زیست‌شناسی جانوری، سال پانزدهم، شماره دوم، زمستان ۱۴۰۱، صفحات ۲۹۲- ۲۶۳

مقاله مروری

اهمیت مواد معدنی در تغذیه گونه‌های پرورشی اصلی صنعت میگو

مسلم شریفی نیا*

پژوهشکده میگوی کشور، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر، ایران

*مسئول مکاتبات: m.sharifinia@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

DOI: 10.22034/ascij.2023.1978553.1460

چکیده

وجود مواد معدنی در غذای آبزیان به علت نقش حیاتی آنها در فعالیت‌های بدنی ضروری می‌باشد. میگوهای خانواده پنائیده آبزیان ارزشمندی هستند که به صورت گسترده در آب‌های گرمسیری و نیمه گرمسیری زندگی می‌کنند و بیش از نیمی از تولید ناخالص میگو در جهان را به خود اختصاص می‌دهند. هدف از مطالعه پیش رو بررسی دانش و اطلاعات موجود در زمینه تغذیه معدنی در میگوهای خانواده پنائیده می‌باشد. همچنین مطالعه حاضر به بررسی چگونگی تاثیر محیط آبی و چرخه زندگی میگو بر نیازها و نقش مواد معدنی در سلامت میگو خواهد پرداخت. علاوه بر موارد ذکر شده در این بررسی روش‌های تامین مواد معدنی میگوها از طریق آب یا خوراک و یا استفاده از مکمل‌های معدنی در جیره غذایی مورد بحث قرار گرفته‌اند. نتایج بررسی مطالعات مختلف نشان داد که برآورد نیاز رژیم غذایی برای اکثر مواد معدنی در گونه‌های اصلی پرورش میگو (*Penaeus vannamei*، *Penaeus monodon* و *Penaeus japonicus*) گسترده است و برخی از مواد معدنی ضروری مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. به علاوه، در زمینه الزامات مواد معدنی مهم مانند آهن، منگنز، سلنیوم و روی و همچنین سایر مواد معدنی کمیاب برای گونه‌های غالب میگوی پرورشی، اطلاعات جامع و کافی وجود ندارد و حتی در برخی موارد اصلا اطلاعاتی موجود نمی‌باشد. به عنوان مثال الزامات درشت مغذی منیزیم در مورد گونه *P. monodon* هنوز تایید نشده است. بطور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که دانش بیشتری برای شناخت نیازهای معدنی در مراحل مختلف زندگی میگوهای پرورشی، از جمله مراحل بحرانی پوست‌اندازی مورد نیاز است.

کلمات کلیدی: ریز مغذی، مواد معدنی، میگو، آبزی پروری، پرورش متراکم

مقدمه

استفاده از خوراک در آبزی‌پروری می‌تواند هم تولید و هم سود بدست آمده را بطور قابل توجهی افزایش دهد. تغذیه شامل فرآیندهای شیمیایی و فیزیولوژیکی است که مواد مغذی را برای عملکرد طبیعی، افزایش ایمنی، مقاومت در برابر بیماری، نگهداری و رشد در اختیار حیوان قرار می‌دهد. این شامل بلع، هضم، جذب و انتقال مواد مغذی و حذف مواد زائد است. ۲۰ عنصر معدنی شناخته شده وجود دارد که عملکردهای اساسی را در بدن انجام می‌دهند. برخی از مواد معدنی به مقدار قابل توجهی مورد نیاز هستند و به آنها درشت مغذی می‌گویند و برخی دیگر که به مقدار کمتری مورد نیاز هستند به عنوان ریزمغذی نامیده می‌شوند. عناصر ریزمغذی به همراه سایر مواد معدنی برای سلامت بدن و تولید بهتر میگو نقش بیشتری در تغذیه میگو دارند. آبزی¬پروری به طور گسترده در تراکم بالا با افزایش سطح تولید توسعه یافته است. در پرورش آبزیان بطور تجاری منابع غذایی طبیعی استخر قادر به تامین

نیازهای غذایی آنها برای دستیابی به رشد بهینه نیستند. مواد غذایی موجود در آب برای رشد سریع بدن حیوانات با دوره پرورش محدود کافی نیست. در نتیجه استفاده از خوراک برای تامین نیازهای غذایی آبزیان پرورشی تغذیه مورد نیاز است. تغذیه تکمیلی بسیار ضروری است و سهم عمده ای در سامانه‌های پرورش متراکم دارد. مواد معدنی از جمله مواد معدنی کمیاب (ریزمغذی) نقش اصلی را در تغذیه برای عملکردهای مختلف بدن و رشد در شرایط پرورش نیمه متراکم و متراکم ایفا می کنند. ترکیب غذایی مواد معدنی غنی شده تاثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم ایمنی، مقاومت در برابر بیماری ها و استرس در آبزیان دارد. مواد معدنی در غذای آبزیان ضروری هستند به دو دسته عناصر عمده شامل کلسیم، پتاسیم، سدیم، فسفر، منیزیم، کلر و گوگرد و عناصر کمیاب شامل آهن، مس، کبالت، منگنز، ید، روی، مولیبدن، سلینم، کلر، فلور، وانادیوم، قلع، آرسنیک و نیکل. این عناصر نقش حیاتی را در فعالیت‌های بدن از جمله استحکام اسکلت خارجی، فعالیت دستگاه عصبی، غدد درون ریز، اجزا تشکیل دهنده رنگدانه‌های خونی، ایجاد تعادل در واکنش‌های اسیدی- بازی (به عنوان بافر) و ایجاد موازنه اسمزی بر عهده دارند. آبزیان قادرند مواد غذایی را نه تنها از طریق غذا ، بلکه از طریق آب نیز جذب نمایند. به همین دلیل تخمین مقدار درست آن مشکل است. اما به هر حال در آبزیان آب شیرین، نیاز بیشتری نسبت به مکمل‌های معدنی وجود دارد. تاکنون نیازهای معدنی میگو یک اولویت تحقیقاتی نبوده است. مطالعات اولیه به این نتیجه رسیدند که میگوهایی که در سامانه‌های گسترده پرورش یافته و رشد می‌کنند معمولاً نیازی به مکمل‌های معدنی ندارند و می-توانند نیازهای معدنی خود را از طریق بستر، مواد معدنی محلول در آب و هر خوراک ارائه شده تامین کنند (٦٨، ٩٦). با این حال، با توجه به گرایش صنعت میگو به سمت توسعه عمودی (متراکم سازی) و افزایش میزان برداشت در واحد سطح، پرداختن به الزامات نیازهای معدنی از طریق مکمل‌های معدنی روز به روز در حال افزایش می‌باشد. تولید زمانی بهینه می‌گردد که منجر به رشد سریعتر، تراکم و زیست توده بیشتر و چرخه تولید کوتاه‌تر شود. بنابراین با بالا رفتن میزان تراکم، بررسی نیازهای معدنی میگوی پرورشی در اولویت قرار می‌گیرد. مواد معدنی را می‌توان سه گروه ضروری، ضروری مشروط و غیر ضروری طبقه-بندی کرد. تعیین ضروری بودن یک ماده معدنی اولین گام حیاتی قبل از ارزیابی نیاز آن در یک موجود زنده (جانور) می‌باشد. همانطور که توسط Frieden (١٩٨٤) تعریف شده است (٣٦): "یک عنصر زمانی ضروری تلقی می‌شود که کمبود آن باعث اختلال در عملکرد فیزیولوژیکی شود". مواد معدنی که ضروری تلقی می‌شوند باید در مقادیر مناسب و در فرمهایی که فراهمی زیستی بالاتری دارند، تهیه شوند.

محیط آبی

مواد معدنی مورد نیاز جانوران آبزی به محیطی که در آن زندگی می‌کنند بستگی دارد. بسیاری از ده‌پایان (دکاپودا) دریایی تطبیق‌دهنده‌های اسمزی هستند که به موجب آن غلظت نمک‌ها با محیط اطراف قابل مقایسه است. در مقابل، گونه‌هایی که در آب‌های شیرین زندگی می‌کنند و بسیاری از گونه‌های مصبی، غلظت یونی همولنف خود را بالاتر از غلظت آن در محیط آبی حفظ می‌کنند. در این شرایط، گونه‌ها دائماً آب ناخواسته را از طریق اسمز جذب می‌کنند و یون‌های ریز کمیاب را از طریق انتشار غیرفعال از دست می‌دهند (٨٣، ١٠٨). میگوهای خانواده پنائیده (Penaeidae) معمولاً یوری‌هالین هستند و می‌توانند دامنه وسیعی از شوری را تحمل کنند. به عنوان مثال، میگوی ببری سیاه (*Penaeus Monodon*) می‌تواند زمانی که در آب با شوری کم قرار دارد، به لحاظ تنظیم اسمزی هایپراسموز و با افزایش شوری هایپواسموتیک شود (٢٠). این باعث می‌شود که *P. monodon* زمانی که در محدوده ١٠ تا ٣٥ ppt پرورش داده می‌شود دارای رشد و بقای قابل مقایسه‌ای باشد (٢، ١٣٩). همچنین نتایج مطالعات نشان داده است که تفاوتی در میزان بقاء و وزن نهایی گونه‌های *Penaeus vannamei* و *Penaeus brasiliensis* پرورش یافته در شوری‌های ٤ تا ٣٢ ppt مشاهده نشده است (٧٢، ٧٧). مواد معدنی موجود در آب می‌توانند منبع مهمی برای گونه پرورشی باشند و از طریق

پوست، آبشش‌ها و روده جذب می‌شوند (۱). مواد معدنی محلول دارای بالاترین میزان فراهمی زیستی هستند، اما مواد معدنی موجود به صورت ذرات دارای فراهمی زیستی ناچیزی هستند (۱۳۶). با این حال، اصطلاح «محلول» بیشتر یک اصطلاح عملیاتی برای توصیف انواع شیمیایی آب است، اما ممکن است شاخص دقیقی برای فراهمی زیستی نباشد. در عوض، شیمی آب به طور قابل توجهی بر دسترسی ارگانیسم به مواد معدنی، از جمله پتانسیل اسمزی یون‌های منفرد، و همچنین سختی، pH، وزن مخصوص و قلیائیت کل تأثیر می‌گذارد. هنگام پرورش گونه‌های دریایی، ترکیب ایده‌آل مواد معدنی در آب معمولاً با محیطی که به طور طبیعی در آن زندگی می‌کنند، مطابقت دارد. همانطور که توسط Boyd (۲۰۲۰) گزارش شده است خصوصیات معمول آب دریا شامل شوری ۳٤/۵ ppt، چگالی وزن مخصوص ۱/۰۲۷ کیلوگرم بر لیتر در ۲۵ درجه سانتیگراد، pH برابر ۸/۱، قلیائیت کل ۱۱٦ میلی گرم در لیتر و سختی کل ٦۵۷۰ میلی گرم در لیتر به صورت CaCO3 در شوری ۳٤/۵ ppt می‌باشد (۱۲). نسبت یونهای منفرد در آب دریا بسته به موقعیت جغرافیایی متفاوت خواهد بود، اما به طور کلی یون‌های سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) یونهای غالب هستند که ۸۵/۷٪ از شوری را تشکیل می دهند. پس از این یون‌ها، یون‌های منیزیم (Mg^{2+}) و سولفات ۱۱/۲٪، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) هم هر کدام با میزان ۲/۳٪ از میزان شوری، یون‌های غالب در آب دریا می‌باشند (۱۲، ۱۳). سایر یون-های اصلی شامل کربنات، برم، استرانسیوم، اسید بوریک، فلوئور و سیلیس تنها ۰/۸ درصد از کل شوری را تشکیل می‌دهند. ترکیب مواد معدنی کمیاب در آب دریا بسیار متغیر است اما اغلب به دلیل غلظت بسیار کم آنها به تجهیزات با دقت و حساسیت بالا برای اندازه گیری نیاز دارند. اگرچه تمام عناصر جدول تناوبی را می‌توان در آب دریا یافت، اما عناصری که برای تغذیه میگو مرتبط هستند عبارتند از کبالت (Co)، مس (Cu)، آهن (Fe)، منگنز (Mn)، سلنیوم (Se) و روی (Zn). همچنین عناصری که ممکن است به عنوان مواد معدنی فوق‌العاده مورد نیاز باشند، مانند مولیبدِن (Mo)، وانادیم (V) و (Si) هم در آب دریا وجود دارند (۵۸).

اهمیت مواد معدنی در مراحل مختلف زندگی و فرآیندهای زیستی

نیازهای معدنی با سن و مرحله رشد ارگانیسم متفاوت می-باشد. در لارو سخت‌پوستان نسبت سطح به اندازه بدن بزرگتر است. با این حال، درجه‌ای که معدنی شدن اسکلت بیرونی در هر مرحله از زندگی رخ می‌دهد، متفاوت است و فرضیات مربوط به نیاز مطلق مواد معدنی را به چالش می‌کشد. به عنوان مثال، در میگو *Penaeus paulensis* افزایش پیوسته خاکستر از مرحله ناپلیوس اولیه (۹٪ خاکستر) تا مرحله دوم پروتوزوآ (۲۵٪ خاکستر) رخ می دهد، اما در مرحله مایسیس و اوایل مراحل پست لارو میزان خاکستر از ۲۰ ٪ به ۱۲٪ کاهش‌می یابد (۷۵). خرچنگ‌های عنکبوتی (Spider crabs) خاکستر بیشتری در مرحله زوآ دارند (۳۰٪ خاکستر) و سپس در مرحله مگالوپا (۱۵٪) کاهش می‌یابد (٤). در لابسترهای دمپایی شکل (slipper lobsters)، محتوای خاکستر از مرحله اول لاروی (۳۹/۱٪) به مرحله پست لاروی (۱۵/۳٪) کاهش یافت (۲۳). با این حال، پس از اولین پوست‌اندازی به عنوان یک لابستر جوان، اسکلت بیرونی تحت تاثیر معدنی شدن قرار می‌گیرد که در آن محتوای خاکستر در بالاترین غلظت خود (۵۰/۸٪) می‌باشد (۱۲۹). این افزایش در خاکستر عمدتاً با افزایش غلظت کلسیم همراه بود. این مشاهدات با هم نشان می‌دهند که تغییرات در نیازهای معدنی می‌تواند در هر مرحله از رشد سخت‌پوستان رخ دهد. با وجود این مشاهدات تحقیقات در مورد نیازهای معدنی مراحل لاروی سخت‌پوستان بسیار کم می‌باشد. بررسی‌های اولیه در مورد تأثیر غلظت مواد معدنی در آب نشان می‌دهد که کیفیت لارو گونه میگوی *Macrobrachium rosenbergii* را می‌توان با متعادل کردن نسبت غلظت کلسیم: منیزیم آب (۲٤۰:۳۰۰ ppm) بهبود بخشید (۱۲۹). چرخه پوست‌اندازی میگوهای پنائیده شامل چهار مرحله اصلی است (۱۷): (الف) پوست‌اندازی (تغذیه کاهش یافته و پوست‌اندازی فعال)، (ب) پس از

