеца от изследването. С червена прекъснатата линия е отбелязана нормализираната начална стойност =1

Figure 2. Relative changes for fish water temperature for respective systems (F5, LC and 6x50) over a 7-month period in 2023. Significant differences (** - $p < 0.01$) in relative changes for 7- th month of the LC system and the remaining months, and with ! (!! - $p < 0.01$) – those between LC and the remaining systems F5 and 6x50 for the 7 months of the study. The red dashed line marks the normalized starting value =1

водата на рибите за система LC бяха значимо по-високи ($p = 0.004234$, Mann-Whitney U test) от промените на системите F5 и 6x50 за съответните 7 месеца (Фигура 2, отбелязано с !!).

Оптималното рН за добро усвояване на хранителните вещества от растителни култури е 5.5 – 6.6 (Trejo-Téllez and Gómez-Merino, 2012; Goddek et al. 2015), за развитие на генетичния потенциал на рибите между 7.0 и 9.0 (Boyd et al., 1979), а за нитрифициращите бактерии – $pH > 7$. Поради тези причини за цялата система за аквапоника оптималният диапазон на рН е в границите от 6.0 – 8.0 (Medina, 2014). В нашите проучвания средните стойности на рН и за трите използвани системи бяха между горната граница на диапазона за развитие на генетичния потенциал на рибите и горната граница-диапазон на рН за аквапоника. За първия месец от проучването достоверно най-висока беше стойността на рН за системата LC (8.91 ± 0.30), спрямо стойностите на рН (8.47 ± 0.33 и 8.34 ± 0.31), ($p = 0.00019$ *** и $p = 0.0092$ **, Mann-Whitney U test) на останалите две системи F5 и 6x50 (Таблица 3).

За останалите месеци до 7-ия, стойностите на рН за системата LC бяха по-високи от останалите системи, но разликите не бяха достоверни. За 7-ия месец от изследването

стойността на рН за системата F5 (8.93 ± 0.34), беше достоверно по-висока (!!! - $p < 0.001$) спрямо средните стойности на рН (8.02 ± 0.16 и 8.10 ± 0.16) на останалите LC и 6x50 системи (Таблица 3).

За да сравним степента на промените за рН в трите наблюдавани аквапонични системи разделихме получените стойности на рН за всеки от изследваните месеци на стойността на рН за първия месец на системата LC и сравнихме относителните промени за всяка една от системите за съответните месеци при равни изходни условия, а така също и промените между тях за съответните месеци (Фигура 3).

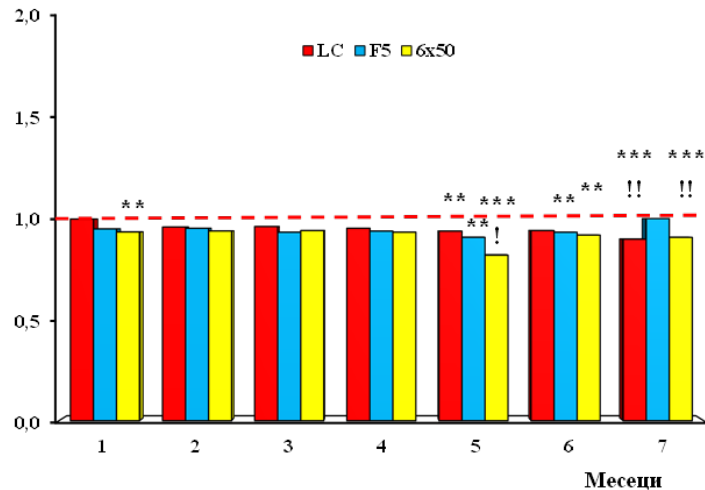
Достоверно по-големи ($p = 0.00781$ **, Mann-Whitney U test) **бяха промените в рН** за системата 6x50 в сравнение със системата LC за първия месец от наблюдението. За 2-ия, 3-ия и 4-тия месец промените не бяха достоверни спрямо тези за 1-ия месец и за трите системи. За 5-ия месец от мониторинга промените в трите системи бяха достоверно по-големи ($p = 0.00781$ **, $p = 0.00964$ **, $p = 0.000849$ ***, Mann-Whitney U test) от тези за 1-ия месец на системата LC, а така също и промените в системата 6x50 бяха достоверно по-големи ($p = 0.00981$!, Mann-Whitney U test) спрямо тези на системата LC за 5-ия месец. За

Таблица 3. Данни за рН на аквапоничните системи (средна стойност \pm SD)% за всичките месеци на изследване

Table 3. pH data of aquaponic systems (mean value \pm SD)% for all months of study

Месец	рН		
	Система		
	F5	LC	6x50
1	8.47 ± 0.33 , (**)	8.91 ± 0.30	8.34 ± 0.31 , (***)
2	8.50 ± 0.35	8.56 ± 0.45	8.38 ± 0.53
3	8.33 ± 0.15	8.58 ± 0.10	8.40 ± 0.24
4	8.38 ± 0.23	8.50 ± 0.13	8.33 ± 0.20
5	8.10 ± 0.28	8.38 ± 0.15	8.18 ± 0.18
6	8.33 ± 0.10	8.40 ± 0.08	8.20 ± 0.14
7	8.93 ± 0.34	8.02 ± 0.16 , (!!!)	8.10 ± 0.16 , (!!!)

Със * са отбелязани достоверните разлики спрямо системата LC, с ! спрямо системата F5.



