

بهبود کیفیت پساب فاضلاب شهری با استفاده از بتن متخلخل برای آبیاری

جهانگیر عابدی کوپایی^{۱*}، محسن جواهری طهرانی^۱ و کیاچهر بهفرنیا^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۱۶)

چکیده

با توجه به افزایش جمعیت، مشکلات کمبود آب و لزوم مصرف آب بیشتر، استفاده از آب‌های نامتعارف و پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در شرایطی که بار آلودگی زیاد نباشد، استفاده از راکتورهای بیوفیلمی معمول می‌باشد. در همین راستا، استفاده از بتن متخلخل به عنوان بستر رشد و تکثیر بیوفیلم، در کاهش بار آلودگی پساب بررسی گردید. بدین منظور یک طرح اختلاط پایه با توجه به آیین‌نامه ACI211.3R انتخاب گردید و با نظر به افزایش سطح ویژه بتن برای رشد بیوفیلم، در سه مرحله و در هر مرحله ۱۰ درصد وزن درشت‌دانه، ریزدانه به طرح اختلاط پایه افزوده شد. طرح آزمایش مورد استفاده بلوک کامل تصادفی می‌باشد. برای انجام آزمایش، در نزدیکی تصفیه‌خانه فاضلاب دانشگاه صنعتی اصفهان کانالی با طول ۹ متر و به عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ساخته شد. سپس بلوک‌های بتنی ساخته شده در کانال مذکور قرار گرفتند و عملیات فرآوری بیوفیلم بر روی خلل و فرج مکعب‌های بتنی انجام پذیرفت. آزمایش‌های کیفی اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، کل مواد جامد معلق (TSS) و تعداد کل کلیفرم‌ها بر روی نمونه‌های پساب ورودی و خروجی به عمل آمد و درصد حذف هر یک از پارامترها محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد با افزوده شدن ریزدانه درصدهای حذف این پارامترها افزایش می‌یابد. به‌طور میانگین درصدهای حذف BOD، COD، TSS و تعداد کل کلیفرم‌ها برای طرح اختلاط اول (۱۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب سنگ درشت‌دانه و بدون ریزدانه) به ترتیب ۲۵، ۳۳، ۴۵ و ۳۷ درصد می‌باشد که این اعداد با همین ترتیب برای طرح اختلاط چهارم (۱۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب سنگ درشت‌دانه و ۴۲۰ کیلوگرم در مترمکعب ماسه ریزدانه) به ۳۶، ۴۰، ۵۷ و ۸۱ می‌رسد. در نهایت می‌توان گفت بتن متخلخل می‌تواند به‌عنوان بستر بیوفیلم مورد استفاده قرار گیرد. براساس نتایج، طرح اختلاط سوم (۱۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب سنگ درشت‌دانه و ۲۸۰ کیلوگرم در مترمکعب ماسه ریزدانه) بهترین طرح اختلاط ارزیابی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پساب، بیوفیلم، BOD، COD، TSS، تعداد کل کلیفرم‌ها

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان،

۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

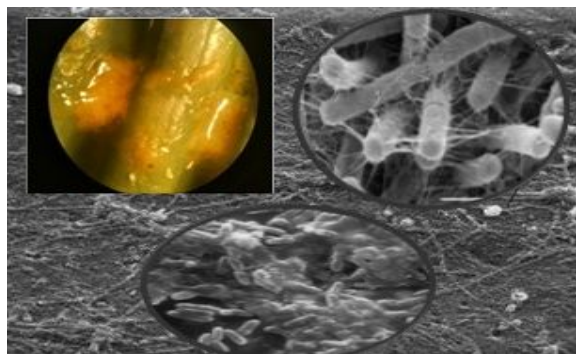
مقدمه

آب به عنوان ماده حیاتی بشر همچنین ماده خام کشاورزی و راه‌گشای صنعت در جوامع امروزی از اهمیت بالایی برخوردار است و تأمین آن در خیلی از کشورها به صورت بحران در آمده است. کشور ما با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک آن از آب‌های شیرین بهره کمی برده است. از طرفی افزایش جمعیت و افزایش آلودگی هوا مدیریت شهری را بر آن می‌دارد تا با اتخاذ تدابیر درست سرانه فضای سبز افراد جامعه را افزایش دهد. حال با توجه به نیاز مبرم به آب و همچنین کمبود منابع آب، جهت تأمین نیاز آبی در کشاورزی و فضای سبز باید در جهت باز چرخانی و استفاده مجدد از پساب‌ها برنامه‌های مدیریتی لازم را اعمال کرد.

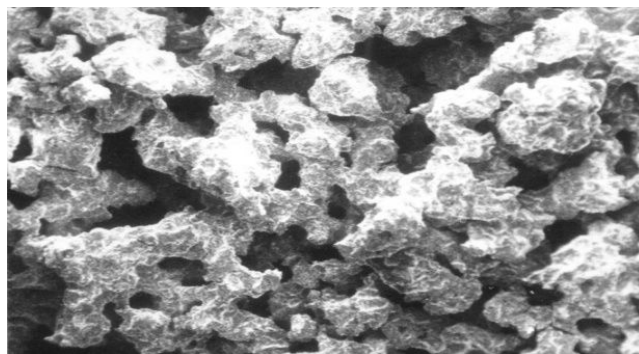
پتانسیل فاضلاب خانگی تولیدی در سطح کشور براساس سرشماری رسمی سال ۱۳۸۵ به تفکیک شهری، روستایی و کل به ترتیب معادل ۳۶۷۰، ۷۲۷، ۴۳۹۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. محاسبات نشان می‌دهد که براساس سناریوی معمول، حجم پساب برگشتی در جوامع شهری و روستایی کشور در سال ۱۴۰۰ به ترتیب معادل ۴۳۶۹ و ۸۲۳ میلیون مترمکعب و در مجموع ۵۱۹۲ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود (۱۲). اعداد ذکر شده نشان دهنده یک منبع آب پایدار جهت استفاده می‌باشد. مشخصه اصلی فاضلاب‌های انسانی میزان BOD و COD بالا، عناصر مغذی و میکروارگانیزم‌های بیماری‌زا (باکتریایی و انگلی) می‌باشد. در صورت عدم نفوذ فاضلاب‌های صنعتی، فاضلاب شهری فاقد فلزات سنگین در حد خطرزا می‌باشد (۷).

