



ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛТЕТ „ВЕТЕРИНАРНА МЕДИЦИНА“
Катедра „Анатомия, физиология и животновъдни науки“



МИЛЕНА ВАСИЛЕВА КРЪСТАНОВА

**ОПТИМИЗИРАНЕ НА СИМБИОЗАТА МЕЖДУ ВИДОВЕТЕ В
СИСТЕМАТА АКВАПОНИКА**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен „ДОКТОР“

**Област на висше образование: 6. „Аграрни науки и ветеринарна
медицина“**

Професионално направление: 6.3. „Животновъдство“

**Научна специалност: „Развъждане на селскостопанските животни,
биология и биотехника на размножаването“**

Научен ръководител: Доц. д-р Андрей Александров Куртенков, д.с.с.

Рецензенти: Проф. Запрянка Николаева Шиндарска, д.с.с.

Проф. д-р Райко Димитров Пешев, д.в.м.н.

София, 2024

Дисертационният труд съдържа 181 стандартни страници и е онагледен с 26 фигури, в т.ч. и снимки, и 23 таблици. Оформен е във въведение, литературен обзор, изследвания, цел и задачи, материали и методи, резултати, обсъждане, изводи, заключение, научни приноси, препоръки за практиката, публикации, свързани с дисертационния труд (5 статии в научни списания), списък на цитиранията (49 цитирания), участие в научни конгреси и конференции (10 участия) и литература с включени общо 425 литературни източници, от които 11 на кирилица и 414 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на 13.12.2024 г. от 11:00 ч. в зала „Акад. Мако Даков“ на сграда А на Лесотехническия университет, гр. София, бул. „Климент Охридски“ №10 на открито заседание на Научно жури със заповед №ЗПС-567/10.10.2024 г. – на ректора на Лесотехническия университет в състав:

Председател: Проф. д-р Красимира Иванова Генова, д.в.м.

Членове: Акад. проф. Атанас Иванов Атанасов, д.с.н.

Проф. Запрянка Николаева Шиндарска, д.с.с.

Проф. д-р Райко Димитров Пешев, д.в.м.н.

Проф. д-р Добри Желев Ярков, д.в.м.

Материалите по защитата (дисертационен труд, автореферат, рецензии и становища на Научното жури) са на разположение в Деканата на факултет „Ветеринарна медицина“, гр. София, бул. „Климент Охридски“ №10, стая 104 и са публикувани на сайта на Лесотехническия университет (www.ltu.bg).

СЪДЪРЖАНИЕ

I.	ВЪВЕДЕНИЕ.....	4
II.	ЦЕЛ И ЗАДАЧИ.....	5
III.	МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ.....	5
III.1.	Материали.....	5
III.2.	Методи.....	8
III.2.1.	Експериментални и лабораторни методи.....	8
III.2.2.	Статистическа обработка на данните.....	11
IV.	РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ.....	11
IV.1.	Наблюдение върху динамиката на основните фактори, обуславящи хранителните потоци и физико-химични изследвания на параметрите на средата при трите аквапонични системи, поставени при еднакви условия.....	11
IV.1.1.	Наблюдение върху динамиката на основните фактори, обуславящи хранителните потоци.....	11
IV.1.1.1.	Наблюдение на температурата на въздуха на трите аквапонични системи.....	11
IV.1.1.2.	Наблюдение на температурата на водата на рибите и растенията на трите аквапонични системи.....	13
IV.1.1.3.	Наблюдение на относителната влажност на въздуха на трите аквапонични системи.....	15
IV.1.1.4.	Наблюдение на pH на водата на трите аквапонични системи.....	16
IV.1.1.5.	Изследване концентрацията на разтворения кислород на трите аквапонични системи.....	18
IV.1.1.6.	Изследване концентрацията на амоняка, нитритите и нитратите на трите аквапонични системи.....	19
IV.1.1.7.	Химични изпитвания на макро и микроелементи на трите аквапонични системи.....	22
IV.2.	Микробиологични и химични изпитвания на тилапия, растения и вода за определяне на здравословния статус и като показатели за безопасност и качество на аквапоничната продукция.....	25
IV.2.1.	Микробиологични изследвания на тилапия и вода.....	25
IV.2.2.	Елементен анализ на тъканите на растителната аквапонична продукция.....	26
IV.3.	Количествено определяне на някои замърсители във водата и аквапоничната продукция.....	27
IV.3.1.	Определяне концентрацията на олово, кадмий и живак във водата в аквапоничните системи.....	27
IV.3.2.	Определяне концентрацията на олово, кадмий и живак в мускулно месо от риба, листни и плодни зеленчуци.....	28
IV.3.3.	Определяне концентрацията на нитрити и нитрати в листни и плодни зеленчуци.....	29
V.	ИЗВОДИ.....	29
VI.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	31
VII.	НАУЧНИ ПРИНОСИ.....	32
VIII.	ПРЕПОРЪКИ ЗА ПРАКТИКАТА.....	33
IX.	СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ВЪВ ВРЪЗКА С ДИСЕРТАЦИЯТА.....	33
X.	УЧАСТИЕ В НАУЧНИ КОНГРЕСИ И КОНФЕРЕНЦИИ.....	34
	БЛАГОДАРНОСТИ.....	35
	ABSTRACT.....	36

I. ВЪВЕДЕНИЕ

В световен мащаб се търсят отговори за продоволствената сигурност на нарастващото население, включително и за храна, чието производство има екологични, здравни и социални ползи. Учени и експерти застават зад позицията, че без активно и устойчиво управление на природните ресурси и процеси, без прилагане на нови технологии и иновации не е възможен прогрес в производството на храни. Аквапониката, при която са интегрирани две хранителни системи – рециркулационна система за аквакултури (RAS) и органична хидропоника за растителни култури е пример за безотпадно производство. При добър баланс между двете системи се осигуряват допълнителни икономии на разходите. Аквапониката представлява симбиоза между риби, микроорганизми и растения, и осигурява устойчивото използване на вода и хранителни вещества и тяхното рециклиране. Функционирането на аквапоничните системи се осъществява при динамично равновесие на хранителните цикли на двете основни подсистеми. В системите за аквапоника се използва водата от аквакултурите, която е богата на рибни отпадъци, които се използват като хранителни вещества за растежа на растенията, които от своя страна пречистват ефективно водата на аквакултурите.

Оптимизирането на симбиозата между видовете в аквапониката изисква проследяване на биологичните и технологичните характеристики на системата и проучване на промяната на факторите, обуславящи жизнената среда. Изразходваното време, за наблюдение и оптимизиране на променливите параметри, е основен проблем при аквапоничните системи. За разрешаването му е необходимо планирана комбинирана диагностика (интелигентна, автоматизирана и лабораторна) и системен анализ на взаимовръзката на променливите в жизнената среда, за постигане на устойчивост на жизнения цикъл на видовете и максимално производство на безопасна и качествена продукция.

Развитието на проучванията на биологичните и технологичните характеристики на системите за аквапоника, както и на екологичните, оперативните и социално-икономическите аспекти и тяхната взаимовръзка доказва, че аквапониката се нуждае от допълнителни изследвания за постигане на устойчив прогрес. Все повече учени работят върху оптимизиране на модел на аквапонична система с най-благоприятни видове за отглеждане и високо качество на получаваната продукция при различни условия на средата.

II. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ

Целта на настоящите изследвания е да се проучат основните фактори, обуславящи хранителните потоци, взаимовръзката между биологичните и технологичните характеристики на аквапоничните системи и здравния статус на Нилска тилапия (*Oreochromis niloticus*) в три от основните методи на аквапонично производство, за да се постигне оптимизиране управлението на жизнената среда на видовете, добива и качеството на продукцията и ефективността на използваните ресурси.

За реализиране на определената цел си поставихме следните задачи за изпълнение:

1. Проучване на условията на средата и основните фактори, обуславящи хранителните потоци при трите аквапонични системи, поставени при еднакви условия, и сравняването им.

1. Да се проучат основните фактори (температура на въздуха и водата на рибите и растенията, влажност на въздуха, рН и разтворен кислород), от които зависят хранителните потоци в трите аквапонични системи.

2. Да се извърши качествена оценка на водата в трите аквапонични системи чрез количествен анализ на компонентите в нея (концентрации на амоняк, нитрити и нитрати).

3. Да се извърши количествен анализ на макроелементите и микроелементите в хранителните разтвори.

II. Проучване и оценка на хранителните потоци, влияещи върху добива и качеството на продукцията и ефективността на използваните ресурси.

1. Да се направи елементен анализ на тъканите на растенията.

2. Да се определят количествено някои замърсители във водата и продукцията.

III. Установяване на здравния статус на тилапията чрез микробиологични изследвания на риби и вода.

III. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

III.1. Материали

III.1.1. Опитни риби

В животновъдния обект за отглеждане на риби, регистриран към Центъра за аквапоника (ЦА), при Тракийския университет – Стара Загора, в пълносистемен тип на производство на хайвер, личинки, зарибителен

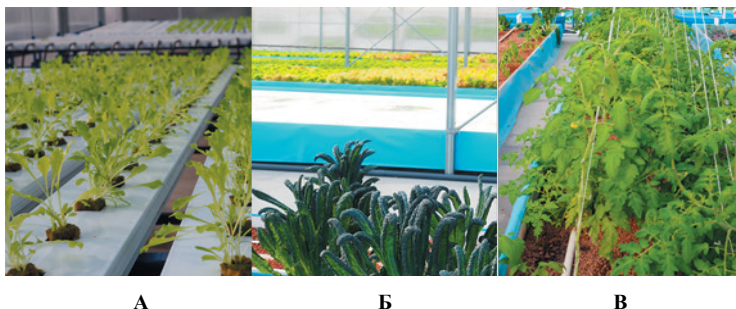
материал и риба за консумация, чрез интензивна технология е развъдена риба Нилска тилапия (*Oreochromis niloticus*) (фиг. 1). В отделните експерименти са използвани общо 1525, от които в аквапонична система (АС) – F5 – 40 тилапии, с начално средно тегло от 0.08 kg (обща биомаса 3.2 kg); в АС LC – 995 тилапии със средно тегло от 0.62 kg (обща биомаса 616.9 kg) и в АС 6x50 – 490 тилапии, със средно тегло от 0.07 kg (обща биомаса 34.3 kg).