Фигура 3. Относителни промени на рН за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца през 2023 г. Достоверните разлики в относителните промени на рН на системата LC и останалите две системи са отбелязани със звездичка (** - $p < 0.01$, *** - $p < 0.001$), а тези между системата F5 и останалите системи - с ! ($p < 0.05$, !! - $p < 0.01$). С червена прекъснатата линия е отбелязана нормализираната начална стойност =1

Figure 3. Relative pH changes for the respective systems (F5, LC and 6x50) over a 7-month period in 2023. Significant differences in the relative pH changes of the LC system and the other two systems are marked with an asterisk (** - $p < 0.01$, *** - $p < 0.001$), and those between the F5 system and the other systems - with ! ($p < 0.05$, !! - $p < 0.01$). The red dashed line marks the normalized starting value =1

6-ия месец промените за системите F5 и 6x50 бяха достоверно по-големи ($p = 0.00781^{**}$, $p = 0.00931^{**}$, Mann-Whitney U test) от тези на системата LC за 1-ия месец. През 7-ия месец относителните промени за системите LC и 6x50 бяха достоверно по-големи ($p = 0.000761^{***}$, $p = 0.000849^{***}$, Mann-Whitney U test) в сравнение с 1-ия месец за LC, а така също и спрямо тези на системата F5 за 7-ия месец ($p = 0.00911^{!!}$, Mann-Whitney U test) (Фигура 3).

Разтвореният кислород (DO) е един от най-важните фактори, който може да бъде строго регулиран и контролиран (Wedemeyer 2001). Неговото количество във водата за нуждите на рибата и растенията трябва да бъде в граници от 5 – 11 mg/L, но оптималното количество е поне 6 mg/L (Timmons and Losordo, 1994; Nelson 2008; Trejo-Télez and Gómez-Merino, 2012). В нашите проучвания средните стойности на DO и за трите изпитвани системи за целия период

на проучването бяха по-близо до долната граница, която ние приехме за 6 mg/L, на диапазона на DO за нуждите на рибата и растенията. Средната стойност на DO за системата F5 постепенно намаляваше и на 4-ия месец от изследването тя беше (6.80 ± 0.23) достоверно ($p = 0.00029^{***}$, Mann-Whitney U test) по-ниска от стойностите на DO (7.81 ± 0.20 и 7.65 ± 0.20) за останалите две системи LC и 6x50. На 5-ия и на 7-ия месец от проучването средните стойности на DO за системата F5 бяха (6.10 ± 0.71 и 5.76 ± 0.54), съответно също достоверно ($p = 0.000029^{***}$ и $p = 0.0000012$, Mann-Whitney U test) по-ниски от стойностите на DO (7.81 ± 0.20 и 7.65 ± 0.20) за останалите две системи LC и 6x50 (Таблица 4), като за 7-ия месец от изследването тази стойност беше най-ниска в сравнение с останалите две системи (Таблица 4).

За да сравним промените в DO за трите аквапонични системи поотделно в продълже-

ние на периода на изследване, така и промените между тях за съответните месеци разделихме получените стойности на **DO** за всеки от изследваните месеци на стойността на **DO** за първия месец на системата LC. На 2, 3 и 4-ти месец от проучването относителни промени на **DO** за трите аквапонични системи бяха по-големи от тези на 1-ия месец, но

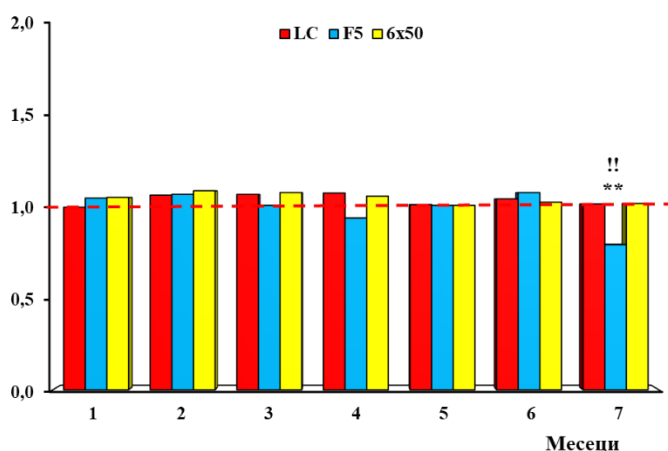
разликите не бяха достоверни, така както не бяха достоверни и промените за 6-ия месец (Фигура 5). Но за седмия месец от изследването относителните промени в системата F5 бяха достоверно по-малки от тези на първия месец от проучването (Фигура 5, отбелязано с ** – $p = 0.00973$, Mann-Whitney U test), а така също бяха и достоверно по-малки от тези на

Таблица 4. Данни за **DO** на аквапоничните системи (средна стойност \pm SD) mg/L за всичките месеци на изследване

Table 4. Aquaponic systems DO data (mean value \pm SD) mg/L for all study months

Месец	Разтворим кислород (DO) [mg/L]		
	Система		
	F5	LC	6x50
1	7.61 \pm 0.63	7.25 \pm 0.25	7.64 \pm 0.28
2	7.73 \pm 0.25	7.73 \pm 0.35	7.90 \pm 0.45
3	7.31 \pm 0.15	7.76 \pm 0.19	7.80 \pm 0.24
4	6.80 \pm 0.23, (***)	7.81 \pm 0.20	7.65 \pm 0.20
5	6.10 \pm 0.71, (***)	7.35 \pm 0.31	7.31 \pm 0.29
6	7.40 \pm 0.43	7.58 \pm 0.38	7.45 \pm 0.37
7	5.76 \pm 0.54, (***)	7.38 \pm 0.14	7.81 \pm 0.16

Със * са отбелязани достоверните разлики спрямо системата F5.