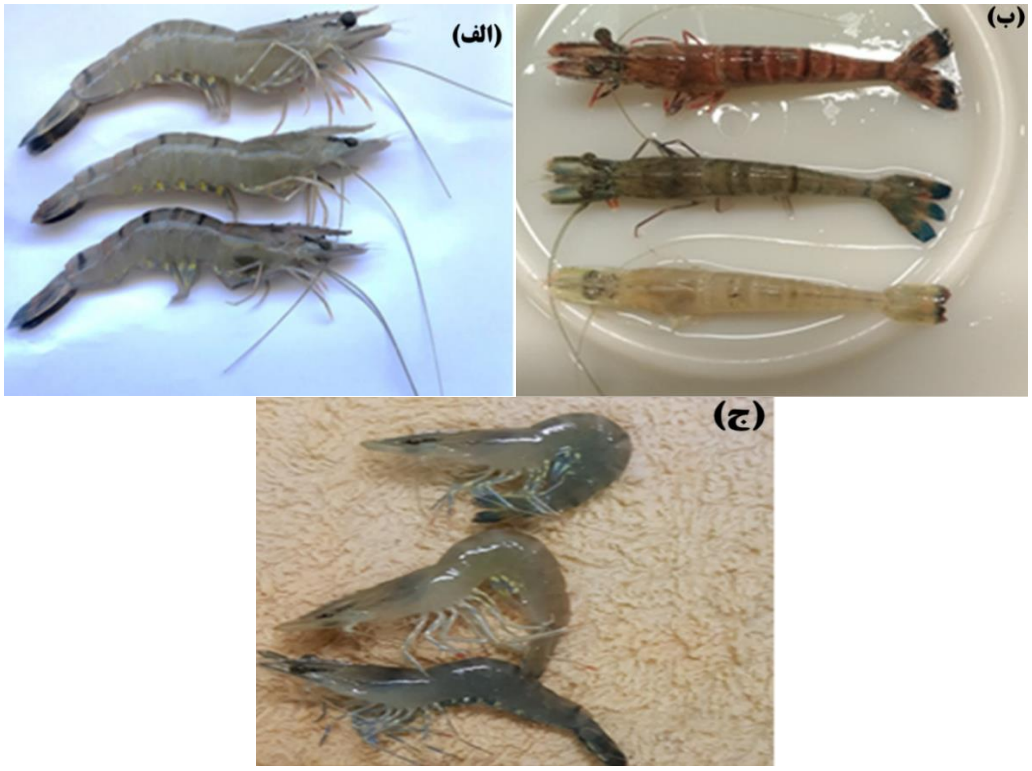
پوست‌اندازی (تغذیه کاهش یافته و اسکلت بیرونی کم کم سفت شده اما در برابر فشار نمی‌تواند مقاومت کند)، (ج) بین پوست‌اندازی (تغذیه فعال و اسکلت بیرونی سخت) و (۵) قبل از پوست‌اندازی (عدم تغذیه و اسکلت بیرونی دارای لایه کوتیکولی رنگدانه‌دار کیتینی است که در آن کاراپاس به راحتی با فشار جدا می‌شود). رشد به صورت گام به گام اتفاق می‌افتد، به این ترتیب که ابتدا پوست-اندازی رخ می‌دهد و به دنبال آن به سرعت دریافت آب برای بزرگ شدن کوتیکول جدید قبل از سخت شدن و معدنی شدن مجدد انجام می‌گردد. میزان مواد معدنی که میگو از طریق پوست‌اندازی از دست می‌دهد به درستی مشخص نشده است. پوسته بیرونی از یک ماتریس آلی با نمک‌های معدنی مختلف تشکیل شده است که کربنات کلسیم، فسفات کلسیم، کربنات منیزیم و دی اکسید سیلیکون غالب هستند (۱۶، ۱۲۴). برای حفظ مواد معدنی، میگوها به طور فعال مواد معدنی پوسته بیرونی قدیمی را در مرحله قبل از پوست‌اندازی از طریق ترشح کیتیناز در اسکلت خارجی قدیمی ماتریس آلی را تجزیه و مواد معدنی را بازجذب می‌کنند. مواد مغذی آزاد شده از پوسته بیرونی قدیمی وارد همولنف میگو می‌شوند، که به عنوان ذخیره اصلی مواد معدنی و همچنین سایر مواد مغذی مانند اسیدهای آمینه و کاروتنوئیدها عمل می‌کند (۱۲۴). بصورت تقریبی حدود ۳۸٪ از مواد مغذی پوسته بیرونی قدیمی را می‌توان از طریق تجزیه با کیتیناز بازیابی کرد (۷۶). این فرآیند جذب در غلظت کاتیون‌های منیزیم، سدیم، پتاسیم و کلسیم همولنف که بالاترین سطح را در زمان پوست‌اندازی دارند، منعکس می‌شود. سپس در هنگام معدنی‌شدن در پوسته بیرونی جدید استفاده می‌شوند و میزان آنها کاهش می‌یابد. غلظت‌ها در طول دوره بین پوست‌اندازی ثابت می‌مانند. این الگو در چندین گونه از آبزیان دکاپود از جمله میگوی صورتی *Penaeus duorarum* (۱۷)، میگوی هندی *Penaeus indicus* (۱۳۴)، *Panulirus argus* (۱۳۰) و *Homarus vulgaris* (۵۰) مشاهده شده است و به احتمال زیاد در همه گونه‌های ده‌پایان آبزی مشترک است. زمان قبل از پوست‌اندازی با افزایش اسمولاریته کل، افزایش حجم همولنف و تورم اسکلت بیرونی جدید مشخص می‌شود. همچنین غلظت سدیم و پتاسیم در همولنف افزایش می-یابد (۱۷). پس از پوست‌اندازی، اسکلت بیرونی جدید در ابتدا فرآیند معدنی شدن ضعیفی دارد و نسبت به نمک و آب نفوذپذیر است که منجر به تغییرات اسمزی در همولنف می‌گردد. این تغییرات موقتی هستند زیرا معدنی شدن اسکلت بیرونی جدید میگو را قادر می‌سازد تا کنترل بیشتری بر شار اسمزی (Osmotic flux) اعمال کند (۷۶). سخت‌پوستان برای بازیافت بیشتر مواد معدنی و سایر مواد مغذی، پوسته‌های جدا شده خود را می‌خورند. گونه‌های متعددی مشاهده شده است که از پوسته‌های جدا شده خود تغذیه می‌کنند. *P. monodon* و *P. vannamei* به طور معمول تمام پوسته جدا شده خود را به جز سخت‌ترین جزء، یعنی کاراپاس می‌خورند. در حالی که بلعیدن پوسته-ها معمول به نظر می‌رسد، مشخص نیست که مواد معدنی تا چه حدی در روده هضم و جذب می‌شوند (۵۱، ۱۱۲، ۱۱۴، ۱۴۳). پوست‌اندازی نیاز به انرژی دارد و شامل از دست دادن پروتئین، لیپید، کربوهیدرات و مواد معدنی است (۱۱۴). این هزینه‌ها می‌تواند قابل توجه باشد. به عنوان مثال، *P. vannamei* به میزان قابل توجهی از انرژی مصرفی خود برای پوست‌اندازی در طول دوره آزمایشی نیاز داشته و این نیاز انرژی در زمان پوست‌اندازی با تناوب بالاتر، افزایش یافت (۵۷). در زئوپلانکتون دافنیا، تقاضا برای کلسیم و فسفر در طول پوست‌اندازی، انباشت کربن را محدود می‌کند (۵۵). صرف انرژی قابل توجه در مرحله پس از پوست‌اندازی به منظور سنتز موثر و معدنی سازی مجدد اسکلت بیرونی جدید بسیار مهم است (۷۶). عدم تعادل مواد معدنی در آب یا رژیم غذایی می‌تواند مشکلاتی را در رسوب مواد معدنی یا خروج اسکلت بیرونی ایجاد کند. برای آب، ترکیب اسکلت بیرونی تحت تأثیر در دسترس بودن مواد معدنی است. به عنوان مثال، میگوی *Penaeus latisulcatus* پس از رشد در آب شور داخلی که دارای کمبود پتاسیم بود، محتوای معدنی کمی در اسکلت بیرونی خود داشت (۹). غنی‌سازی آب با پتاسیم منجر به بهبود معدنی شدن اسکلت بیرونی شد تا جایی که حیوانات به سطوحی معادل با پتاسیم محیط پرورشی

رسیدند. کمبود مواد معدنی و عدم تعادل یونی در آب و رژیم‌های غذایی فرموله شده می‌تواند منجر به بیماری‌های مرتبط با پوست‌اندازی، مانند پوسته نرم و مرگ و میر شود (۹). تغییرات در ترکیب مواد معدنی با پیشروی فرآیند تولیدمثل رخ می‌دهد. براساس مطالعات انجام شده در میگوی *P. vannamei*، بلوغ تخمدان منجر به کاهش غلظت مس در عضله و افزایش منگنز در هپاتوپانکراس می‌گردد (۸۷). به طور مشابه، کاهش غلظت کلسیم و منیزیم هم در عضله و هم هپاتوپانکراس میگوی *P. vannamei* (در یک دوره هچری ۱۰۰-۱۲۰ روز) برای هر دو جنس، در مقایسه با غلظت آنها در میگوهای وحشی تازه صید شده، گزارش شده است. در مقابل، غلظت عناصر کمیاب (روی، مس، آهن و منگنز) در عضله در طول این فرآیند بیشتر شده است (۸٦). این تغییرات ممکن است منعکس کننده سازگاری‌های سوخت و سازی (متابولیکی) برای تولید مثل یا به طور متناوب انتقال مواد معدنی به غدد جنسی باشد. میگوهایی که کمبود مواد معدنی دارند، احتمالاً با مشاهدات تغییر ترکیب و کیفیت تخم‌ها، باروری را کاهش می‌دهند. این یافته‌ها با هم، نیاز به تحقیق در مورد نقشی که مواد معدنی در مدیریت مولدین و هچری دارند را برجسته می‌کند.

اهمیت مواد معدنی در سیستم ایمنی میگو

در انسان و حیوانات اهلی نقش مواد معدنی در ایمنی ثابت شده است. به عنوان مثال، مواد معدنی نقش مهمی در واکنش‌های اکسیداتیو، ظرفیت کسیدانی، تکثیر و عملکرد سلولی، فعالیت ضد میکروبی، التهاب و پاسخ‌های ایمنی تطبیقی دارند (۵۱). تأثیر نامطلوب کمبود برخی از مواد معدنی بر سیستم ایمنی بدن، مستعد کردن میزبان به عفونت پاتوژن و افزایش خطر ابتلا به بیماری شناخته شده است (۵۰). با این حال، در میگو، تأثیر کمبود مواد معدنی بر سیستم ایمنی و بیماری به خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است و بنابراین به خوبی درک نشده است. مانند سایر جانوران آبزی، این عدم آگاهی در میگو به دلیل وجود منابع متعدد مواد معدنی برای میزبان (رژیم غذایی و محیط زیست)، تأثیر این منابع و تعامل با سایر مواد معدنی و مواد مغذی پیچیده است (۱۲۷). در شرایط تجربی (آزمایشی)، بیماری‌های مرتبط با کمبود یا عدم تعادل مواد معدنی مشاهده شده است. بروز سندرم دم کرامپ (Cramp tail syndrome) توسط Truong و همکاران (۱۳۲) گزارش شده است که در آن عضله دم پس از دست‌کاری منقبض می‌شود. آنها همچنین سندرم کمبود رنگدانه (یک رنگ غیرعادی در اسکلت بیرونی میگوهایی می‌باشد که با رژیم‌های غذایی نامتعادل مواد معدنی تغذیه می‌شوند) را در میگوهایی که با رژیم‌های غذایی نامتعادل به لحاظ مواد معدنی (از جمله غلظت‌های متفاوت ۱۲ ماده معدنی در جیره‌های خالص شده و غلظت‌های متفاوت کلسیم، فسفر، منیزیم، سلنیوم، منگنز و روی در جیره های آزمایشی) تغذیه شدند، مشاهده کردند (شکل ۱). این موارد بیماری-های رایج تغذیه‌ای هستند که با عدم تعادل مواد معدنی مرتبط می‌باشند (۷۸). یک بیماری رایج که در سخت-پوستان در نتیجه کمبود مواد معدنی بیان می‌شود پوسته نرم است که باعث ظاهر غیر طبیعی پوسته‌های نرم یا کاغذ مانند نازک می‌شود (۹). گنجاندن کلسیم و فسفر در رژیم غذایی بیان پوسته نرم را در *P. monodon* را کاهش می-دهد (۹). جیره‌های حاوی نسبت کلسیم به فسفر ۱ باعث افزایش ۳ برابری افزایش وزن (٦۲ درصد در مقابل ۱۸ درصد) و بهبود ۸۹ درصدی در پوسته نرم در مقایسه با رژیم‌های بدون مکمل کلسیم یا فسفر شدند. میگوهای پوسته نرمی که با جیره‌های دارای کمبود کلسیم و فسفر تغذیه شده بودند، بقا و افزایش وزن کمتری در مقایسه با میگوهای تغذیه شده با رژیم غذایی حاوی مکمل کلسیم و فسفر داشتند. کمبود مواد معدنی که برای تشکیل پوسته مهم هستند را می‌توان با علائم بالینی یا بیماری‌های مربوط به پوست‌اندازی مرتبط دانست که در آن میگو جهت پوست‌اندازی دچار مشکل می‌شود. علاوه بر این پس از پوست‌اندازی سخت شدن مجدد اسکلت بیرونی به سختی انجام می‌گردد و منجر به شکل گیری پوسته‌های نرم می-شود که به نوبه خود می تواند منجر به جراحات کاراپاس و عفونت های باکتریایی بیشتر شود (۷۸). مکمل‌های غذایی برخی از مواد معدنی می‌تواند عملکرد ایمنی میگو را بهبود بخشد. به عنوان مثال، مس در بسیاری از پروتئین-

ها و آنزیم‌های موجود در میگو نقش حیاتی ایفا می‌کند، از جمله این که جزء اصلی هموسیانین است که مشابه هموگلوبین و عنصر حامل اکسیژن آن یعنی آهن موجود در مهره‌داران است. هموسیانین همچنین به عنوان یک پروتئین مهم در ایمنی بی مهرگان عمل می‌کند (۱۱). علاوه بر این، مس یکی از عوامل مهم دیگر آنزیم‌های ایمنی از جمله تیروزیناز، سوپراکسید دیسموتاز Cu-Zn و فرواکسیداز است. نقش مس در عملکرد ایمنی میگو با افزایش تعداد کل هموسیت‌ها و تولید سوپر اکسید در رژیم غذایی *P. monodon* به شکل CuCl و در سطوح بین ۱۰ تا ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۷۳). همچنین تاثیر آن بر پارامترهای ایمنی نیز با افزایش نرخ رشد با همان دوزها مطابقت داشت، در حالی که دوزهای بالاتر مکمل CuCl با عدم افزایش عملکرد ایمنی و کاهش سرعت رشد همراه بود. علاوه براین، افزودنی تجاری آلی مس باعث افزایش چندین پارامتر ایمنی را در همولنف و هپاتوپانکراس میگوی *P. vannamei* از جمله سوپراکسید دیسموتاز (فقط در هپاتوپانکراس)، آلکالین فسفاتاز، اسید فسفاتاز، لیزوزیم (فقط هپاتوپانکراس) و فنول اکسیداز (فقط همولنف) افزایش داد (Yuan et al., 2019). یافته‌های مشابهی در خرچنگ‌های چینی (Chinese mitten crabs) نیز مشاهده گردید که مکمل $CuSO_4$ باعث افزایش پاسخ‌های ایمنی و بهبود مقاومت در برابر آئرومونا‌س شد (۱۲۶). به نظر می‌رسد نیاز به مس اضافه شده به رژیم غذایی میگو باعث افزایش فعالیت ایمنی ذاتی می‌شود که احتمالاً نقش محوری آن را در چندین مولکول ایمنی منعکس می‌کند. با این حال، اثرات سمی مس زمانی که استفاده بیش از حد یا قرار گرفتن در معرض مس بیش از حد وجود داشته باشد، مانند استفاده از آن در مدیریت استخر به عنوان یک کشنده موثر، نشان داده شده است (۹۸، ۱۴۰). شواهد فزاینده‌ای از عملکردهای ایمونولوژیکی سایر مواد معدنی کمیاب در میگو وجود دارد. به عنوان مثال، پروتئین‌های حاوی سلنیوم (Se) در واکنش‌های اکسایش و کاهش یا ردوکس (Redox)، فعالیت آنتی اکسیدانی و رشد و عملکرد سلول‌های ایمنی مهم هستند. بیان ژن‌های سلنوپروتئین H/M/W1 در بافت-های میگوی پنائید شناسایی شده است (۱۲۸). علاوه بر این موارد در میگوهای تغذیه شده با رژیم غذایی حاوی مکمل ۰/۳ ppm سلنیوم آلی، میزان رشد و بقا بهبود یافته و شدت عفونت کمتری را در میگوهای بازمانده به دنبال چالش با ویروس سندرم تاورا (Taura Syndrome Virus) در مقایسه با میگوهایی که با رژیم غذایی پایه بدون مکمل یا مکمل ۰/۳ ppm سلنیوم غیر آلی تغذیه شده بودند، گزارش شده است (۱۲۳). منگنز (Mn) هم نقش مهمی در ظرفیت آنتی اکسیدانی سخت‌پوستان ایفا می‌کند زیرا آنزیم سوپراکسید دیسموتاز منگنز با استرس اکسیداتیو سلولی مبارزه می‌کند (۱۳۵، ۱۴۵). روی (Zn) از عملکرد ایمنی میگو با ایفای نقش در تولید پروتئین مربوط به تعداد تولید هموسیت، فعالیت فاگوسیتوتیک و رشد بافت پشتیبانی می‌کند (۸۰) و دارای نقش مشابه روی در سایر حیوانات است (۱۱۶). استفاده پیشگیرانه از مواد معدنی برای بهبود ایمنی و مقاومت در برابر بیماری در میگو کمیاب است و تحقیقات بیشتری برای درک رابطه بین در دسترس بودن مواد معدنی از محیط و رژیم غذایی و تأثیر آنها بر پیشگیری از بیماری مورد نیاز است.



شکل ۱- اثرات عدم تعادل مواد معدنی رژیم غذایی بر مورفولوژی میگو. تصاویر (الف) میگوهای سالم تغذیه شده با رژیم‌های غذایی مبتنی بر پودر ماهی؛ (ب) سندرم کمبود رنگدانه در میگوهای تغذیه شده با رژیم های غذایی نیمه خالص شده با مواد معدنی نامتعادل؛ و (ج) سندرم دم کرامپ هنگام تغذیه با غلظت‌های مختلف کلسیم، فسفر، منیزیم، سلنیوم، منگنز و روی در جیره‌های غذایی آزمایشی مبتنی بر پودر ماهی

روش‌های سنجش نیازهای معدنی

سنجش نیازهای مواد معدنی را می‌توان به روش‌های مختلفی اندازه‌گیری کرد. یک رویکرد اندازه‌گیری محتوای معدنی بافت‌ها است. روش دوم از آزمایشات فرمولاسیون برای ارزیابی اثرات سطوح مختلف گنجاندن بر رشد و فیزیولوژی میگو استفاده می‌کنند. سوم، مسیرهای بیوشیمیایی را می‌توان برای اندازه‌گیری نیازهای معدنی بررسی کرد. مطالعات متعدد بر روی میگو نشان می‌دهد که اسکلت بیرونی می‌تواند کلسیم، فسفر و پتاسیم و هپاتوپانکراس، مس و روی را از منابع غذایی ذخیره کند. ادغام مواد معدنی در بافت‌های عملکردی خاص، شواهدی ارائه می‌دهد که عرضه این مواد معدنی در رژیم غذایی فراتر از مقدار موجود در آب دریا مورد نیاز است. ترکیب معدنی یک اندام یا بافت می‌تواند به عملکرد آن مرتبط باشد، بنابراین غلظت مواد معدنی در بافت‌ها می‌تواند وضعیت مواد معدنی-تغذیه‌ای را نشان دهد (۲۸). به عنوان مثال، اسکلت بیرونی میگو متراکم‌ترین بافت معدنی است. همانطور که قبلاً اشاره شد، پوست‌اندازی می‌تواند غلظت مواد معدنی اسکلت‌های بیرونی را دستخوش تغییر کند، اما می‌توان با نمونه‌برداری از حیوانات در مرحله بین پوست-اندازی از این امر جلوگیری کرد. غلظت مواد معدنی درشت (Macrominerals) اسکلت بیرونی مانند کلسیم و فسفر در مواردی مفید است که کاهش در اسکلت بیرونی با کمبود مواد معدنی مانند پوسته نرم همراه باشد (۹). هپاتوپانکراس میگو برای ذخیره مواد معدنی انتخاب شده استفاده می‌شود و می‌تواند شاخصی از مواد معدنی باشد (۲۸). به عنوان مثال، در میگوی سفید غربی غلظت منیزیم به صورت خطی با سطوح آن در آب افزایش می‌یابد. میگو به طور فعال منیزیم را ذخیره می‌کند به طوری که سطوح داخل هپاتوپانکراس بسیار بالاتر از آب اطراف است (۱۰۹). با این حال، این اثر برای پتاسیم گزارش نشده است. درک بیشتر از پویایی نحوه استفاده میگو از

