

کارایی راکتورهای کرمی در کاهش حجم لجن تولیدی در سیستم‌های لجن فعال

اعظم نادری^۱، مهدی فرزاد کیا^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران
۲- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران
mahdifarzadkia@gmail.com (۰۲۱) ۸۸۶۰۷۹۴۵ (نویسنده مسئول)

(دریافت ۹۳/۱۰/۱۳ پذیرش ۹۴/۲/۲۵)

چکیده

از فرایند لجن فعال برای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب‌های شهری و پساب‌های صنعتی به‌طور گسترده‌ای در جهان استفاده می‌شود. یکی از مشکلات این فرایند، تولید بیش از اندازه لجن است. با توجه به قوانین سخت‌گیرانه محیطی در مورد دفع لجن مازاد، هزینه تصفیه و دفع لجن حدود ۶۰ درصد از هزینه‌های بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها را شامل می‌شود. از این رو طی سال‌های اخیر کمینه‌سازی تولید لجن در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های متعدد فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی برای بهبود کاهش لجن ارائه شده است. این روش‌ها در اغلب موارد نیاز به سرمایه‌گذاری بالا و هزینه‌های بالای بهره‌برداری دارند. فناوری استفاده از راکتورهای کرمی بسیاری از محدودیت‌های این روش‌ها را ندارد. در این مقاله ویژگی‌های این روش و پژوهش‌های انجام شده در این زمینه به‌صورت مروری مورد توجه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: لجن فعال، کمینه‌سازی لجن، راکتورهای کرمی، شکارگری

۱- مقدمه

را به‌دست آورند [۸، ۹ و ۱۰]. امروزه فقدان مدیریت اصولی بر لجن‌های دفعی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، تهدیدی جدی برای سلامتی انسان و منابع محیط زیست مانند آب، خاک و محصولات کشاورزی به‌شمار می‌رود [۱۱ و ۱۲]. از روش‌های رایج دفع لجن، سوزاندن و تخلیه در اقیانوس و دریا است که در سال‌های اخیر به‌دلیل محدودیت‌های محیط‌زیستی منسوخ شده است. کاربرد لجن در زمین و کمپوست‌سازی نیز به‌دلیل موانع فنی و اقتصادی با محدودیت‌های اجرایی مواجه است [۱۳]. تثبیت و دفع بهداشتی لجن حاصل از تصفیه فاضلاب یکی از پرهزینه‌ترین و تخصصی‌ترین مسائل رشته مهندسی محیط زیست است. کارشناسان بر این عقیده‌اند که تأسیسات تصفیه لجن ۴۰ تا ۶۰ درصد از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و حدود ۵۰ درصد از هزینه‌های راهبری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را به‌خود اختصاص می‌دهند [۱۴]. یک راه ایده‌آل برای حل مشکل تصفیه لجن تولید شده، کاهش تولید آن در حین تصفیه است [۱۵].

در بسیاری از کشورهای دنیا از فرایند لجن فعال برای تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، به‌دلیل کارایی بالای آن در حذف مواد آلی، نیتروژن و فسفر، به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۱ و ۲]. یکی از مشکلات لجن فعال متعارف تولید بیش از اندازه لجن است. در سال‌های اخیر میزان تولید لجن در جهان افزایش چشمگیری داشته و انتظار می‌رود که در آینده نیز این روند ادامه داشته باشد [۳ و ۴]. لجن مازاد تولیدی در فرایند لجن فعال متعارف، بین ۱۵ تا ۱۰۰ لیتر به ازای هر کیلوگرم BOD_5 متغیر است، این لجن‌ها در بیشتر موارد بیش از ۹۵ درصد آب دارند [۵ و ۶]. اروپا به تنهایی با بیش از چهل هزار تصفیه‌خانه بیولوژیکی فاضلاب، سالانه در حدود هفت میلیون تن جامدات خشک تولید می‌کند و انتظار می‌رود که این تولید سالانه در اروپا و جهان افزایش یابد [۷]. لجن‌های فاضلاب در شمار مواد زائد خطرناک طبقه‌بندی شده و به سبب خطراتی که برای انسان و محیط زیست دارند، باید قبل از دفع در محیط، تثبیت شوند و نیز معیارهای زیست محیطی لازم

می‌کنند، تنها ۰/۱ انرژي به داخل سطح غذایی بعدی انتقال پیدا می‌کند. شکارگر در طی فرایند انتقال، ۰/۹ انرژي را مصرف می‌کند. به همین دلیل هنگامی که انرژي از سطح انرژي پایین یا باکتری به سطح انرژي بالاتر یا میکروفاونا انتقال پیدا می‌کند، کاهش یافته و متعاقب آن تولید لجن نیز کاهش می‌یابد [۳۴].

در سیستم لجن فعال اگرچه دانسیته پروتوزوئرها بالاست، اما بسیار ریزاند و بسیاری از آنها باکتری‌های پراکنده را می‌خورند. بنابراین شکارگری توسط پروتوزوئرها روش چندان جالب و قابل توجهی نیست [۳۵]. طی بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده بر روی لجن فعال، کرم‌ها بزرگ‌ترین موجودات مشاهده شده هستند و به دلیل اندازه بزرگ ترشان پتانسیل بیشتری نسبت به پروتوزوئرها، در کاهش حجم لجن دارند [۳۶]. مصرف لجن توسط کرم‌ها نه تنها منجر به کاهش در مقدار جامدات خشک و حجم لجن می‌شود، بلکه قسمتی از لجن تبدیل به کرم‌های جدید می‌شود که پتانسیل زیادی برای استفاده مجدد دارند.