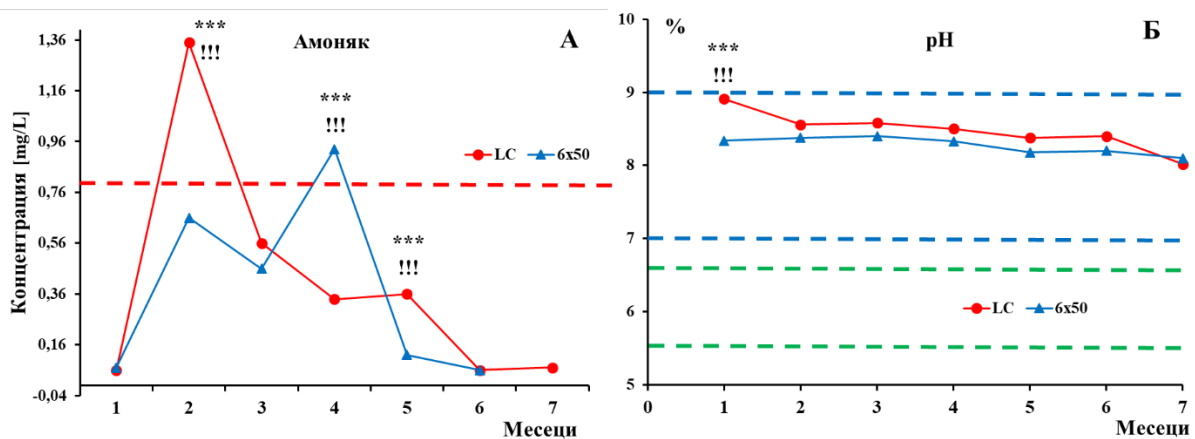
Фигура 4. Относителни промени на **DO** за съответните системи (F5, LC и 6x50), за период от 7 месеца през 2023 г. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики спрямо тези на начална стойност = 1 (** - $p < 0.01$), с ! (!! - $p < 0.01$), - между F5 и LC и 6x50. С червена прекъсната линия е отбелязана нормализираната начална стойност =1

Figure 4. Relative changes in dissolved oxygen (DO) for respective systems (F5, LC and 6x50), over a 7-month period in 2023. Significant differences from baseline = 1 (** - $p < 0.01$) are marked with an asterisk. with ! (!! - $p < 0.01$), - between F5 and LC and 6x50. The red dashed line marks the normalized starting value =1

системите LC и 6x50 за 7-ия месец (Фигура 4, отбелязано с!! – $p = 0.00846$, Mann-Whitney U test).

Чрез периодичните тестове за контрол на нитрификацията проследихме процеса. Нитрификацията е динамичен процес, който зависи и от рН на водата и сравняването на трите системи е невъзможно в един и същи момент във времето. Ето защо за сравнение между трите системи избрахме различни етапи от проследените параметри. Проследихме системите LC и 6x50 във времето, тъй като LC е най-голяма и има най-голяма гъстота на рибата 995 бр. със средно тегло от 0.62 kg (обща биомаса 616,9 kg), а 6x50 е с два пъти по-малка гъстота 490 риби, със средно тегло от 0.07 kg (обща биомаса 34.3 kg), което определя количеството на разтворени рибни

отпадъци. За системата LC на 2-ия месец от проучването стойността на концентрацията на амоняк (1.35 ± 1.48 mg/L) беше достоверно най-висока ($p = 0.000762$, Wilcoxon Match paired test) от стойностите за останалите 6 месеца на проучването. Концентрацията на амоняк (0.36 ± 0.14 mg/L) за 5-ия месец беше достоверно по-висока ($p = 0.0010$, Wilcoxon Match paired test) от стойностите за 1, 6 и 7 месец (Таблица 5, Фигура 5 А, отбелязано със ***). За системата 6x50 достоверно най-висока ($p = 0.000762$, Wilcoxon Match paired test) беше стойността на концентрацията на амоняк (0.93 ± 0.23 mg/L) за 4-ия месец в сравнение с останалите месеци от проучването (Таблица 5, Фигура 5 А, отбелязано със ***) от стойностите за останалите 6 месеца на проучването. На 2-ия месец от проучването стойност-



Фигура 5. Средни стойности на концентрацията на амоняк (А) и рН (Б) за системи LC и 6x50 за период от 7 месеца. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики в средните стойности на амоняк и рН между система LC и 6x50 (***) – $p < 0.001$), а с! (!!! – $p < 0.001$) – тези между пиковата стойност на системите и останалите стойности за съответните системи. Със зелени прекъснати линии е отбелязан диапазон на рН (от 5.5 до 6.6%) за добро усвояване на хранителни вещества от растенията; със сини прекъснати линии диапазона (от 7.0 до 9.0%) за развитие на рибите и с червени прекъснати линии – диапазон на рН за аквапоника от (6.0 до 8.0). С червена прекъснатата линия е отбелязана горната граница на диапазона за допустими стойности на амоняка за водата на рибите (0 до 0.8 mg/L)

Figure 5. Average values of ammonia concentration (A) and pH (B) for LC and 6x50 systems over a period of 7 months. The significant differences in the average values of ammonia and pH between LC and 6x50 system are marked with an asterisk (***) – $p < 0.001$), and with! (!!! – $p < 0.001$) – those between the peak value of the systems and the remaining values for the respective systems. With green dashed lines, a pH range (from 5.5 to 6.6%) for good absorption of nutrients by plants is marked; with blue dashed lines the range (from 7.0 to 9.0%) for fish development and with red dashed lines – the pH range for aquaponics from (6.0 to 8.0). The red dashed line marks the upper limit of the allowable ammonia range for fish water (0 to 0.8 mg/L)

та на концентрацията на амоняк за системата LC беше достоверно по-висока ($p = 0.0000211$, Mann-Whitney U test) от тази на системата 6x50 (Таблица 5, Фигура 5 А, отбелязано със !!!). Пиковата стойност на концентрацията на амоняк за системата 6x50 за 4-ия месец беше достоверно по-висока ($p = 0.0000121$, Mann-Whitney U test) от стойността на системата LC (Таблица 5, Фигура 5 А, отбелязано със !!!).

