

مروری بر نیازمندی‌های مواد معدنی در تغذیه ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*)

فائزه مرتضایی^۱، بهرام فلاحتکار^{*۱}

^۱گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، گیلان

چکیده:

نقش مواد معدنی در تغذیه، فیزیولوژی و حیات بسیاری از حیوانات مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال دستیابی به اطلاعات در زمینه نیازمندی‌های مواد معدنی ماهیان و اثرات آنها بر ترکیبات و عملکرد بیوشیمیایی بدن، واکنش‌های آنزیمی و واحدهای ساختاری غیر آنزیمی با محدودیت رو به رو است. این مسئله به دلیل جذب برخی از مواد معدنی توسط آب، ماده غذایی و در نتیجه عدم اندازه‌گیری دقیق این عناصر اتفاق می‌افتد. امروزه اهمیت عناصر معدنی میکرو و ماکرو به عنوان اجزای ضروری جیره ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در بسیاری از مطالعات به اثبات رسیده است. عناصر ماکرو (Na، K، Mg، Ca، P) جزء اصلی واکنش‌ها و مسیرهای بیوشیمیایی بوده و وجود عناصر معدنی میکرو (Se، Mn، Cr، Fe، Cu، Zn) به دلیل بهبود عملکرد رشد و تغذیه ماهی مهم تلقی می‌شوند. در این راستا، برهم‌کنش عناصر ماکرو و میکرو، شرایط فیزیکیوشیمیایی محیط آبی و فیزیولوژی ماهی می‌توانند دستیابی به سطوح بهینه و دسترسی زیستی مواد معدنی در خوراک را تحت تاثیر قرار دهند. این مطالعه مروری بر سطوح مختلف نیازمندی‌ها، نقش مواد معدنی در خوراک و تاثیر متقابل آنها بر رشد، تغذیه و فیزیولوژی بدن ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بعنوان یکی از گونه‌های مهم پرورشی خواهد بود.

کلمات کلیدی: احتیاجات غذایی، عملکرد بیوشیمیایی، قزل‌آلای رنگین‌کمان، *Oncorhynchus mykiss*. متابولیسم، مواد معدنی.

مقدمه

ماکرو شامل کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سدیم و فسفر و دسته دیگر که عناصر معدنی میکرو نامیده شده در برگیرنده مس، آهن، ید، منگنز، سلنیوم و روی هستند (NRC, 2011).

در پژوهش حاضر، به بررسی احتیاجات مواد معدنی در جیره ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*) به عنوان یکی از مهم‌ترین گونه‌ها در تولیدات آبی‌پروری جهان پرداخته می‌شود (جدول ۱). گونه‌های آب شیرین افزایش روز افزونی در تولیدات آبی‌پروری داشته‌اند و پیش‌بینی می‌شود که در آینده، حدود ۶۰٪ از تولیدات کل آبی‌پروری را به خود اختصاص دهند (FAO, 2016). از این میان، ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان به دلیل خصوصیات بارز فیزیولوژیک و رفتاری همچون سازش با شرایط پرورشی و سرعت رشد و ارزش غذایی بالا مورد توجه بسیاری از پرورش‌دهندگان قرار گرفته است. مواد معدنی در متابولیسم بهینه غذا، افزایش استقامت استخوان‌ها، توازن در تبادل آب با محیط و حضور مایعات بدن ایفای نقش می‌کنند. این مواد هر چند به میزان اندک اما در تداوم حیات موجود ضروری بوده، در غیر این صورت سلامتی ماهی به خطر می‌افتد. از جمله عواملی که در افزایش تولیدات آبی‌پروری این گونه نقش بسزایی دارد، نوع تغذیه و کیفیت عناصر مغذی تشکیل دهنده آن می‌باشد. توجه به نیازمندی‌های مواد معدنی ماکرو و میکرو در کنار سایر اجزای جیره غذایی این گونه، می‌تواند منجر به تولید محصولی با کیفیت بالاتر شود. هدف از این مطالعه، معرفی انواع مختلف مواد معدنی، وظایف، اثر این عناصر در تغذیه، رشد، فیزیولوژی و بروز انواع بیماری و سمیت، انواع برهم‌کنش‌ها با سایر مواد مغذی و محیط زیست، منابع دستیابی به عناصر معدنی و میزان نیازمندی هر یک از آنها در جیره ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان خواهد بود.

علی‌رغم انجام فعالیت‌های پژوهشی در زمینه نیازمندی‌های مواد مغذی آبزیان از دهه ۱۹۵۰ میلادی، تحقیقات در مورد مواد معدنی از اواسط دهه ۱۹۷۰ آغاز و تا به امروز با روند کندی رو به انجام است (Antony Jesu, 2014a). مواد معدنی توسط اجزای اصلی و ماهیت غیر آلی خود از سایر مواد مغذی تفکیک می‌شوند و بسیاری از این عناصر به دلیل وجود وظایف ساختاری و متابولیکی در بدن موجودات، حائز اهمیت هستند (Davis and Gatlin, 1996). علاوه بر محدودیت دستیابی به اطلاعات در زمینه مواد معدنی مورد نیاز ماهیان و سخت‌پوستان در مقایسه با سایر گروه‌های تغذیه‌ای، اطلاعات اندکی نیز در مورد نیازمندی‌های مواد معدنی گونه‌های آبی در مقایسه با جانوران خشکی موجود است و دلیل این امر جذب این عناصر توسط ماهی از طریق آب و مواد غذایی است (Stickney, 2000). به طور کلی ارزیابی احتیاجات عناصر معدنی ماهیان برخلاف موجودات خشکی به دلیل تعاملات با محیط آبی بسیار پیچیده‌تر می‌باشد (Kaushik, 2002).

از جمله عواملی که در تغییر سطوح مواد معدنی جیره آبزیان دخیل هستند عبارتند از: عوامل بیولوژیک مانند نوع گونه، مرحله زندگی، مرحله رسیدگی جنسی، سطوح تغذیه‌ای، عادات و وضعیت تغذیه‌ای ماهی، کارکرد تغذیه‌ای و علائم کمبود عناصر در بدن، ترکیبات جیره، دسترسی و برهم‌کنش‌های تغذیه‌ای و عوامل زیست محیطی مانند غلظت مواد در آب، شوری، دما، نوع سیستم پرورشی و عوامل دیگری از قبیل محتوای مواد معدنی بدن، ثبات و تنظیم یونی، غلظت مواد در بافت، پلاسما، فعالیت آنزیم‌های مختلف، ترشحات دفعی و حتی بیان ژن مرتبط با عناصر معدنی مختلف می‌توانند در تعیین سطوح این عناصر، مفید واقع شوند (Antony Jesu Prabhu et al., 2014a). دسته‌بندی این عناصر بر اساس ضرورت یا عدم ضرورت، نیازمندی‌ها یا مقادیر آنها در بدن، به صورت عناصر معدنی ماکرو و عناصر معدنی میکرو مطرح شده است. عناصر معدنی

کلسیم و فسفر

کلسیم و فسفر دو عنصر رایج از بخش غیر ارگانیک جیره به حساب می‌آیند و به عنوان اجزای ساختاری بافت‌های سخت مانند استخوان‌ها، فلس و دندان نقش خود را ایفا می‌کنند (NRC, 2011). کلسیم علاوه بر عملکرد ساختاری، وظایف دیگری مانند انعقاد خون (مهره داران)، عملکرد عضلانی، بهبود انتقال پیام عصبی، تنظیم اسمزی و نقش کوفاکتور را در فرآیندهای آنزیمی برعهده دارد (Lall, 2002). فسفر بخشی از انواع مختلف فسفات‌های آلی مانند نوکلئوتیدها، فسفولیپیدها، کوآنزیم‌ها، دئوکسی ریبونوکلئیک اسید و ریبونوکلئیک اسید را تشکیل می‌دهد. کمبود عناصر معدنی ماکرو مهم مانند کلسیم، سبب مشکلات عمده‌ای در ماهیان می‌گردد. کمبود فسفر با ایجاد اختلال در متابولیسم داخلی بدن، سبب کاهش رشد و افزایش ضریب تبدیل غذایی می‌شود؛ همچنین کاهش جذب این عنصر (کم تر از حد نرمال) سبب کاهش معدنی شدن بافت‌های سخت و بروز ناهنجاری‌های اسکلتی مختلف خواهد شد (Sugira et al., 2004).

