



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

بهره‌برداری و پرورش آبزیان  
جلد نهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۹  
۱۰۵-۱۱۵

<http://japu.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/japu.2020.16576.1496

مقاله کامل علمی - ترویجی

## چرخه گوگرد و تولید سولفید هیدروژن در اکوسیستم‌های آبی با ناکید بر آبی‌پروری

رعنا دشت‌بین<sup>۱</sup>، \* نعمت‌الله محمودی<sup>۲</sup> و حسین بشارتی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه تکثیر و پرورش آبزیان، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران،  
<sup>۲</sup> استادیار گروه تکثیر و پرورش آبزیان، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران،  
<sup>۳</sup> استاد گروه میکروبیولوژی خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴

### چکیده

در این مقاله، چرخه گوگرد، اکولوژی و فیزیولوژی باکتری‌های احیاکننده سولفات، نحوه تولید و عوامل مؤثر بر تولید سولفید هیدروژن و در نهایت اثرات زیست‌محیطی آن بررسی شده است. چرخه گوگرد در اکوسیستم‌های آبی یک فرایند بیوژئوشیمی پیچیده است که شامل چهار مرحله معدنی شدن، آلی شدن، احیاء شدن و اکسید شدن می‌باشد. در اکوسیستم‌های آبی غنی از مواد آلی به‌ویژه استخرهای پرورش آبزیان نیمی از مواد آلی تحت شرایط بی‌هوازی توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات تجزیه می‌شوند و گاز سولفید هیدروژن به‌عنوان محصول جانبی طی این فرایند تولید می‌شود. افزایش غلظت سولفید هیدروژن (بیش از ۰/۰۰۲ میلی‌گرم در لیتر) در استخرهای پرورش آبزیان می‌تواند سبب مرگ و میر آبزی، کاهش رشد و تولیدمثل آن‌ها و بوی نامطبوع و هم‌چنین افزایش نرخ مصرف اکسیژن گردد. غلظت بسیار کم سولفید هیدروژن برای موجودات آبی بسیار سمی است و بنابراین باید از تولید آن جلوگیری شود. از طرف دیگر، تجزیه مواد آلی، مقدار مواد مغذی (به‌عنوان مثال نیتروژن و فسفر) را در آب افزایش می‌دهد در نتیجه سبب یوتروفی شدن اکوسیستم‌ها می‌شود. بنابراین، چرخه گوگرد در اکوسیستم‌های آبی هم دارای اثرات منفی و هم اثرات مثبت است.

**واژه‌های کلیدی:** اکوسیستم‌های آبی، آبی‌پروری، باکتری احیاکننده سولفات، چرخه گوگرد، سولفید هیدروژن

\* مسئول مکاتبه: mahmoudi.nemat@gmail.com

مقدمه

گوگرد یکی از مهم‌ترین عناصر فراوان روی کره زمین است که اساساً در صخره‌ها و رسوبات به شکل پیریت ( $FeS_2$ ) و گچ ( $CaSO_4$ ) و در آب دریا به صورت سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) وجود دارد (مایزر و استامز، ۲۰۰۸). علاوه بر این، گوگرد از لحاظ بیوشیمی نیز بسیار مهم است، به طوری که در اسیدهای آمینه سیستئین و متیونین و در ویتامین‌ها مثل تیامین، بیوتین و اسید لیپوئیک و همچنین در کوآنزیم A نقش ساختاری و عملکردی دارد (بهره و همکاران، ۲۰۱۴). چرخه گوگرد در رسوبات آبی شامل فرایندهای اکسایش و احیا است که در اکوسیستم‌های آب شیرین

کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است (هولمر و استورک‌هولم، ۲۰۰۱). چرخه گوگرد به دلیل تعداد فراوان حالت‌های اکسیداسیون از ۲- (کاملاً احیا شده) تا ۶+ (به طور کامل اکسید شده) و توانایی تغییر شکل گوگرد (S) به صورت زیستی و شیمیایی پیچیده است (مایزر و استامز، ۲۰۰۸؛ مادیگان و همکاران، ۲۰۱۲). حالت‌های معمول اکسیداسیون عنصر گوگرد در جدول ۱ نشان داده شده است (طباطبائی و همکاران، ۱۹۸۸) که تمام این ترکیبات محصول واسطه فرایند تجزیه هستند (دلینچه، ۲۰۱۳).

جدول ۱- حالت‌های اکسیداسیون ترکیبات مختلف گوگرد (طباطبائی و همکاران، ۱۹۸۸).

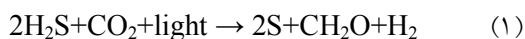
-۲	۰	+۲	+۴	+۶
H <sub>2</sub> S Hydrogen sulfide HS <sup>-</sup>	S Sulfur Elemental S <sub>8</sub> /S <sup>0</sup>	(SO) Sulfur monoxide	SO <sub>2</sub> Sulfur dioxide	SO <sub>3</sub> Sulfur trioxide
S(R-SH) Organic		H <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> Sulfoxylic acid	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> Sulfurous acid	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Sulfuric acid
		S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> Thiosulfate	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> Sulfite	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
		S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> Tetrathionate		

هم‌زمان با تخریب مواد آلی توسط این میکروارگانیسم‌ها این عناصر به حالت محلول تبدیل می‌شوند و دوباره به پیکره آب برمی‌گردند. بنابراین، چرخه گوگرد از یک طرف مواد آلی را تخریب می‌کند و منجر به تولید ترکیبات سمی هم‌چون سولفید هیدروژن می‌شود و از طرف دیگر باعث افزایش عناصر غذایی در آب می‌گردد. این اثرات مثبت و منفی باکتری‌های احیاکننده سولفات در مزارع