Фиг. 1. Използвани риби Нилска тилапия (*Oreochromis niloticus*)

III.1.2. Опитни растения

От 2021 г. са изпитани растителни култури: босилек (обикновен, виолетов, дребнолистен), бял патладжан, кресон, лайка, лук за перца, магданоз, манголд, мента, моркови, невен, пак-чой, пипер сиврия, риган, физалис, чесън за перца, маруля (*Lactuca sativa*) от сортовете (Aquarel, Batavia Guidizel, Bacio, Sotalis, Vignole, Noisette Adelita II, Izabita и Roselita) – 5170 растения (фиг. 2 А); кейл (*Brassica oleracea var. acephala*) от сорт Laciniato Nero Di Toscana – 20 растения (фиг. 2 Б) и домати (*Lycopersicum esculentum*) от сортовете San Marzano nano – 20 растения, Миляна (български сорт от Институт по зеленчукови култури „Марица“) – 20 растения и Трапезица (български сорт) – 20 растения (фиг. 2 В).



Фиг. 2. Растителните аквапонични култури. (А) – марули, (Б) – кейл и (В) – домати

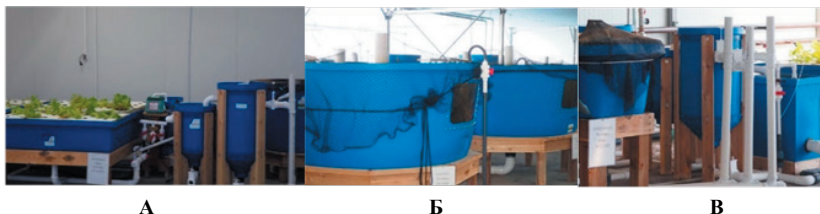
III.1.3. Фураж

Използван е концентриран фураж по рецепта за риба тилапия (Tilapia Aller Bona Float), доставен от Aller Aqua, Германия, който представлява плуващи пелети с големина от 3 и 4.5 mm. Хранителната дажба е подавана три пъти в количество около 2.0 % от телесното тегло на рибите.

III.1.4. Помещение и оборудване

Проучването е извършено върху АС за изпитване в ЦА. Използваната оранжерия е типова, многоотворна, горещо поцинкована с покривно покритие от двоен полиетилен, а оградните стени са от поликарбонат с дебелина 10 mm и оградни термopanели. За опитните постановки са използвани следните модели аквапонични системи: „F5” – Clear Flow Aquaponic Systems®/версия 2020 г. (фиг. 6 А); „LC” – Large Commercial w/LFB Clear Flow Aquaponic Systems® с ZDEP®/версия 2021 г. (фиг. 6 Б) и „6x50” – Nursery Clear Flow Aquaponic Systems®/версия 2021 г. на фирмата Nelson и Pade®, Inc. (фиг. 3 В).

Системите за аквапоника имат басейни за отглеждане на риби, филтър за твърди вещества, бактериален биофилтър, контейнер за дегазиране, лежи за растенията и водосборен резервоар. АС F5 е монтирана в затворено помещение с цел научни изпитвания и обучение, а LC и 6x50 са монтирани в затворено оранжерийно помещение за производство на зеленчуци (табл. 1).



Фиг. 3. Аквапоничните системи, използвани в проучването. (А): F5, (Б): LC и (В): 6x50

Таблица 1. Данни за аквапоничните системи.

АС	Брой рибни басейни	Обем на 1 рибен басейн [L/m ³]	Общ обем [L/m ³]	Брой риби за басейн	Общ брой риби	Тегло на рибата при зарибяване [kg]	Гъстота [риби/m ³]	Плътност при зарибяване [kg/m ³]
F5	1	379	379	40	40	3.2	105.54	8.44
LC	4	1893	11 358	260	1040	83.2	137.34	10.987
6x50	6	189	1134	82	490	0.98	432.09	0.864

III.1.5. Използвани апарати

• Сензори, свързани с интерфейсна система Sensaphone 800 за мониторинг на температура на външния въздух, на въздуха в помещението, на водата, налягане на въздуха и водата.

• Цифрови измерватели за автоматичен контрол на температура, pH и DO.

• Тестове за сравнение Octa-Slide 2 на LaMotte Aquaponics Kit Code 3637.

• Масспектрометър с индуктивно свързана плазма (ICP-MS), модел Agilent 8900 ICP-MS.

• Оптично-емисионен спектрометър (ICP-OES).

• Автоматичен живачен анализатор с автоматичен пробоподавач чрез атомно-абсорбционна спектрометрия със „студени пари“ (CV-AAS).

• Течнохроматографска система с UV или DAD детектор.

• Microflex LT масспектрометър (Bruker Daltonics, Германия).

III.2. Методи

III.2.1. Експериментални и лабораторни методи

III.2.1.1. Изследване условията на средата (въздух и вода)

При проучването са изследвани в продължение на 7 месеца три модела АС с трите технологии – система на дълбоководна култура (RAFT), техника на хранителния филм (NFT) и лежи със субстрат (MGB), поставени при еднакви условия – F5 (RAFT), LC (NFT, RAFT и MGB) и 6x50 (RAFT). Ежедневно са отчитани условията на средата чрез високотехнологична система за интелигентен контрол чрез сензори, свързани с интерфейсна система Sensaphone 800 за мониторинг на температурата на въздуха и на влажността и с цифрови измерватели за автоматичен контрол (термометър със сонда и измерватели на pH и DO).

III.2.1.2. Количествен анализ на концентрациите на амоняк, нитрити, нитрати чрез колориметричен метод

Параметрите във водните разтвори: азот-амониев ($\text{NH}_3\text{-N}$), йон-селективен нитрит ($\text{NO}_2\text{-N}$) и йон-селективен нитрат ($\text{NO}_3\text{-N}$) са измервани периодично чрез ръчен контрол, чрез колориметричен метод с тестове за сравнение Octa-Slide 2 на LaMotte Aquaponics Kit Code 3637.

III.2.1.3. Определяне на химични елементи във вода, фураж и растения

За определяне на количеството химични елементи е извършено петкратно пробовземане от вода, фураж и растения за лабораторно изследване чрез валидирани вътрешно-лабораторни методи (ВЛМ), предназначени за количествена оценка в Централната лаборатория за ветеринарно-санитарна експертиза и екология (ЦЛВСЕЕ) и Централната лаборатория за химични изпитвания и контрол (ЦЛХИК) към Българската агенция по безопасност на храните (БАБХ).

III.2.1.3.1. Изследване на водни проби

Водните проби са вземани в полипропиленови съдове, предварително трикратно изплакнати с вода от системата, и подкиселени до $\text{pH} = 2$, като към 1 L вода е добавяна 5 mL концентрирана чиста азотна киселина (Merck). Количественото определяне на химичните елементи от пробите вода е извършено чрез ВЛМ в ЦЛВСЕЕ. Измерването на химичните елементи (с изключение на живак) е извършено чрез масспектрометър с индуктивно свързана плазма (ICP-MS) и оптично-емисионен спектрометър (ICP-OES). Общият живак (T-Hg) е измерен с автоматичен живачен анализатор с автоматичен пробоподавач чрез атомно-абсорбционна спектрометрия със „студени пари“ (CV-AAS).

III.2.1.3.2. Изследване на проби от фураж

Концентрираният фураж по рецепта за тилапия (Tilapia Aller Bona Float) с два размера на гранулите – 3 и 4.5 mm е изпитан в ЦЛХИК. чрез ICP-MS след разлагане на пробите с микровълнова система под налягане.

III.2.1.3.3. Изследване на проби от растенията

Определянето на нивата на минералните вещества в изследваната растителна продукция са извършени на точкови проби, приготвени от марули, домати и кейл, обработени (предварително подкиселени с азотна киселина) и етикетирани по правилата на Европейския комитет по стандартизация (CEN), за да се гарантирана аналитичната валидност и са анализирани в акредитираната ЦЛХИК към БАБХ чрез мас спектрометрия с ICP-MS за следи от елементи в хранителни продукти.

III.2.1.4. Анализ на тежки метали в храни от животински и растителен произход чрез мас спектрометрия с индуктивно-свързана плазма и на други замърсители (нитрити и нитрати) в листни и плодни зеленчуци чрез течнoхроматографска система с UV

За количествено определяне на нивата на замърсители, като тежки метали (Pb, Cd, Hg), в продукцията от риба тилапия и тежките метали, нитрити и нитрати в продукцията от растителни култури (марули, домати и кейл) по Регламент 2023/915 на Европейската комисия са анализирани двукратни проби от риба и четрикртатни проби от растителни култури.

III.2.1.4.1. Изследване на олово, кадмий и живак в мускулно месо от риба, листни и плодни зеленчуци

Взетите 2 точкови проби са обработени и етикетирани по правилата на CEN, така че да бъде гарантирана аналитичната валидност и са анализирани в акредитираната ЦЛВСЕС при БАБХ по изискване на Регламент 882/2004 по един и същ начин за различните групи продукти. Количеството на тежките метали е определено от мускулното месо от рибата и прилагано за цяла риба. Точните нива на съдържание на тежки метали са прилагани за мокрото тегло на листните и плодните зеленчуци, след измиване и отделяне на ядливата част. Измерването на Pb и Cd е направено с ICP-MS и с ICP-OES. Измерването на общия живак (T-Hg) е извършено на автоматичен живачен анализатор с автоматичен пробоподавач чрез CV-AAS.

III.2.1.4.2. Изследване на други замърсители (нитрити и нитрати) в листни и плодни зеленчуци

Пробите от листни и плодни зеленчуци (марули, кейл и домати) са обработени и етикетирани по правилата на CEN, така че да бъде гарантирана аналитичната валидност и са анализ в акредитираната ЦЛХИК, при БАБХ, следвайки изискванията на Регламент (ЕО) №1881/2006, относно методи за вземане на проби и анализ за съдържание на нитрати. Изпитването е извършено с течнoхроматографска система с UV или DAD детектор.