هپاتوپانکراس برای ذخیره مواد معدنی مورد نیاز است تا بتوان از این اندام به عنوان معیار اطمینان استفاده کرد. آزمایشات فرمولاسیون شامل افزودن سطوح درجه‌بندی شده از ماده معدنی (معمولاً به شکل غیرآلی) به یک رژیم غذایی خالص یا نیمه خالص و اندازه گیری پاسخ فیزیولوژیکی حیوانات است. ضروری بودن مواد معدنی را می‌توان با ترکیب یک ماده معدنی در یک سطح مشخص و بررسی اثرات مقادیر مختلف مواد معدنی دیگر بررسی کرد. این نوع مطالعات ضروری مفید هستند زیرا نیاز به یک ماده معدنی را در حضور و غیاب سایر مواد معدنی رژیمی محاسبه می‌کنند (۲۹، ۳۲، ۱۳۲). رشد کوتاه مدت به دلیل کمبود مواد معدنی با استفاده از جیره‌های آزمایشی با استفاده از موادی با محتوای معدنی ناچیز مشاهده شده است. نتایج آزمایشات انجام شده با استفاده از جیره‌های نیمه خالص یا خالص شده با کازئین به‌عنوان منبع پروتئین غالب، به دلیل کمبود مس، فسفر، پتاسیم، منیزیم، سلنیوم، منگنز و روی اثرات منفی را بر عملکرد رشد نشان دادند. در شرایط کنترل شده، اثرات کمبود مواد معدنی را می‌توان به وضوح مشخص کرد و می‌تواند بعنوان راهنمایی برای شناسایی کمبود مواد معدنی طی دوره پرورش تجاری عمل کند (۱۳۱). ارزیابی مسیرهای زیستی درگیر در بهره‌برداری از مواد معدنی می‌تواند اندازه‌گیری مستقیم نیازهای معدنی را فراهم کند. این می‌تواند شامل اندازه‌گیری فعالیت آنزیم-ها و بیان ژن‌ها در بافت‌ها باشد (۲۲، ۶۲، ۱۴۱). با این حال، یکی از خطاهای این رویکرد این است که اندازه-گیری فعالیت آنزیم یا بیان ژن در بهترین حالت آن ممکن است شرایط بهینه را در یک حیوان در حال رشد منعکس نکند (۸). با وجود این محدودیت، این روش در روشن کردن مسیرهای زیستی کلیدی شامل مواد معدنی و محیط‌هایی که این مسیرها در آن فعال می‌شوند، مفید است. آزمایش‌هایی که مسیرهای زیستی خاص استفاده از مواد معدنی را ارزیابی می‌کنند برای میگو محدود هستند، اما عمدتاً برای میگوی *P. vannamei* به سرعت در حال توسعه هستند (۴۰، ۴۱، ۱۱۸). توسعه یک شبکه متابولیک در مقیاس ژنوم برای میگوی *P. vannamei* امکان مطالعه سیستم‌های متابولیک را فراهم می‌کند و می‌تواند برای شبیه سازی میزان مورد نیاز و استفاده شده مواد مغذی، مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از چنین مدل‌هایی، واکنش‌های انتقالی و تبادلی مواد معدنی برای تعیین نیازمندی گونه‌ها ارزیابی شده است. مدل‌ها نیازمندی‌های روی، منیزیم و مس را که با متون منتشر شده مطابقت دارند، تعیین می‌کنند (۰/۰۰۵۹ ٪ روی، ۰/۱۲٪ منیزیم، ۰/۰۳۴٪ مس)، در حالی که احتیاجات کلسیم، فسفر، پتاسیم و منگنز متفاوت است (۴۰). هنگام برون‌یابی این مدل‌ها باید احتیاط کرد زیرا تفسیر و دقت آنها به کیفیت و جامعیت شبکه های متابولیکی در مقیاس ژنوم بستگی دارد. مدل‌های مشابه برای سایر میگوها مورد نیاز است، اما در حال حاضر به دلیل فقدان داده‌های ژنومی محدود شده‌اند. برای میگو، مسیرهای زیستی خاصی به خوبی ایجاد نشده است، و تلاش قابل توجهی در این فضا لازم است تا بتوان از این فناوری‌ها برای ارزیابی وضعیت مواد معدنی بر روی رشد و ایمنی استفاده کرد.

روش‌های استفاده از مواد معدنی جهت تغذیه میگوها

مواد معدنی را می‌توان از طریق آبی که در آن زندگی می-کنند یا از طریق غذا در اختیار میگوها قرار داد. در این بخش، بررسی این دو مسیر و استراتژی لازم برای مدیریت ترکیبی آنها در سامانه‌های میگو ارائه می‌شود.

- **آب:** مقدار و ترکیب مواد معدنی حل شده در آبی که حیوانات در آن زندگی می‌کنند تأثیر زیادی بر فیزیولوژی میگو دارد. در گسترده‌ترین حالت، مقدار مواد معدنی موجود را می‌توان با شوری اندازه‌گیری کرد، که نشان‌دهنده تنش‌های اسمزی کلی یک حیوان است. با این حال، سختی و قلیاییت نیز برای تولید میگو مهم است (۱۳۷). سختی غلظت کاتیون‌های دو ظرفیتی (مانند کلسیم، منیزیم و استرانسیم) را که به صورت قسمت در میلیون کربنات کلسیم ($CaCO_3$) یا میلی‌گرم در لیتر بیان می‌کند، اندازه گیری می‌کند. قلیاییت غلظت بازها را اندازه‌گیری می‌کند و به طور مشابه به صورت ppm $CaCO_3$ یا mg/L بیان می-شود. قلیاییت، سختی و pH با هم مرتبط هستند، اما تفاوت آنها شیوه‌های مدیریت آنها را تعیین می‌کند. به عنوان مثال،

افزودن سنگ آهک به افزایش سختی و قلیاییت کمک می‌کند در حالی که استفاده از بی‌کربنات سدیم ($NaHCO_3$) به قلیایی بودن کمک می‌کند اما سختی را نه. سختی کم یک شاخص قابل اعتماد است که نشان دهنده غلظت پایین کلسیم آب است، با این حال سختی بالا لزوماً نشان دهنده غلظت بالای کلسیم نیست، زیرا منیزیم و سایر کاتیون‌های دو ظرفیتی به سختی آب کمک می‌کنند. درک این پیچیدگی‌ها برای مدیریت پروفیل‌های معدنی آب مهم است. تولیدکنندگان می‌توانند آب موجود در تاسیسات تولید را برای بهبود شیمی آب تنظیم کنند. در حوضچه‌های باز، شوری می‌تواند در فصول بارانی، از طریق بارندگی و روان‌آب شیرین، یا با رقیق شدن آب‌های منبع مصب کاهش یابد. برخی از سامانه‌های تولیدی از آب‌های زیرزمینی با شوری کم یا از آب شیرین استفاده می‌کنند. در هر شرایطی، تولیدکنندگان ممکن است با افزودن آب دریا یا نمک، سطح شوری را متناسب با آن تنظیم کنند. سختی، قلیائیت و pH را می‌توان با افزودن نمک‌های معدنی تنظیم کرد. مواد معدنی یونی کلیدی مانند سولفات کلسیم (گچ)، کلرید پتاسیم (پتاس)، سولفات پتاسیم، سولفات منیزیم و کلرید سدیم ممکن است به طور خاص برای اصلاح کمبود در شیمی آب اضافه شوند (۱۵). چنین تمایلی به اصلاح شیمی آب بیشتر برای تولید لازم است تا ملاحظات مورد نیاز معدنی خاص (۶۸، ۸۸). افزودن برخی مواد معدنی به آب می‌تواند تاثیر زیادی بر میزان تولید داشته باشد. به نحوی که در محیط‌های کم شور، بارها نشان داده شده است که هر دو عنصر منیزیم و پتاسیم برای حفظ رشد مورد نیاز هستند (۲۷، ۳۸، ۹۰، ۱۰۹). به عنوان مثال، در آب با شوری ٤ ppt، افزایش سطح K^+ از ۵ به ٤۰ میلی‌گرم در لیتر بصورت خطی باعث بهبود میزان بقای پست لارو و وزن میگوی *P. vannamei* شده است، در حالی که سطوح Mg^{2+} بالاتر از ۱۰ میلی‌گرم در لیتر (تا ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر) با بقای بهتر مرتبط بود (۱۱۱). همچنین در این محیط‌ها، نگهداری نسبت سدیم به پتاسیم (Na:K) به میزان ۲۷/۶ و Mg:Ca با نسبت۳/٤ موثرترین راهکار در حفظ رشد میگوی *P. vannamei* می‌باشد (۱۱۰). اهمیت داشتن ترکیب معدنی مناسب آب، حتی در آب با شوری بالا (۳۰ppt)، توسط Zhu و همکاران (۲۰۰۶) نشان داده شد، که بیان کردند پتاسیم جیره نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای در دسترس بودن آن در آب باشد. نتایج مطالعه آنها نشان داد زمانی که سطوح K در آب از ۳۳۲ به ۱۰۱ میلی گرم در لیتر کاهش یافت، میزان وزن نهایی میگوی سفید غربی تا ۳۷٪، نرخ رشد ویژه تا ۲۶٪، راندمان پروتئین تا ۲۵٪ و راندمان تبدیل خوراک تا ۲۷/۵٪ روند کاهشی را از خود نشان دادند (۱٤۶). این تلفات در تولید را نمی‌توان با مکمل‌های غذایی اضافی پتاسیم برطرف کرد. در سامانه‌های بزرگی که از آب با شوری کم استفاده می‌کنند، ممکن است به جای تلاش برای رساندن همه نمک‌ها به سطحی قابل مقایسه با محیط‌های دریایی، روش مقرون به صرفه‌تر و عملی‌تر اینست که نمک‌های خاص را به سامانه اضافه کنیم. با درک اهمیت مواد معدنی خاص در شیمی آب و فیزیولوژی میگو، پرورش دهندگان می‌توانند در نحوه تنظیم شوری در سامانه‌های تولید خود بصورت انتخابی عمل کنند.

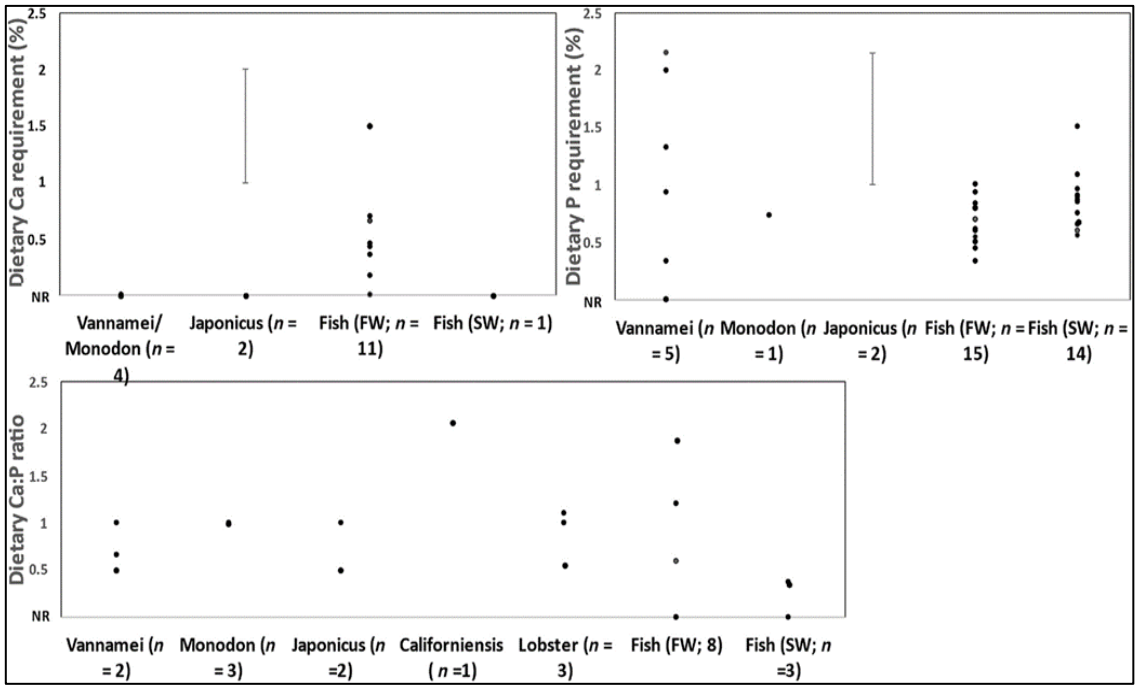
- **غذا:** متخصصان تغذیه از مواد معدنی مانند مونو کلسیم فسفات (MCP)، فسفات منیزیم (MgP)، مونو سدیم فسفات (MSP) و پرمیکس‌های معدنی برای ایجاد یک رژیم غذایی که نیازهای معدنی میگو را برآورده می‌کند، استفاده می‌کنند. این استراتژی معمولاً عناصر معدنی درشت (ماکرو) و کمیاب شناخته شده را شامل می‌شود. بیشتر پرمیکس‌های معدنی به دلیل قیمت پایین و در دسترس بودن این اشکال، عمدتاً حاوی نمک‌های معدنی هستند. بنابراین، پرمیکس‌ها معمولاً حاوی کلسیم و فسفر (به صورت کلرید کلسیم، کربنات یا فسفات)، کبالت (به صورت کلرید یا سولفات کبالت)، مس (به صورت سولفات یا کلرید مس)، آهن (به صورت سولفات آهن)، پتاسیم (به صورت یدید ، فسفات یا کلرید)، منیزیم (به صورت سولفات منیزیم) و سدیم (به صورت فسفات یا کلرید سدیم) هستند. برخی از پرمیکس‌های معدنی همچنین حاوی مواد معدنی کمیاب به اشکال دیگر مانند هیدروکسی کلریدها و مواد معدنی کیلیت شده هستند. زیرا که شواهد فزاینده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد این

اشکال مکمل می‌توانند مؤثرتر باشند. بنابراین، مواد معدنی کمیاب را می‌توان به صورت سولفات منگنز یا گلیسین منگنز آلی، Se به‌عنوان سلنیت سدیم یا به صورت Se-متیونین آلی یا مخمر غنی‌شده و روی را به صورت سولفات روی یا لیزین/متیونین/گلیسین روی آلی ارائه کرد (۳۷، ۷۹، ۸۰، ۸٤، ۹۹، ۱۰۱، ۱۳۸). با این وجود، برخی از مواد معدنی کمیاب معمولاً در این پرمیکس‌ها یافت نمی‌شوند و بنابراین پتانسیل کمبود آنها در رژیم غذایی وجود دارد. مواد معدنی کمیاب هیدروکسی کلراید ساختارهای کریستالی مهندسی شده‌ای هستند که پیوندهای کووالانسی محکمی دارند و حلالیت آنها را نسبت به سولفات‌ها کمتر و یا واکنش‌پذیر می‌کند. گروه هیدروکسیل منفرد (OH-) از اکسید شدن یا اتصال با سایر اجزای فلزی جلوگیری می کند. در دسترس بودن مواد معدنی هیدروکسی کلراید در میگوی پنائیده به خوبی درک نشده است. با این حال، در یک مطالعه مکمل هیدروکسی کلرید مس منجر به افزایش معادل با استفاده از سولفات مس در کاراپاس، هپاتوپانکراس و کل بدن میگوی *P. vannamei* شد (۱٤٦). نانوتکنولوژی شامل تجویز مواد معدنی با اندازه ذرات در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانوذرات برای بهبود جذب و نگهداری و کاهش خطر سمیت در آبزی-پروری استفاده شده است. به عنوان مثال، نشان داده شده است که تجویز Se به عنوان نانوذرات برای چندین گونه ماهی موثر است (٦۳). علاوه بر این، استفاده از آن از نظر شاخص‌های رشد و سلامتی نسبت به اشکال سنتی Selenite و Se-methionine موثرتر است (٤٦، ۱۱۳). گزارش‌های اخیر نانو مواد معدنی را در میگو در نظر گرفته‌اند. Ghaffarizedah و همکاران (۲۰۲۲)، میزان ایده‌آل گنجاندن نانوسلنیوم را ۰/۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر اساس افزایش وزن تعیین کردند. کاهش رشد و استرس اکسیداتیو بالا در سطوح بالاتر از این حد مشاهده شد، که نشان می‌دهد سمیت همچنان می‌تواند با نانو اشکال Se در میگو رخ دهد (٤٥). کیلیت کردن مواد معدنی، اغلب با لیگاندهای اسید آمینه، فراهمی زیستی مواد معدنی را در مقایسه با نمک‌های معدنی بهبود می‌بخشد. مطالعات متعددی این موضوع را در میگو نشان داده است. ساختار مولکول اجازه می‌دهد تا ماده معدنی پیوند خورده به عنوان یک کیلیت دست نخورده به داخل سلول مخاطی منتقل شود. این امر فرمولاسیون کمپلکس‌های نامحلول با سایر مواد مغذی را به حداقل می‌رساند. با این حال، اگر فلز-کیلیت قبل از جذب از طریق دیواره مخاطی جدا شود و یونی شود، مزایای کانی کیلیت از بین می‌رود و تابع همان عوامل محدود کننده مواد معدنی در مواد غذایی یا مواد معدنی است (۱۳۱). آمینو اسید-کیلیت‌ها اثر حفظ پروتئین دارند، همانطور که در گونه‌های پستانداران و اخیراً در میگو مشاهده شده است. در این مطالعات، افزایش وزن و یا استفاده از پروتئین زمانی که این ماده معدنی به عنوان یک اسید آمینه-کیلیت ارائه شد، در مقایسه با همان سطح گنجاندن نمک معدنی مشاهده شد. در میگوی سفید غربی، استفاده از کیلیت‌ها وزن بدن را تا ۲۵/۷٪ افزایش دادند و غلظت پروتئین را در همولنف را تا ٥/٦٪ (٤/٦٥ در برابر٤/٤٠ گرم در دسی لیتر) در مقایسه با میگوهای تغذیه شده با سطوح معادل مواد معدنی غیرآلی (۵ گرم بر کیلوگرم) افزایش دادند. مکانیسم چگونگی بهبود استفاده از پروتئین کیلیت‌ها ناشناخته باقی مانده است. با این حال، ممکن است در اثر فعال شدن پروتئینازها و همچنین آنزیم-های دخیل در آنابولیسم ایجاد شود (۷، ٦۲). مخمرهای غنی شده با مواد معدنی یک منبع زیست فعال از عناصر را فراهم می‌کنند. با این حال، هزینه بالا و غلظت نسبتاً کم مواد معدنی در محصول در مقایسه با سایر اشکال، استفاده از آن را به جای خوراک دام فقط به تغذیه انسان محدود کرده است. برخی از مواد مورد استفاده برای تهیه غذای آبزیان منابع خوبی از مواد معدنی هستند. اینها شامل پودر ماهی، پودر مرغ، محصولات جانبی گوشت، بیوماس میکروبی یا پودر جلبک است که هر کدام منبع متنوع و به طور کلی زیستی از مواد معدنی را فراهم می‌کنند. این مواد می توانند جذابیت و خوش طعم بودن خوراک را بهبود بخشند. برخی مطالعات اثرات استفاده از زیست‌توده میکروبی و کنجاله جلبکی را بررسی کرده‌اند که مورد علاقه متخصصان تغذیه آبزی‌پروری به عنوان مواد تشکیل دهنده‌ای هستند که به طور بالقوه می‌توانند به طور کامل یا جزئی جایگزین محصولات مبتنی بر پودر ماهی شوند.