Shearer و Hardy (۱۹۸۷) دریافتند که میزان دسترسی کلسیم و منیزیم در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان تغذیه شده با جیره واجد کمبود فسفر، کاهش می‌یابد. سختی آب (وجود کلسیم در آب) خواه توسط رقابت شیمیایی، سازش بیولوژیکی یا هر دو فرآیند سبب کاهش جذب سمیت فلزاتی مانند روی خواهد شد. طی آزمایشی با قرارگیری عنصر روی در معرض غلظت‌های مختلف کلسیم، مشاهده شد که جذب عنصر روی طی دوره ۲۴ ساعته به طور تقریبی با جذب کلسیم در ارتباط بوده و میزان روی به طور معنی‌داری از طریق قرارگیری در معرض کلسیم موجود در آبشش کاهش یافت. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اثرات محافظتی کلسیم غیر قابل اغماض است (Barron and Shannon, 2000). سیستم آنزیمی ATPase-Ca نقش مهمی در انتقال این یون و پاسخ تنظیمی مربوط به مصرف کلسیم از آبشش ایفا میکند اما برخی نتایج نشان می‌دهد که با انتقال ماهی به محیط آبی حاوی سطوح پایین کلسیم، فعالیت این

جدول ۱: تولیدات آبی پروری ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در محیط‌های مختلف آبی (FAO, 2014)

محیط‌های پرورشی	تولید جهانی (تن)	تولید در ایران (تن)
آب‌های شیرین	۵۶۹۸۱۹	۱۲۵۵۱۵
آب‌های شور	۲۲۵۱۹۴	-
آب‌های لب شور	۱۰۷۵۲	-

مروری بر منابع**دسته‌بندی مواد معدنی****عناصر معدنی ماکرو**

عملکرد عناصر معدنی ماکرو، به گونه‌ای است که همواره چه در جیره و چه در بدن، به مقدار نسبتاً زیادی مورد نیاز می‌باشد و در شکل‌گیری ساختارهای استخوانی و بافت‌های سخت (مانند شعاع باله‌ها، فلس‌ها، دندان و اسکلت خارجی)، هدایت الکتریکی، تعادل اسید و بازی، تولید پتانسیل غشاء و تنظیم اسمزی ایفای نقش می‌کنند (NRC, 2011). شش ماده معدنی شامل کلسیم، کلر، منیزیم، فسفر، پتاسیم و سدیم در دسته‌بندی رایج‌ترین عناصر معدنی ماکرو قرار می‌گیرند (جدول ۲).

جدول ۲: عناصر معدنی ماکرو مورد نیاز در جیره ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (Watanabe et al., 1997)

ماده معدنی	میزان توصیه شده (g/۱۰۰g)
کلسیم	ناچیز
فسفر	۰/۷-۰/۸
منیزیم	۰/۰۶-۰/۰۷
سدیم	ناچیز
پتاسیم	ناچیز
کلر	ناچیز

آنزیمی و دمایی آرد سویا بر جذب ظاهری فسفر کل، فیتات، نیتروژن و عناصر دیگر همچون کلسیم، منیزیم، استرانسیوم، منگنز و روی در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بررسی شد. نتایج نشان داد که در جیره حاوی خاکستر بالا، فرآیند اسیدی شدن سبب کاهش اثرات فیتاز شده، در حالی که در جیره حاوی حداقل میزان خاکستر، اسیدی شدن به طرز قابل توجهی فعالیت آنزیمی را افزایش خواهد شد. همچنین میزان فسفر دفعی ماهی تغذیه شده به وسیله جیره حاوی خاکستر پایین و تیمار شده با فیتاز در مقایسه با ماهی تغذیه شده با جیره تجاری، به میزان ۹۸-۹۵٪ کاهش یافت. تیمار حرارتی اثر معنی‌داری بر مقادیر عناصر معدنی جیره نداشت (Sugiura *et al.*, 2001).

اثر استراتژی‌های تغذیه‌ای در مراحل مختلف بر سطوح مختلف فسفر جیره و کاهش ورودی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است و به دنبال آن سعی شده تا شاخص‌های تولید در آبزیان پرورشی در حد مطلوب حفظ گردد (Lellis *et al.*, 2004). نتایج مطالعه دیگری در مورد اثر کمبود فسفر و کلسیم روی کاهش و به تأخیر افتادن مرحله اولیه تشکیل اسکلت درون غضروفی و غشایی بچه ماهی نورس قزل‌آلای رنگین‌کمان نشان داد که کمبود کلسیم بدون اثرگذاری روی معدنی شدن ساختار اسکلت نهایی، سبب اختلال در توسعه و تکامل اسکلتی می‌شود و اثر خود را روی اندازه و شکل ستون مهره ماهی خواهد گذاشت (Fontagne *et al.*, 2009). مدل‌های رگرسیونی چندگانه قادر به پیش‌بینی میزان دسترسی فسفر در جیره فرموله شده واجد طیف وسیعی از مکمل‌های سنتتیک و گیاهی هستند (Hua and Bureau, 2006). مدل‌های فاکتوریلی، ضایعات دفعی فسفر را در سیستم‌های پرورش آزادماهیان پیش‌بینی می‌کنند (Hua *et al.*, 2008). نیازمندی‌های فسفر در جیره ماهیان مختلف در محدوده‌ای بین ۰/۳ تا ۱/۵٪ از جیره کل گزارش شده است (Lall, 2002). نتایج آزمایش هضم پذیری ظاهری در بررسی اثر اسیدفرمیک بر دسترسی فسفر موجود آرد ماهی با سه دوز مختلف در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان

سیستم آنزیمی دستخوش تغییراتی خواهد شد. مکان جذب کلسیم در ماهیان آب شیرین، سلول‌های کلراید واقع در رشته‌های آبششی است و قرارگیری ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در محیط حاوی سطوح پایین کلسیم، سبب تزاید سلول‌های کلراید موجود در لاملاها خواهد شد (Mayer-Gostan *et al.*, 1983).

در مطالعه‌ای اثرات القای سنتز زرده (ویتلوژنین) بر میزان تشکیل کلسیم از فلس و استخوان‌های ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بررسی شد. تزریق یکباره هورمون ۱۷-بتا استرادیول سبب افزایش شاخص هیاتوسوماتیک، سطوح کلسیم پلاسما و زرده شده و این تغییرات سبب کاهش معنی‌دار میزان کلسیم در فلس‌ها شد (Carragher and Sumpter, 1991).

اندازه‌گیری آزمایشی غلظت فسفر در ادرار، شاخص دقیقی در تعیین متابولیسم فسفر جیره بسیاری از ماهیان است (Sigiura *et al.*, 2001). دستکاری جیره مانند کاهش دادن فسفر کل جیره (Green *et al.*, 2002) یا افزایش دسترسی فسفر در جیره توسط اضافه کردن آنزیم فیتاز (Gatlin and Li, 2008) یا افزودنی‌هایی مانند اسیدسیتریک در کاهش دفع فسفر از طریق ادرار و مدفوع موثر است (Sugiura *et al.*, 1998). دستکاری تغذیه‌ای در جیره ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان سبب می‌شود که ضایعات فسفوری محلول و نامحلول به بیش از ۵۰٪ کاهش یابد (Green *et al.*, 2002). در بررسی دسترسی ظاهری و حقیقی عنصر فسفر در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان تغذیه شده با جیره حاوی مواد گیاهی شامل آرد سویا (پرچرب و گرمادیده)، دانه کتان و روغن کانولا در مقایسه با جیره حاوی آرد ماهی، پودر خون، ضایعات طیور، مشاهده شد که دسترسی حقیقی فسفر در آرد ماهی بین ۲۱/۵ تا ۵۵/۴٪ و در جیره گیاهی ۹/۷ تا ۴۸/۴٪ بوده و همچنین دسترسی ظاهری فسفر در منابع حیوانی (آرد ماهی) ۳۰٪ بیشتر از منابع گیاهی تخمین زده شد. این نتایج نشان داد که منابع پروتئینی گیاهی دارای فیتاز، می‌توانند دسترسی فسفر را از ۴۶/۲ به ۷۵/۶٪ افزایش دهند (Marty and Brown, 1996). اثرات تیمارهای

غذایی با منشا گیاهی و حاوی سطوح بالای منیزیم در جیره‌های فرموله شده آزمایشی، سبب کاهش استفاده از مکمل‌های منیزیم شده است. با این حال به دلیل دسترسی زیستی اندک منیزیم در آرد ماهی، افزودن برخی از مکمل‌های منیزیم، مانند کلرید منیزیم، در جیره به منظور رفع نیاز ماهیان توصیه می‌شود (Watanabe *et al.*, 1988).