За първия месец от проучването достоверно най-висока беше стойността на рН за системата LC (8.91 ± 0.30), спрямо стойностите

на рН (8.47 ± 0.33 и 8.34 ± 0.31), ($p = 0.00019$ *** и $p = 0.0092$ **, Mann-Whitney U test) на останалите две системи F5 и 6x50. За останалите месеци до 7-ия стойностите на рН за системата LC бяха по-високи от останалите системи, но разликите не бяха достоверни. За 7-ия месец от изследването стойността на рН за системата F5 (8.93 ± 0.34), беше достоверно по-висока (!!! - $p < 0.001$) спрямо средните стойности на рН (8.02 ± 0.16 и 8.10 ± 0.16) на останалите LC и 6x50 системи (Таблица 5, Фигура 5 Б).

Таблица 5. Данни за рН, NH_3 , нитрити и нитрати (средна стойност \pm SD) на аквапоничните системи F5, LC и 6x50 за период от 7 месеца

Table 5. Data for pH, NH_3 , nitrites and nitrates (mean value \pm SD) of the F5, LC and 6x50 aquaponic systems over a period of 7 months

Месец	рН [%]	Амоняк [mg/L]	Нитрити [mg/L]	Нитрат [mg/L]
LC				
1	8.91 ± 0.30	0.06 ± 0.01	0.88 ± 0.88	55.44 ± 14.79
2	8.56 ± 0.45	1.35 ± 1.08	1.82 ± 1.10	35.20 ± 12.45
3	8.58 ± 0.10	0.56 ± 0.47	0.33 ± 0.00	52.80 ± 15.66
4	8.50 ± 0.13	0.34 ± 0.24	0.33 ± 0.00	35.20 ± 10.00
5	8.38 ± 0.15	0.36 ± 0.14		
6	8.40 ± 0.08	0.06 ± 0.01		
7	8.02 ± 0.16	0.07 ± 0.02	0.33 ± 0.00	54.67 ± 5.51
F5				
1	8.47 ± 0.33 , (**)	0.11 ± 0.01		53.27 ± 3.81
2	8.50 ± 0.35	0.07 ± 0.00	0.41 ± 0.00	55.13 ± 5.64
3	8.33 ± 0.15			
4	8.38 ± 0.23			
5	8.10 ± 0.28			
6	8.33 ± 0.10			
7	8.93 ± 0.34	0.08 ± 0.01		8.80 ± 1.23
6x50				
1	8.34 ± 0.31 , (***)	0.07 ± 0.04	0.28 ± 0.10	66.00 ± 21.09
2	8.38 ± 0.53	0.66 ± 0.76	0.68 ± 0.03	55.00 ± 15.56
3	8.40 ± 0.24	0.46 ± 0.88		
4	8.33 ± 0.20	0.93 ± 0.23	0.33 ± 0.03	39.60 ± 6.22
5	8.18 ± 0.18	0.12 ± 0.00		
6	8.20 ± 0.14	0.06 ± 0.01		
7	8.10 ± 0.16 , (!!!)			

Със * са отбелязани достоверните разлики спрямо системата LC, с ! спрямо системата F5.

За системата LC измерихме най-висока средна стойност на концентрация на нейонизиран амоняк през втория месец (1.35 ± 1.08 mg/L), която беше над горната граница на диапазона ($0 - 0.8$ mg/L) за допустими стойности на нейонизиран амоняк за тилапия (Nelson, 2008). През третия месец стойността на концентрацията на нейонизиран амоняк (0.56 ± 0.47 mg/L) беше също висока, но под горната граница за допустими стойности. След 3-ия месец концентрациите се понижаваха и на 6-ия и 7-и месец бяха измерени най-ниските концентрации (Таблица 5, Фигура 5). Нивата на концентрации на нейонизиран амоняк за двете системи бяха над долната допустима граница.

За системата LC най-високи нива на концентрацията на нитрити (1.82 ± 1.10 mg/L) измерихме през втория месец, които бяха над горната граница на диапазона ($0 - 1.8$ mg/L) за допустими стойности за нитрити ($0 - 1.0$ mg/L), след което в следващите месеци стойностите спадаха, но не достигаха долната граница на диапазона (Таблица 5) (Nelson, 2008). Най-висока средна стойност на концентрация на нитрати отчетохме в края на първия (55.44 ± 14.79 mg/L), през третия (52.80 ± 15.66 mg/L) и седмия месеци (54.67 ± 5.51 mg/L). След този период процесът нитрификация започна да се стабилизира.

За системата 6x50 нивата на нитрити за първия и втори месец от наблюдението бяха (0.28 ± 0.10 и 0.68 ± 0.03 mg/L), а нивата на нитрати бяха най-високи през първия (66.00 ± 21.09 mg/L) и втория (55.00 ± 15.56 mg/L) месец от проучването, след което спадаха (Таблица 5).

Нивата на концентрации на нитрати и за двете системи бяха под горната граница на диапазона за допустими стойности на нитрати за риба до 400 mg/L (Nelson, 2008).

ДИСКУСИЯ

В системите за аквапоника температурата на водата влияе на добива на растителни-

те култури, на растежа и здравето на рибите и микробите (Somerville et al., 2014). Тя е един от най-важните фактори, влияещи върху физиологията, растежа, размножаването и метаболизма на тилапията. Температурният диапазон за нормално развитие, размножаване и растеж на тилапията е около 20 до 35°C , с оптимален диапазон от около $25 - 30^{\circ}\text{C}$ (Chervinski 1982; El-Sayed 2006). Известно е, че смислаемостта на макроелементите се влияе от температурата и количественото определяне на смислаемостта на съставките за оптимално качество на фуража за тилапия трябва да се извършва при съответната температура (24 и 32°C), независимо от климатичния регион и/или сезон (Dey et al., 2023). В нашите проучвания не бяха установени достоверни разлики в температурата на водата на рибите за трите аквапонични системи с оптималните за тилапия $25.5 - 26.6^{\circ}\text{C}$, което осигуряваше на рибите в системите оптимални условия за нормално развитие (Nelson, 2008). Но за последния месец на проучването (юли) в системата 6x50 температурата на водата на рибите беше по-ниска ($24.43 \pm 0.88^{\circ}\text{C}$), но това не се отрази върху развитието и растежа на тилапията. Достоверно най-големи бяха температурните промени в системата LC за 7-ия месец от изследването спрямо останалите месеци, а така също и спрямо останалите две системи за този месец, но това не се отрази на развитието на тилапията.