کاهش لجن توسط کرم‌های خاکی در کشورهای در حال توسعه در سطح کوچک، تقریباً یک فناوری رایج است. مهم‌ترین محصول این فناوری ورمی کمپوست یا فضولات کرم‌های خاکی است که به دلیل داشتن محتوای بالای نیتروژن، فعالیت بالای میکروبی و محتوای پایین فلزات سنگین، به عنوان کود مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید بیومس کرمی غنی شده از پروتئین با قابلیت استفاده مجدد به عنوان کمپوست نیز از مزایای این روش به حساب می‌آید [۳۷]. وانگ و همکاران^{۱۱} در سال ۲۰۱۰، عملکرد بیوفیلترهای متعارف^{۱۲} و ورمی فیلتر^{۱۳} حاوی کرم‌های خاکی *Eisenia foetida*^{۱۴} را به منظور تصفیه لجن فاضلاب خانگی مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ورمی فیلتر فناوری مؤثری برای پایدارسازی لجن مازاد فاضلاب خانگی است. در ورمی فیلترها میزان کاهش جامدات معلق فرار (VSS) در حدود ۵۶ تا ۶۶/۶ درصد به دست آمد. به طور متوسط تعامل میکروارگانیسم‌ها و کرم‌ها تقریباً مسئول کاهش ۴۶ درصدی جامدات معلق فرار است [۳۸].

نکته قابل توجه در استفاده از کرم‌های خاکی، محتوای آب موجود در لجن است که باید در حدود ۸۰ درصد باشد. گزینه دوم استفاده از کرم‌های آبی در کاهش حجم لجن است. بسیاری از این کرم‌ها به طور طبیعی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب وجود دارند و در

امروزه راهکارهای کمینه‌سازی تولید لجن مازاد در فرایند لجن فعال، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱۶].

بر طبق پژوهش‌های پیشین، رویکردهای کاهش لجن مازاد شامل چهار دسته است:

۱- تخریب یا اختلال در رشد^۱ شامل تخریب حرارتی، ازن‌زنی، کلرزنی، استفاده از امواج اولتراسونیک، تخریب شیمیایی توسط اسیدها و بازها و غیره [۱۷، ۱۸ و ۱۹]:

۲- تغییر در متابولیسم^۲ شامل: کنترل زمان ماند و استفاده از اکسیژن خالص [۲۰ و ۲۱]:

۳- متابولیسم نامتجانس^۳، شامل: اتصال مکرر فرایندهای هوازی و بی‌هوازی، فرایند هوازی با ته‌نشینی بی‌هوازی^۴ و استفاده از منفصل‌کننده‌های شیمیایی^۵ [۲۲، ۲۳ و ۲۴]:

۴- شکارگری باکتری‌ها^۶ و سایر تکنولوژی‌های جدید [۲۵ و ۲۶]. از جمله مسائل و مشکلات این روش‌ها که کاربرد آنها را در مقیاس اجرایی با چالش مواجه نموده است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

عدم دستیابی به شرایط اکسیداسیون بهینه، وجود گندزدای باقیمانده در لجن برگشتی و تخریب سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی، تشکیل ترکیبات ناخواسته مانند تری هالومتان‌ها در فرایندهای لجن فعال- کلرزنی و هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری زیاد واحدهای اولتراسونیک [۲۷ و ۲۸].

بر این اساس به دلیل هزینه بالای کاربرد مواد شیمیایی و انرژي در این روش‌ها، بهینه‌سازی فنی و اقتصادی این رویکردها قبل از کاربرد باید مورد توجه قرار گیرد [۲۹]. روش شکارگری کرمی^۷ یک روش اکولوژیکی است و در مقایسه با این روش‌ها، از ویژگی‌های مناسبی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری پایین‌تر برخوردار است [۳۰ و ۳۱].

در سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب مواد و انرژي از ماده به باکتری و سپس به پروتوزوئرها^۸ یا متازوناها^۹ انتقال می‌یابد [۳۲ و ۳۳]. بر طبق تئوری زنجیره غذایی، کاهش لجن توسط کرم‌ها به دلیل احتیاجات متابولیکی^{۱۰} و تشکیل ارگانیسم‌های بزرگ‌تر است. هنگامی که میکروفاوناها، میکروارگانیسم‌ها را شکار

¹ Lysis- Cryptic Growth

² Maintenance Metabolism

³ Uncoupling Metabolism

⁴ OSA (Oxic- Settling – Anaerobic)

⁵ Chemical Uncoupler

⁶ Predation on Bacteria

⁷ Worms' Predation

⁸ Protozoa (Ciliates, Flagellates, Amoeba, Heliozoan)

⁹ Metazoa (Rotifera, Nematode)

¹⁰ Metabolic Maintained Needs

¹¹ Wang et al.

¹² Conventional Biofilter (BF)

¹³ Vermifilter (VF)

¹⁴ *Eisenia foetida*

این روش نیازی به تغلیظ لجن نیست. این کرم‌ها به دو دسته شناور و چسبیده تقسیم‌بندی می‌شوند [۳۹].

طی ده سال گذشته راکتورهای مختلف کرمی به‌منظور کاهش لجن توسعه یافته‌اند [۴۰]. عمده‌ترین گونه‌های کرم‌های آبی موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب که برای کاهش لجن پیشنهاد شده‌اند شامل *توبیفیسیده*^۱، *لامبریکولیده*^۲ و *آئولوزوماتیده*^۳ و بیشترین کرم‌های موجود *آئولوزوماتیده* و *نایدیده*^۴ است [۴۱ و ۴۲].

کربن آلی پیچیده در طبیعت توسط کرم‌های آبی تغییر یافته و با جمع‌آوری این کرم‌ها، میزان لجن در این سیستم‌ها کاهش می‌یابد. اجرای چنین اصل اکولوژیکی برای افزایش تجزیه لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توسط پژوهشگران مختلفی در سطح آزمایشگاهی اثبات شده است. در سال ۱۹۹۳، گروهی از محققان رشد گونه‌های کرمی *نایدیده* در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را بیان نمودند. در پژوهشی در سال ۱۹۹۷، میزان کاهش لجن توسط کرم‌های *توبیفیسیده* در صافی چکنده تقریباً معادل ۵۰ درصد کل جامدات معلق (TSS) گزارش شد. در سال ۲۰۰۶ در پژوهش‌های مختلف سیستم‌هایی برای کشت گونه‌های *توبیفیسیده* و تولید کرم‌های *لامبریکولوس وریگاتوس*^۵ به کار گرفته شد و پارامترهای تأثیر گذار بر روی ارتقا بهره‌برداری این سیستم‌ها مطالعه شد [۴۳].