III.2.1.5. Микробиологични изследвания на тилапия и вода чрез матрично-асистирана лазерна десорбция

Пробите от риби са изследвани чрез матрично-асистирана лазерна десорбция. Всички изолати са култивирани върху кръвен агар, съгласно специфичните процедури за изолация на бактериални патогени от риби (28°C) и идентифицирани с помощта на Microflex LT масспектрометър (Bruker Daltonics, Германия), със софтуер MALDI BioTyper и FlexControl V3.4.

III.2.2. Статистическа обработка на данните

Получените данни са обработени чрез дескриптивна статистика. Разпределението им за нормалност е проверено чрез Kolmogorov-Smirnov&Lillefors test. За доказване на достоверните разлики в стойностите на параметрите между трите системи е използван непараметричен анализ за независими извадки Kruskal-Wallis ANOVA с post hoc анализ на Dunn и непараметричен Mann-Whitney U тест за независими променливи за доказване на значимите разлики между три и две системи при ниво на доверие $p < 0.05$. За доказване на значимите разлики в стойностите на измерваните параметри вътре в системите е използван Wilcoxon Match pair test за зависими променливи при $p < 0.05$. Статистическите изчисления са извършени с помощта на STATISTICA 8 за Windows (StatSoft Inc., САЩ).

IV. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

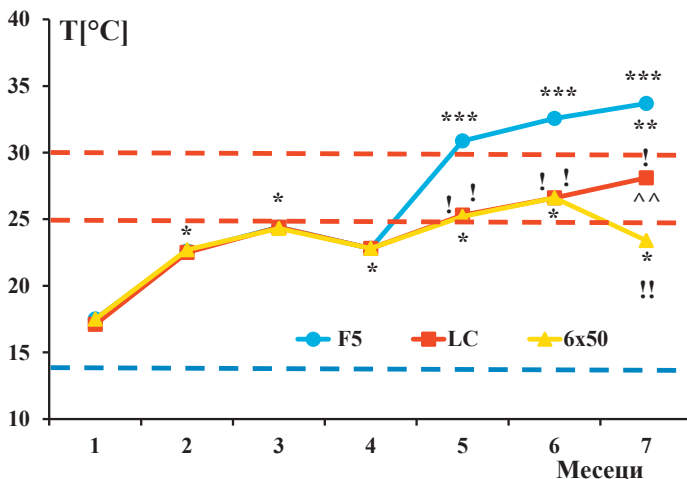
IV.1. Наблюдение върху динамиката на основните фактори, обуславящи хранителните потоци и физико-химични изследвания на параметрите на средата при трите аквапонични системи, поставени при еднакви условия

IV.1.1. Наблюдение върху динамиката на основните фактори, обуславящи хранителните потоци

IV.1.1.1. Наблюдение на температурата на въздуха на трите аквапонични системи

Температурата на околната среда влияе както на температурата на водата на рибите, така и на температурата на водата на растенията. Температурата на водата от своя страна има влияние върху добива на растителни култури, растежа и здравето на рибите и микроорганизмите в АС (*Somerville et al., 2014*). За да потвърдим тази хипотеза са осъществени наблюдения върху динамиката на основните фактори, обуславящи хранителните потоци – температура на околната среда и на водата на

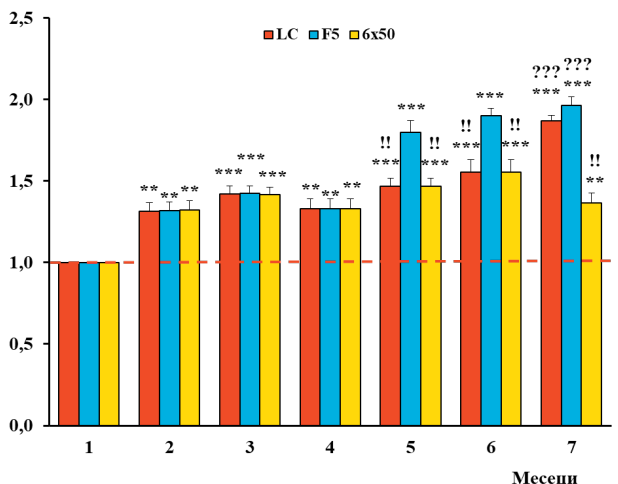
рибите и на растенията при трите АС. От мониторинга за температурата на въздуха е установено, че за всичките месеци на наблюдение тя е в диапазона между долната и горна граница на диапазона, при която има максимален растеж на растенията (от 14.4 до 30°C) (фиг. 4). За месец януари средната стойност на температурата е значимо по-ниска за трите системи в сравнение с оптималните стойности. По-ниската температура на въздуха от оптималните стойности може да повлияе температурата на водата на рибите и водата на растенията.



Фиг. 4. Динамика на температура на въздуха за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца. Със звездичка (* - $p < 0.05$, *** - $p = 0.001$) са отбелязани достоверните разлики в средните температури на въздуха спрямо тези на първия месец за съответната система, с ! ($p < 0.05$, !! - $p = 0.01$) – тези между F5 и останалите две системи и с ^^ ($p < 0.01$) – между системата 6x50 и LC. С червени прекъснати линии е отбелязан диапазонът (25 – 30°C, предложен от *Yamori et al. (2022)*) на оптималната температура на въздуха за максимален растеж на растенията от маруля, а със синя – долната граница (14.4°C, предложена от *Nelson (2008)*) на температурата за максимален растеж на растенията

За да се оцени степента на промените на изследваните параметри в трите наблюдавани аквапонични системи, получените стойности за всеки от изследваните месеци са разделени на стойността за първия месец на съответните системи, за да се получат относителните промени за всяка една от системите за съответните месеци. Нормализирането на данните е направено, за да се поставят в еднакви изходни условия трите системи, което осигуряваше оценяване на реалните промени и тяхното сравнение за трите системи. През 2, 3, и 4 месец относителните промени в

температурата на въздуха в трите АС са еднакви и значимо по-големи от тези за 1-ия месец на изследване, но без значими разлики помежду им. За останалите месеци (5, 6 и 7) относителните промени са значимо по-големи от тези за 1-ия месец на изследване за трите системи също (фиг. 5).

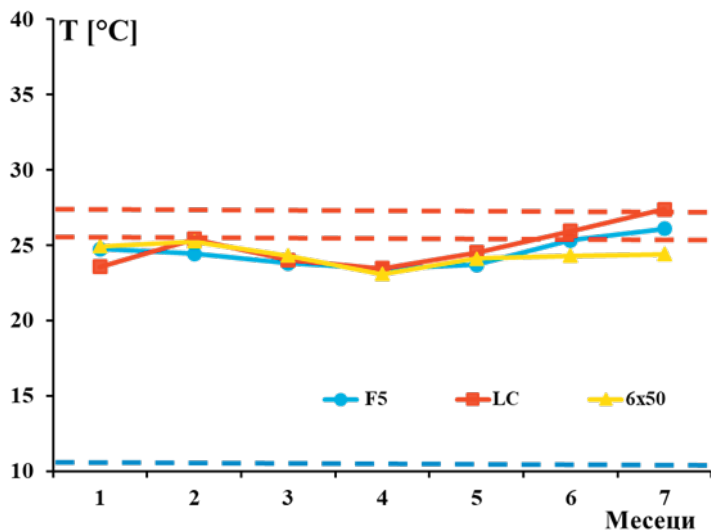


Фиг. 5. Относителни промени на температурата на въздуха за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца през 2023 г. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики спрямо тези на начална стойност = 1 (** - $p < 0.01$, *** - $p < 0.001$), с ! (!! - $p < 0.01$, !!! - $p < 0.001$) – тези между F5 и останалите две системи, а с ? – между 6x50 и останалите две системи (??? - $p < 0.001$). С червена прекъсната линия е отбелязана нормализираната начална стойност = 1

IV.1.1.2. Наблюдение на температурата на водата на рибите и растенията на трите аквапонични системи

Температурата на водата на рибите е един от най-важните фактори, влияещи върху физиологията, растежа, размножаването и метаболизма на тилапията, която е топлолюбива риба и може да се развива в широк температурен диапазон. Измерените през месец януари ниски температури на въздуха (около 17°C) не повлияват на температурата на водата на рибите. Средната температура за трите системи е около 25°C, като най-ниска е за системата LC (23.6°C), която е най-голямата АС. Пониските измерени температури на водата на рибите вероятно биха повлияли растежа на рибите, тъй като растежът на рибата при 28°C е почти двойно по-голям от растежа при 24 и 32°C. От данните при мониторинга на температурата на водата на рибите не са установени достоверни разлики в температурите в сравнение с оптималните за

тиляпия – 25.5 – 26.6°C през целия период на наблюдение и за трите системи (Nelson, 2008) (фиг. 6). За системата F5 (най-малката система) промените на температурата на водата на рибите са единствено по-големи за 7-ия месец (фиг. 6), от което може да се заключи, че промените в температурата на въздуха се отразяват най-вече на промените на водата на рибите за най-горещия месец (юли) и то за най-малката аквапонична система F5 (фиг. 4 и 5). Може да се предположи, че тя се затопля повече, поради по-малкия обем на рибния басейн.

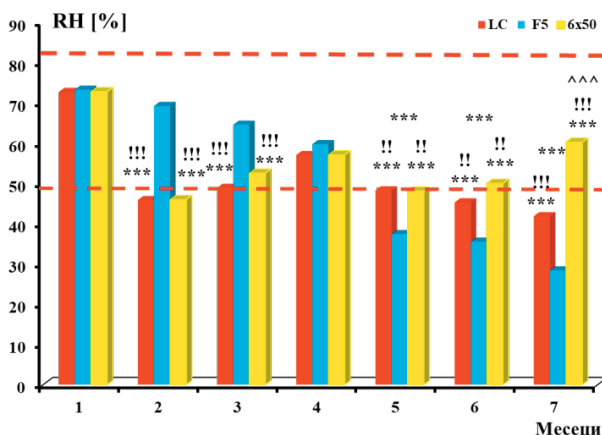


Фиг. 6. Динамика на температурата на водата на рибите за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца. С червени прекъснати линии е отбелязан диапазонът (25.5 – 26.6°C, предложен от Nelson (2008)) на оптималната температура на водата за растеж на рибата, а със синя – долната критична граница на температурата (7 – 11°C, предложена от Balarin and Haller (1982)) за развитие на рибата

Температурата на водата на растенията е отговорна за растежа и развитието им и зависи в голяма степен от температурата на околната среда – въздуха. Установено е, че за всичките месеци на измерване средната температурата на водата на растенията е в температурния диапазон (25 до 30°C) за максимален растеж на марулята. Тя е в горната граница на препоръчителния диапазон за маруля, от 20 до 26°C, предложен от Resh (2012), но под долната граница от по-високия температурен диапазон от 28 до 32° C, предложен от Al Tawaha et al. (2021).