حال سؤال این‌جاست که آیا می‌شود از پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب استفاده کرد؟ پاسخ مشخص است اگر حدود تصفیه فاضلاب به اندازه‌ای باشد که کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب در حد استانداردهای توصیه شده باشد و به شرط قبول فرهنگ عمومی جامعه استفاده از پساب بلا مانع است (۸). اما مشکل این‌جاست که اغلب شاخص‌های کیفیت پساب بیش از استانداردها می‌باشد. از جمله مهم‌ترین

شاخص‌ها، میزان کلیفرم‌ها می‌باشد که معمولاً بسیار بیشتر از حد مجاز است و پارامترهای BOD و COD معمولاً در آستانه مرز خطرناکی می‌باشند. در کشورهای در حال توسعه برای از بین بردن کلیفرم‌ها، از کلر زنی استفاده می‌شود اما به دلیل ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی کلر این روش تقریباً منسوخ شده است. راه حل دیگر آن است که تصفیه خانه‌های فاضلاب مجهز به سیستم‌های مدرن هم‌چون گندزدایی به کمک گاز ازن، پرتو UV و اشعه X شوند که لازمه آن صرف هزینه‌های بسیار زیاد جهت خرید، نصب و بهره‌برداری از این تجهیزات می‌باشد. همچنین با توجه به غیربومی بودن این فناوری‌ها الزاماً این راه کارها مناسب نبوده زیرا تجربه نشان داده است معمولاً این تجهیزات پس از مدتی مستهلک شده نیاز به تعویض قطعات دارند و با توجه به بعد مکانی شرکت سازنده، مدت زمانی نه‌چندان کوتاه این تجهیزات کارایی خود را از دست می‌دهند و تمامی برنامه‌ریزی‌ها را با مشکل روبرو می‌سازند (۹). راه کار دیگر آن است که با راه‌کارهای ساده و ارزان اما راهبردی کیفیت پساب را تا حد استاندارد بهبود بخشید. مشکل اصلی پساب تصفیه‌خانه‌های ایران کلیفرم بالای آنها می‌باشد از طرفی ویژگی کلیفرم‌ها، تولید مثل بالای آنها است که در نتیجه آن نیاز به مواد غذایی افزایش می‌یابد علاوه بر این حداکثر عمر اکثر این موجودات ۷۲ ساعت می‌باشد (۱۳). به منظور مبارزه بیولوژیک با کلیفرم‌ها باید مانع از تکثیر سریع آنها شد، برای این کار باید مواد آلی موجود در پساب که به عنوان منبع تغذیه کلیفرم‌ها محسوب می‌شود را کاهش داد (۱۰). از طرف دیگر همان‌گونه که ذکر شد عمر کلیفرم‌ها محدود می‌باشد پس اگر بتوانیم آنها را معطل کنیم به صورت طبیعی می‌میرند (۱۳). در مواردی که بار آلی کم باشد معمولاً استفاده از روش‌های بیوفیلیمی توصیه می‌گردد (۱). راه کار پیشنهادی استفاده از بتن متخلخل به عنوان بیوفیلتر می‌باشد. به طور مشخص بر روی خلل و فرج زیاد بتن متخلخل بیوفیلیم تشکیل می‌شود. نمایی از این خلل و فرج در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمونه‌ای از بیوفیلم



شکل ۱. نمونه از خلل و فرج بتن متخلخل

متخلخل به‌عنوان نوعی فیلتر شنی عمل می‌کند. این بدان معناست که میکروارگانیسم‌های ته‌نشین نشده در حوض ته‌نشینی ثانویه را به دام می‌اندازد و کیفیت پساب خروجی را تا حد مطلوبی بهبود می‌بخشد. در واقع در صورت استفاده از بتن متخلخل به دلیل وجود شیره سیمان ذرات سنگی را به هم چسبانده دیگر نیاز به محفظه جهت نگهداری ذرات کنار هم نبوده و می‌توان ذرات را به اشکال گوناگونی که قالب‌بندی قابل اجرا داشته باشند، درآورد.