هزینه پایین و عدم آلودگی ثانویه از جمله مزایای استفاده از کرم‌ها به‌شمار می‌رود، اما از طرف دیگر کاربرد عملی استفاده از کرم‌ها، به‌علت نبود ارتباط شفاف بین شرایط بهره‌برداری مثل زمان ماند، دما، میزان بارگذاری لجن از موانع محدود کننده این روش محسوب می‌شوند. باقی ماندن دانسیته بالای کرم‌ها برای مدت طولانی یکی دیگر از چالش‌های مهم این روش است [۴۴ و ۴۵].

امروزه راکتورهای جدید کرمی برای افزایش رشد کرم‌ها گسترش یافته‌اند. این راکتورها می‌توانند برای تصفیه لجن مازاد تخلیه شده از فرایندهای لجن فعال مورد استفاده قرار گیرند و یا در داخل فرایندهای لجن فعال تعبیه شوند و لجن برگشتی را تصفیه کنند.

سیستم شکارگری دو مرحله‌ای الگویی جدید است؛ مرحله اول به مرحله باکتری‌ها یا راکتور اختلاط کامل بدون زمان ماند بیومس به‌منظور رشد باکتری‌های پراکنده شده و مرحله دوم به مرحله شکارگری یا سیستم لجن فعال با زمان ماند بالا برای رشد پروتوزوئرها و متازوئها اختصاص دارد. نتایج به‌دست آمده از این

الگو ثابت کرد که بازده تولید لجن در مرحله دوم در مقایسه با مرحله اول، ۶۰ تا ۸۰ درصد کمتر است. پژوهش‌های بعدی نشان داد که سیستم‌های دو مرحله‌ای موجب آزادسازی مقدار قابل توجهی نیترات و فسفات در پساب می‌شوند [۴۶].

با اینکه کرم‌ها در این راکتورها به خوبی رشد کرده‌اند و میزان کاهش لجن خوبی در مقیاس آزمایشگاهی به‌دست آمده، اما کاربرد گسترده این راکتورها مستلزم پژوهش‌های بیشتر در مورد کیفیت پساب و لجن خروجی از این راکتورها است. پاسخ این سوالات در پژوهش‌های بعدی باید مشخص شود. آیا مواد مقاوم یا مضر با پساب به محیط تخلیه خواهند شد؟ و آیا فرایند لجن فعال برای مدت طولانی بدون لجن مازاد دوام خواهد یافت؟ علاوه بر این انجام عملی کاهش لجن توسط کرم‌ها، نیازمند آزمایش‌های بیشتر در مقیاس پایلوت است [۴۷].

در سال ۲۰۰۹، هندریکس و همکاران^۶ راکتور کرمی جدیدی را با این منظور طراحی کردند. در این پژوهش کرم‌های *اولیگوکت*، *لامبریکولوس وریگاتوس* در ماده حامل ثابت نگاه داشته شدند. این آزمایش برای دو نوع ماده حامل با اندازه روزنه‌های متفاوت انجام شد. با افزایش اندازه سوراخ‌ها از ۳۰۰ به ۳۵۰ میکرون، رشد بیومس کرمی در راکتور افزایش یافت و کاهش جامدات معلق فرار، ۴۱ تا ۷۱ درصد به‌دست آمد. هیچ رشد کرمی در اندازه سوراخ‌های کمتر از ۳۰۰ میکرون اتفاق نیفتاد. میزان کاهش کل جامدات معلق توسط کرم‌ها ۱۶ تا ۲۶ درصد به‌دست آمد. (۲۲ تا ۳۰ درصد بر حسب VSS) [۴۸].

این پژوهشگران دریافتند که علاوه بر کاهش لجن توسط این راکتورهای کرمی، آبیگری از فضولات کرم‌ها بهبود یافته و هزینه‌های انتقال در زنجیره پردازش لجن کاهش می‌یابد. این امر به‌ویژه برای تصفیه‌خانه‌های کوچک فاضلاب که بدون تسهیلات پردازش لجن است و هزینه‌های انتقال لجن نسبتاً بالایی دارند می‌تواند قابل توجه باشد [۴۹].

در سال ۲۰۰۶، هوانگ و همکاران^۷ چهار نوع از متازوئها شامل *آئولوزوما همپریچی*^۸، *دافنیا مگنا*^۹ (از خانواده سخت‌پوستان)، *توبیفکس توبیفکس*^{۱۰} (کرم‌های باریکی‌اند که ممکن است طولشان به ۱۰۰ میلی‌متر هم برسد) و *فیزا آکوتا*^{۱۱} (نوعی نرم‌تن شش‌دار) را از تانک هوادهی جمع‌آوری کرده و مورد

⁶ Hendickx et al.

⁷ Huang et al.

⁸ *A. hemprichi* (Annelida: Aeolosomatidae)

⁹ *D. magna* (Daphniidae, Arthropoda)

¹⁰ *Tubifex. tubifex* (Annelida, Tubificidae)

¹¹ *P. acuta* (Mollusca, Physidae)

¹ Tubificidae

² Lumbriculidae

³ Aeolosomatidae

⁴ Naididae

⁵ *Lumbriculus variegatus*

شماتیک کلی استفاده از کرم‌های ثابت نگاهداشته شده در تصفیه‌خانه فاضلاب در شکل ۱ و خلاصه تحقیقات انجام شده در رابطه با شکارگری در جدول ۱ آورده شده است.

۲- نتایج و بحث

به دلیل توسعه روزافزون صنعت و اقتصاد، تولید فاضلاب خانگی و صنعتی سال به سال افزایش می‌یابد. بر اساس گزارش‌های آماری، در ایالات متحده آمریکا هر ساله بالغ بر $8/2$ میلیون تن و در اروپا سالانه بیش از 10 میلیون تن لجن خشک تولید می‌شود. در چین هم تخمین زده می‌شود که $4/4$ میلیون تن لجن خشک تولیدی در سال 2010 به 6 میلیون تن در سال 2015 برسد [۵۷]. دفع لجن مازاد یکی از چالش‌های بزرگ تصفیه‌خانه‌ها محسوب می‌شود. به همین سبب طی سال‌های اخیر، کمینه‌سازی تولید لجن توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [۵۸ و ۵۹]. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی به این منظور مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که هر یک از آنها معایب و مزایای خود را دارند. روش‌هایی مانند از نونی، صوت‌دهی و حرارت‌دهی لجن که به عنوان روش‌های تخریب یا اختلال در رشد شناخته شده‌اند، همچنین تغییر در متابولیسم (مانند زمان ماند بالای لجن و استفاده از اکسیژن زیاد) کارایی و قابلیت اطمینان خود را به اثبات رسانده‌اند. با این وجود این روش‌ها به دلیل نیاز به اکسیژن و انرژی ورودی، چندان هم کم هزینه نیستند.