دو گروه از میکروارگانیسم‌ها (احیاکننده سولفات و اکسیدکننده گوگرد) نقش مهمی را در تغییر شکل گوگرد ایفا می‌کنند. میکروارگانیسم‌های احیاکننده سولفات تحت شرایط بی‌اکسیژنی برای تجزیه مواد آلی از سولفات به‌عنوان پایانه گیرنده الکترون استفاده می‌کنند که در نهایت منجر به تولید سولفید هیدروژن می‌شود (مایزر و استامز، ۲۰۰۸). با توجه به این‌که مواد آلی دارای مقدار زیادی نیتروژن و فسفر هستند

DSR سولفات به‌عنوان پایانه گیرنده الکترون برای تنفس بی‌هوازی احیا می‌شود (بهره و همکاران، ۲۰۱۴؛ مادیگان و همکاران، ۲۰۱۲).

**اکسیداسیون:** اکسیداسیون ترکیبات احیاشده گوگردی توسط دو گروه میکروارگانیسم باکتری‌های فتوتروفیک و کمولیتوتروفیک انجام می‌شود. اکسیداسیون فتوتروفیک سولفید فرایندی بی‌هوازی است که توسط باکتری گوگردی سبز<sup>۸</sup> مثل *Chlorobium* و باکتری گوگردی ارغوانی<sup>۹</sup> مانند *chromatium* انجام می‌شود (بهره و همکاران، ۲۰۱۴؛ گاش و دام، ۲۰۰۹). علاوه بر این، برخی از باکتری‌های غیرگوگردی ارغوانی نیز استراتژی متابولیکی مشابهی را دنبال می‌کنند (گاش و دام، ۲۰۰۹). این باکتری‌ها از سولفید هیدروژن ( $H_2S/HS^-$ )، عنصر گوگرد ( $S^0$ ) و گاهی تیوسولفات ( $S_2O_3^{2-}$ ) به‌عنوان دهنده الکترون برای احیای کربن دی‌اکسید ( $CO_2$ ) استفاده می‌کنند (رابطه ۱) (گاش و دام، ۲۰۰۹).



اکسیدکننده‌های کمولیتوتروفیک سولفید که به آن‌ها باکتری‌های گوگردی بی‌رنگ<sup>۱۰</sup> نیز گفته می‌شود، از ترکیبات معدنی گوگردی مثل سولفید هیدروژن، عنصر گوگرد، سولفیت ( $SO_3^{2-}$ ) و تیوسولفات و در بعضی موارد ترکیبات آلی گوگردی مانند متانتیول<sup>۱۱</sup>، دی‌متیل سولفید<sup>۱۲</sup> و دی‌متیل دی‌سولفید<sup>۱۳</sup> به‌عنوان دهنده الکترون و منبع انرژی برای رشد استفاده می‌کنند (بهره و همکاران، ۲۰۱۴؛ کریشنانی و همکاران، ۲۰۱۰؛

پرورش ماهی نیز صادق است. از این‌رو، یکی از مشکلات اصلی در استخرهای پرورش ماهیان تولید سولفید هیدروژن است. بنابراین، در این مقاله به بررسی چرخه زیستی گوگرد، اکولوژی و فیزیولوژی باکتری‌های احیاکننده سولفات، نحوه تولید و عوامل مؤثر بر تولید سولفید هیدروژن و در نهایت اثرات زیست‌محیطی چرخه گوگرد پرداخته شده است.

**چرخه گوگرد در اکوسیستم‌های آبی:** چرخه گوگرد شامل چهار مرحله معدنی شدن<sup>۱</sup>، آلی شدن<sup>۲</sup>، احیاشدن<sup>۳</sup> و اکسیدشدن<sup>۴</sup> می‌باشد (شکل ۱) (بهره و همکاران، ۲۰۱۴).

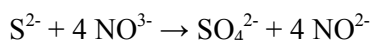
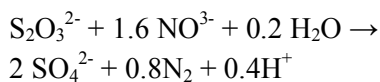
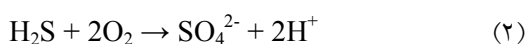
**معدنی شدن:** تجزیه ترکیبات آلی گوگردی، فرایندی که در آن مولکول‌های بزرگ به واحدهای کوچک‌تر شکسته شده و در نهایت به ترکیبات معدنی (سولفات‌ها) توسط میکروارگانیسم‌ها تبدیل می‌شود (بهره و همکاران، ۲۰۱۴).

**آلی شدن:** جذب (اسیمیله شدن<sup>۵</sup>) گوگرد به سلول‌های میکروبی یا توقف ترکیبات ساده گوگردی و الحاق آن‌ها به سلول‌های باکتری، قارچ یا اکتینومایست را آلی شدن گویند که به‌طور کامل به متابولیسم میکروبی بستگی دارد (ادواردز، ۱۹۹۸).