IV.1.1.3. Наблюдение на относителната влажност на въздуха на трите аквапонични системи

Влажността на въздуха (RH) също е фактор, от който зависи правилното развитие на растенията. Установените от нас средни стойности на RH на въздуха за трите аквапонични системи за първия месец от изследването са по-близо до горната граница (75%) от диапазона (от 50 до 85%) за максимален растеж на маруля (*Chia and Lim, 2022*). Когато температурата на въздуха се повиши, RH спада. За 5, 6 и 7-ия месец от проучването средната температура на въздуха за системата F5 е значимо по-висока от месеците 1, 2 и 3 (фиг. 4). RH за тези месеци е значимо по-ниска в сравнение с месеците 1, 2 и 3 (фиг. 7). Доказателство за тази обратно пропорционална връзка между промените в температурата на въздуха и тези на RH са и резултатите, които са получени при сравнението на тези фактори между трите AC. За 2-ия и 3-ти месец средната стойност на относителната влажност на системата F5 е значимо по-висока от тези за системите LC и 6x50 (фиг. 7).



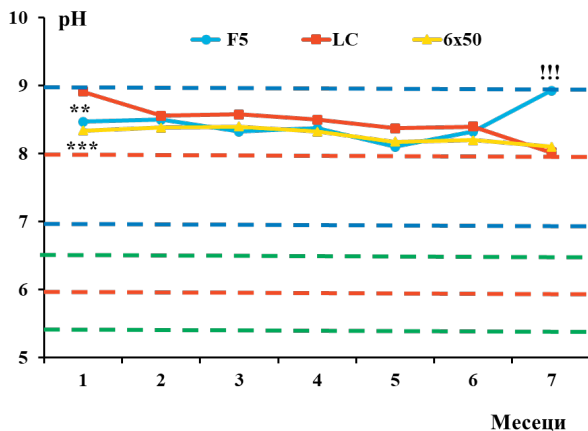
Фиг. 7. Средни стойности на относителната влажност на въздуха (RH) в % за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца през 2023 г. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики в средните стойности между 1-ия месец и останалите 6 месеца (***) - $p < 0.001$), а с! (!! - $p < 0.01$, !!! - $p < 0.001$) – тези за съответните месеци между система F5 и останалите две системи LC и 6x50, а с (^^^ - $p < 0.001$) между система LC и 6x50. С червени прекъснати линии са отбелязани долната и горната граница на диапазона за RH (от 50 до 85%) за максимален растеж на маруля (*Chia and Lim, 2022*).

Докато за последните три месеца (5, 6 и 7) от мониторинга, обратно средните стойности на RH на въздуха на системите LC и 6x50 са значимо по-високи в сравнение с тези на системата F5, защото средната температурата на въздуха на системата F5 е значимо по-висока от тези на системите LC и 6x50 за тези месеци (фиг. 4 и фиг. 7). Промените в RH за системата F5 са по-големи в сравнение с тези на останалите две системи LC и 6x50. Това вероятно може да се дължи и на различните технологии на трите изследвани АС, а и на разликите в обемите – АС F5 е с един рибен басейн с обем 379 L за разлика от другите две системи LC и 6x50, които са с по 6 рибни басейни с общ обем 11 358 L и 1134 L съответно. Установено е, че колебанията в стойностите RH причиняват повече щети, отколкото наличието на постоянно висока или ниска относителна влажност.

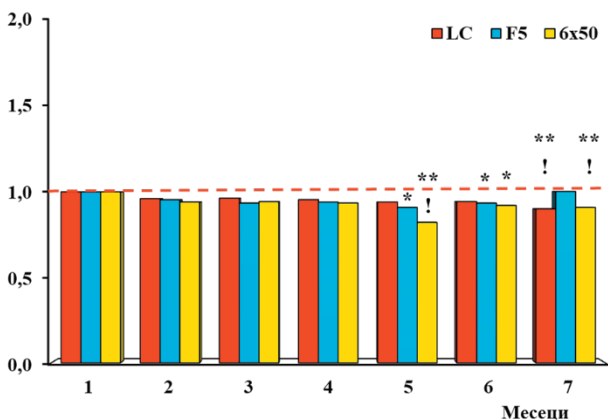
IV.1.1.4. Наблюдение на pH на водата на трите аквапонични системи

Един от най-критичните фактори за оцеляването на риби, микроорганизми и растения в аквапоничните системи е pH на водата. Нивото на pH влияе върху параметрите на качеството на водата, както на съотношението на амоняка към амония, така и на разтворимостта на хранителните вещества за растенията. Добре проектираната и правилно работеща система е тази, при която pH непрекъснато намалява поради нитрификация и трябва да се коригира до оптималното pH от 7. В нашите проучвания средните стойности на pH и за трите използвани системи са между горната граница на диапазона за рибите и горната граница на диапазон на pH за аквапоника, но нивото на pH е доста по-високо от горната граница за усвояване на хранителните вещества от растителните култури (фиг. 8). Достоверно най-високи са стойностите на pH за системата LC спрямо останалите две системи за 1-ия месец. За 7-ия месец pH за системата F5 са достоверно по-високи (!!! - $p < 0.001$) спрямо средните стойности на останалите две LC и 6x50 системи (фиг. 8).

Относителни промени на pH за 5-ия месец от мониторинга са достоверно по-големи в трите системи от тези за 1-ия месец, като за системата 6x50 те са достоверно по-големи спрямо тези на системата LC. За 6-ия месец относителните промени в системите F5 и 6x50 са достоверно по-големи от тези за 1-ия месец, а през 7-ия месец за системите LC и 6x50 те са достоверно по-големи в сравнение с 1-ия месец, а така също и спрямо тези на системата F5 за 7-ия месец (фиг. 9).



Фиг. 8. Средни стойности на pH за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики в средните стойности на pH между LC и останалите две системи (** - $p < 0.01$, *** - $p < 0.001$), а с ! (!!! - $p < 0.001$) – тези между система F5 и останалите две системи LC и 6x50 за седмия месец. Със зелени прекъснати линии са обозначени долната и горната граница на диапазона на pH (от 5.5 до 6.6, *Trejo-Téllez and Gómez-Merino, 2012*) за добро усвояване на хранителни вещества от растенията; със сини прекъснати линии – границите на диапазона (от 7.0 до 9.0 (*Boyd and Lichtkoppler, 1979*)) за развитие на рибите и с червени прекъснати линии – на pH за аквапоника (от 6.0 до 8.0, *Medina, 2014*).



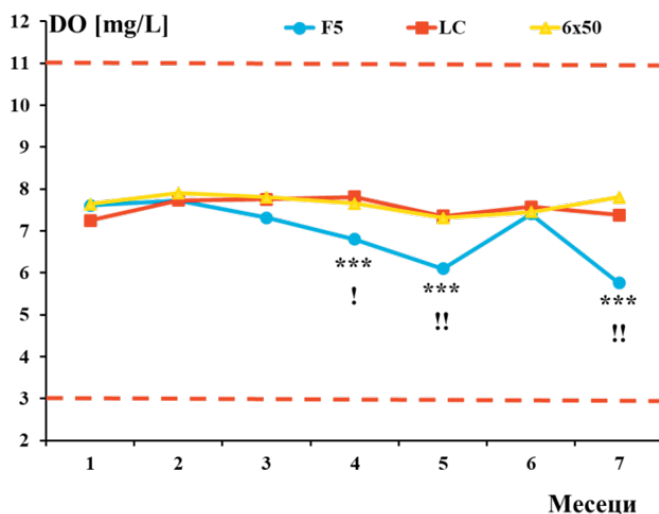
Фиг. 9. Относителни промени на pH за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца през 2023 г. Достоверните разлики в относителните промени на pH спрямо 1-ия месец на аквапоничните системи и останалите месеци на изследване са отбелязани със звездичка (* - $p < 0.05$, ** - $p < 0.01$), а тези между системата F5 и останалите системи – с ! (! - $p < 0.05$). С червена прекъснатата линия е отбелязана нормализираната начална стойност =1.

Когато рН не намалява с течение на времето, вследствие на извършващата се нитрификация, при която нитрифициращите бактерии изискват високо ниво на рН (> 7) за растежа си, в следствие на което рН на водата намалява, то тогава може да се предположи, че се извършва бактериална денитрификация в анаеробни зони и нитратът се превръща в азотен газ (*Blackburne et al., 2007*). Денитрификацията консумира H^+ йони и повишава рН. За да се избегне денитрификацията, е необходимо почистване на филтриращите резервоари и отстраняване на отлаганията от органични вещества. За цялата система за аквапоника оптималният диапазон на рН е в границите от 6.0 – 8.0 (*Tyson et al., 2008; Medina, 2014*).

IV.1.1.5. Изследване концентрацията на разтворения кислород на трите аквапонични системи

Разтвореният кислород (DO) също е един от най-критичните фактори на околната среда, свързани с правилните физиологични функции на тилапията, оптималния растеж на растенията, както и за полезните бактерии (*Li et al., 2018*). В нашите проучвания средните стойности на DO и за трите използвани АС за целия период на проучването са близо до 6 mg/L, в диапазона на DO за нуждите на рибата и растенията (от 5 до 11 mg/L). Средната стойност на концентрацията на DO за системата F5 постепенно намалява и на 4-ия месец от изследването е (6.80 ± 0.23 mg/L) достоверно по-ниска от тези за 1, 2 и 3 месец. Тя е значимо по-ниска от стойностите (7.81 ± 0.20 и 7.65 ± 0.20 mg/L) за останалите две системи LC и 6x50 (фиг. 10).