رویکرد دیگر یعنی متابولیسم نامتجانس نیز مزایا و کارایی بالایی دارد. سیستم‌های OSA، اتصال مکرر فرایندهای هوازی-بی‌هوازی و استفاده از منفصل‌کننده‌های شیمیایی جزء این رویکرد است که در این میان استفاده از منفصل‌کننده‌های شیمیایی احتمال آسیب به محیط و کاهش ته‌نشینی لجن را به همراه دارد [۶۰].

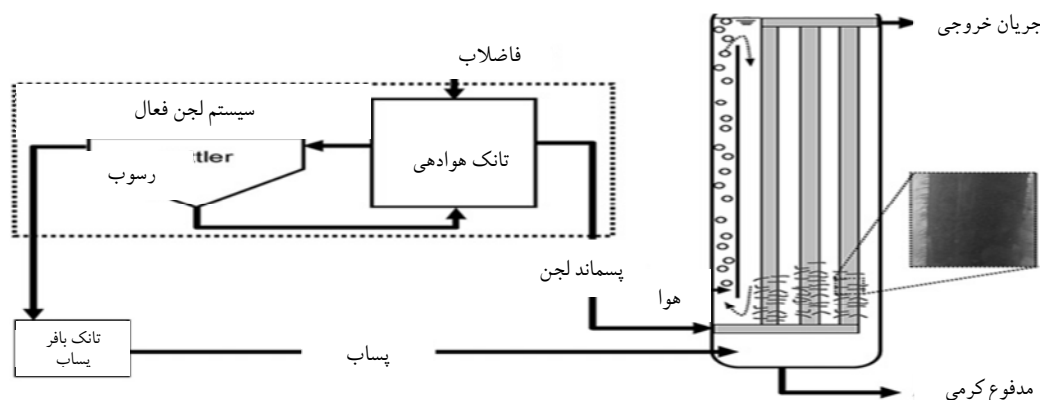
مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار کاهش لجن با استفاده از این میکروفائوناها به ترتیب $0/8$ ، $0/18$ ، $0/54$ و $0/1$ میلی‌گرم لجن به میلی‌گرم میکروفائونا در روز حاصل شد که با نژاد و گونه و اندازه کرم‌ها تغییر می‌یافت [۵۰].

در پژوهشی در سال 2001 روشن شد که متازوناها نمی‌توانند تولید لجن را در تانک هوادهی کاهش دهند. در سال 2003 الیسن و همکاران بر این باور بودند که میکروفائوناها می‌توانند لجن را کاهش دهند اما در مورد این که کدام یک از گونه‌های آن‌ها بهترین و بیشترین کاهش لجن را دارند، اختلاف نظر داشتند. این عقاید متناقض به کمبود روش‌های مؤثر برای تشخیص میزان کاهش لجن ایجاد شده توسط میکروفائوناها مربوط می‌شود [۵۰].

بر اساس مکانیسم این سیستم دو مرحله‌ای، سیستم‌های جدیدی که شامل ترکیب راکتور کرمی توپیفیسیده با حوض اکسیداسیون با چرخش عمودی (IODVC) بود (کرم‌های غالب برنچنریا سووربایی بودند)، در سال 2007 توسط گوئو و همکاران^۱ ساخته شد. مقدار کاهش لجن در این سیستم‌ها $4/46$ درصد به دست آمد. در سال 2009 وئی و همکاران^۲ سیستم IODVC را با جریان روبه پایین راکتور کرمی کنار هم قرار دادند. در این سیستم متوسط بازده لجن و شاخص حجمی لجن در IODVC به ترتیب $0/33$ کیلوگرم جامدات معلق بر کیلوگرم COD حذف شده و 78 میلی‌گرم در لیتر بود. با این حال با توجه به کیفیت پساب، حضور کرم‌ها موجب آزادسازی فسفر به داخل پساب شده و ممکن است مانعی برای کاربرد در مقیاس کامل شود [۵۱].

¹ Guo et al.

² Wei et al.



شکل ۱- شماتیک کلی استفاده از کرم‌های ثابت نگاهداشته شده در تصفیه‌خانه فاضلاب [۴۹]

تاکنون مطالعات اندکی در این زمینه در مقیاس واقعی صورت گرفته است. در سال ۲۰۱۱، تامیس و همکاران^۱ کرم‌های *اولیگاکت بنام آئولوفوروس فورکاتوس*^۲ را در بستری ثابت شده در یک راکتور ۱۲۵ متر مکعبی طی چهار سال از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۰ در مقیاس واقعی در تصفیه‌خانه فاضلاب وولویگا^۳ واقع در هلند مورد بررسی قرار دادند و در آن اکسیژن محلول در راکتورهای کرمی بالاتر از ۴ میلی‌گرم در لیتر و در تانک لجن کمتر از ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر نگاه داشته شد. ۲۵ درصد لجن مازاد حاصل از تانک ته‌نشینی ثانویه به این راکتورهای کرمی فرستاده می‌شد. پساب لجن حاصل از راکتورهای کرمی در یک تانک بی‌هوازی که فرایندهای متان‌زایی در آن اتفاق می‌افتاد، ذخیره می‌شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده در کنار کاهش ۶۵ درصدی لجن بر اساس TSS و افزایش تجزیه، تشکیل متان نیز بهبود یافت و امکان نگهداری پایدار جمعیت کرمی امکان‌پذیر شد.

با این وجود استفاده از پروتوزوئرها و متازوئها در مقیاس واقعی به‌منظور کاهش لجن نیازمند مطالعات وسیع‌تری در مورد زیست‌شناسی این موجودات و اثرات زمان ماند، دما، میزان بارگذاری لجن، غلظت اکسیژن محلول و غیره بر کارایی این راکتورها است [۴۳].