سدیم و پتاسیم

این عناصر در انجام بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیک مانند تعادل اسیدی بازی و تنظیم اسمزی ضروری هستند و اغلب در آب فراوان بوده، بنابراین کمبود متابولیک آن‌ها به ندرت مشاهده می‌شود (Lall, 2002). در مطالعه‌ای میزان جذب سدیم از آبشش‌های ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در طول لاملاهای ثانویه اندازه‌گیری شد. سلول‌های کلراید در جذب سدیم نقش مهمی برعهده دارند. مشاهدات نشان داد که انتشار سدیم می‌تواند روی شکل سلول‌های کلراید اثر بگذارد و تزاید سلول‌های کلراید مدور موجود در لاملاهای ثانویه با افزایش ظرفیت پمپاژ سدیم در آبشش در ارتباط است (Avella *et al.*, 1987). بررسی مکانیسم ترشح آمونیاک و جذب سدیم در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان نشان داد که بافت آبشش ذاتا آمونیاک تولید کرده و بین ترشح آمونیاک و میزان آن در محیط همبستگی وجود دارد. میزان انتشار آمونیاک به خارج طبق دسترسی پروتون محیط تغییر می‌کند و جذب سدیم با نوسان غیر مستقیم اسیدیته دچار تغییر می‌شود. رابطه بین سدیم و پروتون از طریق فعالیت و اندازه‌گیری ترشحات H^+ تایید شده است (Avella and Bornancin, 1989). در مطالعه‌ای با بررسی اثر ترکیبات مختلف مانند فرمالین، پراکسید هیدروژن و کلرید سدیم بر عفونت قارچی تخم قزل‌آلای رنگین‌کمان، مشاهده شد که تمامی ترکیبات در مقایسه با تیمار شاهد، سبب بهبود فرایند تفریح شدند. اما تیمار کلرید سدیم به میزان mg/l ۳۰۰۰۰ در مقایسه با دو ترکیب دیگر اثرات به مراتب

پرورشی آب لب شور نشان داد که میزان فسفر در جیره حاوی 10 mL/kg اسید فرمیک، به طور معنی‌داری از $0.69/5\%$ به $0.75/5\%$ افزایش یافت (Vielma and Lall, 1997).

Dvavis و همکاران (۱۹۹۳) گزارش دادند که افزایش دوز مکمل کلسیم در جیره پایه سبب مهار دسترسی زیستی فسفر می‌شود. براساس این مطالعه، کلسیم می‌تواند دسترسی فسفر را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین باید از افزایش سطوح کلسیم به بیش از $2/5\%$ جلوگیری کرد. شواهدی مبنی بر اثر ویتامین D_3 و متابولیت‌های مرتبط روی هموستازی کلسیم در ماهیان استخوانی وجود دارد. عمده ترین تنظیم کننده متابولیسم فسفر در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان، متابولیت‌های وابسته یا انتقال دهنده‌های کلسیم فسفات و فسفر موجود در جیره در مقایسه می‌باشند (Coloso *et al.*, 2003).

منیزیم

منیزیم در بافت‌های نرم فضای برون و درون سلولی حضور دارد و در حفظ هموستازی بین و خارج سلولی ماهیان و سخت پوستان نقش مهمی ایفا می‌کند (Mantel and Farmer, 1963). علاوه بر این، وجود منیزیم در تنفس سلولی و واکنش انتقال فسفات درگیر با آدنوزین دی و مونوفسفات، فعال کننده تمامی واکنش‌های تیامین پیروفسفات و متابولیسم‌های وابسته به اسید چرب، کربوهیدرات و پروتئین نقش به سزایی دارد و کمبودش در جیره انواع مختلفی از ماهیان آب شیرین از جمله قزل‌آلای رنگین‌کمان، سبب کاهش رشد کمبود اکسیژن (آنوکسی)، بیحالی، تشنج، انحنای ستون فقرات، مرگ و میر بالا و کاهش سطوح منیزیم در کل بدن، سرم خون و استخوان‌ها خواهد شد (Dall and Moniaty, 1983). آب شیرین محتوی $1-3\text{ mg/l}$ منیزیم است و نیازمندی ماهیان در این محیط بین $0.25/0$ تا $0.07/0$ از جیره می‌باشد (Lall, 2002). قزل‌آلای رنگین‌کمان قادر به جذب $1/3\text{ mg/l}$ یون منیزیم از آب بوده که رفع کننده بخشی از نیازهای متابولیک این ماهی است (Shearer, 1989). وجود اقلام

کمتری در مهار عفونت قارچی داشت (Schreier *et al.*, 1996).

Harpaz و همکاران (۲۰۰۵) گزارش دادند که اضافه کردن نمک در آب شیرین، سبب افزایش فعالیت آنزیمهای نوار مسواکی روده مانند آلکالین فسفاتاز، لاکتاز و لوسین آمینوپپتیداز شده و اثراتی روی زوائد پیلوریک دارد. استفاده از این مکمل در یک جیره فرموله آزمایشی به میزان ۱۰-۷٪ سبب کاهش استرس ناشی از تنظیم اسمری و افزایش بقای ماهیان منتقل شده از آب شیرین به آب شور خواهد شد.

عناصر معدنی میکرو

عناصر معدنی میکرو یا عناصر کمیاب که عمدتاً به میزان کمتری در جیره و بدن موجود مورد نیاز است (جدول ۳)، تشکیل دهنده اصلی هورمون‌ها و آنزیم‌ها هستند و به عنوان کوفاکتور و فعال کننده بسیاری از آنزیم‌ها به کار می‌روند و غلظت و شکل کاربردی این مواد با میزان فعالیت متابولیسمی درون سلول یا بافت‌ها رابطه تنگاتنگی دارد (Satoh *et al.*, 1987a). حفظ تعادل سطوح عناصر معدنی میکرو در بدن موجود در گرو محاسبه دقیق پارامترهای جذب، ذخیره و دفع مواد محقق خواهد شد.

جدول ۳: عناصر معدنی میکرو مورد نیاز در جیره ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (Watanabe *et al.*, 1997)

ماده معدنی	میزان توصیه شده (g/۱۰۰g)
مس	۳-۳/۵
آهن	ناچیز
روی	۱۵-۳۰
منگنز	۱۲-۱۳
سلنیوم	۰/۱۵-۰/۳۸
ید	ناچیز

کروم

این عنصر به عنوان یک مولکول ارگانومتال سبب تقویت فعالیت انسولین در متابولیسم کربوهیدرات شده و نقش عمده‌ای در ارتباط با فاکتور تحمل گلوکز، فعال سازی آنزیم‌های مختلف، متابولیسم لیپید و حفظ ثبات پروتئین و اسیدهای نوکلئیک دارد (NRC, 1997).