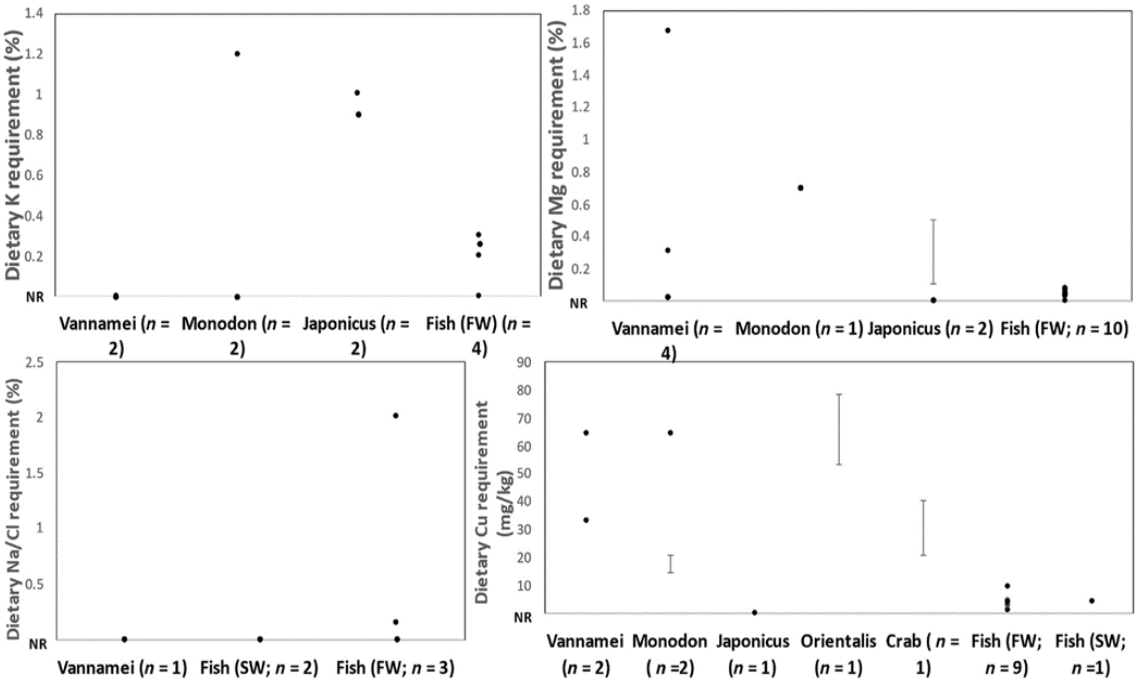
زیست‌توده میکروبی زمانی که بعنوان جایگزین پودر و روغن ماهی در رژیم غذایی *P. monodon* استفاده شد، قادر به حفظ رشد و بقا در میگوهای پرورشی بود (۴۸). زیست‌توده میکروبی همچنین ترکیب خاکستر و پروتئین کل بدن را افزایش داد که نشان دهنده جذب بهتر مواد معدنی و پروتئین در مقایسه با رژیم غذایی سرشار از پودر ماهی است. به طور مشابه، گنجاندن پودر ریز جلبک باعث افزایش غلظت مواد معدنی مس، آهن، منگنز و روی رژیم غذایی در مقایسه با جیره حاوی آرد ماهی شد که منجر به نرخ رشد بالاتر و غلظت بیشتر منگنز در میگوی *P. vannamei* شد (۶۰). تنوعی از فعل و انفعالات مواد معدنی و مواد مغذی می‌تواند در ماتریس رژیم غذایی رخ دهد که می تواند منجر به کمبود مواد معدنی ثانویه شود (۴۴). اثر این فعل و انفعالات به عوامل بی‌شماری مانند غلظت مواد معدنی خاص (به ویژه نسبت کلسیم به فسفر)، ترکیب رژیم غذایی و مواد تشکیل دهنده، سن و گونه‌های پرورشی و عوامل محیطی بستگی دارد. اگرچه این اثرات متقابل به آسانی در گونه‌های دیگر شناسایی شده است، شواهد در این مورد برای میگو کمیاب است اگرچه احتمال وقوع آنها وجود دارد. پروتئین رژیم غذایی می‌تواند بر استفاده از مواد معدنی تأثیر بگذارد و بالعکس. در ماهی کپور، افزودن کبالت بر اساس افزایش رشد، کارایی پروتئین و ادغام لوسین نشاندار شده در ماهیچه، اثر حفظ پروتئین دارد (۵۴). در گونه‌های زمینی، پروتئین ارائه شده به عنوان کازئین، محتوای مس کبد را در بره‌ها تا ۴۳ درصد در مقایسه با پروتئین آرد سویا افزایش داد، در حالی که مکمل جیره ال سیستئین با ۰/۴ درصد باعث کاهش جذب مس در جوجه‌ها شد (۶، ۴۴). این احتمال وجود دارد که موادی مانند اسیدهای آمینه آزاد با پتانسیل کیلیت شدگی بالا می‌توانند مس را متصل کرده و کمپلکس‌هایی تشکیل دهند که جذب ضعیفی ندارند. فعل و انفعالات با سایر مواد مغذی شامل ویتامین‌ها، آنتی بیوتیک‌ها، آنتی اکسیدان‌ها، مواد تشکیل دهنده کمپلکس، آلکالوئیدها و گلوکوزیدها است. وقوع فعل و انفعالات منفی را می‌توان با استفاده از اشکال پایدار مواد معدنی و سایر مواد مغذی (ویتامین‌ها، آنتی اکسیدان‌ها) کاهش داد. کیلیت‌های معدنی میزان فراهمی زیستی بالایی از خود نشان داده‌اند. کپسوله کردن مواد مغذی با استفاده از عوامل کیلیت کننده مانند EDTA، کیتوزان، کربوکسی متیل سلولز و غیره برای جلوگیری از شستشوی مواد مغذی در جیره‌های غذایی آبزیان مورد توجه قرار گرفته است (۳۳، ۱۰۷، ۱۴۲). اگرچه این تکنیک ثبات جیره را بهبود می‌بخشد و احتمالاً فعل و انفعالات مواد مغذی را به حداقل می‌رساند، تأثیر آن بر استفاده از مواد مغذی توسط حیوان متناقض بوده است. بنابراین، مزایای کپسوله کردن مواد معدنی بر متابولیسم مواد معدنی نیاز به بررسی و مطالعه بیشتر دارد.

اهمیت عناصر معدنی در نیازهای زیستی میگو

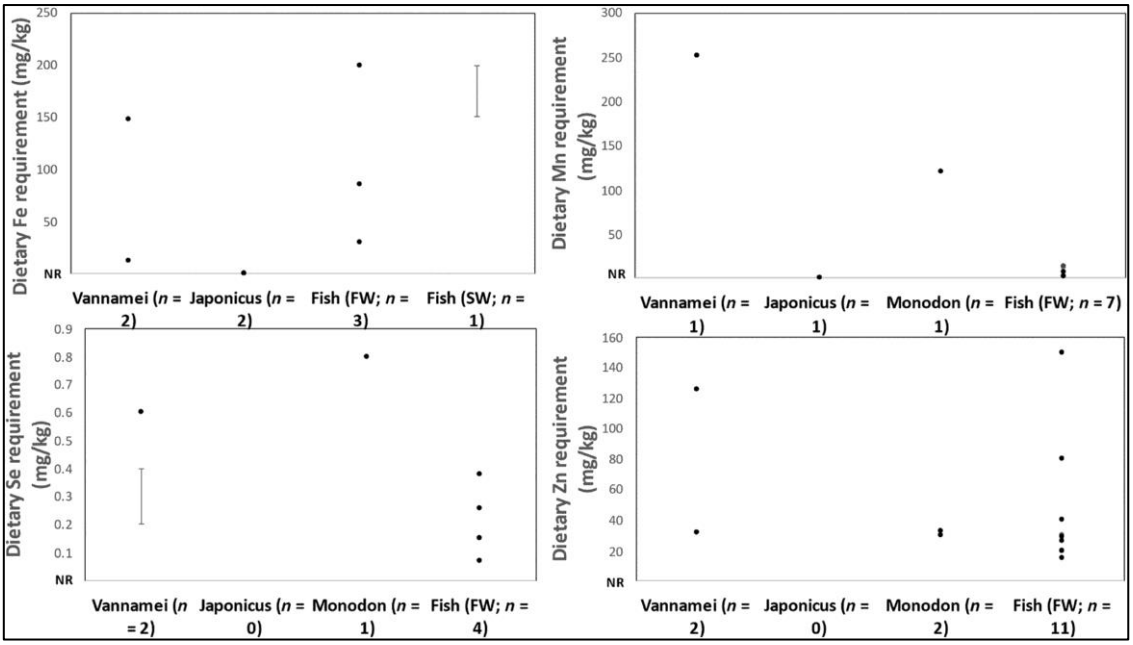
این بخش به بررسی دانش فعلی از نیازهای غذایی میگو به مواد معدنی بصورت عنصری می‌پردازد. همچنین بر اساس مقالات منتشر شده محدوده‌های مورد نیاز هر عنصر معدنی برای سخت‌پوستان و گونه‌های میگوی پناییده ارائه شده است (شکل‌های ۲ تا ۴). علاوه بر این، مقادیر مورد نیاز برای ماهیان آب شیرین و آب شور نیز در همان نمودارها برای مقایسه نشان داده شده است. مطالعات نیازهای مواد معدنی برای سخت‌پوستان بر اساس معیارهای زیر انتخاب شدند: (الف) یک منبع معدنی غیرآلی به یک رژیم غذایی پایه اضافه شد. (ب) رشد، بقا یا ترکیب معدنی بافت ارزیابی شد؛ و (ج) توصیه‌ای در مورد ضرورت یا نیاز معدنی در گونه‌های پنائیده ارائه شد. بر اساس مرور منابع موجود، در این بررسی بر روی عناصر معدنی Ca، P، نسبت‌های Ca: P، K، Mg، Cu، Fe، Mn، Se و Zn تمرکز شده است.



شکل ۲- نیازهای معدنی کلسیم (Ca)، فسفر (P) و نسبت‌های Ca:P برای ماهی‌های آب شور و شیرین، *Homarus americanus* (خرچنگ آمریکایی)، و گونه‌های مختلف میگوی پنایید. مقادیر روی محور x (x =۰) نشان می‌دهد که کانی مورد نیاز نیست، یا برای Ca:P هیچ رابطه ای وجود ندارد (NR). N= تعداد مطالعات ارجاع شده را نشان می‌دهد. نقاط نشان دهنده مقدار(های) توصیه شده است. ویسکرها محدوده توصیه شده را نشان می‌دهند.



شکل ۳- نیازهای غذایی پتاسیم (K)، منیزیم (Mg)، سدیم (Na) / کلرید (Cl) و مس (Cu) برای ماهی‌های آب شیرین و آب شور، خرچنگ چینی *Eriocheir sinensis* و گونه‌های مختلف میگوی پنائیده. مقادیر روی محور x (x =۰) نشان می‌دهد که کانی مورد نیاز نیست، یا برای Ca:P هیچ رابطه ای وجود ندارد (NR). N= تعداد مطالعات ارجاع شده را نشان می‌دهد. نقاط نشان دهنده مقدار(های) توصیه شده است. ویسکرها محدوده توصیه شده را نشان می‌دهند.



شکل ٤- نیازهای غذایی آهن (Fe)، منگنز (Mn)، سلنیوم (Se) و روی (Zn) برای ماهی‌های آب شیرین و آب شور و گونه‌های مختلف میگوی پنائیده. مقادیر روی محور x (x =۰) نشان می‌دهد که کانی مورد نیاز نیست، یا برای Ca:P هیچ رابطه ای وجود ندارد (NR). N= تعداد مطالعات ارجاع شده را نشان می‌دهد. نقاط نشان دهنده مقدار(های) توصیه شده است. ویسکرها محدوده توصیه شده را نشان می‌دهند.

کلسیم

کلسیم (Ca) معمولاً فراوان‌ترین ماده معدنی موجود در حیوانات است که جزء اصلی اجزای ساختاری می‌باشد و برای انقباضات عضلانی، عملکرد اعصاب و انعقاد لازم است. اهمیت آن به این معنی است که این ماده معدنی بیشترین تحقیق را در تغذیه دام‌های خشکی‌زی دارد و مقادیر مورد نیاز آن برای اکثر نژادهای تولیدی و مراحل زندگی شناخته شده است (۸۲، ۱۳۳). کلسیم در فعالیت متابولیسمی، انقباظ عضلانی و فعالیت بعضی آنزیم‌ها لازم می‌باشد. کمبود کلسیم باعث رشد کم، آهکی شدن استخوان‌ها و شکل غیر طبیعی سر می‌شود. کلسیم بوسیله ماهی می‌تواند از آب دریا جذب شود ولی آب شیرین کلسیم کمی دارد. غذاهای با منشأ حیوانی مانند پودر گوشت و پودر ماهی حاوی مقدار قابل توجهی از کلسیم هستند بنابراین کمبودی در جیره غذایی رخ نمی‌دهد. مکمل کلسیم معمولاً برای ماهیان دریایی مورد نیاز نیست، زیرا معمولاً می‌توانند آن را از آب به دست بیاورند. علاوه بر این، کمبود کلسیم در گونه‌های ماهی پرورشی در محیط‌های کم شور به ندرت اتفاق می‌افتد. با این حال برخی از ماهیان آب شیرین نیاز به مکمل دارند. به عنوان مثال، تیلاپیا آبی *Oreochromis aureus* (۱۰۳، ۱۰٤) و تیلاپیا هیبریدی *Oreochromis niloticus* x *O. aureus* (۵۸، ۱۲۱)، به ترتیب به مکمل کلسیم غذایی ۰/۱۷ و ۰/۷ درصد نیاز دارند. اندازه‌گیری سختی و قلیائیت آب پارامترهای مهمی هستند که بر دسترسی کلسیم تأثیر می‌گذارند و می‌توانند از شوری مهم‌تر باشند (۵۹). ماهی می‌تواند مستقیماً کلسیم را از آب جذب کند و حضور آن در محدوده ایده‌آل حفظ نمک‌های دیگر مانند سدیم و پتاسیم جذب شده از خون ماهی را بهبود می‌بخشد. برای سخت‌پوستان، مکمل کلسیم در رژیم غذایی معمولاً مورد نیاز نیست، زیرا آنها معمولاً می‌توانند نیاز خود را از آب تأمین کنند. کلسیم یک ماده معدنی مهم در سخت‌پوستان است که در سطوح بالایی در بدن میگو عمدتاً به صورت کربنات کلسیم در اسکلت بیرونی (حدود ۳۰ درصد در

میگو) وجود دارد (۱۰۵). در خرچنگ‌های *Sesarma rectum* و *Neohelice granulata*، افزودن کلسیم (کلرید کلسیم) در رژیم غذایی بر غلظت ماده معدنی موجود در همولنف تأثیر می‌گذارد، اما نیازی جهت اضافه شدن آن در رژیم غذایی نمی‌باشد (۱۴۴). کلسیم رژیمی ممکن است در طول تولیدمثل مورد نیاز باشد، زیرا سطوح آن هم در ماهیچه و هم در هپاتوپانکراس میگوهای تخمریزی کرده کاهش می‌یابد (۸۶). با این حال، مطالعات موجود بر روی میگوهای پمائیده با استفاده از آزمایش‌های رشد و ترکیب بافت، نیازی به کلسیم جیره برای گونه‌های *P. vannamei* و *P. monodon* را گزارش نمی‌کنند (شکل ۲). در واقع، کلسیم بیش از حد در رژیم غذایی (به عنوان نمک‌های کلرید، کربنات یا فسفات) رشد را مهار می‌کند. ذکر این نکته مهم است که علی‌رغم اینکه مکمل کلسیم در رژیم غذایی مورد نیاز نیست، اما ارتباط بین کلسیم و فسفر رژیم غذایی مهم می‌باشد (۱۳۱).

فسفر

فسفر (P) در ارگانیسم ها به صورت فسفولیپیدها، ATP/ADP و مولکول‌های انرژی کراتین فسفات، اسیدهای نوکلئیک و بافرها (مانند فسفات ها) وجود دارد (۵۷). علاوه بر این، فسفر به همراه کلسیم جزء اصلی سیستم اسکلتی در مهره‌داران و اسکلت بیرونی سخت-پوستان است. فسفر بر خلاف کلسیم به میزان کمتری از آب جذب می‌شود بنابراین وجود این عنصر در جیره غذایی حائز اهمیت می‌باشد. فسفر در منابع جانوری مانند پودر ماهی قابلیت استفاده بالاتری دارد ولی ماهیان دارای معده حقیقی مانند قزل آلا توانایی بیشتری در استفاده از منابع فسفر جانوری در مقابل ماهیان فاقد معده مانند کپور دارند. فسفر در ماهیان معده‌دار تا ۶۰٪ و در ماهیان فاقد معده حدود ۲۵٪ قابل دستیابی می‌باشد. بالا رفتن میزان فسفر غذا می‌تواند یکی از عوامل آلوده کننده اکوسیستم‌های آبی باشد. فسفر غیر قابل هضم و همچنین فسفر محلول دفع شده از راه ادرار و برانشی وارد آب خروجی شده و در اثر انتقال به اکوسیستم‌های آبی باعث آلودگی محیط‌های آبی و یوتریفیکاسیون آنها می‌شوند. بنابراین باید در استفاده از غذای با میزان فسفر بالا کاملاً دقت نمود.