Понижаването на концентрацията на DO след първия месец, може да се обясни с повишаване на температурата на водата, с нарастването на популацията на рибите, растенията и бактериите, които непрекъснато се нуждаят от все повече кислород. Достоверно най-големите промени в температурата на въздуха за F5 системата спрямо останалите две (фиг. 4) също е една от причините за понижаване на концентрацията на DO за тази система.

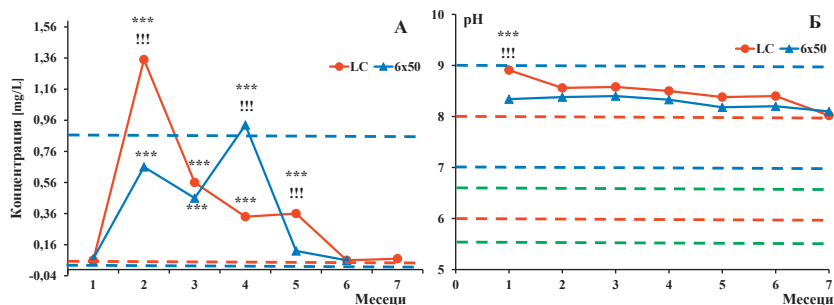


Фиг. 10. Средни стойности на разтворения кислород (DO) за съответните системи (F5, LC и 6x50) за период от 7 месеца. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики в средните стойности между 1-ия месец и останалите 6 месеца (***) - $p < 0.001$), а с ! (!! - $p < 0.01$, !!! - $p < 0.001$) – тези за съответните месеци между система F5 и останалите две системи LC и 6x50. С червени прекъснати линии са обозначени долната и горната граница на диапазона на DO за нуждите на рибата и растенията (от 3 до 11 mg/L).

IV.1.1.6. Изследване концентрацията на амоняка, нитритите и нитратите на трите аквапонични системи

Нитрификацията е динамичен процес, който зависи и от температурата и от рН на водата и сравняването на трите системи е невъзможно в един и същи момент във времето. Това ни даде основание да проследим системите LC и 6x50 във времето, тъй като LC е с най-голяма плътност на рибата, а 6x50 е с десет пъти по-малка плътност при заребяването, което предопределя количеството на разтворени рибни отпадъци. Най-висока средна стойност на концентрацията на нейонизиран амоняк е установена през 2-ия месец от проучването за системата LC, която е достоверно по-висока (1.35 ± 1.08 mg/L) от тази (0.07 ± 0.00 mg/L) на системата 6x50 (фиг. 11 А).

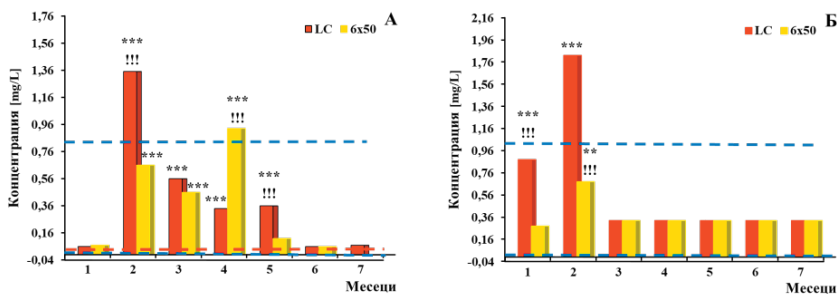
След 3-ия месец за системата LC концентрацията на нейонизиран амоняк и на нитритите е понижена до края на проучването.



Фиг. 11. Средни стойности на концентрацията на амоняк (А) и pH (Б) за системи LC и 6x50 за период от 7 месеца. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики в средните стойности на амоняк и pH за 1-ия месец и останалите месеци на изследването за система LC и 6x50 (***) - $p < 0.001$), а с ! (!!! - $p < 0.001$) – тези между двете системи за съответните месеци. Със сини прекъснати линии са отбелязани долната и горната граница на диапазона (0 до 0.8 mg/L) за допустими стойности във водата на нейонизиран амоняк за развитие на тилапията, а с червена прекъсната линия е отбелязана допустимата стойност (под 0.01 mg/L) за аквапоника. Със зелени прекъснати линии са отбелязани долната и горната граница на диапазона на pH (от 5.5 до 6.6) за добро усвояване на хранителни вещества от растенията; със сини прекъснати линии – на диапазона (от 7.0 до 9.0) за развитие на рибите и с червени прекъснати линии – на диапазон на pH за аквапоника (от 6.0 до 8.0).

Концентрацията на нитрати в АС флукутираше непрекъснато. Амонякът засяга централната нервна система на рибата, причинявайки конвулсии и смърт при 2.79 mg/L (*Randall and Tsui, 2002*). Продължителното излагане на тилапията на концентрации на нейонизиран амоняк (NH_3) над 0.2 mg/L може да причини смъртност, особено сред малките и младите във вода с ниска концентрация на DO. Нейонизираният амоняк е причина за намаляване на консумацията на храна при концентрации от едва 0.08 mg/L. За високите нива на амоняк в системите може да допуснем, че скоростта на нитрификацията е намалена, поради промяна в температурата на водата на рибите, защото при повишаване на температурата на водата на рибите също се увеличава процентът на TAN във водата и се повишава клетъчният метаболизъм (*Somerville et al., 2014*). Концентрацията на амоняк е токсична за всеки вид риба, а тя се променя право пропорционално с промените на pH и температурата на водата. За първия месец от проучването достоверно най-висока е стойността на pH за системата LC (8.91 ± 0.30), спрямо стойностите на pH (8.34 ± 0.31) на системата 6x50. За останалите месеци до 7-ия стойностите на pH за системата LC са по-високи от тези на 6x50, но разликите не са достоверни (фиг. 11 Б).

Тилапията е изключително толерантна към нитритите. Токсичността се проявява при концентрации от 27 mg/L или повече. При настоящото проучване е наблюдавано повишаване на концентрацията на нитрити, след което повишаване на концентрацията на нитрати и намаляване на тази на нитрити. За AC LC най-високи нива на концентрацията на нитрити (1.82 ± 1.10 mg/L) са измерени през втория месец, които са 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 спадат, но не достигат долната граница на диапазона (фиг. 11 Б). Нивата на нитрити за 1-ия и 2-ия месеци на системата LC са достоверно по високи от тези на системата 6x50 за тези месеци (фиг. 12 Б). Най-висока средна стойност на концентрация на нитрати е отчетена 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 започва да се стабилизира. Получените от нас стойности за концентрациите на нитрати са по-ниски от тези на *Tsoumalakou et al.* (2022), които установяват концентрация на нитрати, получени от процеса на нитрификация до 100 mg/L, по-високи от нивата, в система маруля-тилапия – 75 mg/L и концентрации на нитратен азот за листни зеленчуци в диапазона от 42.2 – 63.5 mg/L (*Delaide et al., 2016B; Rafiee et al., 2019*).



Фиг. 12. Нива на концентрациите на нейонизиран амоняк (А) и нитрити (Б) в аквапоничните системи LC и 6x50 за период от 7 месеца. Със звездичка са отбелязани достоверните разлики в средните стойности на амоняк и нитрити за 1-ия месец и останалите месеци на изследването за система LC и 6x50 (***) - $p < 0.001$), а с! (!!! - $p < 0.001$) – тези между двете системи за съответните месеци. С две сини прекъснати линии са отбелязани долната и горната граница на диапазона (0 до 0.8 mg/L) за допустими стойности във водата на нейонизиран амоняк за развитие на тилапията и на диапазона на нитрити (0 до 1 mg/L), а с червена прекъсната линия е отбелязана допустимата стойност на нейонизиран амоняк (под 0.01 mg/L) за аквапоника

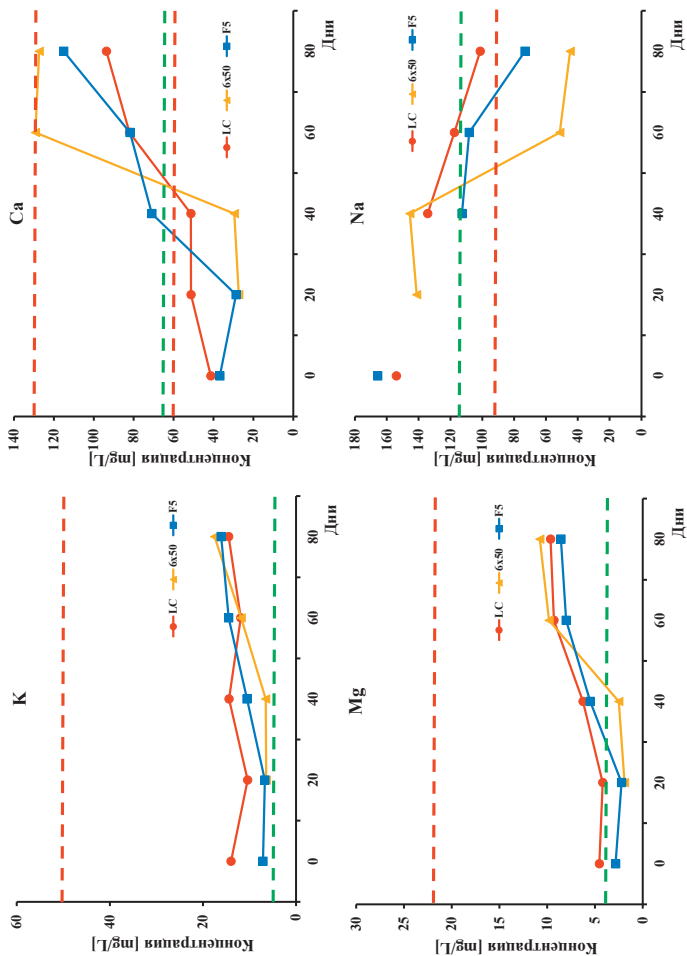
IV.1.1.7. Химични изпитвания на макро и микроелементи на трите аквапонични системи

От получените резултати за нивата на макро и микроелементите в трите АС (фиг. 13 и 14), може да се заключи, че процесите на минерализация в хранителните разтвори са силно динамични, което потвърждава хипотезата, че хранителни дефицити и дисбаланси на хранителни вещества в хранителните разтвори на АС не могат да се поддържат през продължителни периоди от време до оптималните концентрации на веществата (*Seawright et al., 1998; Taha et al., 2022A; Aslanidou et al., 2023*).