بتن سبک یا بتن متخلخل در سال ۱۹۲۴ میلادی توسط یک مهندس سوئدی ابداع گردید (۴). ویژگی‌های منحصر به فرد بتن متخلخل از جمله مقاومت در برابر یخ‌زدگی، کم‌وزن بودن، تخلخل بالا و افزایش ضریب نفوذپذیری باعث شد تا برای استفاده در روسازی معابر مورد استقبال قرار گیرد (۲۶). دیرکز و همکاران (به نقل از ۶) در تحقیقی کارایی ۹ فیلتر مختلف در تصفیه یک سیلاب مصنوعی را با یکدیگر مقایسه کردند در این فیلترها از ماسه‌های با دانه‌بندی مختلف و همچنین اکسید و هیدروکسید آهن استفاده شده بود. همه فیلترها ابتدا برای فشارهای هیدرولیکی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند و سرعت جریان در هر فیلتر نسبت به افزایش فشار هیدرولیکی آن با همدیگر مقایسه شد. سپس کارایی فیلترها در حذف آلودگی‌های مختلف نسبت به زمان و در یک دوره ۸ ماهه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. همچنین استویک و همکاران در تحقیقی گزارش کردند که برای بهینه کردن حذف باکتری‌ها در سیستم تصفیه باید چگونگی تأثیر فاکتورهای جاندار و

اصطلاح بیوفیلم به سلول‌هایی گفته می‌شود که روی یک سطح تثبیت شده و عموماً به وسیله یک ماتریکس از مواد پلیمری آلی، با منشأ میکروبی احاطه شده‌اند (شکل ۲). بیوفیلم می‌تواند از یک‌گونه و یا مخلوطی از چندگونه تشکیل شده باشد (۱). توانایی باکتری‌ها برای چسبیدن به سطوح، به‌ویژه در ارگانیسم‌های پاتوژن که از این خاصیت برای شروع بیماری استفاده می‌کنند، به‌عنوان یک پدیده مهم شناخته شده‌است. در طبیعت میکروارگانیسم‌ها، اغلب در ارتباط نزدیک با سطوح جامد رشد می‌کنند، که این سطوح ممکن است بافت‌های نرم زنده، یا سطوح غیرزنده، مواد غوطه‌ور و یا ذرات خاک باشد. ارتباط و پیوستگی با سطوح جامد منجر به تشکیل بیوفیلم میکروبی می‌شود (۱).

باید توجه داشت، راه‌کار پس از تصفیه‌خانه مدنظر می‌باشد زیرا پس از تصفیه ثانویه BOD تا حد زیادی پایین آمده و لجن ایجاد شده بر روی سطوح خلل و فرج (که در اینجا به‌عنوان بیوفیلم محسوب می‌شود) کم بوده و موجب گرفتگی در مدت زمان مشخصی نمی‌شود. به‌علت پایین آمدن غلظت مواد آلی در پساب، میکروارگانیسم‌ها دچار شوک غذایی می‌شوند و تمایل به تشکیل بیوفیلم دارند (۱۰). در اینجا بتن متخلخل به‌عنوان تکمیل‌کننده فرآیند تصفیه فاضلاب می‌باشد تا کیفیت پساب مناسب شود. نکته دیگر آن‌که اکثر تصفیه‌خانه‌های ایران از مشکل عدم ته‌نشینی لجن (به‌علت به‌وجود آمدن میکروارگانیسم‌های رشته‌ای و در نتیجه کم‌وزن شدن) رنج می‌برند و بهره‌برداران را با مشکل مواجه می‌سازند (۱۳)، بتن

تفاوت خاصی نداشت که این نشان دهنده آن است که حذف suspended COD به زمان‌های واکنش هیدرولیکی بستگی ندارد (۲۵). چوی و همکاران نیز اعلام کردند در صورت استفاده از بتن متخلخل به‌عنوان بیوفیلتر، BOD موجود در جریان خروجی به‌طور میانگین از ۱۰/۴ در جریان ورودی به ۲/۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. به این ترتیب بازده حذف BOD به‌طور متوسط ۷۴٪ بود. کل میزان نیتروژن در جریان ورودی فاضلاب به‌طور میانگین ۹/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر بود درحالی‌که این میزان در جریان خروجی به ۴/۷۱ رسید، در نتیجه درصد حذف نیتروژن کل، ۴۷٪ است. درمورد کل فسفر موجود نیز در جریان ورودی مقدار آن ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر بود که در خروجی میزان آن به ۰/۵۹ رسید به این ترتیب ۶۰٪ حذف فسفر کل داشته‌است (۱۶). همچنین ویلسن و همکاران بیان کردند زمان ماند فیلترها با افزایش سرعت تخلیه تغییر می‌کند. فیلترهای شنی تنها اصلاح‌کننده‌های فیزیکی نیستند بلکه می‌توانند به‌طور اساسی از نظر بیولوژیکی هم عمل کنند. طول فیلترها و سرعت تخلیه تأثیر چندانی در زمان ماند هیدرولیکی فیلترها ندارد درحالی‌که توده زیستی نقش مهمی در عملکرد فیلترها دارد (۲۷).

هدف از انجام این طرح بررسی توانایی بتن متخلخل به‌عنوان بستری جهت رشد و توسعه بیوفیلم بر روی خلل و فرج آن و همچنین به‌دست آوردن طرح اختلاط بهینه بتن متخلخل جهت رشد و توسعه بیوفیلم و مشخص شدن درصد کاهش پارامترهای کیفی آب در حضور بیوفیلم تشکیل یافته بر روی بتن متخلخل می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش در مجاورت تصفیه‌خانه دانشگاه صنعتی اصفهان به ساخت کانالی با ابعاد ۳۰×۲۰ سانتی‌متر ارتفاع و عرض و به طول ۸ متر اقدام شد. به این منظور با بیل مکانیکی گودبرداری لازم به‌عمل آمد و پس از دیوار چینی، دیواره‌ها و کف کانال با سرامیک عایق‌بندی شد؛ همچنین دو

