مقاله کامل علمی- پژوهشی

بهره‌برداری و پرورش آبزیان
جلد دهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰
۲۷-۴۳
http://japu.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/japu.2021.18875.1578

مقایسه بازدهی و روند نیتریفیکاسیون در سیستم آکواپونیک با به‌کارگیری دو نوع بستر کشت گیاهی

کاوه تقی‌پور*[۱]، وحید یاوری[۲]، پریتا کوچنین[۲]، سید محمد موسوی[۳]، محمد ذاکری[۳] و حسین پاشازانوسی[۴]

[۱]دانشجوی دکتری تخصصی گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران،
[۲]استاد گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران،
[۳]دانشیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران،
[۴]مربی گروه علوم پایه، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱

چکیده

در سیستم‌های آکواپونیک، تفاوت در طراحی خاص بستر کشت‌های مختلف گیاهی، سبب تفاوت در میزان جذب نیترات توسط گیاه و به‌دنبال آن تغییر در روند نیتریفیکاسیون و راندمان تولید در این سیستم‌های پرورشی می‌گردد. در این آزمایش، بازدهی و روند نیتریفیکاسیون سیستم آکواپونیک در مقیاس آزمایشگاهی با به‌کارگیری دو نوع بستر کشت گیاهی شامل بستر کشت شناور و سیستم نوار غذایی در واحدهای مجزای آکواپونیک به‌مدت ۸ هفته مورد ارزیابی قرار گرفت. هر سیستم شامل ۳ تکرار بود و در مجموع ٦ سیستم جداگانه طراحی شد. بچه‌ماهیان کپور معمولی (*Cyprinus carpio*) با میانگین وزن اولیه ۰/۰٦±۹/۳٤ گرم و تراکم ۳۰۰ عدد در هر مترمکعب آب مخازن پرورشی و گیاه نعناء معمولی (*Mentha spicata*) به تعداد ٦ نشاء در هر بستر کشت گیاهی در یک واحد گلخانه‌ای تیماربندی گردید. شاخص‌های کیفی آب شامل نیترات، آمونیاک و pH در پایان هر هفته آزمایش اندازه‌گیری و مقایسه شد. در هفته چهارم آزمایش میزان pH در تکنیک کشت شناور به‌طور معناداری بالاتر از سیستم نوار غذایی بود (P<۰/۰۱). در تمامی هفته‌های آزمایش تفاوت معنی‌داری بین دو نوع سیستم اکواپونیک در میزان آمونیاک ثبت نگردید (P>۰/۰۵). شاخص نیترات در هر دو نوع سیستم آکواپونیک، از پایان هفته سوم تا پایان هفته چهارم روند افزایشی و پس از آن روندی متعادل و نوسانی تا پایان دوره از خود به نمایش گذاشت. هم‌چنین میزان نیترات در سیستم نوار غذایی مقادیر بالاتری نسبت به بستر کشت شناور در هفته‌های چهارم، پنجم، ششم و هشتم به ثبت رسانید. میانگین وزن کل گیاه تولیدی در بستر کشت شناور مقادیر بالاتری نسبت به سیستم نوار غذایی به ثبت رسانید. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، استفاده از بستر کشت شناور به‌دلیل کارایی بهتر سیستم‌های آزمایشی و عملکرد بهتر رشد ماهی و گیاه نعناء توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آکواپونیک، هیدروپونیک، کپور معمولی (*Cyprinus carpio*)، گیاه نعناء (*Mentha spicata*)، نیتریفیکاسیون

* مسئول مکاتبه: kave.taghipoor@gmail.com

مقدمه

امروزه توسعه سیستم‌های متراکم پرورشی به‌دلیل تولید سریع مواد آلی، باقی‌مانده خوراک و نیتروژن غیرآلی سمی منجر به افزایش نگرانی در خصوص توسعه پایدار صنعت آبزی‌پروری گردیده است (ژائو و همکاران، ۲۰۱۳). پرورش ماهی در سیستم مداربسته با بازچرخانی آب باعث تجمع مواد آلی زائد در محیط پرورش می‌شود. اگر این مواد متابولیک به تغذیه گیاهان برسند زائد نیستند، بلکه ارزش اقتصادی داشته و برای سیستم پرورش ماهی منفعت نیز دارند (روستا و سجادی نیا، ۲۰۱۰). بشر امروز با بهره‌گیری از علوم مختلف و به‌خصوص تلفیق هوشمندانه علوم متنوع با یکدیگر، تلاش می‌کند تا از حداقل امکانات، بیش‌ترین بهره‌وری را کسب نماید. این مقوله در جنبه‌های مختلفی از زندگی مدرن امروزی نمود داشته و به‌طور مستمر رو به افزایش است. یکی از نمونه‌های مثال زدنی در این خصوص، آکواپونیک (به معنی تلفیق آبزی‌پروری با هیدروپونیک) می‌باشد (کینگ، ۲۰۰۵). سیستم‌های آکواپونیک در مقایسه با سایر سیستم‌های متراکم پرورشی از مزایای متعددی هم‌چون افزایش کیفیت و بهبود طعم محصولات کشاورزی حاصل از این سیستم و پالایش آب و محیط زندگی ماهیان از مواد سمی هم‌چون نیترات و آمونیاک به واسطه جذب و مصرف این مواد توسط گیاهان برخوردار است. از دیگر مزایای این سیستم صرفه جویی در مصرف آب و کاهش هزینه تامین آب در بخش آبزی‌پروری سیستم و عدم استفاده از کودهای شیمیایی در بخش گیاهی این سیستم‌ها و جلوگیری از آلودگی محیط زیست است (بازبی و همکاران، ۲۰۱۶).

آکواپونیک امکان استفاده از گیاهان مختلفی مانند گل‌های تزئینی، سبزیجات برگی و میوه‌دار و برخی درختچه‌ها و بوته‌ها را در قسمت هیدروپونیک خود و در قسمت آبزی‌پروری امکان پرورش آبزیان مختلف را فراهم می‌کند (گریبر و جانگ، ۲۰۰۹). طبق مطالعات صورت گرفته ماهی کپور معمولی انتخاب بسیار ایده‌آلی برای سیستم آکواپونیک در مناطق معتدل و گرمسیری است. این ماهی توانایی رشد به‌میزان ۶۰۰ گرم در طول ۱۱-۹ ماه بسته به شرایط پرورش را داراست، مقادیر پایین اکسیژن محلول در آب تا میزان حداقل ٤ میلی‌گرم در لیتر و کیفیت پایین آب را تحمل می‌کند، دامنه تحمل بسیار مناسبی در برابر تغییرات دمای آب دارد و می‌تواند در دمای ٤ تا ۳٤ درجه سانتی‌گراد زنده بماند (سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤)؛ این گونه بر اساس اطلاعات سازمان غذا و کشاورزی (FAO) سومین ماهی از لحاظ اهمیت در آبزی‌پروری در سراسر جهان محسوب می‌گردد (ادگارد و همکاران، ۲۰۱۰). استفاده از گیاه نعناء (*Mentha spicata*) که هم دارای خواص دارویی زیادی است و هم ارزش خوراکی و تغذیه‌ای بالایی دارد، به‌علت پتانسیل بالای تولید و مقاومت آن به شرایط رطوبت زیاد محیط ریشه، جهت کشت در سیستم‌های آکواپونیک و هیدروپونیک توصیه شده است (روستا و قربانی، ۲۰۱۱).

از روش‌های متداول کشت گیاه در بخش هیدروپونیک سیستم‌های آکواپونیک تکنیک کشت شناور و نوار غذایی است که در این پژوهش در سیستم‌های مجزای آکواپونیک به‌کار گرفته شد. در روش کشت شناور گیاهان به‌وسیله یک ورقه پلی‌استیرن (یونولیت فشرده) بر روی سطح آب قرار گرفته و ریشه‌ها وارد آب می‌گردد. در روش نوار غذایی نیز جریان باریکی از آب درون یکسری لوله افقی که به‌عنوان محیط کشت گیاه انتخاب گردیده حرکت داشته و مواد مغذی لازم جهت رشد گیاه از مخزن ماهی به محیط اطراف ریشه‌ها منتقل می‌گردد (سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤). بررسی مطالعاتی در

خصوص بکارگیری بستر کشت‌های گیاهی مختلف در سیستم آکواپونیک نشان داد که انواع بستر کشت گیاهی عملکرد متفاوتی بر شاخص‌های کیفی آب (از جمله بازدهی حذف نیترات) سیستم و رشد ماهی و گیاه دارند (سلام و همکاران، ۲۰۱۳؛ لنارد و لئونارد، ۲۰۰۶)، که در واقع علت تفاوت در میزان بازدهی و عملکرد هرکدام از این بستر کشت‌ها در سیستم‌های آکواپونیک، طراحی خاص و منحصر به فرد هرکدام از آن‌هاست که روی بازدهی و عملکرد ریشه گیاه در حذف مواد مغذی نیتروژنی به‌خصوص نیترات تأثیرگذار است.