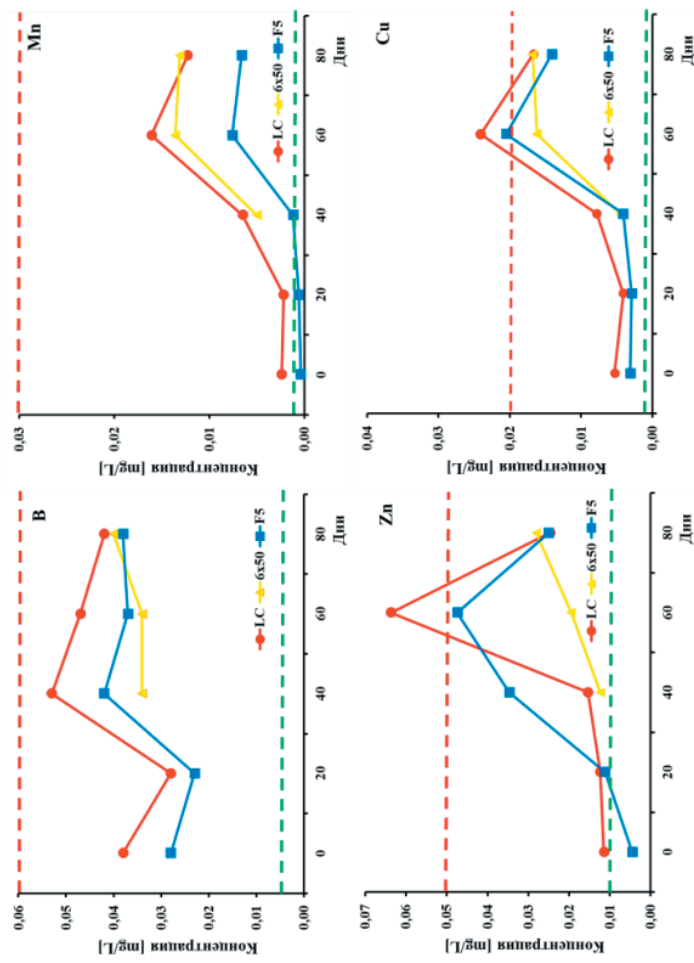
При настоящите проучвания концентрациите на макроелементите К и Mg нарастват плавно до края на периода от 80 дни, но тези нараствания на концентрацията не са достоверни (фиг. 13) и са под долната граница на диапазона за оптимални стойности на концентрациите им. Динамиката в нивата на К и Mg е една и съща за трите системи (фиг. 13).

Динамиката в нивата на Са и Na е подобна, но се различава от тази на макронутриентите К и Mg по достоверно различните нива за отделните системи, като промените в нивата на Са и Na при системата 6x50 са достоверно по-големи от тези на останалите две системи (фиг. 13).

Концентрациите на всички измерени микроелементи В, Mn, Cu и Zn на трите аквапонични системи са под долната граница на диапазоните им за оптимални концентрации до 20-ия ден от проучването (фиг. 14). След този ден те нарастват плавно до 60-ия ден, където са установени пикови концентрации за микроелементите Mn и Cu за трите системи. Максималните концентрации на микроелемента Mn и за трите системи не достигат долната граница на диапазона му (0.5 – 80 mg/L) за оптимални концентрации (фиг. 14). След 60-ия ден концентрациите на всички микроелементи (В, Mn, Cu и Zn) за системите LC и F5 спадат под долната граница на диапазоните им за оптимални концентрации (фиг. 14). Обратно за системата 6x50 максималните концентрации на всички микроелементи са на 80-ия ден, но не достигнат долната граница на диапазоните им за оптимални концентрации (фиг. 14).



Фиг. 13. Динамика на концентрациите на макроелементите K, Ca, Mg и Na в аквaponичните системи LC, 6x50 и F5, за период от 80 дни. Със зелена прекъсната линия е отбелязана измерената средна стойност на водата преди зареждане на системите. С две червени прекъснати линии е отбелязан диапазонът (долина и горна граница) (60.0 – 129.6 mg/L) на оптималните концентрации за Ca, с една червена – долната граница – диапазона за K (50.8 – 340.0 mg/L), за Mg (20.9 – 50.0 mg/L) и за Na (<90.0 mg/L), взети по литературни данни



Фиг. 14. Динамика на концентрациите на микроелементите B, Mn, Cu и Zn в аквапоничните системи LC, 6x50 и F5 за период от 80 дни. Със зелена прекъсната линия е отбелязана измерената средна стойност на съответните микроелементи на водата, преди зареждане на системите. С една червена прекъсната линия е отбелязана долната граница на диапазона за оптималните концентрации на B (0.08 – 2.0 mg/L), Mn (0.5 – 80.0 mg/L), Zn (0.05 – 1.53 mg/L) и Cu (0.02 – 10.0 mg/L), взети по литературни данни

IV.2. Микробиологични и химични изпитвания на тилапия, растения и вода за определяне на здравословния статус и като показатели за безопасност и качество на аквапониичната продукция

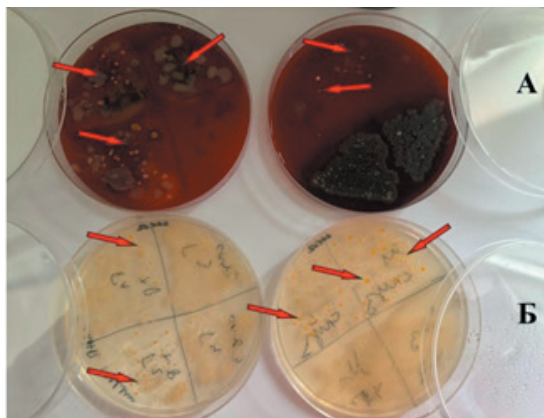
Крайната продукция от тилапия от съответните АС е описана в табл. 2.

Таблица 2. Данни за продукцията от риба.

АС	Брой рибни басейни	Брой риби за басейн	Общ брой риби	Тегло на рибата в края [kg]	Плътност в края [kg/m ³]
F5	1	40	40	24.8 – 28.0	65.4 – 73.9
LC	4	260	995	644.8 – 728	85.2 – 96.1
6x50	6	82	490	39.2	34.6

IV.2.1. Микробиологични изследвания на тилапия и вода

При бактериалната идентификация чрез MALDI – TOF MS са проучени най-разнообразни съобщества в пробите от вода и тилапия (фиг. 15).



Фиг. 15. Бактериален растеж на *Aeromonas veronii*, *A. ichthiosmia*, *A. caviae*, *A. rudis*, *Bacillus cereus*, *Acinetobacter johnsonii*, *A. cumulans*, *Macroccoccus cascolyticus*, *Pseudomonas mosselii*, *Comamonas testosteroni* след препосояване на кръвен агар (А) и Shieh агар (Б). Със стрелки са посочени колониите от бактерии

В пробите от водата и на трите изпитани АС са изолирани и идентифицирани *Aeromonas spp.*, които не повлияват на аквакултурите и

растенията, така както са установили и *Chitmanat et al. (2015)* и *Schmautz et al. (2017)*. Изолираните и идентифицирани *Pseudomonas spp.* и *Bacillus spp.* са известни като биоагенти за активен биоконтрол срещу болести чрез синтеза на антибиотик и сидерофори (*Hynes et al., 2008*), а наличието на *Comamonas testosteroni* осигурява конкуренцията с други бактерии в неговите специални ниши (*Ma et al., 2009*). Не са установени симптоми на заболяване на изследваната тилапия и не е наблюдавана масова или увеличена смъртност на рибите по време на експериментите. Микробиомът във водата и конкретно в кореновата зона на растенията също влияе върху наличността на хранителните вещества, като биотор и биопестицид (*Hynes et al., 2008; Orozco-Mosque et al., 2018*).

IV.2.2. Елементен анализ на тъканите на растителната аквапонична продукция

Данните за реколтата и оценка на външните характеристики на аквапоничната продукция са представени в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Данни за отглежданите марули (*Lactuca sativa*) в аквапоничните системи LC, F5 и 6x50.

Маруля сорт и АС	Реколта [ден]	Тегло [g]	Размери [sm]	Цвят на листата	Форма
<i>Aquarel</i> (LC)	31 – 45	307 – 423	21 – 23	светло зелен	разтворена
<i>Batavia</i> <i>Guidizel</i> (LC)	31 – 45	235 – 330	16 – 19	лъскаво зелен	къдрава
<i>Bacio</i> (LC)	31 – 45	310 – 440	20 – 22	лъскаво тъмно зелен	едра
<i>Sotalis</i> (LC)	31 – 45	264 – 360	22 – 24	светло зелен	разтворена, рехава
<i>Vignole</i> (LC)	31 – 37	370 – 500	22 – 24	светло зелен	фино накъдрена
<i>Adelita II</i> (LC)	20 – 25	90 – 130	17 – 19	лъскав черешов	бейбилийф
<i>Izabita</i> (LC)	20 – 25	265 – 290	16 – 18	червено-зелен	бейбилийф
<i>Noisette</i> (LC, F5)	31 – 40	360 – 510	19 – 22	светъл до средно-зелен	леко накъдрена
<i>Roselita</i> (F5, 6x50)	21 – 35	87 – 140	12 – 16	червено-зелен	бейбилийф едра, отворена
<i>Flavita</i> (F5, 6x50)	21 – 35	90 – 150	12 – 17	гланциран, светло зелен	бейбилийф

Таблица 4. Данни за отглежданите домати (*Lycopersicum esculentum*) в аквапоничните системи LC.