غیرجاندار و تبادل آنها با یکدیگر را مورد بررسی قرار داد. بیوفیلم‌ها در حذف باکتری‌ها مؤثرند به‌همین دلیل به اطلاعاتی در مورد ساختار و ترکیب آنها نیاز است (۲۳). زارع در سال ۱۳۸۳ اعلام کرد وجود یک سازه متخلخل در کنار رودخانه‌ها و به موازات آنها باعث می‌شود دانه‌های بزرگ فاضلاب به درون تأسیسات تصفیه‌خانه وارد نشود. همچنین با تولید لجن در بین بتن شرایط تصفیه هوازی فاضلاب فراهم می‌شود و بهترین سنگ به‌دست آمده برای ریزدانه‌های درون بتن، پوک‌های معدنی می‌باشد، که با وجود کم بودن جذب شیره بتن به‌علت متخلخل بودن، شیره بتن در ریزدانه‌ها نفوذ می‌کند و ریزدانه‌ها درهم قفل می‌شود (۵). از بتن متخلخل به‌عنوان فیلتر تصفیه آب می‌توان استفاده کرد (۱۱)، دراین باره تقی‌زاده و همکاران گزارش کردند که تصفیه کند افقی با بتن متخلخل به‌دلیل رشد توده‌های بیولوژیکی برای از بین بردن باکتری‌ها مناسب است، به‌طوری‌که استفاده از بتن متخلخل باعث کاهش ۱۰۰-۹۰ درصدی باکتری‌های کلیفرم می‌شود. سطح مورد نیاز برای دو فیلتر با سطح عمودی ۲/۶ مترمربع، ۷۰٪ کمتر از فضای مورد نیاز فیلترهای کند است. افزایش سرعت تصفیه باعث کاهش زمان بهره‌برداری می‌شود. ضخامت متوسط این فیلتر ۹ سانتی‌متر و مصالح مصرفی آن ۹۰٪ مصالح مورد نیاز فیلترهای کند می‌باشد. برای اقتصادی بودن طرح نیز می‌توان از سیمان و شن موجود در منطقه استفاده کرد، این نوع فیلتر برای جوامع کوچک مناسب است، به‌علاوه تعمیر و شست و شوی آنها نسبت به فیلترهای شنی افقی آسان‌تر خواهد بود (۲۴). تاوفیک و همکاران در تحقیقی در مقیاس آزمایشگاهی سیستم اصلاح پساب (Up flow Anaerobic Sludge Blanket) و (Moving Bed Biofilm Reactor) را در دمای ۲۲-۳۵ درجه مورد ارزیابی قرار دادند. به‌طوری‌که کل سیستم اصلاح در زمان‌های واکنش هیدرولیکی متفاوت ۵، ۱۰ و ۱۳/۳ ساعت عمل کرد. در نهایت بازده حذف soluble COD colloidal COD total COD به‌ترتیب تا ۹۲، ۸۹ و ۸۰ درصد افزایش یافت، اما حذف suspended COD در زمان‌های واکنش هیدرولیکی‌های مختلف



شکل ۳. مراحل گودبرداری، تهیه قالب بتن، عایق‌بندی کانال و تنظیم جریان ورودی به کانال

آن‌که حفرات بتن کمی ریزتر شوند در سه مرحله، که در هر مرحله ۱۰ درصد وزن درشت‌دانه، ریزدانه به طرح اختلاط پایه اضافه شد (۱۵). در نهایت چهار طرح اختلاط برای بتن متخلخل در اختیار می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات طرح اختلاطها آورده شده است. در اینجا منظور از ریزدانه، شن عبور کرده از الک ۴ و مانده بر الک ۲۰۰ می‌باشد و درشت‌دانه ذرات شن ۴/۷۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق عیار سیمان ۳۳۰ کیلوگرم در مترمکعب به‌طور ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین آب مورد استفاده آب شرب بوده است. نکته دیگر که با توجه به جدول ۱ باید مد نظر قرار گرفته شود این‌است که با افزوده شدن ریزدانه با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی درصد w/c افزایش یافته تا خمیر بتن به‌صورت یکنواخت تهیه گردد و سیمان‌ها به‌صورت گلوله‌ای در نیاید. البته این افزایش درصد در محدوده مجاز توصیه شده توسط ACI211.3R می‌باشد. برای ساخت نمونه‌ها، مقادیر مصالح مصرفی در بتن مطابق طرح‌های اختلاط به‌وسیله ظروف حجمی مدرج اندازه‌گیری شد

حوضچه در ابتدا و انتهای کانال ساخته شد تا جریان ورودی به کانال و خروجی از آن به‌حالت جریان آرام درآید. در ادامه با یک لوله ۵۰ mm پلی اتیلنی به‌طول ۴۰ متر که به‌صورت یک سیفون در آمده بود از لاگون هوادهی تصفیه‌خانه آبیگری به‌عمل آمد، جریان ورودی توسط یک والو برنجی ۱/۲ اینچی قابل تنظیم شد. حداکثر دبی گرفته شده با توجه به اختلاف ارتفاع موجود با این روش حدود ۳۵ لیتر بر دقیقه است. برای ساخت مکعب‌های بتنی، به‌کمک شاخه‌های گالوانیزه قالب‌هایی جهت بتن‌ریزی ساخته شد. ابعاد داخلی قالب $29/5 \times 29/5 \times 15^3$ cm می‌باشد. گزیده‌ای از این مراحل در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به آیین‌نامه ACI211.3R که برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های با اسلامپ صفر است (۱۴)، یک طرح اختلاط پایه انتخاب گردید. این انتخاب براساس میزان تخلخل و ضریب هدایت هیدرولیکی می‌باشد. همچنین محققین قبلی به‌طور آزمایشگاهی خصوصیات استاتیکی و هیدرولیکی این طرح اختلاط را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده بودند (۳ و ۶). برای