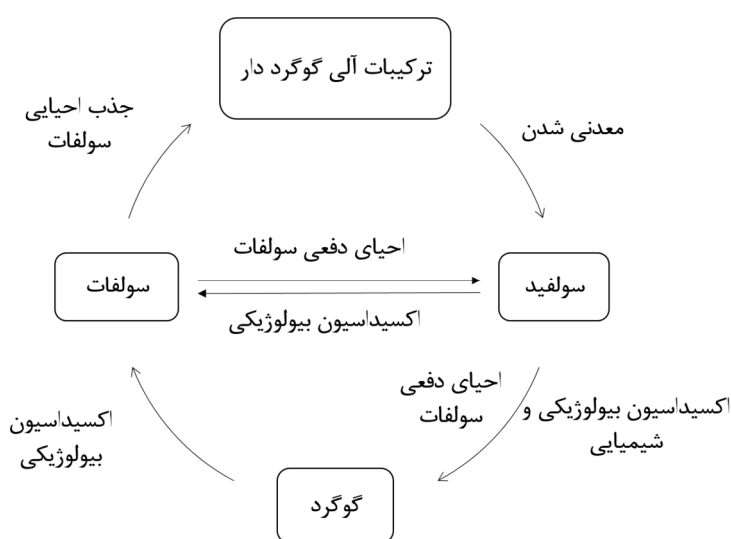
**احیا:** در ابتدا باید احیای سولفات را به دو مسیر جذب احیایی سولفات<sup>۶</sup> و احیای دفعی سولفات<sup>۷</sup> تقسیم نمود (بدلیانس قولیکندی، ۱۳۹۵). در مسیر ASR برای بیوسنتز اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها ترکیبات گوگردی احیا شده تولید می‌شود (بهره و همکاران، ۲۰۱۴). این در حالی است که در مسیر

- 1- Mineralization
- 2- Immobilization
- 3- Reduction
- 4- Oxidation
- 5- Assimilation
- 6- Assimilatory Sulphate Reduction (ASR)
- 7- Dissimilatory Sulphate Reduction (DSR)

- 8- Green sulfur bacteria (GSB)
- 9- Purple sulfur bacteria (PSB)
- 10- Colorless sulfur bacteria
- 11- Methanethiol
- 12- Dimethylsulphide
- 13- Dimethyldisulphide



مادیگان و همکاران، ۲۰۱۲). بیشتر باکتری‌های کمولیتوتروف‌های هوازی هستند و از اکسیژن به‌عنوان پایانه گیرنده الکترون استفاده می‌کنند (رابطه ۲). با این حال، بعضی گونه‌ها می‌توانند به‌طور بی‌هوازی از نیترات و نیتريت به‌عنوان پایانه گیرنده الکترون استفاده کنند (رابطه ۳) (بهره و همکاران، ۲۰۱۴؛ گاش و دام، ۲۰۰۹؛ هولمر و استورک‌هولم، ۲۰۰۱).



شکل ۱- چرخه زیستی گوگرد (Janssen و همکاران، ۱۹۹۹).

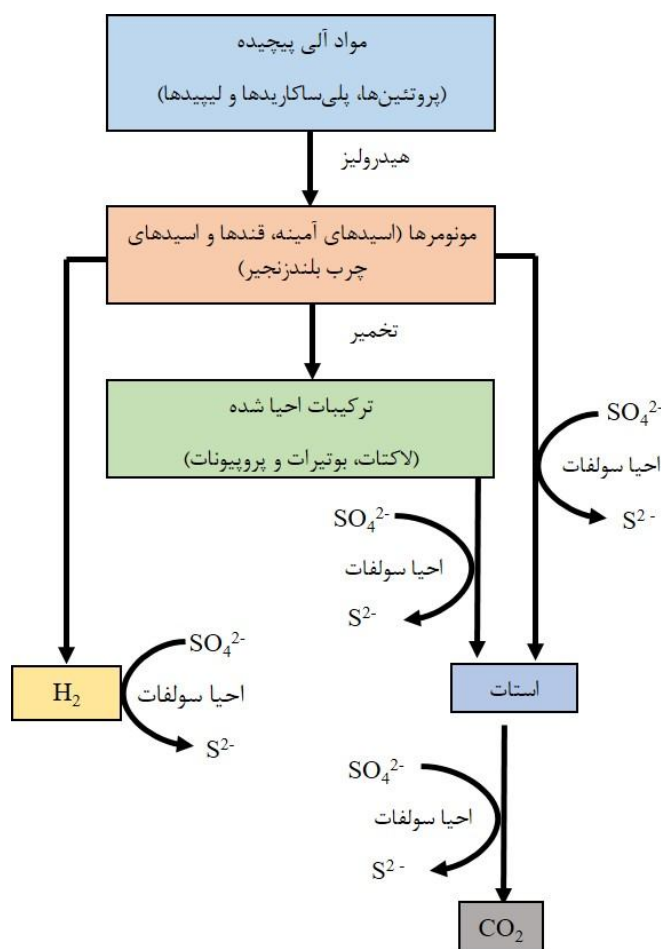
شده‌اند به فراوانی وجود دارند (مادیگان و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال، برخی از میکروارگانیسم‌های هتروتروفیک قادرند تحت شرایط هوازی ترکیبات آلی گوگرد را به سولفید هیدروژن تبدیل کنند (ژیا و همکاران، ۲۰۱۷).