ماهی‌ها نیاز به فسفر دارند و این نیاز معمولاً بیشتر از دام-های خشکی‌زی می‌باشد. آب منبع ضعیفی از فسفر است و بنابراین ماهی‌ها برای حفظ این عنصر تکامل یافته‌اند. فسفر عمدتاً از طریق دفع در ادرار از بین می‌رود و بنابراین به دلیل حجم زیاد ادرار تولید شده، میزان از دست رفتن عنصر فسفر به طور بالقوه برای گونه‌های آب شیرین بیشتر است (۵۹). با این وجود، سطوح مکمل‌های غذایی برای گونه‌های آب شور و شیرین (شکل ۲) مشابه است. کمبودهایی در ماهیان تغذیه شده با مواد خام مانند کنسانتره پروتئین طیور بدون مکمل فسفر مشاهده شده است (۱۲۲). مقدار مورد نیاز فسقر در سخت‌پوستان به خوبی تعریف نشده است. مقادیر مورد نیاز در میگوی *P. vannamei* بین ۰/۳۴ تا ۲/۲ درصد متغیر بود (شکل ۲). تنها یک مطالعه نشان داده است که مکمل فسفر معدنی (به عنوان فسفات سدیم) در القای پاسخ افزایش وزن یا تغییر در غلظت کاراپاس یا هپاتوپانکراس بی‌اثر بود (۲۱)، اما این عدم تأثیر ممکن است تنها به دلیل وجود یک سطح ثابت فسفر باشد. زمانی که در جیره‌های آزمایشی حاوی ۵۳ درصد پودر ماهی در نظر گرفته شود، نیاز فسفر برای پست لاروها (۲/۰۹ تا ۲/۲۰ درصد) بالاترین میزان بود (۹۱). مقادیر فسفر مورد نیاز برای گونه‌های *P. monodon* (۹۵) و *Penaeus japonicus* به ترتیب ۰/۷۴ درصد و ۱ تا ۲/۱۱ درصد توصیه شده است. فسفر از نظر در دسترس بودن، هم در بین مواد تشکیل دهنده و هم برای هر گونه متفاوت است. در ترکیبات گیاهی، بیشتر فسفر به شکل فیتات است که بسیار نامحلول است. با این حال، با افزودن آنزیم فیتاز، که فسفر را از حلقه اینوزیتول آزاد می‌کند، می-توان در دسترس بودن آن در منابع با منشاء گیاهی را بهبود بخشید. در پودر ماهی، فسفر می‌تواند به صورت دی و تری کلسیم فسفات وجود داشته باشد که در هضم نیز نامحلول هستند. با این حال، به طور کلی، وعده‌های غذایی حیوانی منابع بالاتری جهت تامین فسفر هستند و در مقایسه با وعده های غذایی گیاهی، فسفر بیشتری دارند. پودر ماهی و پودر محصول جانبی طیور به ترتیب حاوی

۱/۷۵ تا ٦ درصد و ۰/٦ تا ۵/۳ درصد هستند، در حالی که کنجاله سویا استخراج شده با حلال دارای ۰/٦۵ تا ۰/۷۲ درصد فسفر می‌باشد (۱۳۰). بنابراین جایگزینی پودر ماهی با پروتئین‌های حیوانی و گیاهی می‌تواند محتوای فسفر جیره را کاهش دهد و باعث کاهش وزن شود (۱۰۰). مقادیر فسفر قابل دسترس در مواد مختلف خوراکی برای گونه‌های خشکی‌زی و برخی از ماهی‌ها مشخص شده است. با این حال، این مورد به طور کلی برای میگو صادق نیست. منابع غیرآلی فسفر موجود برای *P. vannamei* تعیین شده است که در آن فسفات سدیم (٦۸/۲٪ قابلیت هضم ظاهری فسفر)، فسفات پتاسیم تک پایه (٦۸/۱٪ ٪ قابلیت هضم ظاهری فسفر) و مونو-کلسیم فسفات (۷۱/۵٪ قابلیت هضم ظاهری فسفر) و مونوآمونیوم فسفات (۱۱٤٪ قابلیت هضم ظاهری فسفر) بالاترین قابلیت دسترسی فسفر را در مقایسه با سایر منابع غیرآلی دارند (۲۵، ۷٤). عدم وجود داده‌های مربوط به فسفر قابل دسترس برای سایر مواد تشکیل دهنده یک چالش در هنگام فرموله کردن رژیم غذایی برای میگوهای پنائیده می‌باشد.

نسبت کلسیم به فسفر

با توجه به اینکه دو عنصر معدنی کلسیم و فسفر با هم در تعامل می‌باشند، نسبت آن‌ها در جیره‌ها مهم است. برای دام‌های زمینی، عرضه هر یک از عناصر به میزان کمتر یا بیشتر از نسبت مناسب مورد نظر می‌تواند جذب هر دو عنصر را تحت تأثیر قرار دهد. در دسترس بودن فسفر اغلب محدوده بالایی برای جذب کلسیم ایجاد می‌کند. برعکس، کلسیم بیش از حد می‌تواند بر استفاده از فسفر تأثیر منفی بگذارد، که احتمالاً به دلیل تشکیل کمپلکس‌های نامحلول در مجرای روده می‌باشد که جذب فسفر را کاهش می‌دهد (۱۱۵). بنابراین، اطمینان از متعادل بودن نسبت این دو عنصر برای تغذیه میگو مهم است. به نظر می‌رسد که ماهی‌ها برعکس دام‌های زمینی محدودیتی به نسبت‌های کلسیم به فسفر نداشته باشند. در بسیاری از گونه‌های ماهی که هم در آب شیرین و هم در آب دریا پرورش می‌یابند، هیچ رابطه‌ای بین کلسیم و فسفر مشاهده نشده است (۵۸)، به استثنای چند مورد مانند *Chrysophrys major* (در آب دریا) و گربه ماهی *I. punctatus* (در آب شیرین) که به ترتیب نیاز به نسبت کلسیم به فسفر ۰/۳٤: ۰/٦۸ و ۱/۵: ۰/۸ دارند (۳، ۱۳۱). برای سخت‌پوستان، نسبت کلسیم به فسفر رژیم غذایی مهم در نظر گرفته می‌شود، زیرا به طور ضمنی بر افزایش وزن تأثیر می‌گذارد، و از تغییر شکل‌های ساختاری مانند پوسته‌های نرم جلوگیری می‌کند. توصیه شده است که در گونه‌های *P. vannamei*، *P. monodon* و *P. japonicus* نسبت کلسیم به فسفر به نسبت ۱:۱ یا کمتر حفظ شود (شکل ٤). براساس نتایج Peñaflorida (۱۹۹۹) در رژیم غذایی میگوی *P. monodon* سطح کلسیم نباید از سطح فسفر تجاوز کند (۹۵). در میگو *Penaeus californiensis*، نسبت‌های بالاتر ۲/۰٦ به ۱ تا ۲/۲٤ به ۱ توصیه شده است، اگرچه نسبت‌های پایین مورد بررسی قرار نگرفتند. به طور مشابه، در خرچنگ دریایی هم نسبت ایده آل کلسیم به فسفر را به میزان ۱: ۱ یا کمتر را گزارش کرده‌اند که در آن میزان رشد و طول کاراپاس بهتری در مقایسه با نسبت‌های بالاتر به دست آمد. این یافته‌ها نشان‌دهنده اهمیت رژیم‌های غذایی متعادل به لحاظ نسبت Ca:P برای سخت‌پوستان است. با این حال، دستیابی به این تعادل پیچیده است زیرا میگو می‌تواند کلسیم را از محیط پرورش به دست آورد. با این وجود، هدف این است که اطمینان حاصل شود که سطوح کلسیم در رژیم غذایی مشابه فسفر است (نسبت ۱:۱ یا کمتر ایده آل است) تا از تأثیر منفی کلسیم بر در دسترس بودن فسفر جلوگیری شود (۱۳۱). غلظت کلسیم در آب بر نسبت Ca:P تأثیر می‌گذارد. نسبت Ca:P میگوی کامل کمی بیشتر از ٤:۱ است و چه میگوها با رژیم غذایی پایه یا مکمل مواد معدنی تغذیه شوند، این نسبت ثابت می‌ماند. مقدار کلسیم در بدن بسیار بیشتر از نیاز رژیم غذایی است و توانایی میگو برای بدست آوردن آسان کلسیم از آب دریا را برجسته می‌کند. به همین دلیل، سامانه‌های تولید با استفاده از آب با کلسیم محلول محدود ممکن است نیاز به مکمل داشته باشند. نشان داده شده است که افزایش غلظت کلسیم در آب با بقا و تولید میگو ارتباط مثبت دارد. با این حال، این رابطه ممکن است توسط پارامترهای دیگری که

با سختی کلسیم مانند قلیاییت نیز مرتبط هستند، مخدوش شود (۹۷).

پتاسیم

پتاسیم (K) همراه با منیزیم، سدیم و کلر، به عنوان الکترولیت در بدن برای تنظیم فشار اسمزی داخل سلولی و تعادل اسید و باز عمل می‌کند. پتاسیم همچنین برای متابولیسم پروتئین، گلیکوژن و گلوکز مورد نیاز است. در ماهیان نیاز به پتاسیم معمولاً از طریق مصرف رژیم غذایی بدون مکمل تامین می‌شود. نتایج حاصل مطالعات مختلف بر روی ماهیان نشان می‌دهد که آب دریا و رژیم‌های غذایی آزمایشی منابع کافی پتاسیم برای ماهی را تامین می-کنند. با این حال، نسبت یون‌ها در آب مهم است و عدم تعادل، مانند محیط‌های هیپواسموتیک یا هیپراسموتیک، توانایی ارگانیسم برای تنظیم اسمزی را مختل می‌کند. منابع غذایی پتاسیم می توانند تنش‌های اسمزی حیوان را در این شرایط کاهش دهند (۹٤). در میگو، پتاسیم فراوان‌ترین ماده معدنی پس از کلسیم است و تحقیقات قابل توجهی برای درک نیازهای این ماده معدنی انجام شده است. نیاز به پتاسیم جیره به میزان ۱/۲٪ (بصورت کلرید پتاسیم)، ۰/۹ تا ۱٪ (بصورت فسفات پتاسیم یا کربنات پتاسیم) به ترتیب برای میگوهای *P. monodon* و *P. japonicus* گزارش شده است (شکل ۳). علی‌رغم اهمیت مکمل‌های غذایی، در دسترس بودن پتاسیم در آب نیز حیاتی است، زیرا این مکمل‌ها نمی‌توانند کمبود پتاسیم آب را جبران کنند. به عنوان مثال، در میگوی *P. vannamei* گنجاندن پتاسیم در جیره (به صورت کلرید پتاسیم) به اندازه مکمل پتاسیم در آب موثر نبود و افزودن مکمل پتاسیم تا میزان ۵۰ ppm در آب دریا باعث بهبود زیست‌توده و افزایش وزن شد. نیاز پتاسیم نیز به سطوح سایر مواد مغذی، به ویژه سایر مواد معدنی (Na، Cl و Mg) و اسیدهای آمینه (آرژنین) بستگی دارد (۱۳۱).

منیزیم

قسمت زیادی از منیزیم (Mg) حدود ۷۰ درصد در بافت‌های سخت وجود دارد. منیزیم عملکردهای متنوعی دارد و به عنوان یک کاتالیزور برای مجموعه وسیعی از آنزیم‌های حیاتی برای متابولیسم کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها عمل می‌کند. منیزیم همچنین جهت تنظیم اسمزی، یکپارچگی غشای سلولی و تعدیل انتقال عصبی عضلانی مورد نیاز است. منیزیم در بافت‌های بدن برای حفظ عضلات لازم است. کمبود منیزیم باعث شلی عضلات، بی اشتهایی، کاهش رشد و مرگ و میر آبزیان می‌شود. بیشتر غذاها به خصوص غذاهای حاوی مواد گیاهی دارای میزان قابل قبولی از منیزیم می‌باشند. کمبود منیزیم در ماهی به خوبی ثبت شده است. برای اکثر گونه‌ها، جذب از طریق آب تنها می‌تواند بخشی از نیازها را تامین کند و بنابراین منابع غذایی حاوی منیزیم مورد نیاز هستند (۵۸، ۷۱). بیشتر منیزیم موجود در میگو در اسکلت بیرونی یافت می‌شود. نیازهای غذایی برای این ماده معدنی بسیار متفاوت است و تا ۰/۳۵درصد برای میگو *P. vannamei* قابل مصرف است (شکل ۳). نیاز به منیزیم در میگوی *P. japonicus* همچنان نامشخص است. Deshimaru و Yone (۱۹۷۸) بیان کردند که حذف منیزیم غذایی تاثیری بر افزایش وزن میگوی *P. japonicus* ندارد (۳۲)، در حالی که در مطالعه دیگری (٦۱) افزودن منیزیم به میزان ۰/۰۱ و ۰/۰۵ درصد افزایش وزن را بهبود بخشید. این اختلاف ممکن است به دلیل تنوع در دسترس بودن منیزیم در آب محیط پرورش باشد. به عنوان مثال، گزارش شده است که افزودن منیزیم به آب تا ۱۳۰ ppm بقای میگوی *P. vannamei* را بهبود می‌بخشد (۲۷). اخیراً اهمیت تاثیر منیزیم جیره در میگوی *P. monodon* مورد بررسی قرار گرفته بود (۱۳۰). در بررسی انجام شده گنجاندن ۰/۷ درصد منیزیم (به صورت اکسید منیزیم) برای بهبود کارایی خوراک و افزایش ترکیب بدن منیزیم پیشنهاد شده بود. منیزیم بعنوان یک نیاز برای تولید مثل در نظر گرفته می‌شود زیرا سطوح آن در ماهیچه‌ها و هپاتوپانکراس در میگوهای تخمریزی کرده کاهش می‌یابد و در تخمدان‌ها در طول بلوغ افزایش منیزیم رخ می‌دهد. پودر ماهی می‌تواند منبع ضعیفی از منیزیم (۰/۰۵ تا ۰/۳ درصد) در مقایسه با سایر مواد تشکیل دهنده باشد (به عنوان مثال، کنجاله سویا حاوی ۰/۲ تا ۰/٤ درصد منیزیم است) و بنابراین رژیم‌های غذایی آزمایشی با نسبت

بالایی از پودر ماهی می‌تواند به طور بالقوه برای میگو دارای کمبود منیزیم باشد (۱۳۱).

سدیم و کلر

این مواد معدنی هر دو عنصر ضروری هستند. آنها با هم نمک معمولی را تشکیل می‌دهند که ارزان‌ترین، خوش طعم‌ترین و آزادترین مکمل معدنی مورد استفاده در حیوانات خشکی‌زی و انسان هستند (۱۳۳). سدیم (Na) و کلر (Cl) اغلب با پتاسیم به دلیل نقش اساسی آنها در تعادل اسید–باز و تنظیم اسمزی شناخته می‌شوند. با این حال، بر خلاف پتاسیم، مشخص کردن نیازهای غذایی Na و Cl در ماهیان و سخت‌پوستان دشوار است (۵۸). این مواد معدنی به طور معمول در آب و مواد غذایی دریایی به وفور یافت می‌شوند و بنابراین کمبود متابولیک به ندرت مشاهده شده است. در ماهیان افزودن سدیم و کلر به جیره در هنگام پرورش در آب شیرین موثر بوده است. نیازهای NaCl رژیم غذایی خارماهی سرخ *Sciaenops ocellatus* هنگامی که در آب شیرین پرورش می‌یابد نشان داد که افزودن میزان نمک تا ۲٪ به جیره‌ها منجر به افزایش رشد می‌گردد (٤۲). اما هیچ افزایش رشدی در آب شور (شوری ٦ درصد) یا آب دریا (شوری ۳۵ درصد) مشاهده نشد. نتایج مشابهی در افزایش رشد و بهبود راندمان تبدیل خوراک با افزودن ۳ و ٤ درصد نمک به ترتیب در جیره غذایی ماهی باس اروپایی (*Dicentrarchus labrax*) و باس آسیایی (*Lates calcarifer*) گزارش شده است (۳۵، ۵۳). در مورد میگو، تحقیقات کمی در مورد نیازهای Na و Cl انجام شده است. مکمل‌های غذایی با افزودن نمک طعام به میزان ۱٪ و ۲٪ باعث افزایش وزن میگوی *P. vannamei* در هنگام پرورش در آب با شوری ٤ ppt نشد (۱۰۹). در حالی که اثر سدیم و کلر در جیره‌ها نشان داده نشده است، مهم است که اذعان کنیم که NaCl بیشترین اسمولیت اضافه شده به آب است (۳۸، ۹۳).

مس

مس (Cu) برای فعال شدن تعداد زیادی آنزیم مربوط به تولید مثل، رشد استخوان، رشد، توسعه بافت همبند و رنگدانه‌های پوست ضروری است. در ماهیان مکمل غذایی مس در تمام گونه‌های ارزیابی شده مورد نیاز است و از ۱/۵ تا ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است (۵، ۵۸). فعل و انفعالات بین مس و سایر مواد معدنی مشهود می‌باشد. در ماهیان، فعل و انفعالات بین مس و سلنیوم گزارش شده است که در آن گنجاندن مس در رژیم غذایی با تجمع سلنیوم در کبد ماهی آزاد اقیانوس اطلس رابطه معکوس داشت (۸۱). در سخت‌پوستان، مس یک ماده معدنی کمیاب است که نقش مهمی ایفا می‌کند، زیرا عنصر حامل اکسیژن در همولنف است که به هموسیانین معروف است. هموسیانین ٤۰ درصد ذخایر مس را در میگو تشکیل می‌دهد. بنابراین، میگو و سایر سخت‌پوستان نسبت به دیگر گونه‌ها نیاز نسبتاً بالایی به مس دارند (شکل ۳). مس در رژیم غذایی (به صورت سولفات مس) برای خرچنگ چینی (Chinese mitten crab) مورد نیاز است و محدوده بهینه آن بین ۲۰/۸ تا ٤۰/۳ میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد که رشد و پاسخ ایمنی را تنظیم می‌کند. نیاز به مس در چهار گونه میگوی *P. vannamei*، *P. monodon*، *Penaeus orientalis* و *Penaeus chinensis* مشاهده شده است، اما برای میگوی *P. japonicus* حذف مس از پرمیکس معدنی هیچ تاثیری بر افزایش وزن ایجاد نکرد. بر اساس یک مدل رگرسیونی که سطوح گنجاندن درجه‌بندی شده مس (به صورت سولفات مس) و افزایش وزن را مورد ارزیابی قرار داد، نیاز به مس میگوی سفید غربی ۳۲ تا ۳٤ گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. به طور مشابه، مدلسازی افزایش وزن و راندمان خوراک در میگوی *P. monodon* نیاز بهینه مس جیره (به بصورت کلرید مس) را ۱۵–۲۱ میلی گرم بر کیلوگرم نشان داد. بالاترین نیاز غذایی به مس در میگوی *P. orientalis* ، ۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم (به صورت سولفات مس) برآورد شده است هرچند این نیاز تا ۷۸ میلی گرم بر کیلوگرم برای دستیابی به رشد مطلوب گزارش شده است. با این حال، میزان ۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس بر اساس کاهش غلظت آن در هپاتوپانکراس در رژیم‌های غذایی با غلظت بیشتر از این مقدار به احتمال زیاد کافی می‌باشد. اثر مثبت مکمل مس بر رشد سخت‌پوستان نشان می‌دهد که نیاز مس را نمی‌توان با آب دریا تامین کرد و بنابراین نیاز به منابع غذایی

دارد. با این حال، جذب مس در جیره‌ها معمولاً به دلیل آنتاگونیست‌های موجود در خوراک مانند فیتات ضعیف است که با مس به راحتی کمپلکس‌های نامحلول را تشکیل می‌دهد (۵۸، ۱۳۱). اثرات کمبود مس در رژیم غذایی و همچنین اثرات مسمومیت ناشی از غلظت بیش از حد آن، بخوبی ثبت و گزارش شده است (۵۸). افزایش مس در جیره‌های غذایی (بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) یا در آب (۰/۹ میلی‌گرم در لیتر) اثرات سمی ایجاد می‌کند که منجر به اختلال در رشد میگو می‌شود (۱۹، ۷۳).