در مطالعات مرتبط با سیستم‌های آکواپونیک، کارایی انواع بستر کشت گیاهی با بررسی رشد گیاه و میزان مواد مغذی آب سیستم مشخص می‌گردد (نووانسی و همکاران، ۲۰۱۹)، بر همین اساس، بررسی مقایسه‌ای بستر کشت‌های گیاهی به‌کار گرفته شده در پژوهش حاضر و معرفی بهترین بستر کشت گیاهی، علاوه بر این که سبب تمرکز تولیدکنندگان بر تولید بیش‌تر گیاهان در بستر کشت مناسب‌تر در سیستم آکواپونیک خواهد شد، سبب تقویت توان گیاه پالایی سیستم به واسطه مصرف و جذب بالاتر مواد آلی نیتروژنی (حاصل از غذا و مدفوع ماهیان) محدودکننده رشد ماهیان و به دنبال آن پالایش مناسب‌تر آب با به‌کارگیری کشت گیاهان در بستر کشت مناسب‌تر و به طبع محیط پرورشی مناسب‌تر جهت تولید ماهیان خواهد شد.

اهداف این پژوهش شامل بررسی و مقایسه اثرات به‌کارگیری بستر کشت‌های مختلف گیاهی شامل بستر کشت شناور و سیستم نوار غذایی بر راندمان کلی سیستم آکواپونیک شامل رشد ماهی و گیاه و روند نیتریفیکاسیون شامل فاکتورهای بیوشیمیایی آب مانند آمونیاک، pH و نیترات به‌مدت ۸ هفته بود. این پژوهش با این فرضیه که تغییر در نوع بستر کشت گیاهی در سیستم آکواپونیک به‌دلیل طراحی خاص هر نوع بستر کشت، سبب تغییر در عملکرد ریشه گیاه در حذف مواد نیتروژنی به‌خصوص نیترات می‌گردد و به‌دنبال آن روی بازدهی کلی سیستم، میزان تولید ماهی و گیاه و برقراری توازن بین میزان ضایعات و پسماند ماهی و تقاضای مواد مغذی توسط گیاه نیز تأثیرگزار است، صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

طراحی سیستم آکواپونیک: در پژوهش حاضر جهت انجام طرح آزمایشی از ۲ تیمار با ۳ تکرار شامل تیمار اول: تکنیک نوار غذایی و تیمار دوم: تکنیک کشت شناور استفاده شد. بنابراین ٦ سیستم آکواپونیک مجزا از هم طراحی و ساخته شد که در طراحی ۳ سیستم از تکنیک نوار غذایی و در ۳ سیستم دیگر از تکنیک کشت شناور استفاده شد. بنابراین دو نوع سیستم آکواپونیک در پژوهش حاضر طراحی و ساخته شد. طراحی سیستم‌ها به گونه‌ای بود که در آن خروجی تمامی مخازن پرورش ماهی از مرکز مخازن و به‌صورت ثقلی خارج شود و به‌صورت یکجا توسط لوله پولیکا جمع‌آوری و به‌سمت مخزن فیلتراسیون فیزیکی و بیولوژیکی (حاوی ابری معمولی و پوکه معدنی) هدایت شود و در نهایت از جهت مخالف ورودی آب مخازن پرورش ماهی به این مخزن، آب توسط یک موتور پمپ به سمت بستر کشت گیاهی و سپس از بستر کشت گیاهی به صورت ثقلی به مخزن ماهی هدایت شده و چرخه فوق تکرار شود (راکوسی و همکاران، ۲۰۰٦).

محاسبات اجزای اصلی سیستم‌ها

محاسبه پایه: به‌ازای هر ۱مترمکعب آب مخزن ماهی با زیست‌توده حداکثر ۲۰ کیلوگرم ماهی و ۲۰۰ گرم غذای روزانه ورودی به سیستم به جریان پمپ ۲۰۰۰

لیتر آب بر ساعت و حداقل ۲۰۰ لیتر پوکه معدنی و مساحت ٤ مترمربع بستر کشت گیاهی احتیاج است (شت و همکاران، ۲۰۱٦؛ سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤).

محاسبه در پژوهش حاضر: با توجه به لزوم ساخت و طراحی ٦ واحد مجزای آکواپونیک در ابعاد آزمایشگاهی از مخزن ماهی با میزان آبگیری ٦۰ لیتر و به طبع از بستر کشت گیاهی با مساحت ۰/۲٤ مترمربع استفاده شد. جریان آب به گونه‌ای تنظیم گردید که آب سیستم در هر ساعت حداقل ۲ مرتبه (۱۲۰ لیتر بر ساعت) تعویض گردد.

استفاده از پوکه معدنی و محاسبه میزان استفاده از آن در هر سیستم آکواپونیک پژوهش حاضر: از ماده پوکه معدنی در بخش بیوفیلتر تمامی سیستم‌ها استفاده شد که پرطرفدارترین ماده جهت استفاده به‌عنوان بیوفیلتر است و تنها ماده‌ای است که همیشه به راحتی در دسترس قرار داشته و ارزان است. نرخ SSA یا نسبت سطح به حجم آن $۳۰۰m^2/m^3$ است که فضای کافی جهت رشد کلونی‌های باکتری‌های نیتریفیکاسیون را ایجاد می‌کند (گودک و همکاران، ۲۰۱۹؛ فرینکو و همکاران، ۲۰۱٦؛ سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤).

محاسبه پایه: به‌ازای هر ۲۰۰ گرم غذای ماهی با پروتئین ۳۲ درصد که وارد سیستم آکواپونیک می‌شود ۷/۵ گرم آمونیاک مطابق رابطه زیر تولید می‌شود:

$$(ج)\ ۷/۵ = (ث)\frac{۱/۲}{۱} \times (ت)\frac{٦۱}{۱۰۰} \times (پ)\ \frac{۱٦}{۱۰۰} \times (ب)\frac{۳۲}{۱۰۰} \times (الف)\ ۲۰۰$$

الف: میزان غذای وارد شده به سیستم بر حسب گرم

ب: درصد پروتئین موجود در غذای ماهی

پ: درصد نیتروژن موجود در پروتئین (مقدار ثابت)

ت: درصد نیتروژن هدر رفته یا دفع شده (۵۵ درصد توسط ماهی دفع می‌شود و ٦ درصد غیرقابل‌هضم و یا هدررفت در محیط آبی تحت‌تأثیر آبشویی به‌طور معمول در نظر گرفته می‌شود)

ث: به‌ازای هر ۱ گرم نیتروژن هدر رفته ۱/۲ گرم آمونیاک تولید می‌شود

ج: میزان آمونیاک تولید شده بر حسب گرم

مقدار آمونیاک اکسید شده توسط باکتری‌های نیتریفیکاسیون در طول یک شبانه‌روز حدود $۰/۲-۲gr/m^2$ (گرم بر مترمربع) است که به عوامل زیادی از جمله دما، اکسیژن، pH و... بستگی دارد و به‌طور میانگین $۰/۵۷gr/m^2$ در روز در نظر گرفته می‌شود. پس در صورتی که ۷/۵ گرم آمونیاک در روز تولید شود به ۱۳/۳ مترمربع فضا جهت نشست باکتری لازم است تا این میزان از آمونیاک اکسید گردد. از آن‌جا که نرخ SSA در ماده پوکه معدنی برابر با $۳۰۰m^2/m^3$ است، پس به مقدار $۰/۰٤٤۳m^3$ یا ٤٤/۳ لیتر پوکه معدنی جهت تبدیل آمونیاک تولید شده از ۲۰۰ گرم غذای وارد شده با پروتئین ۳۲ درصد به سیستم احتیاج است (اما به‌طور معمول جهت احتیاط حداقل ٤/۵ برابر این میزان و در حدود ۲۰۰ لیتر پوکه معدنی به‌ازای هر مترمکعب مخزن پرورش ماهی در نظر گرفته می‌شود) (سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤). بنابراین هر لیتر از پوکه معدنی قادر به ایجاد سطح نشست کافی برای باکتری‌های نیتریفیکاسیون جهت اکسید آمونیاک تولید شده از ٤/۵ گرم غذای حاوی ۳۲ درصد پروتئین را دارد.

محاسبه در پژوهش حاضر: با توجه به این‌که غذای مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای ۳۹ درصد

پروتئین بود، بدین‌ترتیب بر اساس محاسبه پایه ذکر شده، در شرایط پژوهش جاری به‌ازای هر ۲۰۰ گرم غذای ورودی به سیستم ۹/۱ گرم آمونیاک طبق فرمول ذکر شده تولید می‌شود، که این میزان آمونیاک تولید شده اندکی بالاتر از آمونیاک تولید شده از غذاهای حاوی ۳۲ درصد پروتئین است؛ بر همین اساس به ۱۶ مترمربع فضا نیز جهت نشست باکتری لازم است تا این میزان از آمونیاک اکسید گردد؛ هم‌چنین به مقدار $۰/۰۵۳۳m^3$ یا ۵۳/۳ لیتر پوکه معدنی جهت تبدیل آمونیاک تولید شده از ۲۰۰ گرم غذای وارد شده با پروتئین ۳۹ درصد به سیستم احتیاج است. یعنی در صورت استفاده از این غذا هر لیتر از ماده پوکه معدنی قادر به ایجاد سطح نشست کافی برای باکتری جهت اکسید آمونیاک تولید شده از ۳/۷۵ گرم غذا را دارد. با این تصور که اگر در روزهای آخر پژوهش به‌دلیل افزایش میزان غذادهی حداکثر ۲۰ گرم از این غذا وارد سیستم شود (قاعدتاً حد بالای غذادهی در نظر گرفته شده است) به ۵/۳۳ لیتر از پوکه معدنی نیاز است، که بنابر احتیاط ٤/۵ برابر در نظر گرفته شد و در طرح حاضر از حدود ۲۵ لیتر پوکه معدنی در بیوفیلتر هر سیستم استفاده شده است که سطح نشست لازم برای باکتری و اکسید آمونیاک تولید شده از روزانه تا چند برابر غذای روزانه مورد نیاز ماهیان سیستم را داشته باشد. این در حالی بود که میزان غذای روزانه وارد شده به سیستم‌ها در طول مدت آزمایش همواره کم‌تر از ۲۰ گرم در تمامی تکرارها بود.