**فیزیولوژی باکتری‌های احیاکننده سولفات:** باکتری‌های احیاکننده سولفات می‌توانند به دو گروه اصلی تقسیم شوند: آن‌هایی که قادرند ترکیبات آلی را کاملاً به کربن دی‌اکسید ( $\text{CO}_2$ ) اکسید کنند (به‌عنوان مثال *Desulfobacter* و *Desulfococcus*) و آن‌هایی که فاقد این توانایی هستند (مثلاً *Desulfovibrio*). گروه

**باکتری احیاکننده سولفات:** سولفات و عنصر گوگرد پذیرنده‌های الکترون گروه بزرگی از دلتاپروتوباکترهای بی‌هوازی هستند که ترکیبات آلی یا  $\text{H}_2$  را به‌عنوان الکترون‌دهنده در تنفس‌های بی‌هوازی به‌کار می‌گیرند. سولفید هیدروژن هم محصول احیای سولفات و هم گوگرد است. بیش از ۴۰ جنس از این ارگانیسم‌ها، که در مجموع باکتری‌های احیاکننده سولفات و باکتری‌های احیاکننده گوگرد نامیده می‌شوند، شناخته شده است. باکتری‌های احیاکننده سولفات در محیط‌های آبی و خاکی که دارای مقداری سولفات هستند و در اثر فرآیندهای تجزیه میکروبی بی‌هوازی

بسیاری نیز بعضی از الکل‌ها (مثلاً اتانول، پروپانول و بوتانول) را به‌عنوان الکترون‌دهنده اکسید می‌کنند. بعضی از سویه‌های *Desulfotomaculum* از گلوکز استفاده می‌کنند که در میان احیاکننده‌های سولفات نادر است (شکل ۲) (مایزر و استامز، ۲۰۰۸؛ مادپگان و همکاران، ۲۰۱۲).

اول معمولاً از استات به‌عنوان سوبسترای رشد استفاده می‌کنند و دو مسیر متفاوت (چرخه اصلاح‌شده اسید سیتریک و مسیر استیل-کوآنزیم A) برای اکسیداسیون استات به‌کار گرفته می‌شود. محدوده الکترون‌دهنده‌های مورد استفاده باکتری‌های احیاکننده سولفات تا حدی گسترده است. هیدروژن، لاکتات و پیرووات تقریباً به‌طور عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرند و گونه‌های



شکل ۲- مدلی از تجزیه میکروبی ترکیبات آلی در محیط‌های بدون اکسیژن در حضور سولفات.

تخمیری به‌عنوان مثال استات، پروپیونات، بوتیرات، لاکتات و هیدروژن تخمیر می‌شوند. در نهایت با حضور سولفات، باکتری‌های احیاکننده سولفات این محصولات تخمیری را مصرف می‌کنند (مایزر و استامز، ۲۰۰۸).

ماکرومولکول‌ها (به‌عنوان مثال پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و لیپیدها) توسط باکتری‌های هیدرولیتیک هیدرولیز می‌شوند. سپس مونومرهای آن‌ها (اسیدهای آمینه، قندها و اسیدهای چرب) توسط باکتری‌های تخمیرکننده به طیف گسترده‌ای از محصولات

مطالعات نشان داده است که مقدار بالاتر از ۰/۰۰۷ میلی‌گرم در لیتر سولفید هیدروژن تأثیر منفی بر رشد ماهیان جوان آب شیرین (از جمله *Fahtead*, *Goldfish* و *Bluegill*) دارد و همچنین غلظت کشندگی (LC<sub>50</sub>) این گاز برای این ماهیان ۰/۰۹۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (اسمیت و اُسید، ۱۹۷۴). غلظت سولفید هیدروژن به pH، دما و شوری بستگی دارد و عمدتاً تحت تأثیر pH است (داتا، ۲۰۱۲). از آنجائی‌که در طول شب pH آب استخر کاهش می‌یابد در چنین شرایطی سمیت گاز سولفید هیدروژن بیشتر می‌شود (تاگر و دآرامو، ۲۰۰۸). بنابراین، یکی از مشکلات اصلی در استخرهای ماهیان گرمابی تولید مقدار بالای سولفید هیدروژن است (کریشنانی و همکاران، ۲۰۱۰). در جدول ۲، به برخی از اثرات منفی سولفید هیدروژن در ماهیان مختلف اشاره شده است. سولفید هیدروژن علاوه بر ایجاد مشکلات در مزارع گرمابی در فیلترهای زیستی تصفیه پساب نیز مشکلاتی را به وجود می‌آورد. مقدار کم سولفید هیدروژن اثر منفی زیادی بر عملکرد نیتریفیکاسیون (تا ۵۰ درصد) دارد (جوی و هالیباغ، ۱۹۹۵؛ کرب و همکاران، ۲۰۰۷).

تولید سولفید هیدروژن در استخرهای پرورش ماهی: در استخرهای پرورش آبزیان مقدار ماده آلی به‌علت ورود مواد غذایی، مدفوع، کود و غیره بیش‌تر است (آبراهام و همکاران، ۲۰۰۴). افزایش مواد آلی در استخرها سبب ایجاد شرایط بی‌هوایی در رسوب و لایه‌های پایینی آب می‌گردد (بهره و همکاران، ۲۰۱۴). در این شرایط ترکیبات سمی مانند سولفید هیدروژن، توسط میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، پروتوزوآها و غیره تولید می‌شود (آبراهام و همکاران، ۲۰۰۴). علاوه بر این، به‌دلیل مقدار بالای سولفات طبیعی موجود در آب دریا (۲۸ میلی‌مول) که در پرورش میگو مورد استفاده قرار می‌گیرد، پتانسیل تولید سولفید هیدروژن توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات افزایش پیدا خواهد کرد (مانجو و رایت سینگ، ۲۰۰۷). این در حالی است که مقدار سولفات در آب شیرین ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومول است اما با این وجود باکتری‌های احیاکننده سولفات نقش مهمی در تخمیر و اکسیداسیون بی‌هوایی ترکیبات آلی دارد و احیای سولفات در این محیط‌ها زیاد است (هولمر و استورکهورلم، ۲۰۰۱؛ مایزر و استامز، ۲۰۰۸).