از این رو در این مقاله سعی شد که رویکرد چهارم یعنی شکارگری کرم‌ها به‌صورت مروری مطالعه شود. مزایای این روش شامل هزینه پایین و نداشتن آلودگی ثانویه بر روی محیط و سلامتی انسان است. اما از طرف دیگر کنترل سخت تعداد و گونه‌های کرم‌ها، ناشناخته بودن ارتباط بین شرایط بهره‌برداری کنترل شده و رشد کرم‌ها و آزادسازی نیترا و فسفات به داخل پساب را هم باید مدنظر قرار داد. مشکل غیر قابل کنترل بودن رشد کرم‌ها از طریق طراحی راکتورهای جدیدی که کرم‌ها را بر روی بستری ثابت نگه می‌دارد که در مطالعات مختلف هندریکس و همکاران به آن اشاره شده است، می‌تواند قابل حل باشد، با این حال شرایط بهره‌برداری مانند دما، شرایط هوادهی، غلظت اکسیژن و مقدار pH، غلظت MLSS و سایر پارامترها در این راکتورهای جدید به خوبی بررسی نشده است و نیازمند مطالعات عمیق‌تری در آینده است. از طرف دیگر افزایش فسفر، نیتروژن و حتی COD محلول در طول شکارگری به داخل پساب غیر قابل اجتناب است. کاربرد پساب این واحدها در امور آبیاری کشاورزی از مقبولیت خاصی برخوردار است اما در سایر موارد می‌توان برای تقلیل این عارضه از راکتورهای خاص کاهنده فسفر و ازت متعاقب این واحدها استفاده کرد [۶۱].

¹ Tamis et al.

² *Aulophorus Furcatus*

³ *Wolvega*

جدول ۱- خلاصه تحقیقات انجام شده در ارتباط با شکارگری

مرجع	شکارگر و سیستم استفاده شده	نتایج به‌دست آمده
رتساک و همکاران ^۴ [۵۲]	کرم‌های <i>اولیگاکت</i> ^۵ که شامل <i>نیزالینگوئیس</i> ^۶ بودند.	مقدار کاهش بیومس ۵۰-۲۵ درصد به‌دست آمد.
بویز و همکاران ^۷ [۵۳]	<i>لومبریکولوس وریگاتوس</i> ^۸	تحت شرایط مناسب برای رشد کرم‌ها، ۴۰ درصد از توده لجن حذف شده تبدیل به توده‌های کرمی شد. ال وریگاتوس ممکن است میزان تجزیه لجن را دو برابر کنند
سانگ و همکاران ^۹ [۵۴]	پیش تصفیه اولتراسونیک (برای افزایش جامدات معلق فرار قابل دسترس ^{۱۰}) + استریل کردن (در دمای ۱۲۰ درجه به مدت ۲۰ دقیقه برای تشخیص جزء کاهش یافته توسط کرم‌ها) + کرم‌های <i>آئولوزوما همپریچی</i> ^{۱۱}	دانشیه کرم‌ها با غلظت AVSS ارتباط دارد. هنگامیکه AVSS بیش از ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر شود تعادل جرمی کرم‌ها نزدیک ظرفیت محیطی شده و رشد کرم‌ها متوقف می‌شود. علاوه بر آن، میزان کاهش لجن با میزان رشد کرم‌ها در ارتباط است و بیشترین کاهش لجن توسط <i>آئولوزوما همپریچی</i> ، ۴۴۵ میلی‌گرم در لیتر در روز در تراکم ۳۱۵ (تعداد در میلی‌متر) به‌دست آمد.
هندریکس و همکاران [۵۵]	ثابت نگهداشتن کرم‌های <i>لومبریکولوس وریگاتوس</i> بر روی ماده حامل	میزان کاهش ۷۵-۳۶ درصدی کل جامدات معلق، رشد توده‌های جدید کرمی و جمع‌آوری مدفوع کرمی با قابلیت بالای ته‌نشینی نسبت به لجن اولیه حاصل شد. آزمایش‌ها نشان دادند که در مقایسه با لجن، ته‌نشینی فضولات کرمی، منجر به بالا بردن ۲/۵ برابری غلظت جامدات شده است و این موضوع منجر به کاهش ۶۷ درصدی تجهیزات تغلیظ می‌شوند.
فرزادکیا و همکاران [۵۶]	کرم‌های <i>آبی لومبریکولوس وریگاتوس</i>	میزان کاهش لجن در راکتور کرمی ۲ تا ۲/۷۵ برابر بیشتر از نمونه شاهد بود و در نتیجه میزان کاهش لجن ۳۳ درصد به‌دست آمد.

⁴ Ratsak et al.

⁵ *Oligochaeta*

⁶ *Nais elinguis*

⁷ Boys et al.

⁸ *Lumbriculus variegatus*

⁹ Song et al.

¹⁰ AVSS

¹¹ *Aeolosoma hemprichi*

نیز افزایش می‌یابد، زیرا بعد از تصفیه با این امواج، ذرات کوچک بهتر و راحت‌تر در اختیار کرم‌ها قرار می‌گیرند [۶۳].

گونه‌های کرمی *توبیفیکس* *توبیفیکس* یکی از فراوان‌ترین گروه‌های موجود در آب‌های شیرین بوده و به دلیل سطح تغذیه‌ای بالا و عادات غذایی گسترده و اندازه بزرگشان بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند. این کرم‌ها حتی در آب‌های بسیار آلوده و نیز تصفیه‌خانه‌ها یافت می‌شوند و بنابراین نیازی به سازگار کردن آنها با محیط تصفیه‌خانه نیست [۶۴]. *توبیفیکس* *توبیفیکس* به‌عنوان بزرگ‌ترین *اولیگاکت*، مقاومت بالایی در مقابل بعضی از فاکتورهای محیطی مانند نیتروژن آمونیاک، نمک و سمیت مس نسبت به *آتولوزوما* همپریچی دارد. این کرم‌ها روی حذف COD و NH_4^+-N تأثیر نمی‌گذارند، اما منجر به کاهش ناچیزی در فسفر کل می‌شوند. به دلیل مقاومت بالای این کرم‌ها در شرایط مختلف، نتایج قابل قبولی در میزان کاهش لجن به دست آمده است [۶۵].