Един от най-критичните фактори за оценяването на риби, микроби и растения в аквапоничните системи е рН на водата. Нивото на рН влияе върху параметрите на качеството на водата. Този фактор е важен не само за растежа на рибите, но и за осигуряване на хранителни вещества за растенията и позволява оптимално им усвояване, което от своя страна води до ефективен растеж и развитие на растенията в аквапоничните системи. Оптималното рН за всеки жив компонент е различно. Нивото на рН на водата се повлиява от метаболизма на рибите, хранителните отпадъци и температурните промени (Defa et al., 2019). Оптималното рН за развитие на ге-

нетичния потенциал на рибите е между 7.0 и 9.0 (Boyd et al., 1979). Тя се развива и при рН между 5 и 10 с оптимален диапазон от 6.0 до 9.0 (Porta and Masser, 1999; Ross, 2000). Известно е, че видът риба тилапия е устойчив на болести и толерантен към големи колебания в стойността на рН с толеранс между рН 3,7 и 11, но постига най-добър растеж между рН 7,0 и 9,0 (McAndrew et al., 2000). Оптималното рН за добро усвояване на хранителните вещества за повечето растителни култури е 5.5 – 6.6 (Rakocy et al., 2006; Trejo-Téllez and Gómez-Merino, 2012, Goddek et al., 2015). При аквапоничните системи е от решаващо значение да се оптимизират Т и рН, тъй като и двата параметъра корелират силно с концентрацията на токсичния NH_3 , която при повишаване на температурата на водата и рН се повишава (Porta et al., 1999; Medina, 2014). Поради тази причина поддържането на рН в диапазона от 6,0 до 7,0 може да запази амоняка под формата на нетоксичен йонизиран амоняк (NH_4^+) (Al Tawaha et al., 2021). В нашите проучвания средните стойности на рН и за трите използвани системи бяха по-близо до горната граница на диапазона за рН между 6.0 и 9.0 (Ross 2000), което осигуряваше максимален растеж на тилапията. Достоверно най-високи бяха стойностите за системата LC спрямо останалите две системи. Имайки предвид, че нивото на рН на водата се влияе от метаболизма на рибите, хранителните остатъци и температурните промени (Defa et al., 2019) може да предположим, че значимо по-високите средни стойности на рН са повлияни от достоверно по-големите промени в температурата на въздуха (Таблица 1). Но не установихме достоверни разлики в средните температури на водата на рибите между трите системи за 7-месечния период на наблюдение (Таблица 2), въпреки че промените на водата на рибите също бяха по-големи, но не достоверни до 7-ия месец (Таблица 2). Вероятно причините за тези по-високи средни стойности са комплексни. Не само промените в температурите, но също може да се предположи, че поради по-голямата гъстота на рибата при тази сис-

тема (995 риби), може да бъде предпоставка за повлияване на нивото на рН. За 7-ия месец обаче стойностите на рН за системата F5 бяха достоверно по-високи (!!! - $p < 0.001$) спрямо средните стойности на останалите две LC и 6x50 системи (Таблица 3). Тук също може да се предположи, че значимо по-високите средни стойности на рН са повлияни от достоверно най-големите промени в температурата на въздуха за тази система спрямо останалите две (Таблица 1), защото гъстотата на рибата при тази система е по-малка (40 риби) от тази на системата LC и на системата 6x50 (995 и 490 риби). Но при положение, че рН не намалява за 7-ия месец, а при другите две системи обратно намалява поради нитрификацията, то тогава може да се предположи, че се извършва бактериална денитрификация в анаеробни зони и нитратът се превръща в азотен газ. Нитрифициращите бактерии изискват високо ниво на рН (> 7). Има три основни бактерии, за които оптималните нива на рН са – *Nitrobacter* 7.5 (Keen and Prosser, 1987); *Nitrosomonas*: 7.0 – 7.5 (Hatayama et al., 2000) и *Nitrospira*: 8.0 – 8.3 (Blackburne et al., 2007). За цялата система за аквапоника оптималният диапазон на рН е в границите от 6.0 – 8.0 (Medina 2014). По-високите нива на рН в аквапониката могат да доведат до по-ниски добиви от растения с по-ниско усвояване на хранителни вещества (Yang and Kim, 2019; Anderson et al., 2017; Roosta and Afsharipoor, 2012). Достоверно най-големи промени в рН (най-ниски стойности на рН) установихме за 5, 6 и 7 месец в системата 6x50, в която имаше 490 риби в сравнение с останалите месеци, а така също и със системата F5, в която имаше най-малък брой риби – 40. Това е доказателство, че най-вероятно процесът на нитрификация, който предизвиква производството на водородни йони, водещи до спад на рН във водата, е причина за този спад в нивото на рН за тази система. Ефективността на нитрификация се увеличава линейно с 13% на единица рН в диапазон на рН между 5.0 и 9.0 с най-висока активност на амониеви окислители при 8.2 (Antonίου et al., 1990; Villaverde, 1997).