جدول ۲- اثرات سولفید هیدروژن بر آبزیان.

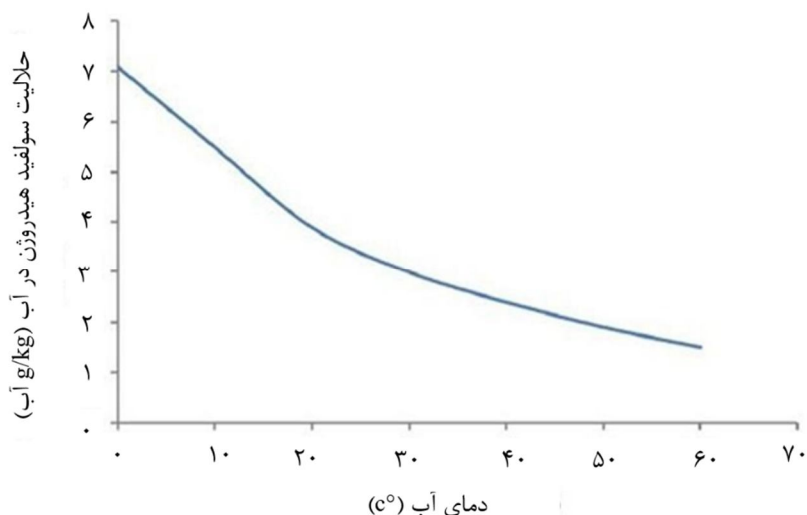
اثرات سولفید هیدروژن بر آبزیان	منبع
مرگ و میر آبزیان و بوی نامطبوع	لهاو و همکاران، ۲۰۰۴؛ پولتون و همکاران، ۲۰۰۲
کاهش رشد آبزیان	پیلای، ۲۰۰۸
کاهش تولیدمثل آبزیان	باگارینانو، ۱۹۹۳
کاهش فعالیت سیتوکروم اکسیداز C، مهار سیستم انتقال الکترون و تنفس هوازی، افزایش لاکتات خون و هیپوکسی بافت	آفانسو و همکاران، ۲۰۰۴
تأثیر منفی بر رشد ماهیان جوان آب شیرین (از جمله <i>Fahtead</i> , <i>Goldfish</i> و <i>Bluegill</i> )	اسمیت و اُسید، ۱۹۷۴

همکاران، ۲۰۱۶). در بین میکروارگانیزم‌ها، باکتری‌ها (فتوتروفیک و کموتروفیک) نقش مهم‌تری در اکسید کردن سولفید هیدروژن ایفا می‌کنند (بهره و همکاران، ۲۰۱۴).

#### عوامل مؤثر بر تولید سولفید هیدروژن

دما: غلظت سولفید هیدروژن که می‌تواند در دمای معمولی در آب حل شود در حدود ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (فتوحی، ۱۳۸۱). بنابراین، با افزایش دما از میزان حلالیت سولفید هیدروژن کاسته می‌شود و از فاز مایع جدا شده و به فاز گاز منتقل می‌گردد (پارک و همکاران، ۲۰۱۴؛ نیلسن و همکاران، ۱۹۹۸). حلالیت سولفید هیدروژن در آب در دماهای مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است.

معمولاً برای کنترل میزان سولفید هیدروژن در استخرهای پرورش آبزیان از فرایندهای فیزیکوشیمیایی شامل هوادهی و تعویض آب، آهک‌پاشی و اکسیداسیون شیمیایی (به‌عنوان مثال پراکسید هیدروژن، هیدروکسید آهن، پرمنگنات پتاسیم و خاکستر زغال سنگ) استفاده می‌شود (بوید و تاکر، ۲۰۱۲). از جمله معایب این روش‌ها می‌توان به تلفات ناگهانی ماهیان، هزینه‌های زیاد انرژی، تولید آلودگی‌های ثانویه و نیاز به مواد شیمیایی گران‌قیمت اشاره نمود که مقرون به صرفه نمی‌باشند (لهاو و همکاران، ۲۰۰۴؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به این مشکلات، استفاده از میکروارگانیزم‌ها (باکتری، اکتینوماسیت‌ها و قارچ‌ها) به‌عنوان یک استراتژی پایدار، مؤثر، کم‌هزینه و دوستدار محیط زیست می‌تواند جایگزینی مناسب برای حذف سولفید هیدروژن از استخرهای پرورش آبزیان باشد (کریشنانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژائو و



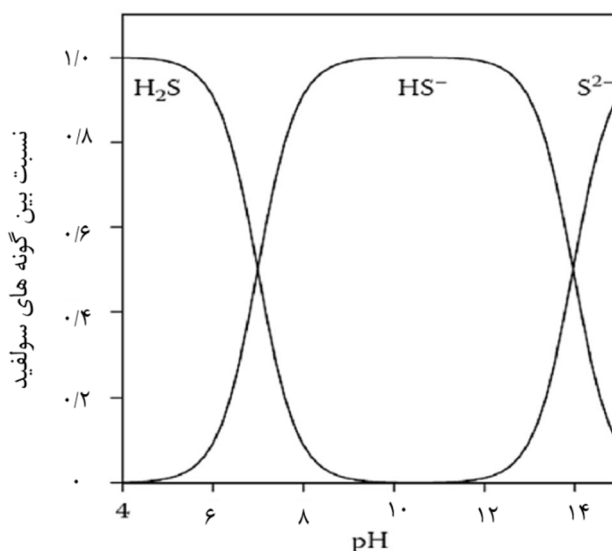
شکل ۳- حلالیت سولفید هیدروژن در آب در دماهای مختلف (نیلسن و همکاران، ۱۹۹۸).