۳- نتیجه‌گیری

انتخاب روش کمینه‌سازی لجن توسط کرم‌ها باید با دقت کافی صورت گیرد. هر کدام از روش‌های شکارگری، معایب و مزایای خود را داشته و بسته به شرایط، اهداف، اقتصاد و نظر پژوهشگران، انتخاب نوع کرم و راکتور کرمی متفاوت خواهد بود. در کنار مزیت ارزشمند کاهش حجم لجن در این روش که به صورت گسترده مطرح است، باید به افزایش ازت و فسفر به داخل پساب و در نتیجه بروز اوتروفیکاسیون در آب‌های پذیرنده نیز توجه داشت. از سویی بیشتر پژوهش‌های انجام شده بر روی این راکتورها در مقیاس آزمایشگاهی بوده و از این رو تصمیم‌گیری برای کاربرد و انتخاب روشی که در مقیاس اجرایی کارآمد و مقرون به صرفه‌تر باشد، هنوز دشوار است. بر این اساس، تحقیقات برای رسیدن به راکتورهایی که در کنار کاهش حجم لجن، مواد مغذی موجود در پساب را هم حذف کنند در آینده ادامه خواهد داشت.

علاوه بر این هر یک از انواع کرم‌های یاد شده ویژگی‌های منحصر به فردی دارند و در کاربرد هر یک از آنها باید شرایط مختلفی سنجیده شود. به‌طور مثال، میزان اکسیژن محلول بر روی میزان مصرف لجن و راندمان هضم لجن توسط کرم‌های آبی ال، *وریکاتوس* تأثیرگذار است. در اکسیژن محلول بالای ۸/۱ میلی‌گرم در لیتر، بیشترین مقدار مصرف لجن با کاهش ۳۶ درصدی TSS گزارش شده است. در اکسیژن محلول پایین‌تر از ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر میزان مصرف لجن چهار برابر کمتر شده، ولی با بالاترین میزان کاهش TSS یعنی ۷۷ درصد همراه بود. همچنین غلظت افزایش داده شده آمونیاک در قسمت آبی، منجر به مصرف پایین لجن توسط کرم‌ها می‌شود. آمونیاک یونیزه شده، شکل سمی برای کرم‌هاست و این رخداد شدیداً وابسته به pH است. دما تأثیر واضحی روی مصرف لجن و راندمان هضم لجن توسط کرم‌ها دارد و میزان مصرف مناسب در دمای ۱۵ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد. افزایش دما از ۱۰ به ۲۰، منجر به کاهش تدریجی در راندمان مصرف لجن می‌شود و برای اطمینان از ادامه حیات کرم‌ها، دمای زیر ۲۵ درجه سلسیوس لازم است. نگر داشتن کرم‌ها در تاریکی بر میزان لجن، تولید فضولات کرمی و راندمان هضم لجن تأثیر نمی‌گذارد [۶۲].

کرم‌های *آتولوزوما* همپریچی که یکی از گونه‌های *آتولوزوما* تیده است و به‌طور معمول در تانک هوادهی سیستم‌های لجن فعال موجوداند، بسیار ریز بوده و حدوداً ۱ تا ۲ میلی‌متر اند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که SRT بر میزان رشد اولیه این کرم‌ها تأثیرگذار است. علاوه بر این در سیستم‌های لجن فعال هنگامی که مقدار F/M پایین‌تر باشد، کرم‌ها آسان‌تر ظاهر می‌شوند. برای اطمینان از کافی بودن دانسیته کرم‌ها باید نسبت F/M، کمتر از ۰/۷ در روز نگهداری شود. علاوه بر این اندازه این کرم‌ها کمتر از ۵۰ میکرون است و تنها می‌توانند ذرات لجن کوچک‌تر از این اندازه را مورد استفاده قرار دهند؛ بنابراین هنگامی که لجن با امواج اولتراسونیک تصفیه شده و به ذرات کوچک‌تری شکسته شود، میزان رشد کرم‌ها

۴- مراجع

1. Yan, P., Ji, F., Wang, J., Fan, J., Guan, W., and Chen, Q. (2013). "Pilot-scale test of an advanced, integrated wastewater treatment process with sludge reduction, inorganic solids separation, phosphorus recovery, and enhanced nutrient removal (SIPER)." *J. Bioresource Technology*, 142, 483-489.
2. Wang, Q., Ye, L., Jiang, G., and Yuan, Z. (2013). "A free nitrous acid (FNA)-based technology for reducing sludge production." *J. Water Research*, 47, 3663-3672.
3. Pathak, A., Dastidar, M.G., and Sreekrishnan, T.R. (2009). "Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review." *Journal of Environmental Management*, 90, 2343-2353.