محاسبه و تعیین تعداد گیاه در هر سیستم

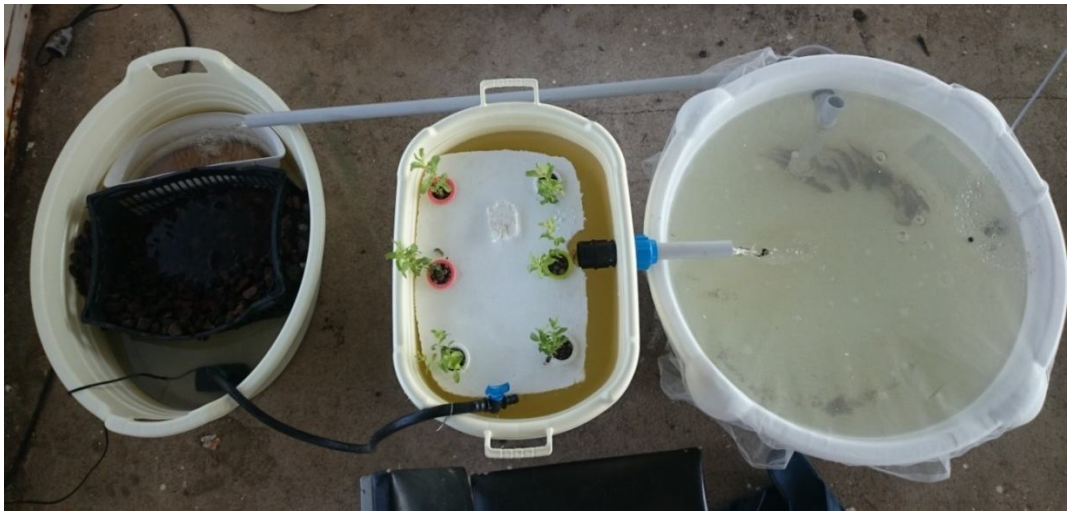
محاسبه پایه: برای گیاهان برگ‌دار با استفاده از غذای ماهی با پروتئین ۳۲ درصد لازم است به‌ازای هر مترمربع بستر کشت گیاهی ۵۰-٤۰ گرم غذای روزانه وارد سیستم شود. در هر مترمربع بستر کشت گیاهی میزان مجاز کشت گیاه ۲۵-۲۰ عدد در مترمربع برای گیاهان برگدار است (بسته به میزان پروتئین غذا می‌تواند در این محدوده کم‌تر یا بیش‌تر شود). توجه به این نکته ضروری است که به‌ازای هر ۱ مترمکعب مخزن ماهی (دارای ۲۰-۱۰ کیلوگرم ماهی و ۲۰۰ گرم غذای ورودی روزانه) نیاز به ایجاد ٤ مترمربع بستر کشت گیاهی و ۱۰۰ عدد گیاه در بستر کشت است. ضمن این‌که رعایت فواصل ۳۰-۲۰ سانتی‌متری بین هر گیاه جهت جلوگیری از تداخل در رشد گیاهان ضروری است (سروزی و فیتسیمنز، ۲۰۱٦؛ شت و همکاران، ۲۰۱٦؛ سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤).

محاسبه در پژوهش حاضر: در پژوهش حاضر با توجه به این‌که از مخزن ٦۰ لیتری ماهی استفاده شد، به طبع بر اساس محاسبه پایه ذکر شده، بستر کشت گیاهی با مساحت ۰/۲٤ مترمربع (طول ٦۰ و عرض ٤۰ سانتی‌متر در سیستم کشت شناور و طول ۲۲۰ و عرض ۱۱ سانتی‌متر در سیستم نوار غذایی) و تعداد یکسان ٦ عدد گیاه در هر سیستم با فواصل ۲۰ سانتی‌متری نسبت به هم استفاده شد.

محل انجام پژوهش: مکان اجرای تحقیق در سالنی گلخانه‌ای به مساحت ۵۰۰ مترمربع با بدنه و چارچوب فلزی مجهز به عایق دمایی واقع در روستای لنگرود در جنوب‌شرقی استان قم و ۳۰ کیلومتری شهرستان قم بود، که با توجه به برخورداری از دمای ثابت شبانه روزی به‌دلیل عایق‌بندی مناسب و نور کافی جهت رشد گیاهان به‌دلیل وجود پنجره سرتاسری مکانی مناسب جهت ایجاد شرایط گلخانه‌ای تشخیص داده شد. به جای شیشه در تمامی پنجره‌های سالن طلق‌های پلی کربنات دو جداره نصب گردید که به‌طور معمول در گلخانه‌ها به جهت جلوگیری از ورود اشعه‌های مضر نور خورشید، جلوگیری از آفتاب سوختگی گیاهان و بالا رفتن بیش

از حد دمای سالن استفاده می‌گردد و هم‌چنین در مقابل وزش باد مقاومت بسیار بالایی دارند.

طرح نهایی هردو نوع سیستم پس از اتمام مراحل ساخت: هر دو نوع سیستم طراحی کاملاً یکسانی در بخش‌های پرورش ماهی و فیلتراسیون دارند و تفاوت طراحی آن‌ها در نوع بستر کشت گیاهی می‌باشد. شکل‌های ۱ و ۲ شکل نهایی هر دو مدل سیستم آکواپونیک از نمای بالا است.



شکل ۱- نمایی از سیستم کشت شناور.

شکل ۲- نمایی از سیستم نوار غذایی.

تهیه، سازگاری و ذخیره‌سازی ماهیان: تعداد ۱۳۰ قطعه ماهی کپور معمولی از یک مرکز توزیع بچه‌ماهی کپور واقع در روستای لنگرود در استان قم تهیه و توسط وانت مجهز به کپسول اکسیژن به سالن محل آزمایش منتقل شدند. این ماهیان به‌مدت ۱۴ روز با محیط پرورشی جدید سازگار شدند. پس از اتمام دوره سازگاری، ۱۰۸ قطعه ماهی با ظاهر سالم (عدم وجود بدشکلی و خوردگی باله) و با میانگین وزنی ۰/۰۶±۹/۳۴ گرم جهت شروع دوره آزمایش انتخاب شدند. توزیع ماهیان در سیستم‌ها به‌نحوی انجام شد که اختلاف معنی‌داری از لحاظ میانگین وزن اولیه هر ماهی بین تیمارها وجود نداشته باشد ($P>0/05$).

زمان، تیماربندی و طرح اجرای آزمایش: پژوهش حاضر در شهریورماه سال ۱۳۹۷ به‌مدت ۸ هفته پس از اتمام طراحی و ساخت سیستم‌های آکواپونیک انجام شد. شیوه چیدمان تیمارها بدین صورت بود که از ۲ تیمار شامل به‌کارگیری ۲ نوع بستر کشت گیاهی در سیستم‌های آکواپونیک مجزا از هم و هر تیمار شامل ۳ تکرار استفاده شد؛ که بدین منظور از ٦ واحد آزمایشی (سیستم آکواپونیک) جدا از هم جهت به‌کارگیری ٦ تکرار آزمایشی استفاده شد. ماهی‌ها در بخش آبزی‌پروری سیستم آکواپونیک با تراکم۳۰۰ عدد بچه‌ماهی در هر ۱ مترمکعب آب مخزن پرورشی ذخیره‌سازی و تا پایان دوره تیمارها از نظر تراکم پرورشی دستکاری نشدند (شت و همکاران، ۲۰۱٦). با توجه به این‌که حجم آب مخزن ماهی در سیستم‌های آکواپونیک طراحی شده ٦۰ لیتر بود، در هر واحد آکواپونیک از ۱۸ عدد بچه‌ماهی در بخش آبزی‌پروری سیستم‌ها استفاده شد.

تعداد ۳٦ نشاء ۱۰ روزه گیاه نعناء که قبل از اجرای پژوهش به‌وسیله کشت بذر در خاک تولید شده بود و از نظر سلامت، ظاهری مناسب و قابل‌قبول داشتند به دقت به‌وسیله ترازو با ضریب دقت ۰/۰۱ گرم توزین و پس از شسته شدن از ذرات خاک وشن، همراه با لیکا (پوکه صنعتی) به عنوان نگهدارنده درون گلدان‌های مخصوص در بسترهای کشت شناور و سیستم نوار غذایی قرار داده شد. میانگین وزن تمامی گیاهان نعناء در ابتدای دوره برابر با ۰/۰۲±۱/۵۱ گرم بود و به گونه‌ای در ٦ سیستم توزیع شدند که فاقد اختلاف معنی‌دار از لحاظ وزنی باشند (P>۰/۰۵). تعداد نشاء گیاه نعناء قرار داده شده در بستر کشت‌های گیاهی هر سیستم ٦ عدد و به‌صورت یکسان توزیع شد.