و همکاران، ۲۰۱۴). در مقادیر پایین pH (pH=۴) درصد  $HS^-$  تشکیل شده فقط ۰/۱ و ۹۹/۹ به‌صورت سولفید هیدروژن مولکولی است (فتوحی، ۱۳۸۱).

pH: همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است هر سه گونه سولفید محلول ( $H_2S$ ،  $HS^-$  و  $S^{2-}$ ) در آب در دامنه تغییرات pH بین ۴ تا ۱۴ می‌باشد (پارک

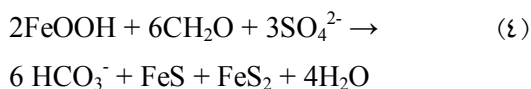
۱۲ شکل غالب گوگرد  $S^{2-}$  می‌باشد. گونه‌های سولفید محلول طبق واکنش‌های زیر به یکدیگر تبدیل می‌شوند.

بنابراین کاهش غلظت سولفید هیدروژن با افزایش pH میسر است. در pH های حدود ۷ گوگرد در دو شکل  $HS^-$  و  $H_2S$  دیده می‌شود. در pH های بیش از



شکل ۴- اثر pH بر اشکال مختلف سولفید محلول (چرچیل و المر، ۱۹۹۹).

گوگردی توسط اسیمیله شدن بیولوژیکی ۲- احیای سولفات به ترکیبات احیاشده گوگردی توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات. در فرایند احیای سولفات به‌طور پیوسته  $HCO_3^-$  به پیکره آب رهاسازی می‌شود که سبب افزایش قلیایت و برگشت pH آب می‌گردد (رابطه ۴).



علاوه بر این، با تجزیه مواد آلی توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات مقدار زیادی نیتروژن و فسفر وارد پیکره آب می‌شود که سبب افزایش مواد مغذی و یوتریفیکاسیون می‌گردد (رابطه ۵). در طی فرایند احیا سولفات سولفید هیدروژن تولید شده می‌تواند با یون‌های فلزات سنگین واکنش دهد و از

مواد آلی زیست‌تخریب‌پذیر: مواد آلی به‌عنوان دهنده الکترون برای باکتری‌های احیاکننده سولفات عمل می‌کنند. مطالعات نشان داده است که حضور مواد آلی مانند اتانول، گلوکز و لاکتات منجر به افزایش نرخ احیای سولفات در سیستم‌های پساب می‌شود (پارک و همکاران، ۲۰۱۴).

اثرات زیست‌محیطی چرخه ژئوشیمی گوگرد: چرخه گوگرد در اکوسیستم‌های آبی یک فرایند ژئوشیمی پیچیده است و بر فلزات سنگین موجود در رسوبات، مواد مغذی آب (عنصر فسفر)، مواد آلی، pH آب اثر می‌گذارد. در ابتدا، گوگرد ممکن است به‌عنوان یکی از عناصر آلاینده منجر به افزایش مقدار سولفات، اسیدی شدن پیکره آب در اکوسیستم‌ها شود. در چرخه گوگرد، دو نوع حذف سولفات در آب‌های طبیعی وجود دارد: ۱- احیای سولفات به ترکیبات آلی



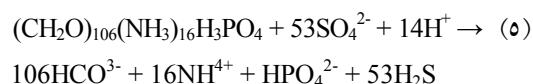
در چرخه مواد مغذی نه تنها منجر به کنترل بهتر کیفیت آب می‌شود بلکه هم‌چنین به استفاده مناسب از محصولات میکروبی در پرورش میگو نیز کمک می‌کند. در پژوهشی دیگر، ژائو و همکاران (۲۰۱۶) به‌منظور حذف سولفید در رسوب و آب استخرهای پرورش آبزیان از میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده گوگرد استفاده کردند و نشان دادند که آن‌ها توانایی حذف کامل  $600 \text{ mg/l}$  سولفید را در ۱۲ ساعت دارد.

در ایران نیز در پژوهشی صفری و یعقوب‌زاده (۱۳۹۰) نشان دادند که دو نوع از باکتری‌های اکسیدکننده  $\text{H}_2\text{S}$  به‌نام‌های تیوباسیلوس دنیتریفیکانس و پاراکوکوس دنیتریفیکانس جدا شده که توانایی رشد در  $\text{pH}=7-8$ ، دمای ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد را داشته و قادر به تبدیل نیترات به نیتريت و در نهایت نیتروژن بوده و فعالیت این باکتری‌ها در بود و نبود سیستم هوادهی تغییر معنی‌داری نشان نمی‌دهد.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی چرخه زیستی گوگرد، اکولوژی و فیزیولوژی باکتری‌های احیاکننده سولفات، نحوه تولید و عوامل مؤثر بر تولید سولفید هیدروژن و در نهایت اثرات زیست‌محیطی چرخه گوگرد پرداخته شده است. چرخه گوگرد در طبیعت هم دارای اثرات مثبت و هم دارای اثرات منفی است. یکی از مهم‌ترین اثرات منفی چرخه گوگرد در اکوسیستم‌های آبی به‌خصوص مزارع پرورش ماهی تولید سولفید هیدروژن توسط باکتری‌های احیاکننده سولفات است. سولفید هیدروژن گازی بسیار سمی برای موجودات آبی است که باید در آبی‌پروری از تولید آن جلوگیری شود. یکی از مهم‌ترین میکروارگانیسم‌های این چرخه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (*Thiobacillus*) است که می‌تواند این ترکیب احیا شده را به سولفات تبدیل

طریق ته‌نشینی فلزات سنگین باعث کاهش سمیت فلزات سنگین شود (لو، ۲۰۱۸).



مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در آبی‌پروری: مطالعات بسیار کمی در زمینه چرخه گوگرد در آبی‌پروری انجام شده است. دواراجا و همکاران (۲۰۰۲) در پژوهشی برای مشاهده تغییرات در جمعیت‌های باکتریایی و تولید میگو در استخرهای پرورشی از دو محصول میکروبی (محصول یک *Bacillus sp.* و *Saccharomyces*) و محصول دو (*Nitrosomonas sp.*، *Bacillus sp.* و *Nitrobacter sp.*) استفاده کردند. نتایج نشان داد که باسیلوس در تمام استخرها غالب بود و رسوبات استخرهایی که که با محصول یک تیمار شده بودند به‌طور قابل‌توجهی تعداد باکتری‌های اکسیدکننده بالاتری داشتند. با این‌حال، میزان تولید در پایان دوره پرورش از لحاظ آماری در استخرهای تیمار شده با محصول یک در مقایسه با استخرهای تیمار شده با محصول دو و کنترل بالاتر نبود. در مطالعه آبراهام و همکاران (۲۰۰۴) باکتری‌های درگیر در چرخه گوگرد در آب و رسوبات سیستم‌های پرورشی گسترده، نیمه‌متراکم و متراکم میگو بررسی شد. این پژوهشگران گزارش کردند که تعداد باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد در آب استخرهای سیستم نیمه‌متراکم و گسترده بیشتر از متراکم است. هم‌چنین با افزایش روزهای پرورشی تعداد این باکتری‌ها کاهش می‌یابد. در حالی‌که تعداد باکتری‌های احیاکننده سولفات در رسوبات هر سه سیستم پرورشی به‌طور قابل‌توجهی متفاوت بودند. هم‌چنین این پژوهشگران نشان دادند که با داشتن اطلاعات اکولوژیکی باکتری‌های درگیر

### سپاسگزاری

به این وسیله از همکاری تمامی کارشناسان محترم آزمایشگاه علوم دریایی و منابع طبیعی آقایان دکتر کمالی، مهندس نورانی، مهندس حسینی، مهندس بور و خانم مهندس حق‌دوست و اعضا بخش بیولوژی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، به‌ویژه سرپرست محترم آزمایشگاه خانم مهندس علیزاده و کارشناسان محترم بخش خانم‌ها مهندس اربابی و مهندس اوتادی و همچنین از زحمات خانم دکتر مکظوم، دکتر رمضان‌ی و آقای دکتر مشتاقی اعضای محترم مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران و در پایان از خانم دکتر شریفیان و آقای دکتر کریمی سپاسگزاری می‌نمائیم.

کند. با توجه به این‌که امروزه تاکید بر تولید محصول ارگانیک و عدم استفاده از نهاده‌های شیمیایی است می‌توان از این باکتری‌ها برای حذف سولفید هیدروژن استفاده کرد. مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از این باکتری‌ها در صنایع مختلف از جمله کشاورزی، کارخانه‌های تصفیه پساب، پالایشگاه‌های نفت و گاز و غیره انجام شده است اما با این وجود مطالعات بسیار کمی در آبی‌پروری به‌خصوص در کشور انجام شده است، بنابراین پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران و محققان کشور بیش از پیش به این موضوع توجه نمایند تا در آینده شاهد پیشرفت‌های چشمگیری در کاربرد این میکروارگانیسم‌ها در صنعت آبی‌پروری باشیم.

### منابع

1. Abraham, T.J., Ghosh, S., Nagesh, T.S., and Sasmal, D. 2004. Distribution of bacteria involved in nitrogen and Sulphur cycles in shrimp culture systems of west Bengal, India. *Aquaculture*. 239: 275-288.
2. Affonso, E.G., Polez, V.L.P., Correa, C.F., Mazon, A.F., Araujo, M.R.R., Moraes, G., and Rantin, F.T. 2004. Physiological Responses to Sulfide Toxicity by The Air-Breathing Catfish, *Hoplosternum littorale* (*Siluriformes Callichthyidae*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*. 139: 4. 251-257.
3. Bagarinao, T.U. 1993. Sulfide as a toxicant in aquatic habitats. *SEAFDEC Asian Aquaculture*. 15: 3. 2-4.
4. Badalians Gholikandi, G. 1395. Microbiology of water and wastewater. Tehran. 948p.
5. Behera, B.C., Mishra, R.R., Dutta, S.K., and Thatoi, H.N. 2014. Sulphur oxidizing bacteria in mangrove ecosystem, A review. *Afric. J. Biotechnol.* 13: 29. 2897-2907.
6. Boyd, C.E., and Tucker, C.S. 2012. Pond aquaculture water quality management. Springer Science and Business Media.
7. Churchill, P., and Elmer, D. 1999. Hydrogen sulfide odor control in wastewater collection systems. *J. New Engl Water Environ. Assoc.* 33: 1. 57-63.
8. Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P., and Verstraete, W. 2007. Nitrogen Removal Techniques in Aquaculture for A Sustainable Production. *Aquaculture*. 270: 1. 1-14.
9. Datta, S. 2012. Management of water quality in intensive aquaculture. *Respiration*. 6: 602.
10. Delincé, G. 2013. The ecology of the fish pond ecosystem: with special reference to Africa (Vol. 72). Springer Science and Business Media.
11. Edwards, P.J. 1998. Sulfur cycling, retention, and mobility in soils, a review. Newtown Square. PA: US Department of Agriculture. Forest Service. Northeastern Research Station.
12. Fotuhi, Sh. 1381. H<sub>2</sub>S removal in wastewater by electrolysis. Master thesis. Tarbiat modares university.
13. Ghosh, W., and Dam, B. 2009. Biochemistry and molecular biology of lithotrophic sulfur oxidation by taxonomically and ecologically diverse bacteria and archaea. *FEMS microbiology reviews*. 33: 6. 999-1043.
14. Holmer, M., and Storkholm, P. 2001. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments, a review. *Freshwater Biology*. 46: 4. 431-451.