جدول ۱. مشخصات طرح اختلاط‌های بتن

شماره طرح اختلاط	مقدار سنگ دانه درشت (Kg/m ^۳)	مقدار ریز دانه (Kg/m ^۳)	سیمان (Kg/m ^۳)	W/C (نسبت آب به سیمان)	تخلخل (درصد)
۱	۱۴۰۰	۰	۳۳۰	۰/۳	۲۶
۲	۱۴۰۰	۱۴۰	۳۳۰	۰/۳۲	۲۳
۳	۱۴۰۰	۲۸۰	۳۳۰	۰/۳۴	۲۱
۴	۱۴۰۰	۴۲۰	۳۳۰	۰/۳۶	۱۸



شکل ۴. مراحل تهیه بتن، قالب‌ریزی و قرارگیری بتن‌ها در کانال

آسیبی به جداره کانال وارد نیاید. در هر بار آزمایش تعداد ۱۱ مکعب در کانال قرار داده شد. نکته دیگر آنکه در هنگام ساخت قالب بتن‌ریزی، عرض قالب ۵/۰ سانتی‌متر کمتر از کانال گرفته‌شد؛ دلیل این امر سهولت در جای گذاشتن و برداشت مکعب‌ها در کانال می‌باشد. فضای ایجاد شده با شن عبوری از الک ۱۴ به‌همراه مقداری سیمان (جهت پایدارشدن شن‌ها) پر شد. این مراحل انجام کار در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای فرآوری راه و روش‌های متعددی وجود دارد. به‌منظور فرآوری مکعب‌های بتنی یا ایجاد بیوفیلم برروی خلل و فرج مکعب‌های بتنی (که در عمل میکروارگانیسم‌ها موجود در این لایه زیستی مواد غذایی موجود در پساب را مصرف می‌کنند و همچنین به‌علت وجود یک سطح لزج و چسبناک موجب جذب

و به‌وسیله مخلوط‌کن، سیمان، آب و سنگدانه با هم مخلوط گردید. سطح داخلی قالب‌های ساخته‌شده به‌وسیله روغن چرب گردید تا بتن سخت شده از قالب جدا گردد.

بتن در سه لایه داخل قالب ریخته شد و هر لایه با ۲۵ ضربه میله استاندارد متراکم گردید، همچنین به‌کمک ماله بنایی سطح قالب مسطح گردید. از هر طرح اختلاط ۱۵ مکعب نمونه تهیه شد. حدود ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی نمونه‌ها از داخل قالب فلزی خارج و درون حوضچه عمل‌آوری قرار داده شد. دوره عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آب ۲۸ روز می‌باشد.

پس از اتمام عمل‌آوری مکعب‌های بتنی، برای هر طرح اختلاط و برای هر تکرار، نوبت به قرارگیری مکعب‌ها درون کانال می‌رسد. به‌دلیل آن‌که جنس کانال از سرامیک می‌باشد باید دقت لازم به‌عمل می‌آمد که با توجه به سختی و وزن مکعب‌ها

جدول ۲. دبی پساب عبوری از هر طرح اختلاط

طرح اختلاط	دبی عبوری (لیتر بر دقیقه)
اول	۸
دوم	۷
سوم	۶
چهارم	۵

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس طرح آماری جهت کاهش BOD

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	ضریب تغییر	R ^۲
تیمار	۳	۲۲۰/۲۹	۷۳/۴۳	۱۷۹/۵۴**		
بلوک	۲	۳۶/۷۵	۱۸/۳۷	۴۴/۹۳**		
خطا	۶	۲/۴۵	۰/۴۱	-	۲/۱	۰/۹۹
کل	۱۱	۲۵۹/۵	-	-		

** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

جهت آزمایش‌ها صورت گرفت. این آزمایش‌ها شامل BOD، COD، TSS و تعداد کل کلیفرم‌ها می‌باشد. در نهایت اطلاعات آزمایش و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند؛ طرح آماری به کار برده شده طرح بلوک کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تغییرات BOD پساب با عبور از بتن متخلخل

در جدول ۳ تجزیه واریانس طرح آماری، آورده شده است. در جدول ۴ نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هر یک از طرح‌های اختلاط بر شاخص BOD آورده شده است. مقایسه میانگین تیمارها به روش LSD در سطح ۵ درصد انجام گرفته است. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود با افزایش درصد ریزدانه به طرح اختلاط درصد کاهش BOD افزایش یافته است. به طوری که از ۲۵/۱ به ۳۶/۴۸ درصد رسیده است دلیل این امر کوچک شدن خلل و فرج و در نتیجه آن افزایش مساحت کل

مواد و میکروارگانیسم‌های دیگر موجود در پساب می‌شوند، در این پژوهش، روش قطع و وصل جریان پساب انتخاب گردید. به این ترتیب، یک شوک رطوبتی به میکروارگانیسم‌های پساب وارد می‌شود. با این شوک میکروارگانیسم‌ها برای بقاء رو به تشکیل بیوفیلم می‌آورند (۱). روند قطع و وصل به این صورت است که شیر فلکه ورودی جریان برای مدت یک ساعت باز می‌شود (با حداکثر دبی) تا کاملاً مکعب‌ها خیس شوند. در هر روز چهار مرتبه (در روز ۳ بار و شب ۱ مرتبه) به مدت سه روز برای هر تکرار این عمل انجام پذیرفت. پس از آن که فرآوری پایان پذیرفت بلافاصله جریان پساب در کانال برقرار شد. با توجه به میزان تخلخل‌های اندازه‌گیری شده برای هر طرح اختلاط یک میزان دبی جهت برقراری جریان پایدار انتخاب گردید و به کمک شیر فلکه جریان ورودی تنظیم شد. در واقع این دبی مشخص کننده میزان نفوذ پساب در نمونه‌ها با توجه به تخلخل می‌باشد. در جدول ۲ دبی عبوری برای هر طرح اختلاط آورده شده است.