Концентрацията на DO във водата е важна за оптималния растеж на рибите и растенията. Поддържане на високи нива на DO във водата е изключително важно и за интензивно дишане на корените и за оптимален растеж на растенията. Кислородът позволява на хетеротрофните бактерии да преобразуват органично свързаните хранителни вещества в разтворената фаза (т.е. протеинов азот в амоняк), а нитрифициращите бактерии да преобразуват амоняка в нитрат. Наличието на кислород във водата също така намалява аноксичният микробен метаболизъм (т.е. нитрато- и/или сулфат-редуциращи бактерии (ComEAU, 2008)). Този процес има огромно въздействие върху намаляването на концентрациите на хранителни вещества. За седмия месец от нашето проучване относителните промени на DO в системата F5 бяха достоверно по-големи от тези на първия месец от проучването (Фигура 4, отбелязано с **), а така също бяха и достоверно по-големи от тези на системите LC и 6x50 за 7-ия месец (Фигура 4, отбелязано с!). Понижаването на стойностите в концентрациите на DO в системата F5 може да бъде обяснено с повишаване на температурата (Таблица 1) и стойностите на рН за този месец (Таблица 3). Това понижаване на концентрациите на DO в системата F5 може да доведе до недобро усвояване на хранителните вещества от растенията и да намали добивите от тях.

Основният източник на азот в една аквапонична система е храната за риба и съдържащите се в нея протеини (Goddek et al., 2015; Wongkiew et al., 2017; Yildiz et al., 2017). Погълнатата храна от рибите се използва частично за асимилация и метаболизъм, а останалата част се отделя или през хрилете, или като урина и изпражнения (Wongkiew et al., 2017). Азотът, който се отделя през хрилете, е под формата на нейонизиран амоняк – NH_3 , който е токсичен за рибите, докато урината и изпражненията са съставени от органичен азот, който се трансформира в амоняк (Wongkiew et al., 2017; Yildiz et al., 2017). Като цяло, рибите отделят азот под формата

на NH_3 и йонизиран нетоксичен амоняк NH_4^+ т.н. (TAN). Концентрацията на амоняка нараства правопропорционално с промените на рН, температурата на водата и DO, и намалява с увеличаване на CO_2 (Chervinski, 1982). Балансът между NH_3 и NH_4^+ зависи най-вече от рН и температурата. В нашето проучване концентрацията на токсичния амоняк беше най-висока за втория месец от проучването за системата LC, след което спадаше, но за двете системи LC и 6x50 нивата на концентрации на нейонизиран амоняк бяха над долната допустима граница на диапазона (0 – 0.8 mg/L) за допустими стойности на нейонизиран амоняк за тилапия (Фигура 5).

Нитрификацията е двуетапен процес, по време на който NH_3 или NH_4^+ , отделени от рибата, се трансформират първо в нитрит NO_2 и след това в нитрат NO_3 от специфични аеробни хемосинтетични автотрофни бактерии, тъй като нитрификацията изисква наличие на кислород, така че е необходима висока концентрация на DO. В настоящото проучване концентрацията на нитрити за системата LC през втория месец бяха над горната граница на диапазона за допустими стойности за нитрити (0 – 1.0 mg/L), така както и концентрацията на амоняк беше най-висока, след което в следващите месеци стойностите спадаха.

По време на нитрификация концентрациите на амоняк, нитрити и нитрати могат да надхвърлят препоръчителните граници и да повлияят негативно върху растежа и оцеляването на рибите (Preena et al., 2021). Растенията в аквапониката абсорбират амоняк и нитрати от циркулиращата вода и те също могат да повлияят на процеса на нитрификация (Schmautz et al., 2016).

Резултатите от настоящото проучване потвърждават становището, че концентрациите на хранителните вещества и съотношението им бързо се променя от първоначалните условия, най-вероятно поради относителния дял на разтворените хранителни вещества, отделени от рибите, които впоследствие се усвояват от растенията, които имат различни изисквания (Seawright et al., 1998).

В затворените системи обаче, загубата на хранителни вещества от кореновата среда е сведена до минимум (Voogt, 2002).

Богатите на хранителни вещества отпадъчни води от RAS са концентрирани на азот и фосфор (Van Rijn, 2013). Освен това, те съдържат DO и разтворена органична материя и съдържат приблизително 99% от хранителните вещества, необходими за растежа на растенията (Skar et al., 2015). Следователно, богатите на хранителни вещества отпадъчни води от RAS могат да се използват като хранителен разтвор в хидропониката.

ИЗВОДИ

1. Най-вариабилна е температурата на въздуха за системата F5, при която температурата е достоверно по-висока от оптималната, а така също и от тази на системата 6x50 за 7-ия месец.

2. Най-големи са температурните промени на водата на рибите за системите LC и F5 за шестия и седмия месец от изследването.

3. Най-големи са промените в рН (най-ниски стойности на рН) в системата 6x50 за 5, 6 и 7 месец в сравнение с останалите месеци, а така също и със системата F5.

4. Най-ниска концентрация на DO имаше системата F5, която с напредване на времето бързо се променяше и в последните четири месеца беше достоверно по-ниска от концентрациите на системите LC и 6x50 за съответните месеци.

5. Нивата на концентрации на нейонизиран амоняк за двете системи LC и 6x50 бяха над долната допустима граница на диапазона (0 – 0.8 mg/L) за допустими стойности на нейонизиран амоняк за тилапия, но под горната такава, с изключение на 2-ия месец от проучването за системата LC.

6. Концентрацията на нитрити за системата LC през втория месец са над горната граница на диапазона за допустими стойности за нитрити (0 – 1.0 mg/L), след което в следващите месеци стойностите спадаха.

7. Мониторингът на нивата на хранителни вещества и факторите, от които те зависят в рециркулиращата водна система е необходимо и задължително изискване за осигуряване на оптимални условия за симбиозата между риби, микроорганизми и растения.

Благодарности: Изказвам благодарности на екипа от Центъра за аквапоника, при Тракийски университет – Стара Загора за съдействието при това изследване.

Конфликт на интереси: Няма.