15. Jørgensen, B.B., and Nelson, D.C. 2004. Sulfide oxidation in marine sediments. geochemistry meets microbiology. GSA Special Pap. 379: 63-81.
16. Joye, S.B., and Hollibaugh, J.T. 1995. Influence of Sulfide Inhibition of Nitrification on Nitrogen Regeneration in Sediments. *Science*. 270: 5236-623.
17. Krishnani, K.K., Kathiravan, V., Natarajan, M., Kailasam, M., and Pillai, S.M. 2010. Diversity of Sulfur-Oxidizing Bacteria in Greenwater System of Coastal Aquaculture. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 162: 5. 1225-1237.
18. Lahav, O., Ritvo, G., Slijper, I., Hearne, G., and Cochva, M. 2004. The potential of using iron-oxide-rich soils for minimizing the detrimental effects of H<sub>2</sub>S in freshwater aquaculture systems. *Aquaculture*. 238: 1. 263-281.
19. Luo, Y. 2018. Geochemical Cycle and Environmental Effects of Sulfur in Lakes. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 394, No. 5, p. 052039). IOP Publishing.
20. Madigan, M., Martinko, J., Stahl, D., and Clark, D. 2012. *Brock Biology of Microorganisms* (13<sup>th</sup> Ed.). Pearson Education. San Francisco. USA. 268-269.
21. Manju, N.J., and Bright Singh, I.S. 2007. Development of nitrifying and photosynthetic sulfur bacteria based bioaugmentation systems for the bioremediation of ammonia and hydrogen sulphide in shrimp culture (Doctoral dissertation, Cochin University of Science and Technology).
22. Muyzer, G., and Stams, A.J.M. 2008. The Ecology and Biotechnology of Sulphate Reducing Bacteria. *Nature Reviews Microbiology*. 6: 6. 441-454.
23. Nielsen, P.H., Raunkjær, K., and Hvitved-Jacobsen, T. 1998. Sulfide production and wastewater quality in pressure mains. *Water Science and Technology*. 37: 1. 97-104.
24. Park, K., Lee, H., Phelan, S., Liyanaarachchi, S., Marleni, N., Navaratna, D., and Shu, L. 2014. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks, a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 95: 251-261.
25. Pillay, T.V.R. 2008. *Aquaculture and the Environment*. John Wiley and Sons. 5p.
26. Poulton, S.W., Krom, M.D., Rijn, J.V., and Raiswell, R. 2002. The use of hydrous iron (FeOH) oxides for the removal of hydrogen sulphide in aqueous systems. *Water Research*. 36: 825-834.
27. Qian, J., Lu, H., Cui, Y., Wei, L., Liu, R., and Chen, G.H. 2015. Investigation on thiosulfate-involved organics and nitrogen removal by a sulfur cycle-based biological wastewater treatment process. *Water research*. 69: 295-306.
28. Safari, R., and Yaghoobzadeh, Z. 1390. Isolation and identification of two species of sodium sulfide-oxidizing bacteria and evaluating their effect on reduction of H<sub>2</sub>S gas production in laboratory and farm conditions. *Quar. J. Microb. Biotechnol. Islamic Azad University*. 10: 35-44.
29. Smith, L.L., and Oseid, D.M. 1974. Effect of hydrogen sulfide on development and survival of eight freshwater fish species. In *The early life history of fish* (pp. 417-430). Springer. Berlin. Heidelberg.
30. Tabatabai, M.A., Stewart, J.W.B., and Schoenau, J.J. 1988. Sulfur in agriculture. *Soil Science*. 145: 6. 462-463.
31. Tucker, C.S., and D'Abramo, L.R. 2008. *Managing high pH in freshwater ponds*. Southern Regional Aquaculture Center.
32. Xia, Y., Lü, C., Hou, N., Xin, Y., Liu, J., Liu, H., and Xun, L. 2017. Sulfide production and oxidation by heterotrophic bacteria under aerobic conditions. *ISME J*. 11: 12. 2754.
33. Janssen, A.J.H., Lettinga, G., and De Keizer, A. 1999. Removal of hydrogen sulphide from wastewater and waste gases by biological conversion to elemental Sulphur. colloidal and interfacial aspects of biologically produced sulphur particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 151: 1-2. 389-397.
34. Zhao, Y.G., Zheng, Y., Tian, W., Bai, J., Feng, G., Guo, L., and Gao, M. 2016. Enrichment and immobilization of sulfide removal microbiota applied for environmental biological remediation of aquaculture area. *Environmental Pollution*. 214: 307-313.