پس از گذشتن ۲۴ ساعت که کاملاً از جریان پایدار اطمینان حاصل شد از حوضچه آرامش ابتدایی و انتهایی، نمونه برداری

جدول ۴. نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هر یک از طرح‌های اختلاط بر شاخص BOD

میانگین	درصد حذف	پساب خروجی mg/L	پساب ورودی mg/L	تکرار	طرح اختلاط
	۲۳/۷۳	۴۵	۵۹	اول	
۲۵/۱ ^d	۲۴/۱۴	۴۴	۵۸	دوم	اول
	۲۷/۴۲	۴۵	۶۲	سوم	
	۲۶/۸۶	۴۳	۵۸	اول	
۲۸/۱ ^c	۲۸/۰۷	۴۱	۵۷	دوم	دوم
	۳۰/۳۶	۳۹	۵۶	سوم	
	۲۹/۸۲	۴۰	۵۷	اول	
۳۲/۱۳ ^b	۳۱/۵۸	۳۹	۵۷	دوم	سوم
	۳۵	۳۹	۶۰	سوم	
	۳۴/۴۳	۴۰	۶۱	اول	
۳۶/۴۸ ^a	۳۶/۹۲	۴۱	۶۵	دوم	چهارم
	۳۸/۱	۳۹	۶۳	سوم	

بین میانگین‌های با حروف همانند اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

اختلاط‌ها بر روی شاخص COD آورده شده است، همچنین مقایسات میانگین تیمارها که به روش LSD در سطح ۵ درصد انجام گرفته است در این جدول آورده شده است. همان‌گونه که از جدول ۶ مشخص است با افزایش ریزدانه به طرح اختلاط پایه اگرچه میزان درصد کاهش COD افزایش یافته است، اما این افزایش به نسبت افزایش ریزدانه نمی‌باشد. در اینجا با افزایش ۱۰ درصدی ریزدانه تنها به‌طور میانگین ۵/۵ درصد کاهش COD افزایش یافته است، که نشان می‌دهد حساسیت پارامتر COD نسبت به افزایش ریزدانه زیاد نیست. یو و همکاران (۲۰۱۰) درصد حذف را به‌طور میانگین ۵۲ درصد اعلام کردند که در اینجا از نتایج گرفته شده بیشتر می‌باشد (۲۸).

لایه زیستی، و همچنین تماس بیشتر پساب با لایه زیستی می‌باشد. نتیجه گرفته شده با نتایج تقی‌زاده و همکاران و چویی و همکاران هم‌خوانی دارد (۲۴ و ۱۶). همچنین این نتیجه با نتایج محققینی که بر روی تغذیه مصنوعی با پساب کار می‌کنند مطابقت دارد؛ به این صورت که هرچه بافت خاک ریزتر باشد کاهش BOD پساب عبوری بیشتر خواهد بود، در این رابطه می‌توان به تحقیقات جوانی، سیکا و همکاران و سیمونز و همکاران اشاره نمود (۲، ۲۱ و ۲۲). در واقع در اینجا به‌خوبی مفهوم اکسیرخواهی بیولوژیکی مشخص شده است که هرچه فعالیت میکروارگانیسم‌ها موجود در فاضلاب افزایش یابد این پارامتر تغییرات محسوس‌تری دارد.

تغییرات COD پساب با عبور از بتن متخلخل

تغییرات TSS پساب با عبور از بتن متخلخل در جدول ۷ نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هر یک از طرح

در جدول ۵ تجزیه واریانس طرح آماری، آورده شده است. در جدول ۶ نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هر یک از طرح

جدول ۵. نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هریک از طرح‌های اختلاط بر شاخص COD

میانگین	درصد حذف	پساب خروجی mg/L	پساب ورودی mg/L	آزمایش	طرح اختلاط
۳۳/۶۷ ^c	۳۱/۱۱	۶۲	۹۰	اول	اول
	۳۴/۷۸	۶۰	۹۲	دوم	
	۳۵/۱۱	۶۱	۹۴	سوم	
۳۵/۹۸ ^{bc}	۳۳/۳۳	۶۴	۹۶	اول	دوم
	۳۶/۵۶	۵۹	۹۳	دوم	
	۳۸/۰۴	۵۷	۹۲	سوم	
۳۸/۵۴ ^{ab}	۳۸/۳	۵۸	۹۴	اول	سوم
	۳۶/۶۷	۵۷	۹۰	دوم	
	۴۰/۶۶	۵۴	۹۱	سوم	
۴۰/۵ ^a	۳۶/۹۶	۵۸	۹۲	اول	چهارم
	۴۱/۰۵	۵۶	۹۵	دوم	
	۴۳/۴۸	۵۲	۹۲	سوم	

بین میانگین‌های با حروف همانند اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس طرح‌ها جهت کاهش COD

R ^۲	ضریب تغییر	مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۰/۹	۳/۸۸	۱۲/۸**	۲۶/۶۵	۷۹/۹۵	۳	تیمار
-	-	۹/۳*	۱۹/۳۶	۳۸/۷۳	۲	بلوک
-	-	-	۲/۰۸	۱۲/۴۹	۶	خطا
-	-	-	-	۱۳۱/۱۷	۱۱	کل