ЛИТЕРАТУРА

- Al Tawaha, A., R., Wahab, P., E., M., Jaafar, H., B., Zuan, A., T., K. & Hassan, M., Z. (2020). Effects of Fish Stocking Density on Water Quality, Growth Performance of Tilapia and Yield of Butterhead Lettuce Grown in Decoupled Recirculation Aquaponic Systems. *Journal of Ecological Engineering Received*, 22(1), 8-19.
- Anderson, T. S., Martini, M. R., De Villiers, D., & Timmons, M. B. (2017). Growth and tissue elemental composition response of butterhead lettuce (*Lactuca Sativa*, Cv. Flandria) to hydroponic conditions at different pH and alkalinity. *Horticulturae*, 3, 41.
- Antoniu, P., Hamilton, J., Koopman, B., Jain, R., Holloway, B., Lyberatos, G. & Svoronos, S. A. (1990). Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria. *Water Res.*, 24, 97-101.
- Barbosa, G., Gadelha, F., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. & Halden, R. (2015). Comparison of land, water and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12, 6879-6891.
- Bartelme, R. P., McLellan, S. L. & Newton, J. R. (2017). Freshwater. Recirculating Aquaculture System Operations Drive Biofilter Bacterial Community Shifts around a Stable Nitrifying Consortium of Ammonia-Oxidizing Archaea and Comammox Nitrospira. *Front. Microbiol., Sec. Aquatic Microbiology*, 8, 101.
- Blackburne, R., Vadivelu, V. M., Yuan, Z. & Keller, J. (2007). Kinetic characterisation of an enriched *Nitrospira* culture with comparison to *Nitrobacter*. *Water Res.*, 41, 3033-3042.
- Boyd, C. & Lichtkoppler, F. (1979). Water quality management in pond fish culture. *Research and Development Series*, 22, Auburn University, Alabama.

- Chervinski, J.** (1982). Environmental physiology of tilapias. In: *The biology and culture of tilapias*. (R.S.V. Pullin and R.H. Lowe-McConnell, eds.). ICLARM Conf. Proc. 7, 119-128.
- Comeau, Y.** (2008). Microbial metabolism. In: *Biological wastewater treatment: principles, modeling and design*. (M. Henze, M. van Loosdrecht, G. Ekama, D. Brdjanovic, eds.) Cap. 2. IWA/Cambridge University Press, London, 9-32.
- Davidson, J., Good, C., Welsh, C. & Summerfelt, S. T.** (2014). Comparing the effects of high vs. low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture systems. *Aquac. Eng.*, 59, 30-40.
- Defa, R. M., Ramdhani, R., Priramadhi & Aprillia, B. S.** (2019). Automatic controlling system and IoT based monitoring for pH rate on the aquaponics system. *Journal of Physics: Conference Series*. 1367 012072.
- Delaide, B., Delhay, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H. & Haïssam Jijakli, M.** (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. *Aquacult. Eng.* 78, 130-139.
- Dey, B. K., Verdegem, M. C. J., Nederlof, M. A. J., Masagounder, K., Mas-Muñoz, J. & Schrama, J. W.** (2023). Effect of temperature on the energy utilization efficiencies of digested protein, fat, and carbohydrates in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 576, 739876.
- Eck, M., Sare, A., Massart, S., Schmutz, Z., Junge, R., Smits, T. H. M. & Haïssam Jijakli, M.** (2019). Exploring bacterial communities in aquaponic systems. *Water*, 11(2), 260.
- El-Sayed, A.** (2004). Tilapia culture. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan, W., Nik, W. & Hassan, A.** (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresour. Technol.*, 101, 1511-1517.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H. & Thorarinsdottir, R.** (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7, 4199-4224.
- Graber, A. & Junge, R.** (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246, 147-156.
- Hatayama, R., Takahashi, R., Ohshima, M., Shibasaki, R. & Tokuyama, T.** (2000). Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase from an ammonia-oxidizing bacterium, *Nitrosomonas* sp. K1: Purification and properties. *J. Biosci. Bioeng.*, 90, 426-430.
- Keen, G. A. & Prosser, J. I.** (1987). Interrelationship between pH and surface growth of *Nitrobacter*. *Soil Biol. Biochem.*, 19, 665-672.
- Licamele, J.** (2009). Biomass Production and Nutrient Dynamics in an Aquaponics System. Doctoral dissertation, University of Arizona.
- Lobanov, V.** (2023). Nutrient Transfer in Aquaponic Systems. Optimizing microbial processes for greater circularity and economic viability. Doctoral dissertation, University of Gothenburg.
- López-Arredondo, D., Leyva-González, A., Alatorre-Cobos, F. & Herrera-Estrella, L.** (2013). Biotechnology of nutrient uptake and assimilation in plants. *Int. J. Dev. Biol.*, 57, 595-610.
- Mansor, M., Hasan, M., Kader, M., Mustafa, W., Saidi, S., Jamlos, M. & Talib, N.** (2023). Aquaponic Ecosystem Monitoring with IOT Application. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 31(3), 345-357.
- McAndrew, B. J., Turner, G. F., Robinson, R. L., Beveridge, M. C. M., Baird, D. J., Ross, L. G., Lowe-McConnell, R. H., Lorenzen, K., Penman, D. J., Little, D. C.** (2000). Evolution, phylogenetic relationships and biogeography. In: *Tilapias: Biology and Exploitation* (Beveridge, M. C. M., McAndrew, B. J., eds.); Springer: Heidelberg, The Netherlands, 1-32.
- Medina, M.** (2014). Effect of aquafeed on productivity of Red amaranth and on water quality under aquaponic cultivation. Doctoral dissertation, Florida International University.
- Meriac, A., Eding, E. H., Schrama, J., Kamstra, A. & Verreth, J. A.** (2014). Dietary carbohydrate composition can change waste production and biofilter load in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 420, 254-261.
- Monsees, H., Keitel, J., Paul, M., Kloas, W. & Wuertz, S.** (2017). Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquac. Environ. Interact.*, 9, 9-18.
- Mota, V. C., Limbu, P., Martins, C. I., Eding, E. H. & Verreth, J. A.** (2015). The effect of nearly closed RAS on the feed intake and growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), African catfish (*Clarias gariepinus*) and European eel (*Anguilla anguilla*). *Aquac. Eng.*, 68, 1-5.
- Nelson, R.** (2008). *Aquaponic food production*. Nelson and Pade, Montello, WI 53949.
- Nichols, M., A. & Savidov, N., A.** (2012). Aquaponics: A nutrient and water efficient production system. *Acta Hortic.*, 947, 129-132.
- Orozco-Mosqueda, M. C., Rocha-Granados, M. C., Glick, B. R. & Santoyo, G.** (2018). Microbiome engineering to improve biocontrol and plant growth-promoting mechanism. *Microbiol Research*, 208, 25-31.
- Popma, T. & Masser, M.** (1999). Tilapia: Life history and biology. *Southern Regional Aquaculture Center*. SRAC Publication No. 283.