شاخص‌های رشد: برای بررسی رشد ماهیان و مقایسه بین تیمارها، شاخص‌های رشد شامل درصد افزایش وزن بدن (WG)، ضریب رشد ویژه (SGR)، شاخص وزن نهایی (FAW)، شاخص بازماندگی (SUR) و شاخص میانگین رشد روزانه (ADG) بر اساس معادلات زیر بررسی گردید (دنستادلی و همکاران، ۲۰۰٦).

$$WG = ۱۰۰ \times [\text{وزن اولیه (گرم)} / [\text{میانگین وزن اولیه (گرم)} - \text{میانگین وزن ثانویه (گرم)}]$$

$$SGR = ۱۰۰ \times (\text{Ln(وزن نهایی)} - \text{(وزن اولیه)}) / \text{تعداد روزهای پرورش}$$

$$FAW = \text{تعداد روزهای پرورش / وزن ماهیان در انتهای دوره (گرم)}$$

$$SUR = ۱۰۰ \times \text{(تعداد بچه‌ماهیان در ابتدای دوره/ تعداد بچه‌ماهیان در انتهای دوره)}$$

$$ADG = \text{تعداد روزهای پرورش / (وزن اولیه – وزن نهایی)}$$

بررسی شاخص‌های کیفی آب و مدیریت سیستم‌ها: هوادهی تمامی سیستم‌ها توسط یک پمپ هوای مرکزی با قدرت هوادهی ٦۰ لیتر بر دقیقه (ساخت شرکت Hailea مدل ACO-318) انجام شد. دما در سیستم پرورشی به‌صورت روزانه ثبت گردید. میانگین دمای آب در طول دوره آزمایش در سیستم‌ها معادل ۰/۱۱±۲٤/۲٤ (میانگین ± خطای استاندارد) درجه سانتی‌گراد ثبت گردید. میزان شوری آب مخازن پرورشی در ابتدای دوره معادل ۰/۰٦±۳/۰۳ واحد شوری (ppt) اندازه‌گیری شد. اکسیژن محلول نیز که یکی از عوامل اصلی در کیفیت آب مخازن پرورشی است، طی دوره آزمایش با هوادهی مداوم

۰/۱۸±۶/۳۷ میلی‌گرم در لیتر بود. جهت سنجش pH از دستگاه pH متر قلمی دیجیتال ساخت شرکت HANNA آمریکا، مدل HI98100 استفاده شد. بازه اندازه‌گیری این دستگاه ۱۴-۰ و دقت اندازه گیری آن ۰/۰۱ است. pH آب تمامی سیستم‌ها در ابتدای دوره یکسان و برابر با ۷/۳۱ بود. آمونیاک (NH_3-N) نیز هر هفته در محل‌های آب خروجی بیوفیلتر، بستر کشت‌های گیاهی و مخازن ماهی هر سیستم اندازه‌گیری شد. بدین‌منظور از دستگاه چکر آمونیاک ساخت شرکت HANNA آمریکا، مدل HI700 استفاده شد. بازه اندازه گیری این دستگاه ppm ۳-۰ و دقت اندازه گیری آن ppm ۰/۰۱ است. اندازه‌گیری نیترات هر هفته در محل‌های آب خروجی بیوفیلتر، بستر کشت‌های گیاهی و مخازن ماهی به روش اسپکتروفتومتری با دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی فرابنفش صورت پذیرفت. تمامی سنجش‌های فاکتورهای کیفی آب مطابق بر روش‌های استاندارد آزمایشگاهی کنترل کیفیت آب بود (انجمن بهداشت عمومی آمریکا، ۲۰۰۵).

غذادهی: در پژوهش حاضر از غذای تجاری SFC4 ساخت شرکت رشد دانه، مناسب جهت تغذیه ماهی کپور معمولی با سایز ۲۰-۷ گرم با میزان پروتئین ۳۹ درصد بر اساس گزارش کارخانه سازنده غذا استفاده شد (جدول ۱ ترکیبات بیوشیمیایی غذای مورداستفاده در آزمایش را بر اساس گزارش کارخانه سازنده نشان می‌دهد). غذادهی به میزان ۳ بار در روز در ساعات ۸:۰۰، ۱۳:۰۰ و ۱۸:۰۰ و براساس روش سیری انجام گرفت (سامرویل و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۱- ترکیبات بیوشیمیایی غذای مورد استفاده در پژوهش.

پارامترهای بیوشیمیایی	رطوبت	خاکستر	پروتئین	چربی
درصد از کل	<۱۰	<۱۰	۳۹	۹

آنالیزهای آماری: هر سیستم آکواپونیک به‌صورت یک واحد آزمایشی در نظر گرفته شد و نتایج به‌صورت میانگین ± خطای‌معیار گزارش شد. در این پژوهش همه محاسبات آماری با استفاده از دو نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ و Microsoft Office Excel 2007 صورت پذیرفت. بررسی نرمال بودن متغیرهای مختلف اندازه‌گیری‌شده در هریک از تیمارها با استفاده از آزمون شاپیرو ویلک[1] و بررسی همگنی واریانس‌ها به کمک آزمون لون[2] صورت پذیرفت. مقایسه متغیرهای مورد مطالعه (شاخص‌های کیفی آب) در هریک از تیمارها (شامل سیستم نوار غذایی و تکنیک کشت شناور) بین هفته‌های مختلف با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه در سطح خطای ۰/۰۵ و مقایسات چندگانه به کمک پس آزمون دانکن انجام گرفت. هم‌چنین مقایسه متغیرهای مورد مطالعه بین دو تیمار (شامل سیستم نوار غذایی و تکنیک کشت شناور) در هر یک از هفته‌های آزمایش با استفاده از آزمون t مستقل صورت گرفت. سطح خطای پژوهش کوچک‌تر از ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

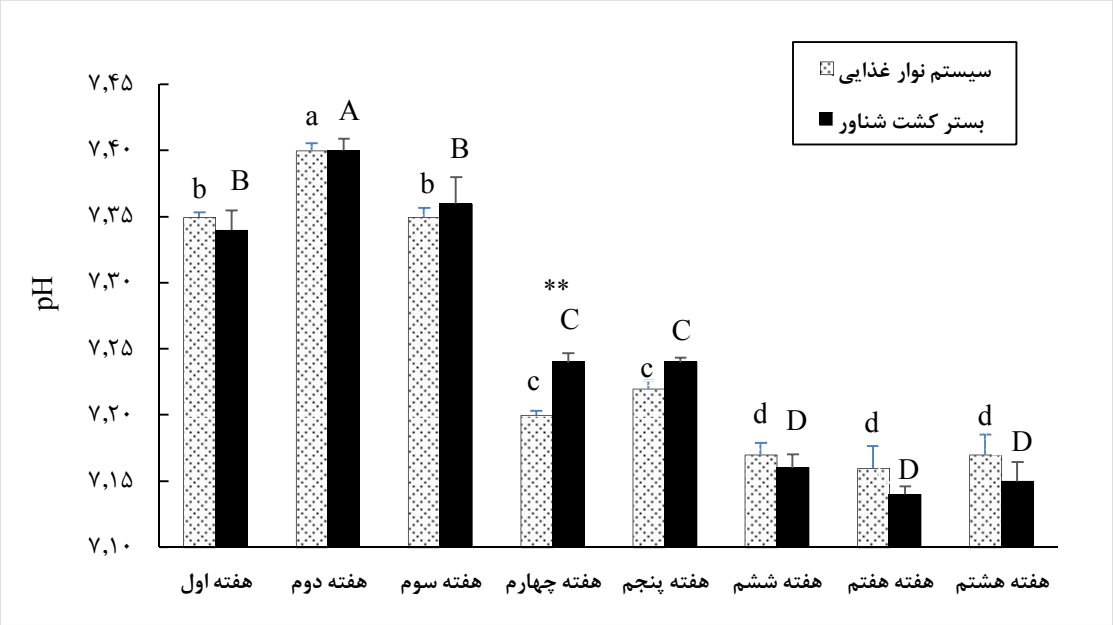
نتایج

شاخص‌های کیفی آب

pH: بر اساس شکل ۳ شاخص pH در هر دو نوع سیستم تا پایان هفته دوم روند افزایشی و پس از آن تا