آهن، منگنز، سلنیوم و روی

نقش اصلی آهن به عنوان یکی از اجزای هموگلوبین می‌باشد و همچنین در ساختمان ATP در اکسیداسیون نقش دارد. هموگلوبین ماده رنگی انتقال دهنده اکسیژن می‌باشد که کمبود آهن و موجب کم خونی و کاهش کارآیی حمل اکسیژن در بدن را به دنبال دارد. آهن برای عملکرد طبیعی بسیاری از سیستم‌های آنزیمی (سیتوکروم-ها، کاتالازها و پراکسیدازها) مورد نیاز است. مهره‌داران از آهن به عنوان عنصر اصلی در فرآیندهای تنفسی استفاده می‌کنند که حامل اکسیژن در گلبول‌های قرمز، هموگلوبین و میوگلوبین است. آهن در منابع حیوانی بیشتر از مواد گیاهی موجود است. در حیوانات، بیشتر آهن به صورت هِم وجود دارد که به راحتی هضم می‌شود. در مقابل، در گیاهان، در دسترس بودن آهن با حضور فیتات کاهش می-یابد که منجر به تشکیل فسفات آهن نامحلول می‌شود. نیاز به آهن در رژیم غذایی همه گونه‌های ماهی مورد بررسی، از جمله گربه ماهی کانالی، ماهی کپور معمولی، ماهی قرمز دریایی و تیلاپیا هیبرید قرمز، بین ۳۰ تا ۱۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. خوراک منبع اصلی آهن برای ماهی است زیرا در غلظت‌های بسیار کم در آب وجود دارد (۴۳، ۱۲۱). آهن یک عنصر ضروری برای سخت‌پوستان قلمداد می‌شود به طور فعال در همولنف خرچنگ‌ها منتقل و متابولیزه می‌شود. طبق نتایج مطالعه Davis و همکاران (۱۹۹۲b) غلظت آهن در جیره پایه به میزان ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم میگوی *P. vannamei* رضایت بخش بود (۳۰) در حالی که در مطالعه Kanazawa و همکاران (۱۹۸۴) گنجاندن آهن بالاتر از ۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم اثر سمی بر میگوی *P. japonicus* داشت (۶۱). در تحقیق انجام شده توسط Zhang و همکاران (۲۰۰۷) حذف آهن از پرمیکس معدنی باعث کاهش غلظت هپاتوپانکراس در میگوی *P. vannamei* شد اما تأثیری بر افزایش وزن نداشت. به طور مشابه، در میگوی *P. japonicus* حذف آهن از پرمیکس معدنی بر افزایش وزن تاثیر نشان نداد (۳۲). تا کنون نیازمندی آهن در میگوی *P. monodon* ارزیابی نشده است. ممکن است نیاز به استفاده از مکمل آهن در طول دوره تولیدمثل وجود داشته باشد. با توجه به افزایش غلظت آهن در تخمدان‌های میگوهای بالغ (۸۷) و همچنین کاهش غلظت آهن در هپاتوپانکراس میگوهای ماده تازه تخمریزی کرده در مقایسه با میگوهای وحشی صید شده، به نظر می‌رسد عنصر آهن در زمان بلوغ تخمدان‌ها در میگوی *P. vannamei* حائز اهمیت باشد (۸۶). علاوه براین میگوهای ماده نسبت به نرها غلظت آهن بیشتری دارند (۹۲). منگنز به عنوان یک فعال کننده، یکی از اجزاء و کوفاکتور چندین سیستم آنزیمی، به ویژه آنهایی که در چرخه اسید سیتریک هستند، عمل می‌کند. سلنیوم برای فعالیت آنزیم گلوتاتیون پراکسیداز ضروری است و به همراه ویتامین E در جهت محافظت در برابر آسیب اکسیداتیو بافت‌ها و غشاهای سلولی عمل می‌کند. در پستانداران، سلنیوم جیره در مقادیر بسیار کم مورد نیاز است و بدون توجه به منبع آن به راحتی جذب می‌شود (۸۲). با این حال، ناکافی بودن سلنیوم می‌تواند باعث ضعیف شدن یا غیر طبیعی شدن غشاهای عضلانی و عروقی شود. روی (Zn) یک جزء ضروری برای بسیاری از متالوآنزیم‌ها و یک کوفاکتور در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی است. روی عمدتاً با متابولیسم لیپید، پروتئین و کربوهیدرات درگیر است. زمانی که از منابع گیاهی در جیره استفاده می‌شود، به دلیل وجود فیتاز که در دسترس بودن عنصر را کاهش می‌دهد ممکن است نیاز به روی بیشتر باشد. در ماهیان مکمل‌های غذایی منگنز (Mn)، سلنیوم (Se) و روی (Zn) در همه گونه‌ها مورد نیاز است (۵، ۵۸). ماهی‌ها نمی‌توانند مقدار کافی از این عناصر را از آب دریا به دست آورند زیرا غلظت آنها بسیار کم است

(منگنز: ۲ میکروگرم در لیتر؛ سلنیوم: ٤ میکروگرم در لیتر و روی ۱۰ میکروگرم در لیتر؛ ۱۳). متوسط نیازهای غذایی این عناصر در بین گونه‌های مختلف ۸/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم منگنز، ۰/۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم سلنیوم و ۳۷/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی است. کمبود این مواد معدنی به دلیل نقش زیاد آنها در متابولیسم مواد مغذی، رشد را مختل کرده و باعث ناهنجاری‌های اسکلتی و مرگ و میر جنین می‌شود (۷۱). علاوه بر این، منگنز، سلنیوم و روی همگی در پاسخ ایمنی و مقاومت به بیماری نقش دارند. در ماهیان، مکمل‌های سلنیوم و روی منجر به بهبود سیستم ایمنی و وضعیت اکسیداتیو در قزل‌آلای رنگین‌کمان *Orconchinhus mykiss* (۱۰۲) و مکمل‌های منگنز و سلنیوم باعث افزایش مقاومت به بیماری باکتریایی کلیوی در ماهی *Orcorhynchus nerka* شد (۱۰). در سخت-پوستان منگنز، سلنیوم و روی همگی ضروری در نظر گرفته می‌شوند. نیازهای غذایی برای منگنز، سلنیوم و روی در گونه‌های *P. vannamei* و *P. monodon* بررسی شده است، در حالی که فقط داده‌های منگنز برای میگوی *P. japonicus* در دسترس می‌باشد (شکل ٤). در میگوی *P. vannamei* حذف منگنز، سلنیوم و روی از پرمیکس معدنی منجر به غلظت کمتر ماده معدنی مربوطه در هپاتوپانکراس شد (۳۰). با این حال، پرمیکس مورد استفاده در این آزمایش دارای غلظت منگنز به میزان ۲۵۱/٦ میلی گرم بر کیلوگرم بود که بسیار بیشتر از مقدار مورد نیاز برای دیگر گونه‌ها بود. نتایج حاصل از گنجاندن سلنیوم در جیره غذایی (به صورت سلنیت سدیم) به میزان ۰/۲ تا ۰/٤ میلی‌گرم بر کیلوگرم نشان داد که باعث حاصل شدن وزن بهینه می‌گردد (۲٦). تامین سطوح کافی سلنیوم از طریق جیره بسیار مهم است، زیرا مقادیر کم سلنیوم در رژیم غذایی (۰/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) منجر به کاهش رشد و ظرفیت آنتی اکسیدانی هپاتوپانکراس می‌شود. با این حال، در سطوح بالاتر از۰/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، رشد بهبود یافت اما علائم سمیت در هپاتوپانکراس گزارش شده است. گنجاندن روی به میزان ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (به صورت کربنات روی) بر اساس غلظت آن در هپاتوپانکراس توصیه می‌شود (۳۱). همچنین نشان داده شده است که روی برای رشد تخمدان‌ها در مولدین مورد نیاز است (۸۷). دو مطالعه انجام شده توسط Truong و همکاران (۲۰۲۰) و Shiau و Jiang (۲۰۰٦) نیازهای منگنز، سلنیوم و روی را در میگوی *P. monodon* بررسی کرده‌اند. مطالعه اول (۳۳) نیاز هر عنصر را بر اساس غلظت‌های منفرد هر عنصر مشخص کرد. در مطالعه دوم (۱۱۹) هفت غلظت روی مورد ارزیابی قرار گرفت تا مشخص شود که مکمل ۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی در جیره‌ها (به صورت سولفات روی) میزان رشد، ترکیب روی کل بدن و پاسخ ایمنی غیراختصاصی را در میگوهای پرورش یافته در آب با شوری کمتر (۱۹ تا ۲۱ ppt) را بهبود می‌بخشد. نیاز به منگنز در میگوی *P. japonicas* تایید نشده است، زیرا حذف آن از پرمیکس معدنی استفاده شده در رژیم غذایی بر عملکرد رشد تاثیری نداشت (٦۱).

سایر مواد معدنی کمیاب

فقط ۹ ماده معدنی مورد بحث در بخش‌های قبلی این بررسی، الزامات مستندی برای میگوهای پنائیده دارند. به مرور زمان ممکن است نشان داده شود که سایر مواد معدنی هم ضروری هستند، اما برای درک نقش آنها نیاز به انجام تحقیقات متمرکز می‌باشد. مواد معدنی کمیاب و نیاز به آنها در تغذیه و نقش آنها در فیزیولوژی همچنان یک زمینه مورد علاقه جهت بررسی است. تحقیق در مورد نقش مواد معدنی به دلیل غلظت‌های دقیق مورد نیاز و محدودیت‌های موجود در دقت روش‌های تحلیلی دشوار است. به این دلایل، تعیین ماهیت این مواد معدنی دشوار می‌باشد. برای گونه‌های زمینی، در مورد ضروری بودن مواد معدنی کمیاب بور، کبالت، مس، ید، آهن، منگنز، مولیبدن، سیلیکون، سلنیوم و روی اطمینان وجود دارد (۸۲). وانادیوم نیز ممکن است ضروری باشد (۵۲). بور در بسیاری از گونه‌ها از جمله انسان، موش، طیور و ماهی ضروری است و نقش تنظیم کننده‌ای در متابولیسم مواد معدنی در استخوان دارد (۸۹). ارزیابی ضروری بودن بور در میگو شواهد اولیه‌ای را برای نیاز غذایی آن ارائه کرد (۱۳۲). در ماهیان اطلاعات در مورد نیازها و نقش بیوشیمیایی مواد معدنی کمیاب محدود است (۷۰، ۱۳٦).

این احتمال وجود دارد که هم ماهی‌ها و هم سخت‌پوستان به مواد معدنی مورد نیاز حیوانات خشکی‌زی نیاز داشته باشند. با این حال، وجود مواد معدنی کمیاب در محیط آبی، شناسایی کمبود این مواد معدنی را دشوار می‌کند. علاوه بر این، گنجاندن مواد غنی از مواد معدنی مانند پودر ماهی در رژیم غذایی احتمالاً نیازها را برآورده می‌کند. در سخت‌پوستان مطالعات کمی در مورد مکمل‌های غذایی حاوی عناصر کمیاب انجام شده است. بیش از ۷۵ ماده معدنی کمیاب را می‌توان در میگو تشخیص داد، با این حال نقش این عناصر نامشخص است (۱۳۲). نشان داده شده است که کروم بر هموستازی گلوکز تأثیر می‌گذارد و بیان ژن‌های دخیل در مسیرهای سیگنال‌دهی انسولین و متابولیسم گلوکز در *P. vannamei* زمانی که با رژیم‌های غذایی حاوی کروم تغذیه شدند، کاهش یافت (۱۱۷). کروم همچنین ممکن است برای اتصال عرضی (cross-linking) کیتوزان در پوسته سخت‌پوستان مهم باشد (۶۹، ۱۰۶). کبالت در کوبالامین (ویتامین B-12) یافت می‌شود و مکمل این ویتامین عملکرد رشد را در میگوی *P. monodon* بهبود می‌بخشد (۲۴، ۱۲۰). علاوه بر این، کبالت ممکن است در سیناپس‌های الکترونیکی موجود در مغز سخت‌پوستان نقش داشته باشد (۴۷، ۱۲۵). مانند این نمونه‌ها، بسیاری از مواد معدنی کمیاب دیگر در فرآیندهای متابولیکی دخیل هستند و باید در میگوی پنائیده بررسی شوند. الزامات برای مواد معدنی کمیاب با نیازهای کم احتمالاً توسط مواد غذایی رایج مورد استفاده در آبزیان برآورده می‌شود. با این حال، این نباید مانع از انجام تحقیقات بیشتر شود، زیرا کمبود مواد معدنی ممکن است با دور شدن صنعت از رژیم‌های غذایی مبتنی بر پودر ماهی و برای عملیات در آب‌های دارای کمبود معدنی ظاهر شود.

خلاصه نیازمندی‌های مواد معدنی در میگوهای پرورشی

جدول ۱ سطوح توصیه شده مواد معدنی غذایی برای سه گونه مهم میگوی پنائیده در آبزی‌پروری (*P. vannamei*، *P. monodon* و *P. japonicas*) را بر اساس اطلاعات مورد بحث در این تحقیق خلاصه می‌کند. اطلاعات ارائه شده در جدول می‌تواند راهنمایی جهت تنظیم رژیم غذایی برای متخصصان تغذیه آبزی پروری باشد. همچنین جهت دادن به تحقیقات آینده برای پر کردن شکاف‌های دانش ما در مورد تغذیه میگوهای پنائیده فراهم خواهد کرد.

جدول ۱- خلاصه سطوح مواد معدنی رژیم غذایی توصیه شده برای گونه‌های مختلف پنائیده

عنصر معدنی	میگوی سفید غربی (*Penaeus vannamei*)	میگوی ببری سیاه (*Penaeus monodon*)	میگوی ژاپنی (*Penaeus japonicus*)
عناصر درشت مغذی (٪)			
کلسیم (Ca)	مورد نیاز نیست	مورد نیاز نیست	مورد نیاز نیست
فسفر (P)	۱ تا ۲	۰/۷۴	۱ تا ۲
نسبت کلسیم به فسفر	≤ ۱	≤ ۱	≤ ۱
پتاسیم (K)	مورد نیاز نیست	≤ ۱	۰/۹
منیزیم (Mg)	۰/۲۶ تا ۰/۳۵	مورد نیاز اما مقدار نامشخص	۰/۱ تا ۰/۵
عناصر ریز مغذی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)			
مس (Cu)	۳۲ تا ۳۴	۱۵ تا ۲۱	مورد نیاز نیست
آهن (Fe)	مورد نیاز اما مقدار نامشخص	ارزیابی نشده	مورد نیاز نیست
منگنز (Mn)	مورد نیاز اما مقدار نامشخص	مورد نیاز اما مقدار نامشخص	مورد نیاز نیست
سلنیوم (Se)	۰/۲ تا ۰/۶	مورد نیاز اما مقدار نامشخص	ارزیابی نشده
روی (Zn)	۳۲	۳۲ تا ۳۴	ارزیابی نشده

اهمیت مواد معدنی در پرورش متراکم میگو

سامانه‌های تولید می‌توانند با تنش‌هایی مواجه شوند که احتمال کمبود مواد معدنی را افزایش می‌دهد. افزایش تولید از طریق افزایش ذخیره‌سازی و میزان تراک احتمالاً بیشترین چالش‌ها را به همراه خواهد داشت. متراکم‌سازی منجر به تراکم و زیست توده بالا و همچنین رشد سریعتر و افزایش دفعات پوست‌اندازی می‌شود. به عنوان مثال، تراکم ذخیره‌سازی بر غلظت مواد معدنی کمیاب هپاتوپانکراس و غلظت مواد معدنی درشت در اسکلت بیرونی و ماهیچه میگوی *P. californiensis* تأثیر می‌گذارد (۸۵). این تغییرات به تفاوت در محتوای مواد معدنی مصرف شده از طریق خوراک و رسوب نسبت داده شده است و ممکن است به افزایش رقابت تغذیه در تراکم ذخیره‌سازی بیشتر از ۸ قطعه میگو در مقایسه با چهار قطعه میگو در متر مربع مربوط شود. در شرایط تجاری، Boyd و همکاران (۲۰۱۷) سامانه‌های تولید را به جهت کاربرد مواد معدنی بین تایلند و ویتنام مقایسه کردند (۱٤). در تایلند، تولید ۱ میلیون تن میگوی *P. vannamei* به ۰/۵۸ هکتار زمین و ٥٤۰۰ متر مکعب آب نیاز داشت، در حالی که در ویتنام،۱/۷٦ هکتار زمین و ۱۵۱۰۰ متر مکعب آب مورد نیاز بود. در هر دو، مواد معدنی جهت حفظ شیمی آب بصورت مناسب اضافه شده بود. در تایلند که میزان تراکم میگوی بالاتری داشت، طبق ارزیابی صورت گرفته نیمی از ۳۹ مزرعه از مواد معدنی مختلف متشکل از ترکیبات کلرید کلسیم، سولفات کلسیم، کلرید منیزیم، سولفات منیزیم، کلرید پتاسیم، سولفات پتاسیم، کلرید سدیم و کربنات سدیم را در استخرها استفاده کرده بودند. اما مزارع ویتنام که تولید میگوی نسبتاً کمتری داشتند، تنها شش مزرعه از ٥٤ مزرعه ارزیابی شده از مخلوط معدنی (حاوی نمک‌های کلسیم، منیزیم و پتاسیم) استفاده می‌کردند. این مطالعه به نیاز بیشتر به استفاده از مکمل‌های معدنی در سامانه‌های تولید متراکم اشاره دارد. سامانه‌های بیوفلوک با داشتن تبادل آب کم مشخص می‌شوند که به طور قابل توجهی با سامانه‌های سنتی در تضاد است. تاکید سامانه‌های بیوفلوک بر حفظ کیفیت آب از طریق مدیریت جوامع میکروبی در سامانه تولید به جای تبادل آب است. با این حال، کاهش تبادل آب به این معنی است که باید توجه زیادی به حفظ ترکیب شیمیایی آب از جمله تامین مواد معدنی شود. این معمولاً شامل کاربرد معمول مواد معدنی برای حفظ بیوفلوک و اصلاح شیمی آب است (۳٤، ٦٤–٦۷). روش‌های انتقال خوراکی مواد معدنی از طریق رژیم‌های غذایی و خوراک طبیعی منبع مهمی از مواد معدنی در سامانه بیوفلوک را فراهم می‌کند. مشخصات معدنی آب (به عنوان مثال، نسبت K:Mg:Ca) باید به طور معمول تحت نظارت و مدیریت قرار گیرد، به ویژه در دوره‌های با شوری کم یا زیست توده بالا، جایی که احتمالاً برای اصلاح سطوح پایین یا عدم تعادل مواد معدنی نیاز به مکمل است. وجود تجمعات میکروبی (بیوفلوک) و سایر منابع طبیعی خوراک احتمالاً بر در دسترس بودن مواد معدنی در سامانه تأثیر می‌گذارد. با این حال، مطالعات در مورد مکمل‌های معدنی و نیازهای میگو در چنین سامانه‌هایی تا حدی به دلیل دشواری مدیریت ورودی‌های معدنی و اثر متقابل بر استفاده از مواد معدنی محدود شده است. مطالعه انجام شده توسط Castille و Lawrence (۱۹۸۹) ممکن است برخی از جهت گیری‌های کلیدی را ارائه دهد (۱۸). نویسندگان حذف مواد تشکیل دهنده از جیره‌های مکمل را در میگوهای *P. vannamei* که در حوضچه‌ها ذخیره شده بودند، ارزیابی کردند که در آن میگوها اجازه دسترسی به غذاهای طبیعی در حال توسعه در محیط خود را داشتند. جالب توجه است که حذف پرمیکس معدنی تأثیر منفی بر رشد میگوهای جوان ذخیره شده در تراکم‌های بالاتر (٤٥۰ گرم بر متر مربع) داشت، اما این نتیجه زمانی که میگوهای کوچکتر در تراکم‌های کمتر (۲٤۷ گرم در متر مربع) ذخیره شده بودند مشاهده نشد. این نتایج تایید می‌کنند که خوراک‌های طبیعی و آب پرورشی می‌توانند نیازهای مواد معدنی را برآورده کنند، اما کمبود مواد معدنی بیشتر در زمانی رخ می‌دهد که تراکم ذخیره‌سازی به میزان زیادی از عرضه غذای طبیعی استخر، مانند شرایط فوق متراکم، بیشتر شود. سامانه‌های تولید متراکم میگو با حداقل تبادل آب مانند بیوفلوک منجر به تخلیه برخی از مواد معدنی و تجمع برخی دیگر در آب در طول زمان می‌شوند.