4. Maeda, T., Yoshimura, T., Shimazu, T., and Shirai, Y. (2009). "Enhanced production of lactic acid with reducing excess sludge by lactate fermentation." *Journal of Hazardous Materials*, 168, 656-663.
5. Tyagi, V.K., and Lo, S-L. (2011). "Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: An up to date review." *J. Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 10, 215-242.
6. Liu, Y., and Tay, J-H. (2001). "Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process." *J. Biotechnology Advances*, 19, 97-107.
7. Elissen, H.J.H., Mulder, W.J., Hendrickx, T.L.G., and Elbersen, H.W. (2010). "Aquatic worms grown on biosolids: Biomass composition and potential applications." *J. Bioresource Technology*, 101, 804-811.
8. Farzadkia, M., Jafarzadeh, N., Loveimi asl, L., and Ghalambor, A. (2008). "Wastewater sludge stabilization using lime a case study of west Ahwaz wastewater treatment plant." *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 19, No. 4 (68), 67-71. (In Persian)
9. Jamal, A., Norieh, N., and Farzadkia, M. (2011). "Comparison of aerobic and lime stabilization methods for evaluation of sewage sludge reuse." *Journal of Environmental Science and Technology*, 4 (2), 182-190.
10. Farzadkia, M., Mirzaiee, R., Ghaffarkhani, M., and Bagheri, F. (2013). "Microbial quality assessment of disposal effluent and sludge from four decentralized wastewater." *Journal of Health in the Field*, 1, 24-30. (In Persian)
11. Farzadkia, M., Jaafarzadeh, N., and Loveimi Asl, L. (2009). "Optimization of bacteriological quality of biosolids by lime addition." *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 6 (1), 29-34. (In Persian)
12. Farzadkia, M. (2002). "Investigation of sludge stabilization and reuse in four small treatment plants of Tehran city." *Scientific Journal of Hamadan University of Medical Sciences*, 9, 51-55. (In Persian)
13. Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R.J., Tyagi, R.D., and Surampalli, R.Y. (2011). "Ultrasonic pretreatment of sludge: A review." *J. Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 1-18.
14. Farzadkia, M., and Norieh, N. (2003). "Evaluation of aerobic digester Potential in stabilization of sludge in wastewater treatment of Serkan Province." *J. Scientific Journal of Hamadan University of Medical Sciences*, 30, 31-37. (In Persian)
15. Takdastan, A., Mehrdadi, N., and Azimi, A. A. (2009). "Investigation of the excess sludge reduction in SBR by oxidizing some sludge by ozone." *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, 28, 94-104.
16. Momeni, S.A.R., and Mirbagheri, S.A. (2005). "Minimization of excess sludge in activated sludge systems." *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 16, No.4 (56), 54-61. (In Persian)
17. Zhang, G., He, J., Zhang, P., and Zhang, J. (2009). "Ultrasonic reduction of excess sludge from activated sludge system II: Urban sewage treatment." *Journal of Hazardous Materials*, 164, 1105-1109.
18. Salsabil, M.R., Prorot, A., Casellas, M., and Dagot, C. (2009). "Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility." *Chemical Engineering Journal*, 148, 327-335.
19. Na, S-H., Shon, and H-K., and Kim, J-H. (2011). "Minimization of excess sludge and cryptic growth of microorganisms by alkaline treatment of activated sludge." *Korean J. Chem. Eng.*, 28, 164-169.
20. Hazrati, H., and Shaygan, J. (2011). "Review of sludge reduction methods in activated sludge systems." *Iranian Chemical Engineering Journal*, 10, 67-75.
21. Khursheed, A., and Kazmi, A.A. (2011). "Retrospective of ecological approaches to excess sludge reduction." *J. Water Research*, 45, 4287-4310.
22. Wang, J., Zhao, Q., JIN, W., and Lin, J. (2008). "Mechanism on minimization of excess sludge in oxic-settlinganaerobic (OSA) process." *J. Front. Environ. Sci. Engin. China* , 2, 36-43.
23. Chen, G-H., An, K-J., Saby, Se., Brois, E., and Djafer, M. (2003). "Possible cause of excess sludge reduction in anoxic-settling-anaerobic activated sludge process (OSA process)." *J. Water Research*, 37, 3855-3866.
24. Guowei, C., Pengge, X., Deqian, X., and Hanqing, Y. (2007). "Comparison between inhibitor and uncoupler for minimizing excess sludge production of an activated sludge process." *J. Front. Environ. Sci. Engin. China*, 1, 63-66
25. Foladori, P., Tamburini, S., and Bruni, L. (2010). "Bacteria permeabilisation and disruption caused by sludge reduction technologies evaluated by flow cytometry." *J. Water Research*, 44, 4888-4899.

26. Wei, Y., Wang, Y., Guo, X., and Liu, J. (2009). "Sludge reduction potential of the activated sludge process by integrating an oligochaete reactor." *Journal of Hazardous Materials*, 163, 87-91.
27. Gallard, H., and Von Gunten, U. (2002). "Chlorination of natural organic matter: Kinetics of chlorination and of THM formation." *J. Water Research*, 36, 65-74.
28. Farooq, R., Rehman, F., Baig, S., and Sadique, M. (2009). "The effect of ultrasonic irradiation on the anaerobic digestion of activated sludge." *World Applied Sciences Journal*, 6, 234-237.
29. Liu, Y. (2003). "Chemically reduced excess sludge production in the activated sludge process." *J. Chemosphere*, 50, 1-7.
30. Tian, Y., Li, Z., and Lu, Y. (2012). "Changes in characteristics of soluble microbial products and extracellular polymeric substances in membrane bioreactor coupled with worm reactor: Relation to membrane fouling." *J. Bioresource Technology*, 122, 62-69.
31. Yang, J., Liu, J., Xing, M., Lu, Z., and Yan, Q. (2013). "Effect of earthworms on the biochemical characterization of biofilms in vermifiltration treatment of excess sludge." *J. Bioresource Technology*, 143, 10-17.
32. Pe'erez-Elvira, S.I., Nieto Diez, P., and Fdz-Polanco, F. (2006). "Sludge minimisation technologies." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5, 375-398.
33. Ghyoot, W., and Verstraete, W. (1999). "Reduced sludge production in a two-stage membrane-assisted bioreactor." *J. Wat. Res.*, 34, 205-215.
34. Lee, N., and Welander, T. (1996). "Use of protozoa and metazoa for decreasing sludge production in aerobic wastewater treatment." *J. Biotechnol. Lett.*, 18, 429-434.
35. Ratsak, C.H., Maarsen, K.A., and Kooijman, S.A.L.M. (1996). "Effects of protozoa on carbon mineralization in activated sludge." *J. Water Research*, 30, 1-12.
36. Wei, Y., and Liu, J. (2006). "Sludge reduction with a novel combined worm-reactor." *J. Hydrobiologia*, 564, 213-222.
37. Hait, S., and Tare, V. (2011). "Optimizing vermistabilization of waste activated sludge using vermicompost as bulking material." *J. Waste Management*, 31, 502-511.
38. Zhao, L., Wang, Y., Yang, J., and Xing, M. (2010). "Earthworm-microorganism interactions: A strategy to stabilize domestic wastewater sludge." *J. Water Research*, 44, 2572-2582.
39. Pasha Zanousi, S., Ayati, B., and Ganjidoust, H. (2012). "Investigation of tubifex worms potential in mass and volume reduction of sludge wastewater treatment plants in laboratory scale." *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 24, No. 4 (88), 59-65. (In Persian)
40. Li, M., Nakhla, G., and Zhu, J. (2013). "Impact of worm predation on pseudo-steady-state of the circulating fluidized bed biofilm reactor." *J. Bioresource Technology*, 128, 281-289.
41. Mosleh, Y.Y., Paris-Palacios, S.V., and Ahmed, M.T. (2007). "Effects of chitosan on oxidative stress and metallothioneins in aquatic worm tubifex (Oligochaeta, Tubificidae)." *J. Chemosphere*, 67, 167-175.
42. Zhang, X., Tian, Y., Wang, Q., Chen, L., and Wang, X. (2012). "Heavy metal distribution and speciation during sludge reduction using aquatic worms." *J. Bioresource Technology*, 126, 41-47.
43. Tamis, J., Van Schouwenburg, G., Kleerebezem, R., and van Loosdrecht, M.C.M. (2011). "A full scale worm reactor for efficient sludge reduction by predation in a wastewater treatment plant." *Water Research*, 45, 5916-5924.
44. Wang, Q., Wang, Z., Wu, Z., and Han, X. (2011). "Sludge reduction and process performance in a submerged membrane bioreactor with aquatic worms." *Chemical Engineering Journal*, 172, 929-935.
45. Elissen, H.J.H., Hendrickx, T.L.G., Temmink, H., and Buisman, C.J.N. (2006). "A new reactor concept for sludge reduction using aquatic worms." *J. Water Research*, 40, 3713-3718.
46. Lee, N., and Welander, T. (1996). "Reducing sludge production in aerobic wastewater treatment through manipulation of the ecosystem." *J. Water Research*, 30, 1781-1790.
47. Xue-song, G., Jun-xin, L., Yuan-song, W., and Lin, L. (2007). "Sludge reduction with Tubificidae and the impact on the performance of the wastewater treatment process." *Journal of Environmental Sciences*, 19, 257-263.