مطالعه‌ای بر اساس تعیین اثرات کروم محلول در آب روی عملکرد رشد و فاکتورهای کبدی ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان تحت شرایط پرورشی نرمال و تراکم بالا انجام شد. با تغذیه ماهی از جیره حاوی مکمل کروم، در تراکم بالا، افزایش وزن و مصرف غذا مشاهده شد. همچنین، افزایش تراکم سبب افزایش اکسیداسیون چربی، hsp70 و مهار hepatic Nrf2 شده و مکمل کروم اثرات منفی آنها را کاهش داد. این جیره قادر به کاهش استرس اکسیداتیو، بهبود و تنظیم بیان عوامل رونویسی هسته کبدی در ماهی قزل‌آلای پرورشی شد (Akdemir *et al.*, 2017). Gatta و همکاران (۲۰۰۱) ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان را با جیره‌ای حاوی مکمل نیمه خالص کروم آلی به میزان بیش از ۴/۱mg/kg تغذیه نمود و مشاهده کردند که لایزوزیم موجود در سرم و فعالیت فاگوسیتوزی و ماکروفاژهای اندام فوق کلیوی بعد از ۶ هفته افزایش یافت. با این حال مکانیسم‌های تأثیر کروم روی متابولیسم کربوهیدرات در ماهیان به درستی مشخص نیست.

مس

یون مس در چگونگی تشکیل خون و عملکرد آنزیم‌های وابسته مانند لایزیل اکسیداز، سیتوکروم C اکسیداز (CCO)، فروکسیداز، تایروزیناز و سوپراکسید دسیموتاز (SOD) نقش دارد. آنزیم لایزیل اکسیداز در تشکیل بافت کلاژن و الاستیک به کار می‌رود و بروز اختلال در پیوند کلاژن و ساختار استخوانی، سبب افزایش شکنندگی استخوان شده که با کمبود مس در ارتباط است (NRC, 2011).

در آزمایشی اثرات قرارگیری ماهی در شرایط حساسیت‌زا و سمی عفونت ساپروولگنیوزیس مورد ارزیابی قرار گرفت.

آهن

نقش اساسی آهن در مهره‌داران استفاده به عنوان کمپلمان هموگلوبین است. به طور کلی سلول‌های قرمز (گلبول‌های قرمز خون) به صورت دوره‌ای احیا شده و بیشتر آهن به چرخه باز می‌گردد. بخش احیا نشده توسط صفرا به روده تراوش می‌شود. آهن نیز مانند دیگر عناصر معدنی میکرو، جذب و به شکل پیوند با پروتئین به بدن منتقل می‌شود (Lovell, 1989). بر اساس مطالعه‌ای با هدف بررسی نقش فری‌رداکتاز و ترانسفرین در تنظیم آهن ماهیان استخوانی، ماهیانی که بوسیله جیره حاوی آهن بالا (1975 mg/Fe/kg) تغذیه شدند، میزان اشباعیت ترانسفرین از ۱۵٪ به ۳۷٪ افزایش یافت. آهن انباشته شده در کبد با افزایش فعالیت کبدی فری‌رداکتاز و ترانسفرین سرم ماهی دارای همبستگی بود. میزان تغییرات انباشتگی آهن در آبشش‌ها محسوس نبود و این امر نشان داد که آبشش‌ها نقش زیادی در متابولیسم آهن نداشتند (Carriquiriborde et al., 2004). آهن یکی از فلزات اولیه درگیر در اکسیداسیون چربی است و آهن فرس نسبت به آهن فریک یک کاتالیست بالقوه در پراکسید چربی است (Lee et al., 1981). در بررسی اثرات نانوذرات آهن بر فاکتورهای رشد و تغذیه ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان، نتایج نشان‌دهنده استفاده از نانوذره آهن در سطح 30 mg/kg و افزایش عملکرد رشد و تغذیه بچه ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بود (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲).

منگنز

این عنصر به عنوان یک کوفاکتور در سیستم‌های چند آنزیمی شامل سنتز اوره از آمونیاک، متابولیسم آمینواسیدهای، اسیدهای چرب و اکسیداسیون گلوکز نقش دارد (Lall, 2002). علائم کمبود این عنصر در ماهیان شامل کاهش رشد، ناهنجاری اسکلتی، مرگ و میر بالای جنین و کاهش نرخ هج خواهد بود (Lall, 2002). براساس مطالعات ایمنی‌شناسی مشاهده شده است که کمبود منگنز و در کنار آن عنصر روی،

ماهی در معرض غلظت‌های نیمه کشنده مس، سیانید، آمونیاک و نیتريت طی ۲۴ ساعت و سپس به مدت ۱۰ دقیقه تحت چالش با *Saprolegnia parasitica* قرار گرفت. این مواد سبب افزایش سطوح استرس و کورتیزول (بالتر از ۳۷۰ ng/ml) و بیشترین حساسیت توسط آمونیاک (۰.۷۱٪) و سپس مس (۰.۵۷٪) ایجاد شد. این مواد در کنار هم سبب بروز پاسخ استرسی حاد در ماهی و در پی آن افزایش درصد ابتلا به عفونت می‌شوند (Carballo et al., 1995). در مطالعه‌ای اثرات سطوح بالای عنصر روی بر رشد، میزان مواد معدنی در بافت، فعالیت متالوآنزیم‌های سوپر دیسموتاز مس-روی و سایر آنزیم‌های ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بررسی شد. نتایج نشان داد که ماهی می‌تواند سطوح بالای مس و روی (۱۷۸mg مس، ۶۸۳mg روی) را تحمل کند. با این حال نسبت مس به روی، سبب تغییر در سطوح مواد معدنی کبد و پلاسما شد. این دو عنصر به تنهایی نیز می‌توانند روی رشد و فاکتورهای سلامتی ماهی تاثیر گذار باشند (Knox et al., 1982).

ید

تقریباً همه سلول‌های بدن محتوی یون ید هستند. با این حال، غده تیروئید در مهره‌داران جایگاه اصلی ذخیره این یون است. هورمون‌های تیروئیدی دربردارنده یون ید بوده و در فعالیت‌هایی از قبیل تنظیم دمایی، متابولیسم پایه، تولیدمثل، رشد و تکامل، خونسازی و گردش خون و همچنین عملکرد عصبی ماهیچه‌ای نقش دارند (NRC, 2005). از علائم کمبود ید در مهره‌داران می‌توان به هایپرپلازی بافت تیروئید (گواتر) اشاره کرد که برخی اوقات در ماهیان در زمان وجود ترکیبات گواتروژنیک در جیره مانند گلوکوسینولات‌ها دیده می‌شود (Lall, 2002). وجود مکمل ید در جیره مرطوب به میزان 80 mg/kg سبب افزایش ید در فیله ماهی بدون اثرگذاری روی سلامتی، رشد یا وضعیت هورمون‌های تیروئیدی پلاسما خواهد شد (Julshamn et al., 2006).

در بچه ماهیان نارس قزل‌آلای رنگین‌کمان، افزودن مکمل سلنیوم توصیه می‌گردد (Fontagne *et al.*, 2013). اثرات نانوذرات سلنیوم و ویتامین E بر پروفیل پروتئوم کبد^۱ ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان تحت شرایط تراکمی بالا بررسی شد. بهترین عملکرد رشد و وضعیت سلامتی در ماهیان تیمار شده با ویتامین بوده و مکمل حاوی نانوذرات اثر معنی‌داری روی رشد ماهی نداشت. به طور کلی داده‌های پروتئومی موجود در ویتامین و نانوذرات سلنیوم می‌تواند بیان پروتئین‌های درگیر در واکنش‌های متابولیسمی ماهی پرورش یافته در تراکم بالا را تغییر دهد (Naderi *et al.*, 2017).

روی

روی به عنوان یک کوفاکتور در سیستم‌های چندآنزیمی و مکمل تعداد زیادی از متالوآنزیم‌ها مانند آنیدراز کربونیک کربوکسی پپتیداز A و B، الکل دهیدروژناز، گلوتامیک دهیدروژناز، دی-گلیسرآلدهید-۳-فسفات دهیدروژناز، لاکتات دهیدروژناز، مالیک دهیدروژناز، آلکالین فسفاتاز، الدولاز، SOD، ریبونوکلاز و DNA پلیمرز ایفای نقش می‌کند (Lall, 2002). افزایش سطوح روی در جیره سبب کاهش دسترسی زیستی مس در جانوران خشکی‌زی خواهد شد (NRC, 2005). در میان منابع معدنی روی، سولفات روی بیشترین دسترسی را برای ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان دارد (Satoh *et al.*, 1987b).