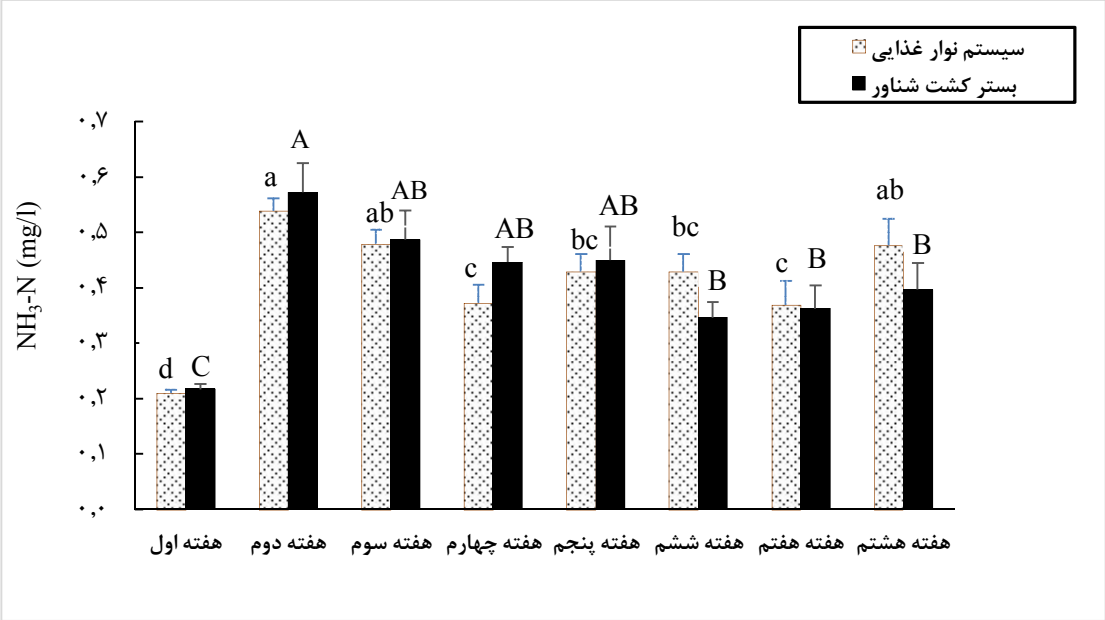
1- Shapiro-Wilk
2- Levene

پایان هفته ششم روند کاهشی از خود به نمایش گذاشت. بیش‌ترین میزان pH در هفته دوم (۷/٤۰±۰/۰۱ در سیستم نوار غذایی و ۷/٤۰±۰/۰۱ در بستر کشت شناور) و کم‌ترین میزان آن در هفته‌های ششم (۷/۱۷±۰/۰۱ در سیستم نوار غذایی و ۷/۱٦±۰/۰۱ در بستر کشت شناور)، هفتم (۷/۱٦±۰/۰۲ در سیستم نوار غذایی و ۷/۱٤±۰/۰۱ در بستر کشت شناور) و هشتم (۷/۱۷±۰/۰۲ در سیستم نوار غذایی و ۷/۱۵±۰/۰۲ در بستر کشت شناور) در هر دو نوع سیستم به ثبت رسید (P<۰/۰۵). در هفته چهارم آزمایش میزان pH در تکنیک کشت شناور به‌طور معناداری بالاتر از سیستم نوار غذایی بود (P<۰/۰۱)؛ در حالی‌که در سایر هفته‌ها اختلاف معناداری بین دو نوع سیستم ثبت نگردید (P>۰/۰۵).



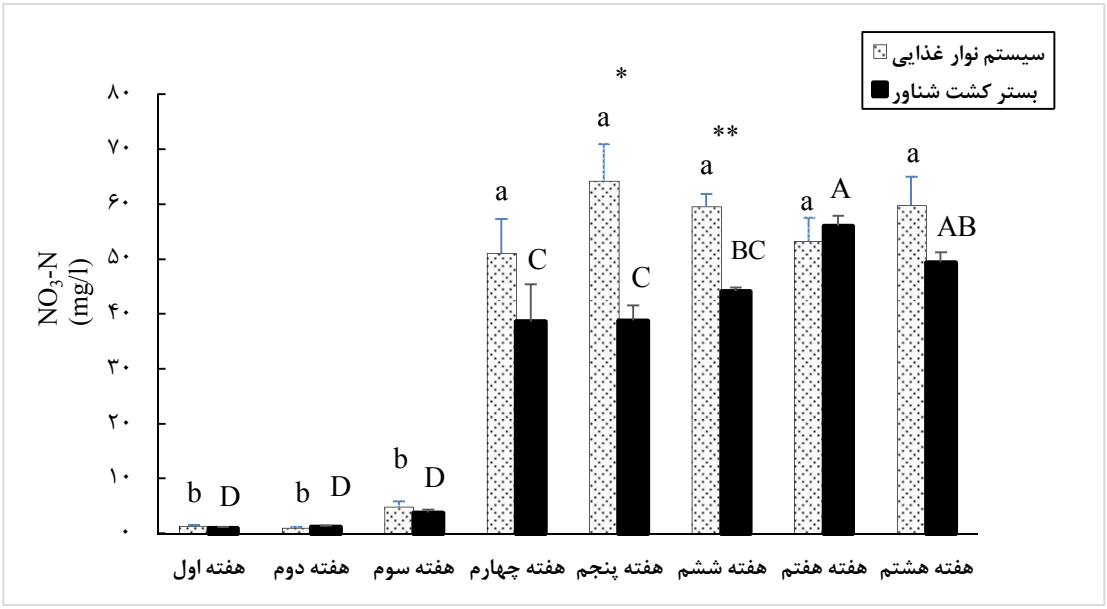
شکل ۳- نمودار شاخص pH در سیستم‌های آکواپونیک در طول دوره آزمایش. حروف لاتین غیرهمسان بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در هر تیمار (شامل بستر کشت شناور و سیستم نوار غذایی) بین هفته‌های مختلف آزمایش می‌باشد. حروف لاتین بزرگ جهت تیمار بستر کشت شناور و حروف لاتین کوچک برای تیمار سیستم نوار غذایی استفاده شده است. جهت نمایش وجود اختلاف معنی‌دار بین دو تیمار در هر یک از هفته‌های آزمایش از علامت ** (P<0.01) استفاده شده است.

آمونیاک: بر اساس شکل ٤ بیش‌ترین میزان شاخص آمونیاک در سیستم نوار غذایی در هفته دوم (۰/٥٤۰±۰/۰۲۱) ثبت گردید که فاقد اختلاف معنی‌دار با هفته سوم (۰/٤۸۰±۰/۰۲٥) و هفته هشتم بود (۰/٤۷۷±۰/۰٤۷) و کم‌ترین میزان آن در هفته اول (۰/۲۱۰±۰/۰۰٦) به ثبت رسید (P<۰/۰٥). هم‌چنین بیش‌ترین میزان این شاخص در بستر کشت شناور نیز در پایان هفته دوم (۰/٥۷۳±۰/۰٥۲) ثبت گردید که فاقد اختلاف معنی‌دار با هفته‌های سوم (۰/٤۸۷±۰/۰٥۲)، چهارم (۰/٤٤۷±۰/۰۲۷) و پنجم (۰/٤٥۰±۰/۰٦۱) بود و کم‌ترین میزان آن در هفته اول (۰/۲۱۷±۰/۰۰۹) به ثبت رسید (P<0.05). در تمامی هفته‌های آزمایش تفاوت معنی‌داری بین دو نوع سیستم اکواپونیک در میزان آمونیاک ثبت نگردید (P>۰/۰٥).



شکل ٤- نمودار شاخص آمونیاک در سیستم‌های آکواپونیک در طول دوره آزمایش. حروف لاتین غیرهمسان بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در هر تیمار (شامل بستر کشت شناور و سیستم نوار غذایی) بین هفته‌های مختلف آزمایش می‌باشد. حروف لاتین بزرگ جهت تیمار بستر کشت شناور و حروف لاتین کوچک برای تیمار سیستم نوار غذایی استفاده شده است.

نیترات: بر اساس شکل ۵ شاخص نیترات در هر دو نوع سیستم آکواپونیک، از پایان هفته سوم تا پایان هفته چهارم روند افزایشی و پس از آن روندی متعادل و نوسانی تا پایان دوره از خود به نمایش گذاشت. بیش‌ترین میزان شاخص نیترات در سیستم نوار غذایی در هفته‌های چهارم (٥١/٠٨±٦/٢٢)، پنجم (٦٤/٢٧±٦/٧٢)، ششم (٥٢/٦١±١/٧٢)، هفتم (٥٣/٢٨±٤/٢١) و هشتم (٥٢/٩±٨/٤١) و کم‌ترین میزان آن در در هفته‌های اول (١/٤٤±٠/١٣)، دوم (١/٠٨±٠/١٤) و سوم (٤/٨٨±٠/٩٢) ثبت گردید (P<٠/٠٥). هم‌چنین بیش‌ترین میزان شاخص نیترات در بستر کشت شناور در هفته هفتم (٥٦/١٢±١/٧٤) ثبت گردید که فاقد اختلاف معنی‌دار با هفته هشتم (٥٣/٧٧±٢/٠٦) بود و کم‌ترین میزان آن در هفته‌های اول (١/٠١±٠/٢١)، دوم (١/٢٩±٠/٠٩) و سوم (٣/٨١±٠/٤٩) ثبت گردید (P<٠/٠٥). هم‌چنین میزان نیترات در سیستم نوار غذایی مقادیر بالاتری نسبت به بستر کشت شناور در هفته‌های چهارم (P<٠/٠٥)، پنجم (P<٠/٠٥)، ششم (P<٠/٠١) و هشتم (P>٠/٠٥) به ثبت رسانید.