Домати сорт	Реколта [ден]	Тегло [g]	Височина [sm]	Цвят на плодовете	Форма
<i>San Marzano nano</i>	65 – 85	60 – 80	60 – 80	тъмно червен	удължена, месеста, плътна
<i>Миляна</i>	85 – 105	135 – 170	50 – 70	наситено червен	кръгла, леко оребрена
<i>Трапезица</i>	70 – 75	160 – 170	40 – 50	ярко червен	кръгла, непуклива

Растителните видове и сортове (включително български) в комбинация с тилапия показват много добри резултати. За да се оцени качеството на крайната продукция е измерена концентрацията на макро и микроелементите в растителната маса. Установено е, че съдържанието на минерали е по-високо от това на конвенционалното производство, а дори и от данните за зеленчуците, произведени чрез хидропоника. Количеството на Na, Mg, P, K, Ca в марули и домати са с по-високи стойности от съобщените данни на *Kim et al. (2004)*, *Yang and Kim (2020B)* и *Mashaii et al. (2023)*. Количеството на Na, Mg, P, Ca, Mn, Cu и Zn в кейла е най-голямо в сравнение с другите отглеждани растения в проучваните АС, а така също и в други проучвания при аквапоника, хидропоника и конвенционално производство (*Eissa and Al-Ahmary, 2005; Mainasara et al., 2018; Poorshahabadi et al., 2019; Mashaii et al., 2023*).

IV.3. Количествено определяне на някои замърсители във водата и аквапонилната продукция

Възможният риск за здравето на хората, причинен от консумацията на продукцията, се оценява чрез биохимичния състав на рибите, растенията и водата като биомаркери на замърсяване. Внимателната проверка гарантира, че при повишаване на замърсителите, токсичните тежки метали, нитритите и нитратите, няма да се предадат на човека чрез консумацията на изследваните продукти.

IV.3.1. Определяне концентрацията на олово, кадмий и живак във водата на аквапоничните системи

Установеното съдържание на тежки метали във водата в АС е почти десет пъти по-малко (табл. 5) от безопасните граници (Pb – под 0.05 и Cd – под 0.01 mg/L), препоръчани от *WHO (2004)* и в обхвата на допустимите стойности, описани от *Feldlitz et al. (2008)*.

Таблица 5. Данни за концентрацията на олово, кадмий и живак във водата на трите аквапонични системи.

Аквапонична система	Pb	Cd	Hg
	[mg/L]		
F5	< 0.001	< 0.001	< 0.001
L1	< 0.001	< 0.001	< 0.001
6x50	< 0.001	< 0.001	< 0.001

IV.3.2. Определяне концентрацията на олово, кадмий и живак в мускулно месо от тилапия, листни и плодни зеленчуци

Установени са концентрации на тежките метали – Pb, Cd и Hg в тъканите на тилапията в трите проучвани АС (табл. 6) с до десет пъти под максималните нива (0.3, 0.05 и 0.5 mg/kg) (*EC, 2023*). Съгласно регулаторните ограничения за листни зеленчуци (Pb – до 0.3 и Cd – до 0.1 mg/kg) и за домати (съответно под 0.05 и 0.02 mg/kg), констатираното съдържание в маруля и кейл (табл. 6) е под допустимите нива на регулаторните ограничения и в рамките на базовите нива на безопасност за консумация от човека (*FAO/WHO; EC, 2023*).

Таблица 6. Данни от изпитване за Pb, Cd и Hg в мускулно месо от риба, листни и плодни зеленчуци.

Вид продукт	Pb	Cd	Hg
	[mg/kg]		
Тилапия (<i>Oreochromis niloticus</i>)	< 0.0061	< 0.0014	< 0.020
Маруля (<i>Lactuca sativa</i>) сорт Roselita	0.071	0.005	< 0.005
Маруля (<i>Lactuca sativa</i>) сорт Vignole	0.086	0.006	< 0.005
Кейл (<i>Brassica oleracea var. acephala</i>)	0.036	0.003	< 0.005
Домат (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	0.029	0.003	< 0.005

IV.3.3. Определяне концентрацията на нитрити и нитрати в листни и плодни зеленчуци

Нивата на нитрати (NO_3^-) в растителната продукция са под границите (4000 – 5000 mg/kg), определени в съществуващото законодателство (Регламент № 2023/915 на ЕО) (табл. 7) и са в обхвата на стойностите, получени за същите зеленчуци, култивирани в почвено земеделие. Може да се заключи, че аквапоничното производство в това проучване не е довело до повишаване на концентрациите на определените замърсители в храните.

Таблица 7. Данни за концентрацията на нитрати и нитрити в листни и плодни зеленчуци.

Вид продукт	NO_3^-	NO_2
	[mg/kg]	
Маруля (<i>Lactuca sativa</i>) сорт Roselita	1739	10.54
Маруля (<i>Lactuca sativa</i>) сорт Vignole	555.4	< 0.5
Кейл (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>acephala</i>)	1245	< 0.5
Домат (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	< 50	19.6

V. ИЗВОДИ

1. Температурата на въздуха от 17.1 до 30°C е оптимална за максимален растеж на тилапия (*Oreochromis niloticus*), марули (*Lactuca sativa*), кейл (*Brassica oleracea* var. *acephala*) и домати (*Lycopersicum esculentum*) и за трите изследвани аквапонични системи (F5, LC и 6x50).
2. Промените в температурата на въздуха се отразяват основно върху промените на водата на рибите за най-горещия месец (юли) и то за най-малката аквапонична система (F5).
3. Температурният диапазон на водата (23 – 34°C) в аквапоничните системи е подходящ за отглеждането на марули от сортовете (Aquarel, Batavia Guidizel, Bacio, Sotalis, Vignole, Adelita II, Izabita, Noisette, Roselita и Flavita), които са с много добри качества.
4. Високите стойности на рН на водата (близки до горната допустима граница – 9 за рибите и над горната допустима граница за растенията – 6.6), през целия период на изследване за трите аквапонични системи, са причина за високите нива на концентрация на нейонизиран токсичен амоняк над горната граница за тилапия, но не са повлияли на оптималното развитие на отглежданите растителни култури.

5. Ниските стойности на концентрация на разтворен кислород (близки до долната граница за нуждите на рибите и растенията – 3 mg/L), през целия период на изследване за трите аквапонични системи, могат да причинят смущения в тяхното развитие.
6. Високата концентрация на нитрити, над горната граница на допустимите стойности (0 – 1.0 mg/L) за LC системата се дължи на високите концентрации на нейонизиран амоняк.
7. Най-малката аквапонична система (F5) е най-лабилна и в нея промените в параметрите на изследваните фактори са най-големи.
8. Разглежданият 80-дневен период на наблюдение на динамиката на концентрациите на макро и микроелементите в хранителните разтвори и при трите аквапонични системи е достатъчен за възстановяване на баланса и за оптимизиране на аквапоничното производство.
9. Нивото на концентрациите на макронутриентите Ca и Mg във водата, преди да влезе в системите за аквапоника, е под долната граница на диапазоните за концентрации на тези елементи за оптимално развитие на растенията, като след добавянето ѝ концентрациите на тези елементи се повишават, но остават под долната граница на диапазоните. Концентрацията на макронутриента Na е над долната граница на диапазона, а след добавяне на водата спада под нея.
10. Нивото на концентрациите на микроелементите B, Mn, Cu и Zn във водата, преди да влезе в аквапоничните системи, е под долната граница на диапазоните за концентрации на тези елементи за оптимално развитие на растенията и остава такова и в почти всички системи. Установеното съдържание на микроелемента Mn във водата и на трите аквапонични системи, дори и в минимални количества, за което до момента не е съобщавано в литературата, не се отразява на оптималното развитие на тилапията и растенията.
11. Микробиомът във водата и рибите, и на трите аквапонични системи, влияе благотворно върху здравословния статус и продуктивността на рибата и растителните култури.
12. Сравнителното изследване на елементния състав на растителната продукция показва значително по-високо съдържание на минерали от публикуваните данни от други проучвания при аквапоника, хидропоника и конвенционално производство.
13. Съдържанието на тежки метали във водата, тилапията и растителните култури на изследваните AC са до десет пъти под безопасните граници, препоръчани от Световната здравна организация и регулаторните нива, определени от Европейския съюз. Данните за замърсяване с нитрати в

зеленчуковите култури показват почти два пъти по-ниски нива от максималните допустими на европейското законодателство.

14. Чрез добре планирана комбинирана диагностика (интелигентна, автоматизирана и лабораторна) и чрез системен анализ на взаимовръзката на променливите в средата може да се постигне оптимизиране на симбиозата на видовете и поддържане в добро състояние на аквапоничните системи за максимално производство на безопасни и качествени аквапонични храни.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Живеем и работим в свят, който е сложен и постоянно променящ се. Новото време налага и нов поглед към производството и консумацията на храни и в България. Развитието на агрохранителната верига в България следва най-развитите страни за производство на храни, които се основават на прогреса в познанието и са съобразени с екологичните, здравни и социални условия. Необходимостта от допълнителни проучвания на аквапоничната технология и навлизането на аквапоничните системи и у нас доведе до разработването на настоящия дисертационен труд.

Резултатите от проведения сравнителен анализ на основните фактори, от които зависи качеството на хранителните потоци в трите основни методи на аквапонично производство и влиянието му върху добива, безопасността и качеството на аквапоничната продукция дадоха възможност да се предложи комплексна диагностика, за да се оптимизира симбиозата между видовете в аквапониката.

Получените данни чрез системен контрол на изпитваните фактори за качество на условията на средата, обработването им чрез статистически методи доказват достоверността на получените резултати.

В заключение може да обобщим, че задължително условие в аквапониката е поддържането на оптимално качество на средата (въздух и вода) за оптимална симбиоза между видовете. Поради динамичните процеси в хранителните потоци на аквапоничните системи е необходим непрекъснат контрол (интелигентен, автоматизиран и лабораторен) чрез постоянни количествени и качествени анализи и оценки и съответната местна адаптация за устойчиво производство на храни.

VII. НАУЧНИ ПРИНОСИ

VII.1. ПРИНОСИ С ОРИГИНАЛЕН ХАРАКТЕР:

1. Извършен е сравнителен анализ на основните фактори, от които зависи качеството на хранителните потоци в трите основни методи на аквапонично производство.
2. Установено е, че най-малката аквапонична система е силно зависима от сезонността, защото промените в параметрите на основните фактори, от които зависи качеството на хранителните потоци са най-големи през летния сезон.
3. Определено е, че 80-дневният период на наблюдение върху динамиката на концентрациите на макро и микроелементите в хранителните разтвори и при трите аквапонични системи е достатъчен за възстановяване на баланса и за оптимизиране на аквапоничното производство.