در مطالعه‌ای مکانیسم جذب روده‌ای عنصر روی توسط قزل‌آلای رنگین‌کمان به شکل اختصاصی با استفاده از وزیکول‌های حاشیه‌ای غشای خارجی و اثر توامان کلسیم در حین انتقال، مورد آزمایش قرار گرفت. مشاهده شد که فعالیت کلسیم در خلال جذب روی پیچیده است و در سطوح پایین غلظت روی (۱ μM)، میزان کلسیم برابر با ۲-۱۱ μM بوده و به طور معنی‌داری سبب تحریک جذب روی می‌شود، در مقابل در سطوح بالا (۱۰۰ μM) مصرف روی را مهار می‌کند (Glover *et al.*, 2004).

سبب کاهش فعالیت سلول‌های کشنده طبیعی در قزل‌آلای رنگین‌کمان می‌شود، ولی در اثر اضافه کردن مکمل معدنی این کمبود برطرف خواهد شد (Inoue *et al.*, 1998). در بررسی اثرات منگنز به عنوان محرک رشد ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان، به صورت سه تیمار با مقادیر ۷۸، ۴۸ و ۹۸ mg/kg مشاهده شد که استفاده از سولفات منگنز به میزان ۹۸ mg/kg، بیشترین میانگین وزن، طول، نرخ رشد ویژه، پروتئین و بهترین ضریب تبدیل غذایی را به همراه دارد. به دلیل اینکه محتویات این یون در آب شور پایین (۰/۰۱ mg/l) است، به مقدار زیادی جذب نمی‌گردد. بنابراین یک منبع مناسب از این یون می‌تواند در جیره ماهیان ضروری تلقی شود (عمادی و همکاران، ۱۳۹۰).

سلنیوم

سلنیوم به عنوان یک جزء از خانواده آنزیمی گلووتاتیون پروکسیداز، در تبدیل پراکسید هیدروژن و هیدروپراکسیدهای چربی به آب و الکل‌های چرب نقش دارد. بنابراین این گروه آنزیمی در حفاظت از سلول در مقابل اثرات مخرب پراکسیدها موثر واقع می‌شود. گلووتاتیون پروکسیداز همسو با ویتامین E به عنوان یک آنتی‌اکسیدان بیولوژیک، فسفر، اسیدهای چرب بلند زنجیر غیر اشباع سلولی و غشای زیر سلولی را از آسیب پرواکسیدها مصون می‌دارد و کمبود سلنیوم در جیره عموماً منتج به کاهش فعالیت این آنزیم و کاهش رشد خواهد شد (Lovell, 1989). از میان اشکال در دسترس سلنیوم، سلنیوم-متیونین نسبت به سلنیت سدیم در جیره قزل‌آلای رنگین‌کمان است دارای دسترسی بیشتری است (Rider *et al.*, 2010).

سمیت مزمن و تدریجی سلنیوم در گونه‌های مختلف ماهیان به میزان ۱۵-۱۳ mg/kg سلنیت سدیم منجر به کاهش رشد، افزایش مرگ و میر (NRC, 2005) و آهکی شدن کلیه خواهد شد (Hilton and Hodson, 1983). جیره حاوی دانه سویا فاقد مکمل سلنیوم در افزایش رشد کارآمد بوده اما به منظور دستیابی به شاخص رشد بهینه

^۱ liver proteome profile

میزان مواد معدنی مورد نیاز، اشکال قابل دسترس آن و تقاضای فیزیولوژیک ماهی توجه نمود. سطوح مواد معدنی پلاسما پس از تغذیه با جیره‌های حاوی مکمل، می‌تواند به عنوان یک شاخص در زمینه جذب و مصرف جیره و دسترسی زیستی مواد به کار رود (Navarro and Wood, 2003). فسفر موجود در آرد ماهی عمدتاً در تشکیل هیدروکسی پاتیت نامحلول منشأ گرفته از بافت‌های سخت مانند استخوان شرکت می‌کند. دسترسی فسفر موجود در آرد ماهی، در کپور بسیار کمتر (۳۳-۱۰٪) از ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (۸۱-۶۰٪) است (Watanabe *et al.*, 1988). استفاده از پروتئین‌های گیاهی به دلیل وجود فیتاز سبب افزایش دسترسی به فسفر در بسیاری از گونه‌ها از جمله قزل‌آلای رنگین‌کمان خواهد شد (Ketola and Richmond, 1994).

مونوفسفات سدیم و پتاسیم منابع در دسترسی از فسفر برای ماهیان از جمله قزل‌آلای رنگین‌کمان هستند و دی و تری فسفات کلسیم دارای مقادیر ۷۱٪ و ۶۴٪ از دسترسی زیستی برای ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان به حساب می‌آیند (Ogino and Takeda, 1978). طی مطالعه‌ای در مورد تغییرات سطوح مواد معدنی پلاسما در قزل‌آلای رنگین‌کمان پس از تغذیه با جیره کاملاً گیاهی و مکمل فسفات دی‌کلسیم (DCP) به میزان ۵ g/kg، مشاهده شد که سطوح پلاسمای P، K، Cu و Se در جیره واجد مکمل در مقایسه با تیمار شاهد ارتقا یافت، در حالی که Ca و Mg تحت تاثیر قرار نگرفتند. بر اساس اندازه‌گیری‌های مربوط به آنالیز هضم، رشد و ترکیبات کل بدن، مکمل DCP منجر به افزایش معنی‌دار غلظت فسفر بدن و ماندگاری آن در جیره واجد مکمل خواهد شد. سطوح مواد معدنی پلاسما غلظت آن در کل بدن و عملکرد عناصر معدنی ماکرو (P، Ca، Mg و K) بهبود یافت و میزان عناصر معدنی میکرو از قبیل Zn و Cu به طور غیر مستقیم تحت تاثیر جیره DCP و اجزای گیاهی آن قرار گرفت (Antony Jesu Prabhu *et al.*, 2014b). مواد معدنی کلات شده (مانند فیتات و فیبر) در مقایسه با منابع غیرآلی دیگر حساسیت کمی نسبت به فعالیت

پتانسیل مسمومیت توسط برخی از عناصر معدنی
برخی از عناصر غیر ضروری از قبیل آرسنیک، کادمیم، جیوه و سرب، قادر به ایجاد مسمومیت در بدن ماهیان هستند. به علاوه، برخی از عناصر معدنی میکرو مانند مس، آهن و سلنیوم در صورت مصرف طولانی مدت با مقادیر بالا سبب بروز اثرات مخرب و سمی خواهند شد. به طور معمول، غلظت مس در جیره جانوران خشکی‌زی بیش از ۲۵۰ mg/kg سبب بروز مسمومیت خواهد شد (Stickney, 2000). سطوح بالایی از آهن در برخی از ارگانسیم‌های آبی مضر تلقی می‌شود. علاوه بر این، آهن کاتالیز شده در اثر اکسیداسیون چربی توسط مکمل آهن افزایش یافته و اثرات معکوسی در جهت پایداری جیره در پی خواهد داشت (Desjardins *et al.*, 1987). آهن فرس سبب کاتالیز پراکسیدها و با تشکیل پیش ساز سبب ایجاد رادیکال‌های آزاد در اسیدهای چرب بلند زنجیر غیراشباع و اکسیژن خواهند شد. در بررسی یک جیره آزمایشی دارای سمیت مس با دوز روزانه بیشتر از ۳۵-۴۵mg/kg در جیره ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان، هیچ گونه اثر سمیت و اختلال در رشد و تولیدمثل ماهی حاصل نشد (Clearwater *et al.*, 2002).