شکل ۵- نمودار شاخص نیترات در سیستم‌های آکواپونیک در طول دوره آزمایش. حروف لاتین غیرهمسان بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در هر تیمار (شامل بستر کشت شناور و سیستم نوار غذایی) بین هفته‌های مختلف آزمایش می‌باشد. حروف لاتین بزرگ جهت تیمار بستر کشت شناور و حروف لاتین کوچک برای تیمار سیستم نوار غذایی استفاده شده است. جهت نمایش وجود اختلاف معنی‌دار بین دو تیمار در هریک از هفته‌های آزمایش از علامت‌های * (P<۰/۰۵) و ** (P<۰/۰۱) استفاده شده است.

رشد ماهی و گیاه: در جدول ۲ نتایج مربوط به شاخص‌های رشد ماهی و در جدول ۳ شاخص‌های رشد گیاه در هر دو تیمار نمایش داده شده است. شاخص‌های رشد ماهی بین دو تیمار اختلاف معناداری را ثبت نکردند (P>۰/۰۵) ولی در تیمار بستر کشت شناور وضعیت بهتری را نسبت به تیمار نوار غذایی به ثبت رساندند. میانگین وزن نهایی ماهیان در تیمار سیستم نوار غذایی ۱/۰٤±۱٦/۸٦ گرم و در تیمار بستر کشت شناور برابر با ۰/۲±۱۸/۹۷ گرم بود، هم‌چنین شاخص میانگین وزن نهایی هر گیاه در تیمار بستر کشت شناور به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از تیمار نوار غذایی بود (P<۰/۰۰۱). به‌طورکلی رشد گیاه وضعیت بهتری را در تیمار بستر کشت شناور نسبت به تیمار نوار غذایی نشان داد.

جدول ۲- شاخص‌های رشد بچه‌ماهیان کپور (*C. carpio*) تحت‌تأثیر دو نوع بستر کشت گیاهی در سیستم‌های آکواپونیک در انتهای ٥٦ روز دوره آزمایش.

شاخص / تیمار	میانگین وزن اولیه (گرم)	میانگین وزن نهایی (گرم)	افزایش وزن بدن (گرم)	درصد افزایش وزن بدن	ضریب رشد ویژه	میانگین رشد روزانه (گرم)	درصد بازماندگی
تکنیک کشت شناور	۹/۳٥ ± ۰/۰۳	۱۸/۹۷ ± ۰/۲	۹/٦۲ ± ۰/۲۲	۱۰۲/۸۷ ± ۲/٦۱	۱/۳٦ ± ۰/۰۲	۰/۱۷	۱۰۰
تکنیک نوار غذایی	۹/۳٤ ± ۰/۱۳	۱٦/۸٦ ± ۱/۰٤	۷/٥۲ ± ۰/۹۳	۸۰/۳ ± ۸/۹۳	۱/۱۳ ± ۰/۰۹	۰/۱۳ ± ۰/۰۲	۱۰۰

جدول ۳- شاخص‌های رشد گیاه نعناء (*Mentha spicata*) تحت دو نوع بستر کشت گیاهی در سیستم‌های آکواپونیک در انتهای ٥٦ روز دوره آزمایش.

شاخص / تیمار	میانگین وزن اولیه هر گیاه (گرم)	میانگین وزن نهایی هر گیاه (گرم)	میانگین وزن کل گیاه تولید شده (گرم)
تکنیک کشت شناور	۱/۵۵ ± ۰/۰۱	۲۸/۵۱ ± ۰/۳۸	۱۷۱/۰۷ ± ۲/۳۱
تکنیک نوار غذایی	۱/۵۱ ± ۰/۰۳	۲٤/۹۸ ± ۱/٦٤	۱٤۹/۸٦ ± ۹/۸٤

بحث

در اکوسیستم آکواپونیک باید یک تعادل پویا بین گیاه، ماهی و باکتری برقرار باشد. مطالعات مختلفی که در زمینه آکواپونیک وجود دارند این سیستم را به یک ترازو تشبیه و عنوان کرده‌اند که برقراری توازن در سیستم آکواپونیک به مانند ترازویی است که کفه‌های ترازو ماهیان و گیاهان بوده در حالی‌که باکتری‌های نیتریفیکاسیون به‌عنوان بازوهای این ترازو نقش برقراری تعادل بین این دو قسمت را ایفا می‌کنند. در واقع باید توازن مناسبی بین میزان ضایعات و پسماند ماهی و تقاضای مواد مغذی توسط گیاه برقرار و از ایجاد سطح کافی برای رشد باکتری‌های نیتریفیکاسیون (به‌عنوان بازوی ترازوی یاد شده جهت تبدیل این پسماندها به مواد مغذی برای گیاهان)، اطمینان حاصل شود (بازبی و لین، ۲۰۱٤؛ سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤). در پژوهش حاضر از بستر کشت‌های مختلف گیاهی با تعداد یکسان گیاه استفاده شد و کفه دیگر که شامل ماهی بود در تراکم‌های یکسان از نظر وزن و تعداد ماهی در تمامی تکرارهای آزمایش به‌کار بسته شد تا مشخص شود چه نوع بستر کشت گیاهی به برقراری بهتر تعادل و توازن با این تعداد ثابت از ماهی در کفه مقابل ترازو کمک و بازدهی بهتر سیستم آکواپونیک را در پی دارد.

شکل‌گیری اولیه یک سیستم مداربسته نظیر آکواپونیک همراه با کلونیزه شدن باکتری‌ها در بیوفیلتر است. تحت شرایط عادی این عمل حدود ۳ تا ۵ هفته طول می‌کشد که فرایندی کند بوده و نیاز به صبر دارد. به‌طورکلی این فرایند نیاز به ایجاد یک بستر و سطح نشست برای باکتری و وارد کردن آمونیاک به سیستم جهت تغذیه باکتری‌هاست. پیشرفت در شکل‌گیری کلونی‌های باکتری‌های نیتریفیکاسیون با مانیتورینگ سطوح نیتروژن در آب بررسی می‌شود (سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤). در پژوهش حاضر در هر دو تیمار شاهد روند افزایشی میزان آمونیاک از ابتدای دوره تا پایان هفته دوم بودیم به‌طوری‌که مقادیر کم‌تر از ppm ۱ و در دامنه مطلوب را ثبت کرد و از انتهای هفته سوم تا پایان دوره شاهد تعدیل و کاهش میزان آمونیاک بودیم.

طبق مطالعات صورت گرفته، در طول فرایند کلونیزاسیون باکتری‌ها در سیستم آکواپونیک (در هفته‌های ابتدایی راه اندازی سیستم) سطوح بالایی از آمونیاک وجود دارد که برای ماهی‌ها مضر است. آمونیاک یک منبع غذایی اولیه برای باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک که اکثراً از نوع نیتروزوموناس هستند، محسوب می‌شود. به‌طور طبیعی مقدار کمی از این باکتری‌ها در سیستم وجود دارد، در واقع این باکتری‌ها در همه جا (از جمله آب، خاک و هوا) حضور دارند. با گذشت ۷-۵ روز پس از افزودن اولین منبع آمونیاکی (که در این آزمایش غذای ماهی است) به سیستم، باکتری‌های اکسید کننده آمونیاک شروع به تشکیل کلونی می‌کنند و آمونیاک را به نیتریت تبدیل می‌کنند. در هفته دوم راه اندازی سیستم

آکواپونیک سطح نیتریت بخاطر فعالیت باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک افزایش می‌یابد و این به نوبه خود سبب جذب باکتری‌های اکسید کننده نیتریت که اکثراً از نوع نیتروباکتر هستند می‌شود. با افزایش جمعیت این باکتری‌ها در سیستم سطوح نیتریت در آب نیز کاهش می‌یابد و به نیترات که محصول نهایی نیتریفیکاسیون است اکسید می‌شود. این چرخه حدود ۳ هفته یا ۲۰ روز به طول می‌انجامد (گودک و همکاران، ۲۰۱۹؛ سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤). بررسی روند آمونیاک در تیمارهای پژوهش حاضر در طول هفته‌های پس از راه اندازی سیستم نشان‌دهنده شکل‌گیری این چرخه است.

طبق گزارش‌های یلدیز و همکاران (۲۰۱۷) و هارمن (۲۰۰۱) راه بررسی برقراری یا عدم برقراری توازن در سیستم آکواپونیک بررسی میزان ضایعات نیتروژنی در آب است. اگر آمونیاک یا نیتریت سیستم زیاد باشد (mg/litre ۱ <)، نشان می‌دهد که سطح و میزان باکتری‌های فیلتراسیون سیستم کم است و اگر پس از گذشت مدت زمان لازم برای شکل‌گیری باکتری‌های نیتریفیکاسیون (هفته سوم) در سیستم هم‌چنان شاهد مقادیر بالای آمونیاک یا نیتریت باشیم (mg/litre ۱ <)، باید سطح در دسترس باکتری را افزایش داد. بیش‌تر ماهیان بیش از چند روز تحمل این سطوح ذکر شده از آمونیاک و نیتریت را ندارند. اما در پژوهش حاضر بررسی روند شکل‌گیری چرخه نیتریفیکاسیون تیمارهای آزمایش در هفته‌های چهارم به بعد بیانگر کلونیزاسیون میزان کافی از باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک در هر دو سیستم بود که سبب کاهش میزان آمونیاک سیستم‌ها به مقادیر کم‌تر از ppm ۰/۵ و نوسان در محدوده کم خطر آمونیاک برای ماهیان سیستم شد.