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

درصد کاهش که به ترتیب مربوط به طرح اختلاط چهارم و طرح اختلاط پایه است، با تفاوت در کل حدود ۲۱ درصدی نشان می‌دهد که افزوده شدن ریزدانه به میزان ۱۰ درصد تنها در حدود ۷ درصد افزایش میزان حذف TSS را دربر دارد. دلیل این امر آن است که برای به دام انداختن بیشتر ذرات معلق جامد نیاز به حفرات ریزتری می‌باشد تا این سیر کاهش

اختلاط‌ها بر روی شاخص TSS آورده شده است، همچنین مقایسات میانگین تیمارها که به روش LSD در سطح ۵ درصد انجام گرفته است در این جدول آورده شده است. در جدول ۸ تجزیه واریانس طرح آماری، آورده شده است. نتایج جدول ۸ نیز نشان‌دهنده روند مثبت افزایش درصد کاهش TSS با افزوده شدن ریزدانه دارد. بیشترین و کمترین

جدول ۷. نتایج تجزیه واریانس طرح‌ها جهت کاهش TSS

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	ضریب تغییر	R ^۲
تیمار	۳	۲۷۰/۲۱	۹۰/۰۷	۲۱۳/۵۳**	۱/۲۴	۰/۸۹
بلوک	۲	۱۶/۳۷	۸/۱۸	۱۹/۴**	-	-
خطا	۶	۲/۵۳	۰/۴۲	-	-	-
کل	۱۱	۲۸۹/۱۱	-	-	-	-

: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

جدول ۸. نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هریک از طرح‌های اختلاط بر شاخص TSS

طرح اختلاط	آزمایش	پساب ورودی mg/L	پساب خروجی mg/L	درصد حذف	میانگین
اول	اول	۱۲۲	۶۸	۴۴/۲۶	۴۵/۴۴ ^d
	دوم	۱۲۰	۶۵	۴۵/۸۳	
	سوم	۱۳۰	۷۰	۴۶/۱۵	
دوم	اول	۱۲۵	۶۵	۴۸	۵۰/۰۹ ^c
	دوم	۱۲۸	۶۳	۵۰/۷۸	
	سوم	۱۳۴	۶۵	۵۱/۴۹	
سوم	اول	۱۳۰	۵۹	۵۴/۶۲	۵۵/۸۹ ^b
	دوم	۱۲۷	۵۷	۵۵/۱۲	
	سوم	۱۳۳	۵۶	۵۷/۸۹	
چهارم	اول	۱۳۶	۶۰	۵۵/۸۸	۵۷/۳ ^a
	دوم	۱۲۲	۵۲	۵۷/۳۸	
	سوم	۱۳۳	۵۵	۵۸/۶۵	

بین میانگین‌های با حروف همانند اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

اختلاط‌های مختلف چیده شود. در بین محققینی که در این زمینه فعالیت کرده‌اند پارک و همکاران و ناداو و همکاران نزدیک‌ترین روش به روش بیان شده را دنبال کرده‌اند که به ترتیب ۵۴ و ۶۰ درصد برای حذف پارامتر TSS گزارش کرده‌اند که با توجه به تفاوت در روش‌ها، با نتایج گرفته شده مطابقت دارند (۱۹ و ۲۰).

همچنان روند افزایشی داشته باشد. در واقع افزودن ریزدانه بیشتر برای کاهش درصد حذف TSS مفیدتر خواهد بود، اما با در نظر گرفتن کاهش دبی عبور کرده دیگر افزودن ریزدانه در شرایط بدون بار هیدرولیکی منطقی نمی‌باشد. راهکار دیگر افزایش طول بلوک چینی می‌باشد مثلاً به جای ۳ متر، می‌توان ۶ متر بلوک متخلخل چیده شود و یا ترکیبی از بلوک‌ها با طرح

جدول ۹. نتایج تجزیه واریانس طرح‌ها جهت کاهش تعداد کل کلیفرم

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	ضریب تغییر	R ²
تیمار	۳	۴۳۳۶/۹۷	۱۴۴۵/۶۷	۱۳۹۳/۶**	۱/۶	۰/۸۲
بلوک	۲	۷۷/۵۶	۳۸/۷۸	۳۷/۳۸**	-	-
خطا	۶	۶/۲۲	۱/۰۴	-	-	-
کل	۱۱	۴۴۲۰/۷۵	-	-	-	-

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

جدول ۱۰. نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هریک از طرح اختلاط‌ها بر روی شاخص تعداد کل کلیفرم‌ها

طرح اختلاط	آزمایش	پساب ورودی mg/L	پساب خروجی mg/L	درصد حذف	میانگین
اول	اول	$1/85 \times 10^6$	$1/2 \times 10^6$	۳۵/۱۴	۳۷/۰۵ ^c
	دوم	$3/95 \times 10^5$	$2/51 \times 10^5$	۳۶/۴۶	
	سوم	$4/6 \times 10^5$	$2/78 \times 10^5$	۳۹/۵۷	
دوم	اول	$3/55 \times 10^5$	$1/8 \times 10^5$	۴۹/۳	۵۳/۹۲ ^b
	دوم	$4/7 \times 10^5$	$2/1 \times 10^5$	۵۵/۳۲	
	سوم	$3/5 \times 10^5$	$1/5 \times 10^5$	۵۷/۱۴	
سوم	اول	$3/6 \times 10^5$	$7/8 \times 10^4$	۷۸/۸۳	۸۱/۴۹ ^a
	دوم	$4/8 \times 10^5$	$8/7 \times 10^4$	۸۱/۸۸	
	سوم	$3/75 \times 10^5$	$5/9 \times 10^4$	۸۴/۲۷	
چهارم	اول	$3/55 \times 10^5$	$7/8 \times 10^4$	۷۸/۰۳	۸۱/۶۹ ^a
	دوم	$3/5 \times 10^5$	$6/1 \times 10^4$	۸۲/۵۷	
	سوم	$4/7 \times 10^5$	$7/3 \times 10^4$	۸۴/۴۷	