منابع و ترکیبات مکمل‌های معدنی

از میان اجزای مورد استفاده در جیره‌های غذایی، آرد ماهی یکی از غنی‌ترین منابع مواد معدنی بیرونی است. نتایج حاصل از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که دسترسی زیستی توسط نوع آرد و محتویات خاکستر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. آرد ماهی مانند سایر مواد فرآوری شده حیوانی دیگر شامل گوشت و آرد استخوان، محصولات فرعی طیور و پودر پر، نسبتاً غنی از مواد معدنی است. با این حال به دلیل دسترسی اندک به عناصر معدنی، واکنش‌های مهارتی بالقوه و به منظور جلوگیری از بروز کمبود و افزایش رشد، جیره با منابع در دسترس مس، فسفر، منگنز و روی مکمل‌سازی می‌گردد (Antony Jesu Prabhu *et al.*, 2015). در جایگزینی آرد ماهی با اقلام گیاهی باید به

الکتروننگاتیوی سطح کلئیدی و جذب کاتیون‌ها توسط نیروهای فیزیکی انجام می‌شود. بنابراین دسترسی زیستی این عناصر معدنی بیشتر از برهم‌کنش بین ترکیبات جیره، به تجزیه آن بستگی دارد. دسترسی به روی در جیره دارای اقلام گیاهی عموماً پایین بوده و افزودن یک مکمل مناسب ضروری است (Watanabe *et al.*, 1988).

در مطالعه‌ای که به بررسی تیمار آنزیمی و اثر دمای آرد سویا بر جذب ظاهری فسفر کل، فیتات، نیتروژن، خاکستر، کلسیم، منیزیم، مس، روی و استرانسیوم در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان پرداخته بود، نتایج نشان داد که تیمارهای دمای (ماکروویو، بخارپز و پختن) اثر معنی‌داری بر جذب فسفر و عناصر دیگر نداشتند اما مکمل فیتاز سبب افزایش جذب فسفر، نیتروژن، خاکستر و سایر عناصر در جیره حاوی آرد سویا شد. در جیره واجد خاکستر پایین، جذب فسفر با استفاده از فیتاز از ۲۷٪ به ۹۰٪ افزایش یافت. دفع فسفر در مدفوع ماهی تغذیه شده با جیره حاوی خاکستر پایین و دارای فیتاز برابر با ۰/۳۲g/kg بوده و ۹۸-۹۵٪ در مقایسه با ماهی تغذیه شده توسط جیره تجاری کاهش یافت (Sugiura *et al.*, 2001).

مطالعات نشان داده است که افزودن مکمل فسفات کلسیم در تغذیه ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان سبب کاهش دسترسی عنصر روی شده است و دسترسی به عنصر روی در آرد ماهی حاوی مقادیری از تری‌فسفات کلسیم کاهش می‌یابد (Sato *et al.*, 1987b). بر اساس نتایج دو آزمایش مبتنی بر اثر منابع گیاهی و مصنوعی مس بر کارایی دسترسی این عنصر در بافت ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان تغذیه شده با جیره حاوی پروتئین گیاهی و حیوانی و تاثیر متقابل افزایش عنصر روی در جیره با تغذیه ماهی از جیره گیاهی مشاهده شد که ماهی تغذیه شده با جیره گیاهی وزن ثانویه، ضریب تبدیل غذایی و غلظت کبدی مس بهبود یافت و افزایش عنصر روی طی ۱۲ هفته در جیره، سبب افزایش مس و روی در بدن شده و کاهش عنصر روی در تیمار شاهد (فاقد مکمل روی و مس) منجر به مرگ و میر و خوردگی باله دمی شد. در

مهارت ترکیبات دارند و دارای دسترسی زیستی بیشتری در جیره هستند. مزیت دیگر این مواد برای گونه‌های آبی کاهش حلالیت در آب است. با این حال هزینه بالای استفاده از کلات‌های مواد معدنی نسبت به منابع غیرآلی سبب شده که مصرف آن در آبی‌پروری محدود گردد. چندین ترکیب مختلف آلی یا مواد معدنی کلات شده در مورد عناصر مختلف شناسایی و توسعه یافته‌اند. آمینواسید کلات شده با مس، منگنز و روی نسبت به نمک‌های معدنی به راحتی در دسترس قرار گرفته و در کبد و استخوان‌های ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان رسوب می‌کنند (Apines *et al.*, 2001). چندین نوع مختلف از عنصر روی، برای گونه‌های آبی ارزیابی شده است. استفاده از متیونین روی در جیره خالص سه برابر قوی‌تر از سولفات روی عمل کرده و در مورد جیره محتوی آرد سویا این مقدار به ۴ تا ۵ برابر نیز می‌رسد و میزان ارزیابی شده مکمل پیکولینات روی به مقدار ۶۰mg/kg و ۳۰ سبب افزایش روی در کل بدن، سرم و کاهش استرس اکسیداتیو ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان خواهد شد (Kucukbay *et al.*, 2006).

تعاملات بین ترکیبات مختلف جیره غذایی

به منظور تقابل نیازمندی‌های فیزیولوژیک جاندار با انواع مختلفی از مواد معدنی، منابع غذایی مختلفی باید در دسترس قرار گیرند. عوامل زیادی دسترسی به عناصر معدنی را تحت‌الشعاع قرار خواهند داد. به طبع در جانداران فاقد سیستم گوارشی اسیدی، دسترسی زیستی به مواد معدنی با محدودیت رو به رو است. علی‌رغم اینکه اسید معده توانایی دسترسی به عناصر را افزایش می‌دهد، برخی از مواد پس از رهاسازی به محیط قلیایی روده تشکیل رسوب نامحلول خواهند داد. سطوح بالای کلسیم و فسفر با منیزیم و روی واکنش داده و رسوبات نامحلولی به وجود می‌آورند (NRC, 2011). علاوه بر این ذرات کلئیدی مانند رس، نمک‌های نامحلول آلومینیوم، منیزیم، آهن و دیگر یون‌ها قادرند که کاتیون‌ها را با قدرت بالایی جذب کنند. جذب در آنیون‌های شیمیایی توسط نیروی

مکمل‌های غذایی که دارای ترکیبی ایده‌آل از انرژی، مواد مغذی و ریز مغذی از جمله عناصر معدنی هستند زمانی اثربخش خواهند بود که کلیه مراحل کنترل فیزیکی و شیمیایی را تحت مدیریتی یکپارچه طی کرده باشند. در زمینه تغذیه ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان، مکمل‌های معدنی مختلفی با مقادیر توصیه شده و قابلیت دسترسی زیستی بالا در بازار موجود هستند که با توجه به اثرگذاری بر سیستم‌های مختلف فیزیولوژیک، ایمنی و سلامت ماهی می‌بایست در دوز بهینه در جیره مورد استفاده قرار گیرند. در همین راستا، به پرورش‌دهندگان توصیه می‌گردد که ضمن تهیه مکمل‌های معدنی از مراکز مجاز، نسبت به استفاده از سطح بهینه این ترکیب در جیره در سنین مختلف توجه ویژه‌ای داشته باشند.

منابع

عمادی، ح.، حسین‌زاده صحافی، ه.، سموات، ز.، ۱۳۹۰. اثرات منگنز به عنوان محرک رشد در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*). مجله بیولوژی دریا، ۹: ۷۹-۷۳.

قبادی، ش.، رجبی اسلامی، ه.، حسینی فرد، س.م.، پلنگی، ل.، ۱۳۹۲. بررسی اثرات سطوح مختلف نانو ذره آهن بر فاکتورهای رشد و تغذیه ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*). فصلنامه علوم تکثیر و آبی‌پروری، ۱: ۸۲-۶۷.

Akdemir, F., Orhan, C., Tuzcu, M., Sahin, N., Juturu, V. and Kazim, S., 2017. The efficacy of dietary curcumin on growth performance, lipid peroxidation and hepatic transcription factors in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) reared under different stocking densities. *Aquaculture Research*, 48:4012-4021.

Antony Jesu Prabhu, P., Kaushik, S.J., Mariojouis, C., Surget, A., Fontagné-Dicharry, S., Schrama, J.W. and Geurden, I., 2015. Comparison of endogenous loss and maintenance need for minerals in

نتیجه می‌توان گفت که تغذیه ماهی با جیره دارای اقلام گیاهی نیازمند استفاده از مکمل‌های روی و مس با حداکثر غلظت به منظور دستیابی به حداکثر میزان رشد است (Read et al., 2014). در اکثر موارد افزودن مکمل حاوی عناصر معدنی میکرو به جیره ماهیان ضرورتی نداشته و عمدتاً به دلیل ارزان بودن و در جهت افزایش کیفیت جیره استفاده می‌شود (NRC, 2011).