در مطالعات مرتبط با سیستم‌های آکواپونیک، پارامترهای رشد گیاه و میزان مواد مغذی آب جهت بررسی کارایی بستر کشت گیاهی اندازه‌گیری می‌گردد (نووانسی و همکاران، ۲۰۱۹). گیاهان نیتروژن را جهت تولید آمینواسیدها، پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و کلروفیل جذب می‌کنند. بیش‌ترین فرم جذبی نیتروژن در گیاه به‌صورت نیترات است. نیترات با سرعت بالایی توسط ریشه گیاه جذب و در بافت گیاه بدون ایجاد اثرات سمی جذب می‌شود. ریشه گیاه توانایی جذب مقادیر محدود آمونیاک را نیز دارد ولی فرم قابل‌جذب نیتروژن برای گیاه نیترات محسوب می‌شود (گودک و همکاران، ۲۰۱۹؛ سونه‌ولد و ویگت، ۲۰۰۹). ماهی‌ها نیز می‌توانند سطح بالایی از نیترات را تحمل کنند (کولت و شبانگلس، ۱۹۷٦)، به‌طوری‌که گزارش گردیده اگر در مدت چند هفته شاهد مقادیر زیادتر از ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در سیستم باشیم لازم است بخش زیادی از آب سیستم خارج و تعویض شود. از طرف دیگر اگر سطح نیترات در طی چند هفته پایین‌تر از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد، یا باید تراکم ماهیان افزایش یابد و به‌دنبال آن با افزایش تغذیه ماهیان اطمینان حاصل شود که مواد مغذی کافی به گیاهان برسد و یا تعدادی از گیاهان را حذف کرد تا مقدار مواد مغذی کافی برای بقیه گیاهان فراهم شود. بدین‌منظور لازم است که سطوح نیتروژن به‌صورت هفته‌ای یکبار جهت بررسی توازن سیستم صورت گیرد، با توجه به این‌که از بررسی نیترات به‌عنوان نشانگر برقراری توازن یاد می‌شود (سامرویل و همکاران، ۲۰۱٤). در پژوهش حاضر بررسی روند نیترات در طول هفته‌های پس از آزمایش نشان‌دهنده این مسأله بود که همسو با فعالیت باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک و کاهش آمونیاک شاهد روند صعودی نیترات از پایان هفته سوم به بعد در تیمارهای آزمایشی بودیم. بررسی روند شاخص نیترات در تیمارهای پژوهش نشان‌دهنده افزایش چند برابری میزان نیترات در پایان هفته چهارم نسبت به

هفته سوم بود، اما از هفته چهارم تا پایان آزمایش در تیمار سیستم نوار غذایی روندی با نوسان کم و بدون اختلاف معنی‌دار را نشان داد ولی در سیستم بستر کشت شناور این روند از هفته چهارم تا پایان آزمایش یک روند نوسانی با اختلاف معنی‌دار بین هفته‌های چهارم تا هشتم را ثبت کرد. از دلایل احتمالی تفاوت در روند هفتگی نیترات در تیمارهای مختلف می‌تواند تفاوت در میزان جذب نیترات توسط گیاه در بستر کشت‌های مختلف تحت‌تأثیر طراحی خاص هر نوع بستر کشت گیاهی و قابلیت آن نوع از بستر در تغذیه مؤثر گیاه باشد. در مطالعه ساله‌نیو (۲۰۱۶) سطوح ایده‌آل نیترات آب در سیستم آکواپونیک جهت رسیدن به حداکثر کارایی سیستم ppm ۱۵۰-۵ ذکر شده است، که در تیمارهای پژوهش حاضر شاهد نوسان نیترات در محدوده مطلوب این دامنه هستیم که خود بیانگر میزان کافی مواد مغذی محلول در آب این تیمارها تا پایان آزمایش است؛ از سوی دیگر با بررسی رشد گیاهان در تیمارهای پژوهش حاضر شاهد رشد کم‌تر گیاهان در سیستم نوار غذایی نسبت به بستر کشت شناور بودیم. در پژوهش حاضر شاخص نیترات میزان بیش‌تری را در سیستم نوار غذایی نسبت به بستر کشت شناور در هفته چهارم، هفته پنجم، هفته ششم و هفته هشتم به ثبت رسانید. به نظر می‌رسد علت این تفاوت را باید در میزان مصرف و تقاضای مواد مغذی توسط گیاهان سیستم بررسی کرد به گونه‌ای که افزایش نیترات که قابلیت جذب بالایی برای گیاهان دارد، در یک سیستم نشان از ضعف آن سیستم در تغذیه مؤثر گیاهان آن سیستم (در سیستم نوار غذایی در پژوهش حاضر) و جذب نیترات توسط گیاهان دارد، یعنی نیترات به میزان کافی وجود داشته اما گیاه توانایی جذب کافی آن را نداشته است. بدین‌ترتیب به‌نظر می‌رسد در هر دو تیمار آمونیاک توسط باکتری‌های نیتریفیکاسیون به خوبی به نیترات تبدیل شده اما نیترات و مواد مغذی توسط گیاهان سیستم نوار غذایی به‌خوبی و به میزان کافی جذب نشده و سبب بازدهی رشد کم‌تر گیاهان در این سیستم نسبت به بستر کشت شناور شده است.

در مطالعه‌ای توسط لنارد و لئونارد (۲۰۰۶) کارایی ۳ نوع بستر کشت گیاهی شامل روش کشت در بستر (شنی)، تکنیک کشت شناور و سیستم نوار غذایی در سیستم آکواپونیک در طول ۲۱ روز مقایسه گردید. در این مطالعه از ماهی کاد (Murray cod) (*Maccullochella peelii peelii*) در کنار کشت گیاه کاهو (*Lactuca sativa*) استفاده گردید. میزان تولید ماهی در تمامی سیستم‌ها یکسان بود و مطابق با پژوهش حاضر نوع بستر کشت گیاهی اثری روی شاخص‌های رشد ماهی نداشت. میزان رشد کاهو در روش کشت در بستر بالاتر از روش کشت شناور و در روش کشت شناور بالاتر از سیستم نوار غذایی بود و اختلاف معناداری بین بستر کشت‌های مختلف (سیستم نوار غذایی < سیستم کشت شناور < سیستم کشت در بستر) را به ثبت رسانید. تیمار نوار غذایی از نظر شاخص بازده حذف نیترات ۲۰ درصد کارایی کم‌تر نسبت به سیستم‌های کشت شناور و کشت در بستر داشت. میزان این شاخص در تیمار نوار غذایی ۷۱/۸ درصد، در سیستم کشت در بستر ۹۰/۹ درصد و در سیستم کشت شناور ۹۳/۲ درصد بود. هم‌چنین میزان نیترات در سیستم نوار غذایی (حدود ۱۵/۷ میلی‌گرم بر لیتر) به‌طور معناداری بالاتر از سیستم کشت شناور (حدود ۲/۶ میلی‌گرم بر لیتر) و سیستم کشت در بستر (حدود ٤/٦٣ میلی‌گرم بر لیتر) بود. به‌طورکلی نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سیستم نوار غذایی در حذف مواد مغذی از آب سیستم آکواپونیک و هم‌چنین تولید زیست‌توده گیاهی نسبت به سیستم کشت شناور و کشت در بستر عملکرد و کارایی ضعیف‌تری دارد و طراحان سیستم آکواپونیک هنگام

طراحی اجزای هیدروپونیکی سیستم آکواپونیک باید این تفاوت‌ها را در نظر بگیرند. در این مطالعه عنوان گردید بازده حذف نیترات کم‌تر در سیستم نوار غذایی ممکن است به‌دلیل سطح تماس کم‌تر از ۵۰ درصدی ریشه گیاهان با آب در این نوع سیستم باشد (گریوس، ۱۹۸۳)، ولی گیاهان در هر دو تیمار کشت شناور و کشت در بستر سطح تماس ریشه‌شان با آب ۱۰۰ درصد بوده و احتمالاً فرصت بیش‌تری برای جذب نیترات از آب نسبت سیستم نوار غذایی دارند. هم‌چنان که ورن (۱۹۸٤) نیز دریافت که سیستم نوار غذایی از نظر حذف مواد مغذی از سیستم کشت در بستر کارایی کم‌تری دارد به‌طوری‌که در سیستم‌هایی که این محقق راه‌اندازی کرد ۳۱ درصد نیترات در روش کشت در بستر و ۲۰ درصد نیترات در روش نوار غذایی حذف شدند. وی در یک سیستم آکواپونیک با به‌کارگیری سیستم کشت در بستر (شنی) که بیش از ۵۰ روز به طول انجامید توانست ۳٤/۵ کیلوگرم خیار تولید کند در حالی‌که تولید این گیاه در سیستم نوار غذایی برابر با صفر بود و نشان داد که به‌کارگیری سیستم کشت در بستر در سیستم آکواپونیک از نظر عملکرد گیاهی و تولید میوه بسیار کارامدتر از سیستم نوار غذایی است. به‌طور خلاصه در مطالعه لنارد و لئونارد (۲۰۰٦) با مقایسه این ۳ نوع بستر کشت گیاهی به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی عنوان گردید که سیستم نوار غذایی به‌طور قابل‌توجهی کارایی کم‌تری نسبت به روش کشت در بستر و کشت شناور دارد و نتایج ضعیف‌تر برای سیستم نوار غذایی احتمالاً به‌دلیل سطح پایین تماس ریشه گیاه با آب در مقایسه با سیستم‌های کشت شناور و کشت در بستر (سطح تماس ۱۰۰ درصد ریشه با آب) است. با این وجود رشد ماهیان در طول ۲۱ روز آزمایش مطابق با پژوهش حاضر مناسب بود و تحت‌تأثیر بستر کشت گیاهی قرار نگرفت.