VII.2. ПРИНОСИ, ОБОГАТЯВАЩИ СЪЩЕСТВУВАЩИ ЗНАНИЯ:

1. Получена е аналитична информация за състоянието на основните параметри, характеризиращи симбиозата между видовете:
 - условия на средата;
 - качество на хранителните разтвори.
2. Проучено е влиянието на хранителните потоци върху добива, безопасността и качеството на аквапоничната продукция и ефективността на използваните ресурси:
 - елементен анализ на растенията;
 - замърсители в аквапоничната продукция.

VII.3. ПРИНОСИ С ПРИЛОЖЕН ХАРАКТЕР:

1. Данните от проучването може да послужат за изграждане на стратегии за оптимизиране симбиозата между видовете в трите основни системи за аквапоника.
2. Разработената комплексна диагностика е успешно внедрена на три нива: административно, научно и комерсиално.

VIII. ПРЕПОРЪКИ ЗА ПРАКТИКАТА

1. Получените резултати за трите основни методи на аквапонично производство може да се използват за успешно внедряване на аквапоничната технология в България.
2. Контролът на факторите (влажност и температура на въздуха, и pH и разтворим кислород на водата) е необходим за осигуряване на правилен баланс между тях, за да се постигне оптимизиране на управлението на жизнената среда на видовете, с което да се гарантира здравния статус и растеж на рибите и растителните култури.
3. За да се избегнат анаеробните условия и произтичащата от тях денитрификация в аквапоничните системи е необходимо редовно и старателно почистване на филтриращите контейнери и отстраняване на отлагания от органични вещества.
4. Препоръчваме на аквапоничните производители да осъществяват системен контрол на аквапоничните системи чрез комбиниране на интелигентна, автоматизирана и лабораторна диагностика.

IX. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ВЪВ ВРЪЗКА С ДИСЕРТАЦИЯТА

1. **Krastanova M., I. Sirakov, S. Ivanova-Kirilova, Yarkov D. and Orozova P.** (2022). Aquaponic systems: biological and technological parameters. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 36, 01, 305 – 316.
Статията има 49 цитирания (до 14.10.2024 г.)
2. **Кръстанова М., Д. Байкова.** (2023). Новата версия хранителни системи – иновативност за устойчиво производство и продоволствие на храни. *Науката за хранене*. 223 – 225.
3. **Krastanova M., A. Kurtenkov.** (2024). Quantitative analysis of the key factors of nutrient fluxes in three techniques of aquaponic systems. *Tradition and modernity in veterinary medicine*. 9; 1 (16): 50 – 56.
4. **Кръстанова М., Н. Терзиев, Т. Янковска-Стефанова, Е. Минева, Д. Байкова.** (2024). Диагностика на аквапониката в България. XIII Национална младежка научно-практическа конференция с международно участие „Актуални проблеми на хранително-вкусовата индустрия според най-съвременните изисквания на българската и европейската нормативна уредба”, Пловдив. 22.02.2024 г.
5. **Кръстанова М.** (2024). Количествен анализ на хранителните разтвори на три аквапонични системи. *Животновъдни науки*. 61(3), 48 – 64.

X. УЧАСТИЕ В НАУЧНИ КОНГРЕСИ И КОНФЕРЕНЦИИ

1. **Krastanova M.** (2021). Basic biological and technological characteristics of the aquaponic system. Международна научна конференция: „Традиции и съвременност във ветеринарната медицина”, 16 – 18.04.2021 г., Факултет „Ветеринарна медицина”, Лесотехнически университет, София, България.
2. **Krastanova M., D. Baykova.** (2021). ‘Functional foods’ – the new lifestyle. X Национална конференция „Актуални проблеми на ХВП индустрия и Европейска нормативна уредба”, 01.10.2021 г., Съюз по хранителна промишленост, Интер Експо Център, София, България.
3. **Krastanova M., D. Baykova.** (2022). The new food systems – innovation for sustainability. XI национална младежка научно-практическа конференция с международно участие „Актуални проблеми на хранително-вкусовата индустрия според най-съвременните изисквания на българската и европейската нормативна уредба”, 09.03.2022 г., Съюз по хранителна промишленост, Международен панаир гр. Пловдив, България.
4. **Krastanova M., D. Baykova.** (2022). The new version of food systems – innovation for sustainable food production and supplying. XI National congress of nutrition with international participation ‘Nutrition science with evaluation of the present and look to the future’, 26 – 29 May 2022, HIS „Frederic Joliot-Curie”, RC „St. Konstantin and Elena”, Varna, Bulgaria.
5. **Krastanova M.** (2022). Scientific art for overall optimization of nutrition and lifestyle. XIX Национална научно-практическа конференция с международно участие „Бъдещето на храната”, 07.12.2022 г., Парк хотел Москва, София, България.
6. **Krastanova M.** (2023). Implementing aquaponics in the urban environment. XII Национална научно-практическа конференция с международно участие „Актуални проблеми на хранително-вкусовата индустрия според най-съвременните изисквания на българската и европейската нормативна уредба”, 23.02.2023 г., Международен панаир, гр. Пловдив, България.
7. **Krastanova M.** (2023). Balance of the parameters in aquaponics system. International scientific conference ‘One Health’, 12 May 2023, Faculty of veterinary medicine, Trakia university – Stara Zagora, Bulgaria.
8. **Krastanova M., N. Terziev, T. Yankovska-Stefanova, E. Mineva, D. Baikova.** (2024). Diagnostics of aquaponics in Bulgaria. XIII Национална младежка научно-практическа конференция с международно участие

„Актуални проблеми на хранително-вкусовата индустрия според най-съвременните изисквания на българската и европейската нормативна уредба”, 22.02.2024 г., Съюз по хранителна промишленост, Международен панаир, гр. Пловдив, България.

9. **Krastanova M.** (2024). Aquaponic systems for sustainable production of environmentally clean food – now also in Bulgaria. XI Национална конференция по хранене, 30.05. – 01.06.2024 г., Парк хотел Москва, София, България.

10. **Krastanova M.** (2024). Environmental, operational and socio-economic aspects of the aquaponic food system. XI Национална конференция по хранене, 30.05. – 01.06.2024 г., Парк хотел Москва, София, България.

БЛАГОДАРНОСТИ

Бих искала да изразя своята най-искрена благодарност към научния ми ръководител – доц. д-р Андрей Куртенков за възможността да работим заедно, за това, че ми даде необходимата свобода да разгърна идеите и заедно да реализираме този научен труд.

С огромно уважение и признателност за административната подкрепа на ръководството на Лесотехническият университет – академик Иван Илиев и доц. д-р Христо Михайлов и на ръководството на Факултет „Ветеринарна медицина“ – проф. д-р Красимира Генова, доц. д-р Танджу Мехмедов и доц. д-р Станислав Радански. Благодаря за професионалното и колегиалното отношение на всички от катедра „Анатомия, физиология и животновъдни науки“ на ФВМ, към ЛТУ.

Благодаря на доц. д-р Илия Ралчев, проф. д-р Запрянка Шиндарска, проф. д-р Донка Байкова и проф. д-р Иван Божков за безрезервната подкрепа през целия период на моето професионално развитие.

Изключително съм признателна за предоставената организационна възможност и ефективното публично-частно партньорство на проф. д-р Добри Ярков и Веселин Балджиев.

Посвещавам научния ми труд на моя съпруг и нашите дъщери – Йоана, Бистра и Дара, и на моите родители.

На тези страници искам да почета и Радосвет Радев за неговия визионерски поглед и дело, благодарение, на които аквапониката, във всичките и модификации, е внедрена и в България.

OPTIMIZING THE SYMBIOSIS BETWEEN SPECIES IN THE AQUAPONICS SYSTEM

Milena Vasileva Krastanova

Abstract

The aim of the research is to study the main factors determining nutrient flows, the interrelationship between the biological and technological characteristics of aquaponic systems and the health status of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in three of the main techniques of aquaponic production placed under the same initial conditions for a period of 7 months. The subjects of the study were 1525 fishes and a total of 5250 plant species: lettuce (*Lactuca sativa*), kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and tomatoes (*Lycopersicum esculentum*). Daily was monitored the parameters of the main factors on which the conditions of the living environment depend (aqueous solutions) through a high-tech system for intelligent and automatic control through sensors. In the accredited laboratories of the Bulgarian Food Safety Agency were performed chemical and microbiological analyzes of the water, feed, fish and plants.

To achieve optimization of the management of the living environment of the fish and plants cultures, the following factors have been studied: abiotic factors (air and water temperature of fish and plants; air humidity); physical and chemical factors (pH, dissolved oxygen, ammonia, nitrites, nitrates, minerals and pollutants in water and in plant tissues) and biotic factors (microorganisms and symbiotic microbiota).

The reported air and water temperature values are optimal for maximum growth of the tilapia, lettuce, kale and tomatoes for all three aquaponic systems studied. High water pH values close to the upper limit for fish and above the upper limit for plants, throughout the study period, for the three aquaponic systems, were the cause for the high concentration levels of non-ionized toxic ammonia above the upper limit for tilapia. But do not affect the optimal development of the cultivated plants. In all aquaponic systems, observed low values of dissolved oxygen concentration, close to the lower limit for optimal development of fish and plants, during the entire study period, did not cause disturbances in their development. The high concentration of nitrites above the upper limit of permissible values is a consequence of the high concentrations of non-ionized ammonia in the largest aquaponic system, due to the higher density of fish. The smallest aquaponic system is the most labile and in it the changes

in the parameters of the studied factors are the largest. The selected 80-day monitoring period for the dynamics of macro and micronutrient concentrations in nutrient solutions is suitable for tracking the balance in aquaponic production. The microbiome in the water and fish of all three aquaponic systems has a beneficial effect on the health status and productivity of the fish and plant species. A comparative study of the elemental composition of plant produce showed significantly higher mineral content than published data from other studies in aquaponics, hydroponics and conventional production. The content of heavy metals in the water, tilapia and plant crops of the aquaponic systems was up to ten times below the safe limits recommended by the World Health Organization and the regulatory levels set by the EU. The observed content of nitrates in vegetable crops is almost twice below the maximum permissible levels of the European regulation.

The performed comparative analysis of the main factors from which depend on the quality of nutrient flows in the three main technologies of aquaponic systems can be used to improve aquaponic production.