48. Hendrickx, T.L.G., Temmink, H., Elissen, H., and Buisman, C.J.N. (2009). "Aquatic worms eating waste sludge in a continuous system." *J. Bioresource Technology*, 100,4642-4648.
49. Hendrickx, TLG., Elissen, HHJ., Temmink, H., and Buisman, C.J.N. (2011). "Operation of an aquatic worm reactor suitable for sludge reduction at large scale." *J. Water Research*, 45, 4923-4929.
50. Liang, P., Huang, X., Qian, Y., Wei, Y., and Ding, G. (2006). "Determination and comparison of sludge reduction rates caused by microfaunas predation." *J. Bioresource Technology*, 97, 854-861.
51. Guo, W-Q., Yang, S-S., Xiang, W-S., Wang, X-J., and Ren, N-Q. (2013). "Minimization of excess sludge production by in-situ activated sludge treatment processes: A comprehensive review." *J. Biotechnology Advances*, 31 (8), 1386-1396.
52. Ratsak, C.H. (2001). "Effects of Nais elinguis on the performance of an activated sludge plant." *J. Hydrobiologia*, 463, 217-222.
53. Buys, B.R., Klapwijk, A., Elissen, H., and Rulkens, W.H. (2008). "Development of a test method to assess the sludge reduction potential of aquatic organisms in activated sludge." *J. Bioresource Technology*, 99, 8360-8366.
54. Song, B., and Chen, X. (2009). "Effect of Aeolosoma hemprichi on excess activated sludge reduction." *Journal of Hazardous Materials*, 162, 300-304.
55. Hendrickx, T.L.G., Temmink, H., and Elissen, H., and Buisman, C.J.N. (2010). "Aquatic worms eat sludge: Mass balances and processing of worm faeces." *Journal of Hazardous Materials*, 177, 633-638.
56. Basim, Y., Farzadkia, M., Jaafarzadeh, N., and Hendrickx, T. (2012). "Sludge reduction by lumbriculus variegatus in Ahvas wastewater treatment plant." *Iranian Journal of Environmental Health Sciences and Engineering*, 9 (4), 1-5.
57. Wang, Z., Yu, H., Ma, J., Zheng, X., and Wu, Z. (2013). "Recent advances in membrane bio-technologies for sludge reduction and treatment." *J. Biotechnology Advances*, 31 (8), 1187-1199.
58. Uan, D.K., Yeom, I.T., Arulazhagan, P., and Rajesh Banu, J. (2013). "Effects of sludge pretreatment on sludge reduction in a lab-scale anaerobic/anoxic/oxic system treating domestic wastewater." *J. Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 10, 495-502.
59. Laurent, J., Jaziri, K., Guignard, R., Casellas, M., and Dagot, C. (2011). "Comprehensive insight of the performances of excess sludge reduction by 90 °C thermal treatment coupled with activated sludge at pilot scale: COD and N removal, bacterial populations, fate of heavy metals." *J. Process Biochemistry*, 46, 1808-1816.
60. Troiani, C., Eusebi, A.L., and Battistoni, P. (2011). "Excess sludge reduction by biological way: From experimental experience to a real full scale application." *J. Bioresource Technology*, 102,10352-10358.
61. Tian, Y., and Lu, Y. (2010). "Simultaneous nitrification and denitrification process in a new Tubificidae-reactor for minimizing nutrient release during sludge reduction." *J. Water Research*, 34,6031-6040.
62. Hendrickx, T.L.G., Temmink, H., Elissen, H.J.H., and Buisman, CJN. (2009). "The effect of operating conditions on aquatic worms eating waste sludge." *J. Water Research*, 43, 943-950.
63. Liang, P., Huang, X., and Qian, Y. (2006). "Excess sludge reduction in activated sludge process through predation of Aeolosoma hemprichi." *J. Biochemical Engineering Journal*, 28, 117-122.
64. Tian, Y., Lu, Y., Chen, L., Lin, H. (2010). "Optimization of process conditions with attention to the sludge reduction and stable immobilization in a novel Tubificidae-reactor." *J. Bioresource Technology*, 101, 6069-6076.
65. Huang, X., Liang, P., and Qian, Y. (2007). "Excess sludge reduction induced by Tubifex tubifex in a recycled sludge reactor." *Journal of Biotechnology*, 127, 443-451.