طبق گزارش‌های یلدیز و همکاران (۲۰۱۷) مدیریت pH در سیستم‌های آکواپونیک امری ضروری است، زیرا pH به‌طور مداوم در نتیجه فرایند نیتریفیکاسیون کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش تولید یون‌های +H و نیترات است. بررسی روند pH در پژوهش حاضر نیز در هر دو تیمار نشان داد که میزان pH به‌طور معناداری در هفته چهارم آزمایش در تکنیک کشت شناور به‌طور معناداری بالاتر از سیستم نوار غذایی بود ($P<۰/۰۱$) و همان‌گونه که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد شاخص نیترات میزان بیش‌تری را در سیستم نوار غذایی نسبت به بستر کشت شناور در هفته چهارم، هفته پنجم، هفته ششم و هفته هشتم به ثبت رسانید؛ بدین‌ترتیب به‌نظر می‌رسد کاهش معنی‌دار میزان pH در هفته چهارم در بستر کشت نوار غذایی نسبت به بستر کشت شناور وجود مقادیر بالاتر نیترات در هفته‌های ذکر شده در سیستم نوار غذایی نسبت به بستر کشت شناور، بدلایل ذکر شده در بالا که ضعف گیاهان در جذب نیترات در سیستم نوار غذایی در پژوهش حاضر است، می‌باشد.

طبق بررسی رندال و رایت (۱۹۸۹) دفع آمونیاک در ماهی که به‌صورت عمده از طریق آبشش صورت می‌گیرد آب را قلیایی می‌کند، که واکنش زیر، خصلت بازی مولکول آمونیاک در واکنش با آب را نشان می‌دهد:

$$NH3 + H2O \rightarrow NH4 + OH^-$$

بدین‌ترتیب به‌نظر می‌رسد که در پژوهش حاضر افزایش سطوح pH در هفته‌های ابتدایی دوره در هر دو تیمار تحقیق به‌دلیل افزایش سطوح آمونیاک در ابتدای دوره در اثر غذادهی و در نبود میزان کافی از باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک در ابتدای دوره باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی با توجه به این‌که عملکرد و تولید گیاه و ماهی در سیستم بستر کشت شناور نسبت به نوار غذایی بهتر بود و با توجه به این‌که از نظر بار مواد مغذی نیتروژنی شاهد مقادیر کم‌تری در سیستم کشت شناور به‌دلیل جذب بهتر مواد مغذی توسط گیاه و رشد بهتر گیاه در این سیستم نسبت به سیستم نوار غذایی بودیم، استفاده از بستر کشت شناور به‌دلیل برقراری بهتر تعادل و توازن در سیستم‌های آکواپونیک راه‌اندازی شده و رشد و عملکرد بهتر ماهی کپور معمولی و گیاه نعناء توصیه می‌گردد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله لازم می‌دانم از معاونت محترم پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر به جهت حمایت‌های همه‌جانبه سپاسگزاری کرده و هم‌چنین از جناب آقای مهندس احمد طینه‌زاده مدیریت محترم بخش صنعت شرکت گروه ملی صنعتی فولاد ایران، به جهت زحمات بی‌شائبه ایشان در خصوص فراهم‌سازی محل انجام پژوهش و پشتیبانی فنی و مهندسی در زمان ساخت و راه‌اندازی سیستم‌ها تشکر و سپاسگزاری کرده و از خداوند متعال برای ایشان طلب موفقیت‌های روزافزون می‌نمایم.

منابع

APHA. 2005. Standards Methods for the examination of Water and Waste water, 21st Edn. Washington D.C.

Buzby, K.M., and Lin, L.S. 2014. Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. Aquacultural Engineering. 63: 39-44.

Buzby, K.M., Waterland, N.L., Semmens, K.J., and Lin, L.S. 2016. Evaluating aquaponic crops in a freshwater flow-through fish culture system. Aquaculture. 460: 15-24.

Cerozi, B.D.S., and Fitzsimmons, K. 2016. Use of *Bacillus* spp. to enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems. Scientia Horticulturae. 211: 277-282.

Colt, J., and Tchobanoglous, G. 1976. Evaluation of the short-term toxicity of nitrogenous compounds to channel catfish, *Ictalurus punctatus*. Aquaculture. 8: 3. 209-224.

Denstadli, V., Skrede, A., Krogdahl, Å., Sahlstrøm, S., and Storebakken, T. 2006. Feed intake, growth, feed conversion, digestibility, enzyme activities and intestinal structure in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed graded levels of phytic acid. Aquaculture. 256: 1. 365-376.

Frincu, M., Dumitrache, C., Cimpeanu, P.C., and Mihal, L.P.C. 2016. Study Regarding nitrification in experimental aquaponic system. J. Young Scientist. 4: 27-32.

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., and Burnell, G.M. 2019. Aquaponics Food Production Systems: Compined Aquaculture and Hydroponic Production Technology for the Future. Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 619p.

Graber, A., and Junge, R. 2009. Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination. 246: 147-156.

Graves, C.J. 1983. The nutrient film technique. Horticultural reviews. 5: 1. 1-44.

Harmon, T. 2001. A look at filtration in aquaponic systems: bead filters. Aquaponic. J. 5: 3. 16-19.

King, C.E. 2005. Integrated agriculture and aquaculture for sustainable food production. Ph.D. Dissertation, The University of Arizona. UMI, AnnHarbor, MI, 87p.

Lennard, W.A., and Leonard, B.V. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in

an Aquaponic test system. Aquaculture International. 14: 6. 539-550.

Nuwansi, K.K.T., Verma, A.K., Rathore, G., Prakash, C., Chandrakant, M.H., and Prabhath, G.P.W.A. 2019. Utilization of phytoremediated aquaculture wastewater for production of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi) and gotukola (Centella asiatica) in an aquaponics. Aquaculture. 507: 361-369.

Ødegård, J., Olesen, I., Dixon, P., Jeney, Z., Nielsen, H.M., Way, K., Joiner, C., Jeney, G., Ardo, L., Ronyai, A., and Gjerde, B. 2010. Genetic analysis of common carp (*Cyprinus carpio*) strains. II: Resistance to koi herpesvirus and *Aeromonas hydrophila* and their relationship with pond survival. Aquaculture. 304: 1-4. 7-13.

Rakocy, E.R., Masser, M.P., and Losordo, T.M. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC Publication, 454: 1-16.

Randall, D.J., and Wright, P.A. 1989. The interaction between carbon dioxide and ammonia excretion and water pH in fish. Can. J. Zool. 67: 12. 2936-2942.

Roosta, H.R., and Ghorbani, F. 2011. Investigation of the growth and development, essential oil and minerals content in two species of mint in hydroponics and aquaponics. J. Sci. Technol. Greenhouse Cul. 2: 7. 19-28.

Roosta, H.R., and Sajjadinia, A.R. 2010. Investigating physiological characteristics of mint in the Raft aquaponic system and perlite medium. J. Soil Plant Interac. 1: 3. 51-61.

Salam, M.A., Asadujjaman, M., and Rahman, M.S. 2013. Aquaponics for improving high density fish pond water quality through raft and rack vegetable production. World J. Fish Mar. Sci. 5: 3. 251-256.

Sallenave, R. 2016. Important water quality parameters in aquaponics systems. NM State University, Cooperative Extension Service, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences.

Shete, A.P., Verma, A.K., Chadha, N.K., Prakash, C., Peter, R.M., Ahmad, I., and Nuwansi, K.K.T. 2016. Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with Common carp (*Cyprinus carpio*) and Mint (*Mentha arvensis*). Aquacultural Engineering. 72: 53-57.

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., and Lovatelli, A. 2014. Small-scale aquaponic food production Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical, Rome. 589p.

Sonneveld, C., and Voogt, W. 2009. Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht, 403p.

Tan, C., Sun, D., Tan, H., Liu, W., Luo, G., and Wei, X. 2018. Effects of stocking density on growth, body composition, digestive enzyme levels and blood biochemical parameters of *Anguilla marmorata* in a recirculating aquaculture system. Turk. J. Fish. Aqua. Sci. 18: 1. 9-16.

Wren, S.W. 1984. Comparison of hydroponic crop production techniques in a recirculating fish culture system. MSc thesis, Texas A&M University, Texas, USA.

Yildiz, H.Y., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., and Parisi, G. 2017. Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-a review. Water. 9: 1. 13.

Zhao, Z.G., Xu, Q.Y., Luo, L., Yin, J.S., and Wang, C.A. 2013. Effect of adding carbon source on growth of fish and water quality in Songpu mirror carp (*Cyprinus specularis Songpu*) pond. J. North. Agric. Univ. 44: 105-112.