نتیجه‌گیری کلی

در حالت کلی اطلاعات کمی در مورد نیاز آبزیان به مواد معدنی وجود دارد و آزمایشات کمی در مورد اندازه‌گیری میزان نیاز هر گونه به مواد معدنی مختلف انجام شده است. انجام آزمایش در این زمینه مشکل می‌باشد به علت اینکه خارج کردن کلیه مواد معدنی از مواد غذایی مشکل است و بعضی مواقع در بافت بدن ماهی ذخایر مواد معدنی وجود دارد که ممکن است بر نتایج اثر بگذارد. معمولاً در صنعت آبزیان استفاده از مواد معدنی با کمک مدل حیوانات تکامل یافته انجام می‌شود. این بررسی فقدان اطلاعات موجود را برای الزامات مواد معدنی مهم مانند آهن، منگنز، سلنیوم و روی و همچنین سایر مواد معدنی کمیاب که در ماهی‌ها و گونه‌های خشکی‌زی مهم هستند اما در حال حاضر در میگو مطالعه نشده است را شناسایی کرده است. حتی در مورد عنصر معدنی منیزیم، نیازمندی میگوی *P. monodon* هنوز تایید نشده است. دانش بیشتری برای نیازهای معدنی در مراحل مختلف زندگی، از جمله مراحل بحرانی پوست‌اندازی مورد نیاز است. با وجود تغییرات مشاهده شده در خاکستر و ترکیب مواد معدنی بین مراحل زندگی و نقش‌های شناخته شده‌ای که این عناصر در طول رشد و بلوغ ایفا می‌کنند، مطالعات کمی تأثیر بالقوه آنتوژنز را بر نیازهای معدنی در نظر گرفته‌اند. توسعه ژنومیک عملکردی، پروتئومیکس و رویکردهای متابولومیک، راه-های جدیدی را برای بررسی مسیرهای بیوشیمیایی که به مواد معدنی نیاز دارند، ارائه می‌دهد. اگرچه این امر مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی است، اما منجر به ایجاد روشی سریع‌تر و مستقیم‌تر برای تعیین نیازهای معدنی می‌شود، به‌ویژه برای بسیاری از عناصر کمیاب نادیده گرفته شده که ممکن است با استفاده از روش‌های دیگر امکان‌پذیر یا اقتصادی نباشد. فن‌آوری‌های پیشرفته جدید در کیلیت‌های معدنی و کپسوله‌سازی پتانسیل قابل‌توجهی برای بهبود انتقال و جذب این مواد مغذی، به طور بالقوه به روشی خاص یا هدفمند دارند. همه این عوامل باید تأثیر بالقوه ماتریس رژیم غذایی، از جمله اثرات متقابل بین مواد معدنی و سایر مواد غذایی را در نظر بگیرند.

منابع

1. Ahearn G., Mandal P., Mandal A. 2004. Mechanisms of heavy-metal sequestration and detoxification in crustaceans: a review. *Journal of Comparative Physiology B*, 174:439-452.

2. Allan G.L., Maguire G.B. 1992. Effects of pH and salinity on survival, growth and osmoregulation in *Penaeus monodon* Fabricius. *Aquaculture*, 107:33-47.

3. Andrews J.W., Murai T., Campbell C. 1973. Effects of dietary calcium and phosphorus on growth, food conversion, bone ash and hematocrit levels of catfish. *The Journal of Nutrition*, 103:766-771.

4. Anger K. 2003. Salinity as a key parameter in the larval biology of decapod crustaceans. *Invertebrate Reproduction and Development*, 43: 29-45.

5. Antony Jesu Prabhu P., Schrama J.W., Kaushik S.J. 2016. Mineral requirements of fish: a systematic review. *Reviews in Aquaculture*, 8:172-219.

6. Aoyagi S., Baker D.H. 1994. Copper-amino acid complexes are partially protected against inhibitory effects of L-cysteine and L-ascorbic acid on copper absorption in chicks. *The Journal of Nutrition*, 124:388-395.

7. Ashmead H. 1992. The roles of amino acid chelates in animal nutrition: summary and conclusion. Noyes Publications, Park Ridge NJ (1992), 479 pp.

8. Baker D.H. 1986. Problems and pitfalls in animal experiments designed to establish dietary requirements for essential nutrients. *The Journal of Nutrition*, 116:2339-2349.

9. Bautista M., Baticados M. 1990. Dietary manipulation to control the chronic soft-shell syndrome in tiger prawn, *Penaeus monodon* Fabricius, The Second Asian Fisheries Forum. Proceedings of the Second Asian Fisheries Forum, 17-22 April 1989, Tokyo, Japan. *Asian Fisheries Society*, 1990:341-344.

10. Bell G., Higgs D., Traxler G. 1984. The effect of dietary ascorbate, zinc, and manganese on the development of experimentally induced bacterial kidney disease in sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Aquaculture*, 36:293-311.

11. Boonchuen P., Jaree P., Tassanakajon A., Somboonwiwat K. 2018. Hemocyanin of *Litopenaeus vannamei* agglutinates *Vibrio parahaemolyticus* AHPND (VPAHPND) and

22. Cheng K.M., Hu C.Q., Liu Y.N., Zheng S.X., Qi X.J. 2005. Dietary magnesium requirement and physiological responses of marine shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in low salinity water. Aquaculture Nutrition, 11: 385-393.

23. Codabaccus B.M., Carter C.G., Fitzgibbon Q.P., Trotter, A.J., Smith, G.G., 2020. Growth and biochemical composition of hatchery reared Scyllaridae lobster (*Thenus australiensis*) larval stages, nisto and juvenile first stage. *Aquaculture*, 524:735262.

24. Conklin D. 1989. Vitamin requirements of juvenile penaeid shrimp. *Advances in Tropical Aquaculture, Workshop at Tahiti, French Polynesia*, 20 Feb-4 Mar 1989.

25. Davis D., Arnold C. 1994. Estimation of apparent phosphorus availability from inorganic phosphorus sources for *Penaeus vannamei*. *Aquaculture*, 127:245-254.

26. Davis D.A. 1990. Dietary mineral requirements of *Penaeus vannamei*: evaluation of the essentiality for thirteen minerals and the requirements for calcium, phosphorus, copper, iron, zinc, and selenium. Texas A and M University. Libraries. Available electronically from https : / /hdl .handle .net /1969 .1 /DISSERTATIONS -1174753.

27. Davis D.A., Boyd C.E., Rouse D.B., Saoud, I.P. 2005. Effects of potassium, magnesium and age on growth and survival of *Litopenaeus vannamei* post- larvae reared in inland low salinity well waters in west Alabama. *Journal of the World Aquaculture Society*, 36:416-419.

28. Davis D.A., Gatlin III D.M., 1996. Dietary mineral requirements of fish and marine crustaceans. *Reviews in Fisheries Science*, 4:75-99.

29. Davis D.A., Lawrence A.L., Gatlin III D.M. 1992a. Evaluation of the dietary iron requirement of *Penaeus vannamei*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 23:15-22.

30. Davis D.A., Lawrence A.L., Gatlin III D.M. 1992b. Mineral requirements of *Penaeus vannamei*: a preliminary examination of the dietary essentiality for thirteen minerals. *Journal of the World Aquaculture Society*, 23:8-14.

31. Davis D.A., Lawrence A.L., Gatlin III D.M., 1993. Evaluation of the dietary zinc requirement of *Penaeus vannamei* and effects of phytic acid on zinc and phosphorus neutralizes its toxin. *Developmental and Comparative Immunology*, 84:371-381.

12. Boyd B. 2020. Typical Chemical Characteristics of Full-Strength Seawater. Global Aqua. Advocate.

13. Boyd C.E. 2019. Water quality: an introduction. Springer Nature.

14. Boyd C.E., McNevin A.A., Racine P., Tinh H.Q., Minh H.N., Viriyatum R., Paungkaew D., Engle C., 2017. Resource use assessment of shrimp, Litopenaeus vannamei and *Penaeus monodon*, production in Thailand and Vietnam. *Journal of the World Aquaculture Society*, 48:201-226.

15. Boyd C.E., Thunjai T. 2003. Concentrations of major ions in waters of inland shrimp farms in China, Ecuador, Thailand, and the United States. *Journal of the World Aquaculture Society*, 34:524-532.

16. Brannon A.C., Rao K.R. 1979. Barium, strontium and calcium levels in the exoskeleton, hepatopancreas and abdominal muscle of the grass shrimp, *Palaemonetes pugio*: relation to molting and exposure to barite. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 63:261-274.

17. Bursey C.R., Lane C.E. 1971. Ionic and protein concentration changes during the molt cycle of Penaeusduorarum. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 40:155-162.

18. Castille F., Lawrence A., 1989. The effect of deleting dietary constituents from pelleted feed on the growth of shrimp on the presence of natural food in ponds. *Journal of the World Aquaculture Society*, 20:22.

19. Chen J.C., Lin C.H. 2001. Toxicity of copper sulfate for survival, growth, molting and feeding of juveniles of the tiger shrimp, *Penaeus monodon*. Aquaculture, 192, 55-65.

20. Cheng J.H., Liao I.C. 1986. Effect of salinity on the osmotic and ionic concentrations in the hemolymph of *Penaeus monodon* and *P. penicillatus*, 1. Asian Fisheries Forum, Manila (Philippines), 26-31 May 1986.

21. Cheng K.M., Hu C.Q., Liu Y.N., Zheng S.X., Qi X.J. 2006. Effects of dietary calcium, phosphorus and calcium/phosphorus ratio on the growth and tissue mineralization of *Litopenaeus vannamei* reared in low-salinity water. *Aquaculture*, 251:472-483.

moulting in *Litopenaeus vannamei*. Scientific Reports, 7:1-15.

42. Gatlin D.M., MacKenzie D.S., Craig S.R., Neill W.H. 1992. Effects of dietary sodium chloride on red drum juveniles in waters of various salinities. *The Progressive Fish-Culturist*, 54:220-227.

43. Gatlin D.M., Wilson R.P. 1986. Characterization of iron deficiency and the dietary iron requirement of fingerling channel catfish. *Aquaculture*, 52: 191-198.

44. Georgievskii V., Annenkov B.N., Samokhin V. 2013. Mineral nutrition of animals: studies in the agricultural and food sciences. Elsevier, Georgievskii, V., Annenkov, B.N., Samokhin, V., 2013. Mineral nutrition of animals: studies in the agricultural and food sciences. Elsevier. Butterworth-Heinemann, 488 p.

45. Ghaffarizadeh A., Sotoudeh E., Mozanzadeh M.T., Sanati A.M., Ghasemi A. 2022. Supplementing dietary selenium nano-particles increased growth, antioxidant capacity and immune-related genes transcription in Pacific whiteleg shrimp (*Penaeus vannamei*) juveniles. *Aquaculture Reports*, 25:101215.

46. Ghaniem S., Nassef E., Zaineldin A.I., Bakr A., Hegazi S. 2022. A Comparison of the Beneficial Effects of Inorganic, Organic, and Elemental Nano-selenium on Nile Tilapia: Growth, Immunity, Oxidative Status, Gut Morphology, and Immune Gene Expression. *Biological Trace Element Research*, 200(12):5226-5241.

47. Glantz R.M., Kirk M.D. 1980. Intercellular dye migration and electrotonic coupling within neuronal networks of the crayfish brain. *Journal of Comparative Physiology*, 140:121-133.

48. Glencross B., Irvin S., Arnold S., Blyth D., Bourne N., Preston N. 2014. Effective use of microbial biomass products to facilitate the complete replacement of fishery resources in diets for the black tiger shrimp, *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 431:12-19.

49. Glynn J.P. 1968. Studies on the ionic, protein and phosphate changes associated with the moult cycle of Homarus vulgaris. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 26:937-946.

50. Gombart A.F., Pierre A., Maggini S. 2020. A review of micronutrients and the immune system–working in harmony to reduce the risk of infection. *Nutrients*, 12:236.

bioavailability. *Journal of the World Aquaculture Society*, 24:40-47.

32. Deshimaru O., Yone Y. 1978. Requirement of Prawn for Dietary Minerals. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 44:907-910.

33. Domínguez D., Rimoldi S., Robaina L.E., Torrecillas S., Terova G., Zamorano M.J., Karalazos V., Hamre K., Izquierdo M. 2017. Inorganic, organic, and encapsulated minerals in vegetable meal based diets for *Sparus aurata* (Linnaeus, 1758). *PeerJournal*, 5(12):e3710.

34. Emerenciano M.G., Rombenso A.N., Vieira, F.d.N., Martins, M.A., Coman, G.J., Truong, H.H., Noble, T.H., Simon, C.J., 2022. Intensification of Penaeid Shrimp Culture: An Applied Review of Advances in Production Systems, Nutrition and Breeding. *Animals*, 12: 236.

35. Eroldoğan O.T., Kumlu M., Kır M., Kiris G.A. 2005. Enhancement of growth and feed utilization of the European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed supplementary dietary salt in freshwater. *Aquaculture Research*, 36:361-369.

36. Frieden E. 1984. Biochemistry of the essential ultratrace elements. Springer Science and Business Media, 444 p.

37. Galkanda-Arachchige H.S., Hussain A.S., Davis D.A. 2021. Fermented corn protein concentrate to replace fishmeal in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Nutrition*, 27:1640-1649.

38. Galkanda-Arachchige H.S., Roy L.A., Davis D.A. 2020. Evaluation of an alternative salt mixture to culture Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in inland aquaculture. *Aquaculture Research*, 51:3540-3550.

39. Galkanda-Arachchige H.S., Roy L.A., Davis D.A. 2021. The effects of magnesium concentration in low- salinity water on growth of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Research*, 52:589-597.

40. Gao C., Yang J., Hao T., Li J., Sun J. 2021. Reconstruction of Litopenaeus vannamei Genome-Scale Metabolic Network Model and Nutritional Requirements Analysis of Different Shrimp Commercial Varieties. *Frontiers in Genetics*, 12:658109.

41. Gao Y., Wei J., Yuan J., Zhang X., Li F., Xiang J. 2017. Transcriptome analysis on the exoskeleton formation in early developmetal stages and reconstruction scenario in growth-

(Boone) fed plant protein based diets. *Aquaculture*, 459:117-123.

63. Khalil H.S., Maulu S., Verdegem M., Abdel-Tawwab M. 2023. Embracing nanotechnology for selenium application in aquafeeds. *Reviews in Aquaculture*, 15(1):112-129.

64. Khanjani M.H., Mozanzadeh M.T., Sharifinia M., Emerenciano M.G.C. 2023. Biofloc: A sustainable dietary supplement, nutritional value and functional properties. *Aquaculture*, 562:738757.

65. Khanjani M.H., Sharifinia M. 2020. Biofloc technology as a promising tool to improve aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*, 12:1836-1850.

66. Khanjani M.H., Sharifinia M. 2021. Production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* reared in a limited water exchange system: The effect of different light levels. *Aquaculture*, 542; 736912.

67. Khanjani M.H., Sharifinia M. 2022. Biofloc technology with addition molasses as carbon sources applied to *Litopenaeus vannamei* juvenile production under the effects of different C/N ratios. *Aquaculture International*, 30:383-397.

68. Koshio S., Davis D. 2011. Mineral requirements and current status of shrimp nutrition research. The Shrimp Book, pp: 485-490.

69. Lall S. 2002. The minerals: In: Halver, JE, Hardy, RW (Eds.), Fish Nutrition (pp. 259-308). Academic Press. San Diego, California.

70. Lall S., Milley J. 2008. Trace mineral requirements of fish and crustaceans. Trace Elements in Animal Production Systems, 203.

71. Lall S.P. 2022. The minerals, Fish nutrition. Elsevier, pp. 469-554.

72. Laramore S., Laramore C.R., Scarpa J., 2001. Effect of low salinity on growth and survival of postlarvae and juvenile *Litopenaeus vannamei*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 32:385-392.

73. Lee M.H., Shiau S.Y. 2002. Dietary copper requirement of juvenile grass shrimp, Penaeus monodon, and effects on non-specific immune responses. *Fish and Shellfish Immunology*, 13:259-270.

74. Lemos D., Coelho R., Zwart S., Tacon A.G. 2021. Performance and digestibility of inorganic phosphates in diets for juvenile

51. Greenaway P. 1993. Calcium and magnesium balance during molting in land crabs. *Journal of Crustacean Biology*, 13:191-197.