نتیجه گیری

اطلاعات مربوط به نیازمندی‌های مواد معدنی ارگانیک‌های آبی به طور قابل توجهی در حال گسترش است. عواملی از قبیل نوع گونه، فیزیولوژی دستگاه گوارش، نوع جیره آزمایشی و برهم‌کنش‌های تغذیه‌ای، نوع منبع مواد معدنی و غلظت آنها در آب می‌توانند سطوح این عناصر را در جیره تحت تاثیر قرار دهند. بر این اساس، مطالعاتی در جهت یافتن رابطه بین میزان مواد معدنی با تغییرات رشد، استراتژی‌های تغذیه‌ای و سیستم‌های پرورشی مورد نیاز است. در زمینه استفاده از این عناصر باید به مواد مهارکننده و ضد مغذی اقلام گیاهی و نسبت عناصر با یکدیگر توجه و در صورت لزوم از نسبت مشخصی از مواد معدنی ماکرو و میکرو در خوراک ماهیان استفاده نمود. برای مثال نسبت بهینه دو عنصر کلسیم و فسفر در جیره این گونه ۱:۱ گزارش شده است. بدون شک، زمانی که اطلاعات در مورد نیازمندی‌های مواد معدنی در راستای ماهیت و تفاوت‌های زیست محیطی گونه‌ها گسترش یابد و سیستم‌های مناسب در زمینه رهاسازی و تحویل مواد مغذی به شکل دقیق تعبیه و تنظیم شود، افزایش کیفیت در جیره، محیط آبی و پایداری زیست محیطی را به همراه خواهد داشت.

توصیه ترویجی

با توجه به رشد روز افزون تولیدات آبی پروری، استفاده از روش‌ها و تکنولوژی‌های پیشرفته تغذیه‌ای با در نظر گرفتن نوع گونه، سن و جنسیت، راهی کارآمد در جهت توسعه تولیدات پرورشی می‌باشد. تولید و عمل‌آوری انواع

- susceptibility to saprolegniosis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Applied and Environmental Microbiology*, 61:2108-2112.
- Carragher, J.f. and Sumpter, P., 1991. The mobilization of calcium from calcified tissues of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) induced to synthesize vitellogenin. *Journal of Comparative Physiology*, 99:169-172.
- Carriquiriborde, P., Handy, R.D. and Davies, S.J., 2004. Physiological modulation of iron metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low and high iron diets. *Journal of Experimental Biology*, 207:75-86.
- Clearwater, S.J., Farag, A.M. and Meyer, J.S., 2002. Bioavailability and toxicity of dietborne copper and zinc to fish. *Journal of Comparative Physiology*, 132C:269-313.
- Coloso, R.M., King, K., Fletcher, J.W., Weis, P., Werner, A. and Ferraris, R.P., 2003. Dietary P regulates phosphate transporter expression, phosphatase activity, and effluent P partitioning in trout culture. *Journal of Comparative Physiology*, 173:519-530.
- Dall, W. and Moriarty, J.W., 1983. Functional aspects of nutrition and digestion. In: Bliss, D.E., (ed), *The Biology of the Crustacea*, Vol. 5. Academic Press, New York. pp 215-216.
- Davis, D.A. and Gatlin, D.M., 1996. Dietary mineral requirements of fish and marine crustaceans. *Fisheries Science*, 4:75-99.
- Davis, D.A., Lawrence, A.L. and Gatlin, D.M., 1993. Response of *Penaeus vannamei* to dietary calcium, phosphorus, and calcium: phosphorus ratio. *Journal of the World Aquaculture Society*, 24:504-515.
- Desjardins, L.M., Hicks, B.D. and Hilton, J.W., 1987. Iron catalyzed oxidation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed fishmeal or plant ingredient-based diets. *Fish Physiology and Biochemistry*, 41:243-253.
- Antony Jesu Prabhu, P., Schrama, J.W. and Kaushik, S.J., 2014a. Mineral requirements of fish: a systematic review. *Reviews in Aquaculture*, 6:1-48.
- Antony Jesu Prabhu, P., Schrama, J.W., Mariojouis, C., Godind, S., Fontagné-Dicharry, S., Geurden, I., Surget, A., Bouyssiere, B. and Kaushik, S.J., 2014b. Post-prandial changes in plasma mineral levels in rainbow trout fed a complete plant ingredient based diet and the effect of supplemental di-calcium phosphate. *Aquaculture*, 430:34-43.
- Apines, M.J.S., Satoh, S., Kiron, V., Watanabe, T., Nasu, N. and Fujita, S., 2001. Bioavailability of amino acids chelated and glass embedded zinc to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* fingerlings. *Aquaculture Nutrition*, 7:221-228.
- Avella, M., Masoni, A., Bornancin, M., and Mayer-Gostan, N., 1987. Gill morphology and sodium influx in the rainbow trout (*Salmo gairdneri*) acclimated to artificial freshwater environments. *Journal of Experimental Zoology*, 241:159-169.
- Avella, M. and Bornancin, M., 1989. A new analysis of ammonia and sodium transport through the gills of the freshwater rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of Applied Biology*, 142:155-175.
- Barron, M.G. and Shannon, A., 2000. Calcium control of zinc uptake in rainbow trout. *Aquatic Toxicology*, 50:257-264.
- Carballo, M., Munoz, M.J., Cuellar, M., and Tarazona, J.V., 1995. Effects of waterborne copper, cyanide, ammonia, and nitrite on stress parameters and changes in

- modified by calcium. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 1663:214-221.
- Green, J.A., Hardy, R.W. and Brannon, E.L., 2002. Effects of dietary phosphorus and lipid levels on utilization and excretion of phosphorus and nitrogen by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Nutrition*, 8:279-298.
- Halver, J.E., Felton, S.P. and Zbanyszek, R., 2004. Carcass selenium loss as an indicator of stress in barge transported salmon (*Oncorhynchus tshawytscha* Walbaum) smolts. *Aquaculture Research*, 35:1099-1103.
- Harpaz, S., Hakim, Y., Slosman, T. and Eroldogan, T., 2005. Effects of adding salt to the diet of Asian sea bass *Lates calcarifer* reared in fresh or salt water recirculating tanks, on growth and brush border enzyme activity. *Aquaculture*, 248:315-324.
- Hilton, J.W. and Hodson, P.V., 1983. Effect of increased dietary carbohydrate on selenium metabolism and toxicity in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of Nutrition*, 113:1241-1248.
- Hua, K. and Bureau, D.P., 2006. Modelling digestible phosphorus content of salmonid fish feeds. *Aquaculture*, 254:455-465.
- Hua, K., De Lange, C.F.M., Niimi, A.J., Cole, G., Moccia, R.D., Fan, M.Z. and Bureau, D.P., 2008. A factorial model to predict phosphorus waste output of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Research*. 39:1059-1068.
- Inoue, M., Satoh, S., Maiat, M., Kiron, V. and Okamoto, N., 1998. Recovery from derangement of natural killer-like activity of leucocytes due to Zn and Mn deficiency in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), by the oral administration of these elements. *Journal of Fish Disease*, 21:233-236.
- trout diets and its effect on the growth and physiological response of rainbow trout. *Fish Physiology and Biochemistry*, 3:173-182.
- FAO, 2014. Statistics and Information Service. *FishStatJ: Universal software for the fishery statistical series*. Rome, Italy.
- FAO, 2016. *The State of World Fisheries and Aquaculture: Contributing to food security and nutrition for all*. FAO, Rome, Italy, 200 p.
- Fontagne, S., Silva, N., Bazin, D., Ramos, A., Aguirre, P., Surget, A., Abran, A., Kaushik, S.J. and Power, D.M., 2009. Effects of dietary phosphorus and calcium level on growth and skeletal development in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry. *Aquaculture*, 297:141-150.
- Fontagne, S., Godin, S., Liu, H., Antony Jesu Prabhu, P. and Bouyssiere, B., 2013. Influence of the forms and levels of dietary selenium on oxidative stress in rainbow trout fry. *Fish and Shellfish Larviculture Symposium*, 13:125-128.
- Gatlin, D.M. and Li, P., 2008. Use of diet additives to improve nutritional value of alternative protein sources. In: Lim, C., Webster, C.D. and Lee, C.S. (eds), *Alternative Protein Sources in Aquaculture Diets*. Haworth Press, New York. pp 501-522.
- Gatta, P., Thompson, K.D., Smullen, R., Piva, A., Testi, S. and Adams, A., 2001. Dietary organic chromium supplementation and its effect on the immune response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Fish and Shellfish Immunology*, 11:371-382.
- Glover, C.N., Bury, N.R. and Hogstrand, C., 2004. Intestinal zinc uptake in freshwater rainbow trout, evidence for apical pathways associated with potassium efflux and