- Preena, P. G., Rejish, Kumar, V. J. & Singh, I. S. B.** (2021). Nitrification and denitrification in recirculating aquaculture systems: the processes and players. *Rev. Aquac.*, 13, 2053-2075.
- Pulkkinen, J. T., Kiuru, T., Aalto, S. L., Koskela, J. & Vielma, J.** (2018). Startup and effects of relative water renewal rate on water quality and growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in a unique RAS research platform. *Aquac. Eng.*, 82, 38-45.
- Rakocy, J., Masser, M. & Losordo, T.** (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics – integrating fish and plant culture. *South Region Aquacult Cent (SRAC) Publ.* 454, 1-16.
- Rakocy, J., Shultz, R., Bailey, D. & Thoman, E.** (2004). Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Hortic.*, 648, 63-69.
- Rakocy, J. E.** (1989). Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system. *Virgin Islands Agricultural Experiment Station, Island Perspectives*, Saint Croix, VI, USA, 5-10.
- Rakocy, J. E., Shultz, R. C., Bailey, D. S. & Thoman, E. S.** (2004). Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Hortic.*, 648, 63-69.
- Roosta, H. R. & Afsharipoor, S.** (2012). Effects of different cultivation media on vegetative growth, ecophysiological traits and nutrients concentration in strawberry under hydroponic and aquaponic cultivation systems. *Adv. Environ. Biol.*, 6, 543-555.
- Santos, G., Ortiz-Gándara I., Del Castillo A., Aruti A., Gómez P., Ibáñez R., Urriaga A. & Ortiz I.** (2022). Intensified fish farming. Performance of electrochemical remediation of marine RAS waters. *Sci. Total Environ.*, 847, 157368.
- Seawright, D., Stickney, R. & Walker, R.** (1998). Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture*, 160, 215-237.
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T. G. & Junge, R.** (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8, 1-22.
- Skar, S., Liltved, H., Kledal, P., Høgberget, R., Björnsdottir, R., Homme, J., Oddsson, S., Paulsen, H., Drengstig, A., Savidov, N. & Seljåsen, R.** (2015). Aquaponics NOMA (Nordic Marine) – New Innovations for Sustainable Aquaculture in the Nordic Countries. Nordic Innovation publication. Oslo, Norway.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. & Lovatelli, A.** (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. *FAO fisheries and aquaculture technical paper no. 589*. FAO, Rome, 262.
- Timmons, M. B. & Losordo, T. M.** (1994). *Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and management*. 1st Edition, Amsterdam: Elsevier.
- Timmons, M., B. & Ebeling J. M.** (2013). *Recirculating aquaculture*. 3rd ed. Ithaca Publishing Company LLC, Ithaca, NY, USA.
- Timmons, M. B., Guredat, T. & Vinci, B. J.** (2018). *Recirculating Aquaculture*. 4th ed. Ithaca Publishing Company LLC, Ithaca, NY, USA.
- Trejo-Téllez, L. & Gómez-Merino, F.** (2012). Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. In: *Hydroponics – A Standard Methodology for Plant Biological Researches* (Asao T., ed.), Mexico.
- Turcios, A. & Papenbrock, J.** (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents – what can we learn from the past for the future? *Sustainability*, 6(2), 836-856.
- Van Rijn, J.** (2013). Waste treatment in recirculating aquaculture systems. Author links open overlay panel. *Aquacultural Engineering*, 53, 49-56.
- Villaverde, S.** (1997). Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters. *Water Res.*, 31, 1180-1186.
- Voogt, W.** (2002). Potassium management of vegetables under intensive growth conditions. In: *Potassium for sustainable crop production* (Pasricha N. S and Bansal S. K. eds.), Int. potash institute, Bern, Switz., 347-362.
- Wedemeyer, G.** (2001). *Fish hatchery management*. American Fisheries Society. Bethesda, Maryland.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W. & Khanal, S. K.** (2017). Nitrogen Transformations in Aquaponic Systems: A Review. *Aquac. Eng.*, 76, 9-19.
- Yamori, N., Levine, C., Mattson, N. & Yamori, W.** (2022). Optimum root zone temperature of photosynthesis and plant growth depends on air temperature in lettuce plants. *Plant Molecular Biology*, 110, 385-395.
- Yang, T. & Kim, H. J.** (2019). Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Sci. Hortic.*, 256, 108619.
- Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Dominguez, D. & Parisi G.** (2017). Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-A review. *Water (Switzerland)*, 9, 1-17.
- Zekki, H., Gauthier, L. & Gosselin, A.** (1996). Growth, Productivity, and Mineral Composition of Hydroponically Cultivated Greenhouse Tomatoes, with or without Nutrient Solution Recycling. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(6), 1082-1088.
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Guimbaud, C. & Fang, Y.** (2016). Effects of PH on Nitrogen Transformations in Media-Based Aquaponics. *Bioresour. Technol.*, 210, 81-87.

Received: April, 29, 2024; Approved: May, 28, 2024; Published: June, 2024