52. Gupta P., Vaswani S. 2020. Basic information about vanadium 'ultra-trace element or occasionally beneficial element'and its various functions in animals: A review article. *Journal of Entomology and Zoological Studies*, 8:645-653.

53. Harpaz S., Hakim Y., Slosman T., Eroldogan O.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*, 24:315-324.

54. Hertz Y., Madar Z., Hepher B., Gertler A., 1989. Glucose metabolism in the common carp (*Cyprinus carpio* L.): the effects of cobalt and chromium. *Aquaculture*, 76:255-267.

55. Hessen D.O., Alstad Rukke N. 2000. The costs of moulting in Daphnia; mineral regulation of carbon budgets. *Freshwater Biology*, 45:169-178.

56. Hou C., Wang F., Dong S., Zhu Y. 2011. The effects of different Ca2+ concentration fluctuation on the moulting, growth and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei* (Boone). *Aquaculture Research*, 42:1453-1459.

57. Hynd P. 2019. Animal nutrition: from theory to practice. Csiro Publishing.

58. Jobling M. 2012. National Research Council (NRC): Nutrient requirements of fish and shrimp. Springer.

59. John E.H., Ronald W.H. 2002. Fish nutrition. Academic Press, USA.

60. Ju Z.Y., Deng D.F., Dominy W. 2012. A defatted microalga (*Haematococcus pluvialis*) meal as a protein ingredient to partially replace fishmeal in diets of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*, Boone, 1931). *Aquaculture*, 354:50-55.

61. Kanazawa A., Teshima S., Sasaki M., 1984. Requirements of the Juvenile Prawn for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Potassium, Copper, Manganese, and Iron. *Journal of Fisheries Kagoshima University*, 33:63-71.

62. Katya K., Lee S., Yun H., Dagoberto S., Browdy C.L., Vazquez-Anon M., Bai S.C. 2016. Efficacy of inorganic and chelated trace minerals (Cu, Zn and Mn) premix sources in Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*

expression of related genes in gilthead seabream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 507:251-259.

85. Méndez L., Acosta B., Palacios E., Magallón F. 1997. Effect of stocking densities on trace metal concentration in three tissues of the brown shrimp *Penaeus californiensis*. *Aquaculture*, 156:21-34.

86. Méndez L., Acosta B., Racotta I. 1999. Mineral concentrations in muscle and hepatopancreas of newly caught wild and hatchery-exhausted spawners of pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Journal of Applied Aquaculture*, 8:17-26.

87. Méndez L., Racotta I., Acosta B., Rodríguez-Jaramillo C. 2001. Mineral concentration in tissues during ovarian development of the white shrimp *Penaeus vannamei* (Decapoda: Penaeidae). *Marine Biology*, 138:687-692.

88. Muralidhar M., Saraswathy R., Kumararaja P., Sukumaran S., Nagavel A., 2016. Application of minerals in shrimp culture systems. CIBA Extension Series, No. 52.

89. Naghii M., Samman S. 1993. The role of boron in nutrition and metabolism. *Progress in Food and Nutrition Science*, 17:331-349.

90. Nesapriyam P.J., Mathew R., Vidya A., Rajalekshmi M., Kaippilly, D., Geeji M. 2022. Mineral supplementation in low saline culture of Pacific white shrimp: Effects on growth and water quality. *Aquaculture Research*, 53:2501-2508.

91. Niu J., Liu Y.J., Tian L.X., Mai K.S., Yang H.J., Ye C.X., Gao W. 2008. Effect of dietary phosphorus sources and varying levels of supplemental phosphorus on survival, growth and body composition of postlarval shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Nutrition*, 14:472-479.

92. Paez-Osuna F., Ruiz-Fernandez C. 1995. Trace metals in the Mexican shrimp *Penaeus vannamei* from estuarine and marine environments. *Environmental Pollution*, 87:243-247.

93. Parmenter K., Bisesi J., Young S., Klaine S., Atwood H., Browdy C., Tomasso J. 2009. Culture of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* in a mixed-ion solution. *North American Journal of Aquaculture*, 71:134-137.

94. Partridge G., Lymbery A. 2008. The effect of salinity on the requirement for potassium by barramundi (*Lates calcarifer*) in saline groundwater. *Aquaculture*, 278:164-170.

shrimp (*Litopenaeus vannamei*): dicalcium phosphate, monocalcium phosphate, and monoammonium phosphate. *Aquaculture International*, 29:681-695.

75. Lemos D., Phan V.N. 2001. Ontogenetic variation in metabolism, biochemical composition and energy content during the early life stages of *Farfantepenaeus paulensis* (Crustacea: Decapoda: Penaeidae). *Marine Biology*, 138:985-997.

76. Lemos D., Weissman D. 2021. Moulting in the grow- out of farmed shrimp: a review. *Reviews in Aquaculture*, 13:5-17.

77. Li E., Chen L., Zeng C., Chen X., Yu N., Lai Q., Qin J.G. 2007. Growth, body composition, respiration and ambient ammonia nitrogen tolerance of the juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at different salinities. *Aquaculture*, 265:385-390.

78. Lightner D.V. 2021. Noninfectious Diseases of Crustacea with an Emphasis on Cultured Penaeid Shrimp, Pathobiology of Marine and Estuarine Organisms. CRC Press, pp. 343-358.

79. Lin S., Lin X., Yang Y., Li F., Luo L. 2013. Comparison of chelated zinc and zinc sulfate as zinc sources for growth and immune response of shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 406:79-84.

80. Lin Y.H., Chen Y.T. 2022. Lactobacillus spp. fermented soybean meal partially substitution to fish meal enhances innate immune responses and nutrient digestibility of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed diet with low fish meal. *Aquaculture*, 548:737634.

81. Lorentzen M., Maage A., Julshamn K., 1998. Supplementing copper to a fish meal based diet fed to Atlantic salmon parr affects liver copper and selenium concentrations. *Aquaculture Nutrition*, 4:67-72.

82. McDowell L.R. 2003. Minerals in animal and human nutrition. 2nd edition. Elsevier.

83. McNamara J.C., Faria S.C. 2012. Evolution of osmoregulatory patterns and gill ion transport mechanisms in the decapod Crustacea: a review. *Journal of Comparative Physiology B*, 182:997-1014.

84. Mechlaoui M., Dominguez D., Robaina L., Geraert P.-A., Kaushik S., Saleh R., Briens M., Montero D., Izquierdo M. 2019. Effects of different dietary selenium sources on growth performance, liver and muscle composition, antioxidant status, stress response and

and chitin quality of shrimp shells obtained from northern shrimp (*Pandalus borealis*). *Carbohydrate Polymers*, 71:388-393.

106. Rojas G., Silva J., Flores J.A., Rodriguez A., Ly M., Maldonado H., 2005. Adsorption of chromium onto cross-linked chitosan. *Separation and Purification Technology*, 44:31-36.

107. Romano N., Koh C.B., Ng W.K. 2015. Dietary microencapsulated organic acids blend enhances growth, phosphorus utilization, immune response, hepatopancreatic integrity and resistance against Vibrio harveyi in white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 435:228-236.

108. Romano N., Zeng C. 2012. Osmoregulation in decapod crustaceans: implications to aquaculture productivity, methods for potential improvement and interactions with elevated ammonia exposure. *Aquaculture*, 334:12-23.

109. Roy L., Davis D., Saoud I., Henry R., 2007a. Supplementation of potassium, magnesium and sodium chloride in practical diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low salinity waters. *Aquaculture Nutrition*, 13:104-113.

110. Roy L.A. 2006. Physiological and nutritional requirements for the culture of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* in low salinity waters. Auburn University.

111. Roy L.A., Davis D.A., Saoud I.P., Henry R.P. 2007b. Effects of varying levels of aqueous potassium and magnesium on survival, growth, and respiration of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low salinity waters. *Aquaculture*, 262:461-469.

112. Rupp U., Ziegler A. 2019. The effect of exuviae ingestion on lysosomal calcium accumulation and the presence of exosomes in the hepatopancreas of *Porcellio scaber*. *Journal of Structural Biology*, 208:107392.

113. Saffari S., Keyvanshokooh S., Zakeri M., Johari, S., Pasha- Zanoosi, H., 2017. Effects of different dietary selenium sources (sodium selenite, selenomethionine and nanoselenium) on growth performance, muscle composition, blood enzymes and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture Nutrition*, 23:611-617.

114. Sarac H., McMeniman N., Thaggard H., Gravel M., Tabrett S., Saunders J. 1994. Relationships between the weight and chemical

95. Peñaflorida V.D. 1999. Interaction between dietary levels of calcium and phosphorus on growth of juvenile shrimp, *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 172:281-289.

96. Piedad-Pascual F. 1989. Mineral requirement of penaeids, Advances in Tropical Aquaculture, Workshop at Tahiti, French Polynesia, 20 Feb-4 Mar 1989.

97. Prapaiwong N., Boyd C.E. 2012. Effects of major water quality variables on shrimp production in inland, low- salinity ponds in Alabama. *Journal of the World Aquaculture Society*, 43:349-361.

98. Qian D., Xu C., Chen C., Qin J.G., Chen L., Li E. 2020. Toxic effect of chronic waterborne copper exposure on growth, immunity, anti-oxidative capacity and gut microbiota of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fish and Shellfish Immunology*, 100: 445-455.

99. Qiu X., Davis D. 2017. Effects of dietary phytase supplementation on growth performance and apparent digestibility coefficients of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Nutrition*, 23:942-951.

100. Qiu X., Tian H., Davis D. 2018. Evaluation of a fish meal analogue as a replacement for fish meal in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Nutrition*, 24:979-990.

101. Qiu X., Tian H., Davis D.A. 2017. Evaluation of a high protein distiller's dried grains product as a protein source in practical diets for Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 480:1-10.

102. Rider S.A. 2009. The roles of organic and inorganic zinc and selenium sources in the nutrition and promotion of health in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Department of Biological Sciences, University of Plymouth Theses.

103. Robinson E.H., LaBomascus D., Brown P.B., Linton T.L. 1987. Dietary calcium and phosphorus requirements of *Oreochromis aureus* reared in calcium-free water. *Aquaculture*, 64:267-276.

104. Robinson E.H., Rawles S.D., Yette H.E., Greene L.W. 1984. An estimate of the dietary calcium requirement of fingerling *Tilapia aurea* reared in calcium-free water. *Aquaculture*, 41: 389-393.

105. Rødde R.H., Einbu A., Vårum K.M. 2008. A seasonal study of the chemical composition

124. Strausfeld N., Bassemir U. 1983. Cobalt-coupled neurons of a giant fibre system in Diptera. *Journal of Neurocytology*, 12:971-991.

125. Sun, S., Qin, J., Yu, N., Ge, X., Jiang, H., Chen, L., 2013. Effect of dietary copper on the growth performance, non-specific immunity and resistance to *Aeromonas hydrophila* of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*. *Fish and Shellfish Immunology*, 34:1195-1201.

126. Tacon A.G. 1992. Nutritional fish pathology: morphological signs of nutrient deficiency and toxicity in farmed fish. Food and Agriculture Org.

127. Tassanakajon A., Somboonwiwat K., Supungul P., Tang S. 2013. Discovery of immune molecules and their crucial functions in shrimp immunity. *Fish and Shellfish Immunology*, 34:954-967.

128. Tavabe K.R., Rafiee G., Frinsko M., Daniels H. 2013. Effects of different calcium and magnesium concentrations separately and in combination on *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) larviculture. *Aquaculture*, 412:160-166.

129. Travis D.F. 1955. The molting cycle of the spiny lobster, *Panulirus argus* Latreille. III. Physiological changes which occur in the blood and urine during the normal molting cycle. *The Biological Bulletin*, 109:484-503.

130. Truong H.H., Hines B.M., Emerenciano M.G., Blyth D., Berry S., Noble T.H., Bourne N.A., Wade N., Rombenso A.N., Simon C.J., 2022. Mineral nutrition in penaeid shrimp. *Reviews in Aquaculture*, 2023:1-19.

131. Truong H.H., Moss A.F., Bourne N.A., Simon C.J. 2020. Determining the Importance of Macro and Trace Dietary Minerals on Growth and Nutrient Retention in Juvenile *Penaeus monodon*. *Animals*, 10:2086.

132. Underwood E.J., Suttle N.F. 1999. The mineral nutrition of livestock. 4th Edition, CAB International, Cambridge, USA.

133. Vijayan K.a., Diwan A. 1996. Fluctuations in Ca, Mg and P levels in the hemolymph, muscle, midgut gland and exoskeleton during the moult cycle of the Indian white prawn, *Penaeus indicus* (Decapoda: Penaeidae). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 114:91-97.

134. Wang Y.C., Chang P.S., Chen H.Y. 2007. Tissue expressions of nine genes important to immune defence of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fish and shellfish Immunology*, 23:1161-1177.

composition of exuvia and whole body of the black tiger prawn, *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 119:249-258.

115. Selle P.H., Cowieson A.J., Ravindran V., 2009. Consequences of calcium interactions with phytate and phytase for poultry and pigs. *Livestock Science*, 124:126-141.

116. Shankar A.H., Prasad A.S. 1998. Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 68:447S-463S.

117. Shi B., Tao X., Betancor M.B., Lu J., Tocher D.R., Meng F., Figueiredo-Silva C., Zhou Q., Jiao L., Jin M. 2021a. Dietary chromium modulates glucose homeostasis and induces oxidative stress in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquatic Toxicology*, 240:105967.

118. Shi B., Yuan Y., Jin M., Betancor M.B., Tocher D.R., Jiao L., Song D., Zhou Q. 2021b. Transcriptomic and physiological analyses of hepatopancreas reveal the key metabolic changes in response to dietary copper level in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 532:736060.

119. Shiau S.Y., Jiang L.C. 2006. Dietary zinc requirements of grass shrimp, *Penaeus monodon*, and effects on immune responses. *Aquaculture*, 254:476-482.

120. Shiau S.Y., Lung C.Q. 1993. Estimation of the vitamin B12 requirement of the grass shrimp, *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 117:157-163.

121. Shiau S., Tseng H. 2007. Dietary calcium requirements of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus*× *O. aureus*, reared in fresh water. *Aquaculture Nutrition*, 13:298-303.

122. Simon, C., Salini, M., Irvin, S., Blyth, D., Bourne, N., Smullen, R., 2019. The effect of poultry protein concentrates and phosphorus supplementation on growth, digestibility and nutrient retention efficiency in barramundi *Lates calcarifer*. *Aquaculture*, 498:305-314.

123. Sritunyalucksana K., Intaraprasong A., Sanguanrut P., Filer K., Fegan D.F., 2011. Organic selenium supplementation promotes shrimp growth and disease resistance to Taura syndrome virus. *ScienceAsia*, 37:24-30.

Stevenson J. 1985. The Biology of Crustacea-integument, pigments and hormonal processes. The Quarterly Review of Biology, 61(2):1986.

135. Wood C.M., Farrell A.P., Brauner C.J. 2012. Homeostasis and toxicology of essential metals. Academic Press.

136. Wurts W.A., Durborow R.M. 1992. Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds.

137. Xie S., Wei D., Tian L., Liu Y. 2021. Dietary supplementation of chenodeoxycholic acid improved the growth performance, immune response and intestinal health of juvenile *Penaeus monodon* fed a low fish-meal diet. *Aquaculture Reports*, 20:100773.

138. Ye L., Jiang S., Zhu X., Yang Q., Wen W., Wu K. 2009. Effects of salinity on growth and energy budget of juvenile *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 290:140-144.

139. Yeh S.T., Liu C.H., Chen J.C. 2004. Effect of copper sulfate on the immune response and susceptibility to Vibrio alginolyticus in the white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fish and Shellfish Immunology*, 17:437-446.

140. Yuan Y., Jin, M., Xiong J., Zhou Q. 2019. Effects of dietary dosage forms of copper supplementation on growth, antioxidant capacity, innate immunity enzyme activities and gene expressions for juvenile Litopenaeus *vannamei*. *Fish and Shellfish Immunology*, 84:1059-1067.

141. Yúfera M., Kolkovski S., Fernández-Dıaz C., Dabrowski K. 2002. Free amino acid leaching from a protein-walled microencapsulated diet for fish larvae. *Aquaculture*, 214:273-287.

142. Zanotto F., Wheatly M. 2002. Calcium balance in crustaceans: nutritional aspects of physiological regulation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 133:645-660.

143. Zanotto F.P., Pinheiro F., Sá M.G. 2009. The importance of dietary calcium consumption in two species of semi-terrestrial grapsoid crabs. Iheringia *Série Zoologia*, 99:295-300.

144. Zhang Q., Li F., Wang B., Zhang J., Liu Y., Zhou Q., Xiang J. 2007. The mitochondrial manganese superoxide dismutase gene in Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis*: cloning, distribution and expression. *Developmental and Comparative Immunology*, 31:429-440.

145. Zhou Y., Zhang D., Peatman E., Rhodes M.A., Liu J., Davis D.A. 2017. Effects of various levels of dietary copper supplementation with copper sulfate and copper hydroxychloride on Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* performance and microbial communities. *Aquaculture*, 476:94-105.

146. Zhu C.B., Dong S.L., Wang F., Zhang H.H., 2006. Effects of seawater potassium concentration on the dietary potassium requirement of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 258:543-550.

The Importance of Minerals in the Nutrition of the Main Farming Species of the Shrimp Industry

Moslem Sharifinia*

Shrimp Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran

Abstract

The presence of minerals in aquatic food is necessary due to their vital role in physical activities. Shrimps of the Panaeid family are valuable aquatic animals that live widely in tropical and subtropical waters and account for more than half of the world's gross shrimp production. The purpose of the upcoming study is to investigate the knowledge and information available in the field of mineral nutrition in shrimps of the Panaideh family. Also, the present study will examine how the aquatic environment and the life cycle of shrimp affect the needs and role of minerals in the health of shrimp. In addition to the cases mentioned in this review, the methods of supplying minerals to shrimps through water or feed or the use of mineral supplements in the diet have been discussed. The results of various studies showed that the estimation of dietary requirements for most minerals in the main species of shrimp farming (*Penaeus vannamei*, *Penaeus monodon* and *Penaeus japonicus*) is wide and some essential minerals have not been studied. Moreover, currently there is no comprehensive and sufficient information on the requirements of important minerals such as iron, manganese, selenium and zinc as well as other rare minerals for predominant species of farmed shrimp and even in some cases there is no information at all. For example, the magnesium requirements of *P. monodon* have not yet been confirmed. In general, it can be concluded that more knowledge is needed to understand the mineral needs in different life stages of farmed shrimp, including the critical stages of molting.

Key words: Micronutrients, Minerals, Shrimp, Aquaculture, Intensive culture