- Lovell, T., 1989. Nutrition and Feeding of Fish. Van Nostrand Reinhold, New York, 68 p.
- Mantel, L.H. and Farmer, L.L., 1983. Osmotic and ionic regulation. In: Bliss, D.E (ed). The Biology of the Crustacea, Vol. 5. Academic Press, New York, pp 215-261.
- Marty, R. and Brown, P.B., 1996. Availability of phosphorus from feedstuffs fed to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. Aquaculture, 142:269-282.
- Mayer-Gostan, N., Bornancin, M., Derenzis, G., Naon, R., Yee, J.A., Shew, R.L. and Pang, P.K.T., 1983. Extraintestinal calcium uptake in the killifish, *Fundulus heteroclitus*. Journal of Experimental Zoology, 227:329-338.
- Naderi, M., Keyvanshokoo, S., Salati, A. and Ghaedi, A., 2017. Proteomic analysis of liver tissue from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under high rearing density after administration of dietary vitamin E and selenium nanoparticles. Comparative Biochemistry and Physiology, 22D:10-19.
- Navarro, M. and Wood, R.J., 2003. Plasma changes in microNutrients following a multi vitamin and mineral supplement in healthy adults. Journal of the American College of Nutrition, 22:124-132.
- NRC., 1997. The Role of Chromium in Animal Nutrition. National Academy Press, Washington, DC. 80 p.
- NRC., 2005. Mineral Tolerance of Domestic Animals, 2nd revised edn. National Academies Press, Washington, DC. 495 p.
- NRC., 2011. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp. National Academies Press, Washington, DC. 376 p.
- Ogino, C. and Takeda, H., 1978. Requirements of rainbow trout for dietary calcium and
- Julshamn, K., Maage, A., Waagbo, R. and Lundebye, A.K., 2006. A preliminary dietary copper on the hepatic concentration and subcellular distribution of copper and zinc in the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Aquaculture, 73:143-155.
- Kaushik, S., 2002. Mineral Nutrition. In: Guillaume, J., Kaushik, S., Bergot, P., Metailler, R. (eds) Nutrition and Feeding of Fish and Crustaceans. Springer-Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK, pp 169-181.
- Ketola, H.G. and Richmond, M.E., 1994. Requirement of rainbow trout for dietary phosphorus and its relationship to the amount discharged in hatchery effluent. Transactions of the American Fisheries Society, 123:587-594.
- Knox, D., Cowey, C.B. and Adron, J.W., 1982. Effects of dietary copper and copper: zinc ratio on rainbow trout *Salmo gairdneri*. Aquaculture, 27:111-119.
- Kucukbay, Z., Yazlak, H., Sabin, N., Tuzcu, M., Cakmak, M.N., Gurdogan, F., Juturu, V. and Sahin, K., 2006. Zinc picolinate supplementation decreases oxidative stress in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquaculture, 257:465-469.
- Lall, S.P., 2002. The minerals. In: Halver, J.E. and Hardy, R.W. (eds) Fish Nutrition. 3rd edn, Academic Press, London, UK, pp 259-308.
- Lee, Y.H., Layman, D.K., Bell, R.R. and Norton, H.W., 1981. Response of glutathione peroxidase and catalase to excess iron in rats. Journal of Nutrition, 111:2195-2202.
- Lellis, W.A. and Hardy, F.T., 2004. Effects of characteristics phase-feeding dietary phosphorus on survival, growth, and processing. Aquaculture, 242:607-616.

- a diet containing deboned fillet scrap. *Progressive Fish-Culturist* 49:192-197.
- Stickney, R.R., 2000. Encyclopedia of aquaculture. In: Collins, G. (ed). Minerals. John Wiley & Sons, Texas, USA, pp 532-540.
- Sugiura, S.H., Dong, F.M. and Hardy, R.W., 1998. Effects of dietary supplements on the availability of minerals in fish meal; preliminary observations. *Aquaculture*, 160:283-303.
- Sugiura, S.H., Gabaudan, J., Dong, F.M. and Hardy, R.W., 2001. Dietary microbial phytase supplementation and the utilization of phosphorus, trace minerals and protein by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Walbaum) fed soybean meal-based diets. *Aquaculture Research*, 32:583-592.
- Vielma, J. and Lall, S.P., 1997. Dietary formic acid enhances apparent digestibility of minerals in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquaculture Nutrition*, 3:265-268.
- Watanabe, T., Kiron, V. and Satoh, S., 1997. Trace minerals in fish Nutrition. *Aquaculture*, 151:185-207.
- Watanabe, T., Satoh, S. and Takeuch, T., 1988. Availability of minerals in fish meal to fish. *Asian Fisheries Society*, 1:175-195.
- phosphorus. *Bulletan of Japanese Society of Scientific Fisheries*, 44:1019-1022.
- Read, E.S., Barrows, F.T., Gaylord, G.T., Paterson, J., Petersen, M.K. and Sealey, W.M., 2014. Investigation of the effects of dietary protein source on copper and zinc bioavailability in fishmeal and plant-based diets for rainbow trout. *Aquaculture*, 432:97-105.
- Rider, S.A., Davies, S.J., Jha, A.N., Clough, R. and Sweetman, J.W., 2010. Bioavailability of co-supplemented organic and inorganic zinc and selenium sources in a white fishmeal based rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diet. *Animal Physiology and Animal Nutrition*, 94:99-110.
- Satoh, S., Takeuchi, T. and Watanabe, T., 1987a. Effect of deletion of several trace elements from a mineral mixture in fish meal diets on mineral composition of gonads in rainbow trout and carp. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53: 281-286.
- Satoh, S., Takeuchi, T. and Watanabe, T., 1987b. Availability to rainbow trout of zinc in white fish meal and of various zinc compounds. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53: 595-599.
- Schreier, T.M., Rach, J.J. and Howe, G.E., 1996. Efficacy of formalin, hydrogen peroxide and sodium chloride on fungal infected rainbow trout eggs. *Aquaculture*, 140:323-331.
- Shearer, K.D. and Hardy, R.W., 1987. Phosphorus deficiency in rainbow trout fed

A review on dietary mineral requirements of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)

Mortezaee F.¹; Falahatkar B.^{1*}

¹Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Guilan, Iran

Abstract

The role of minerals has been investigated in the nutrition, physiology and life span of many animals. However, it is challenged with limited access to data on requirements of fish minerals and their effects on the body's biochemical compositions and functions, enzymatic reactions and non-enzymatic structural units. This is due to the absorption of some minerals by water, food, and therefore the accurate measurement of these elements is not possible. Nowadays, it has been proved the importance of micro and macro elements as essential components of rainbow trout in many studies. Macro elements (P, Ca, Mg, K and Na) are constituent component of biochemical reactions and pathways and the presence of micro elements (Zn, Cu, Fe, Cr, Mn and Se) is considered as important parameters for improving the growth and nutrition of fish. In this regards, interaction between macro and micro elements, water environment, physicochemical condition and fish physiology can impress access to optimal levels and mineral bioavailability in diet. This review will addressed on different levels of requirements, the role of minerals in dietary and their interaction on growth, nutrition and physiology in rainbow trout as an important farmed species.

Keywords: Nutritional requirements, Biochemical function, Rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, Metabolism, Minerals

*Corresponding author: falahatkar@guilan.ac.ir