بین میانگین‌های با حروف همانند اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

تغییرات تعداد کل کلیفرم پساب با عبور از بتن متخلخل

در جدول ۹ نتایج آزمایشات مربوط به تأثیر هر یک از طرح اختلاط‌ها بر روی شاخص تعداد کل کلیفرم‌ها آورده شده است، همچنین مقایسات میانگین تیمارها که به روش LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفته است در این جدول آورده شده است. در جدول ۱۰ تجزیه واریانس طرح‌آزمایی، آورده شده است.

برای جدول ۱۰ نیز می‌توان گفت با افزایش ریزدانه، درصد کاهش تعداد کل کلیفرم‌ها افزایش یافته است؛ بیشترین و کمترین

به ترتیب مربوط به طرح اختلاط چهارم و طرح اختلاط اول یا همان پایه است. نکته قابل توجه افزایش ناگهانی درصد حذف از طرح اول به طرح دوم می‌باشد که با افزوده شدن ۱۰ درصد ریزدانه حدود ۳۱ درصد افزایش حذف را در برداشته است (۳۷/۰۵ به ۵۳/۹۲ درصد). همچنین این روند از طرح دوم به سوم همچنان ادامه دارد و افزایش حدود ۳۲ درصدی را در این مرحله به همراه دارد، یعنی از ۵۳/۹۲ به ۸۱/۴۹ می‌رسد. در ادامه روند افزایشی، متوقف شده به طوری که طرح اختلاط سوم و

جدول ۱۱. میانگین پساب ورودی، خروجی، میانگین درصدهای کاهش پارامترها و استاندارد کاربرد پساب در ایران (۱۲)

پارامترهای اندازه‌گیری شده	واحد	میانگین پساب ورودی	میانگین پساب خروجی	میانگین درصد کاهش	مرز استاندارد آلوده‌کننده پساب		
					تخلیه به چاه	تخلیه به آب سطحی	استفاده در کشاورزی
کدورت	N.T.U*	۱۲۸	۶۱	۵۲	-	۴۰	۱۰۰
BOD**	میلی گرم در لیتر	۶۰	۴۱	۳۰	۳۰	۳۰	۱۰۰
COD***	میلی گرم در لیتر	۹۳	۵۸	۳۷	۶۰	۶۰	۲۰۰
تعداد کل کلیفرم	تعداد در ۱۰۰ میلی لیتر	$۴/۸۳ \times ۱۰^۵$	$۲/۲ \times ۱۰^۵$	۶۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰

* Nephelometric Turbidimeter Unit

** Biological Oxygen Demand

*** Chemical Oxygen Demand

تحقیق نشان می‌دهد می‌توان به‌طور قابل قبولی حدود استاندارد را جهت استفاده از پساب در کشاورزی و یا تخلیه به محیط زیست را تأمین نمود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به نتایج آزمایش‌های کیفی و نتایج جدول‌های تجزیه واریانس به‌طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

۱. برای کاهش BOD پساب بهترین طرح اختلاط، طرح اختلاط چهارم یعنی اضافه‌شدن ۳۰ درصد ریزدانه به طرح پایه می‌باشد. اما با در نظر گرفتن کاهش دبی گذر کرده یعنی از ۸ به ۵ لیتر بر دقیقه به‌نظر می‌رسد استفاده این طرح اختلاط در عمل کاربردی نداشته باشد، و باید از طرح اختلاط سوم و یا دوم استفاده شود. البته جهت قضاوت دقیق باید اهداف پروژه مشخص شود که آیا میزان جریان عبور کرده مهم‌تر می‌باشد یا کاهش بیشتر پارامتر کیفی. به‌عنوان مثال در این پروژه برای پارامتر کیفی BOD افزایش حدود ۳۱ درصدی راندمان حذف حدود ۳۷ درصد کاهش دبی به‌همراه دارد، که این اعداد نیاز به تجزیه و تحلیل دقیق اقتصادی با توجه به شرایط محل پروژه دارد.

چهارم درصد حذف تعداد کل کلیفرم تقریباً یکسانی دارا می‌باشند. در این زمینه نتایج هان و همکاران هم روندی شبیه به نتایج گرفته شده را دنبال می‌کند (۱۸) و نتایج گرفته شده توسط فرناندز و همکاران با ۱۰ درصد تفاوت از نتایج گرفته شده، روندی مشابه را دنبال می‌کند (۱۷).

با در نظر گرفتن هدف این طرح که بهبود کیفیت پساب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب در حد استاندارد می‌باشد، موفقیت قابل قبولی به‌دست آمده است به‌طوری‌که TSS پساب از حدود میانگین ۱۲۸ به ۶۵ رسیده است که قابل استفاده در کشاورزی شده‌است. در جدول ۱۱ حدود استاندارد ایران برای استفاده مجدد از پساب و میانگین پارامترهای مورد مطالعه آورده شده‌است. برای پارامتر BOD و COD اگرچه در این تحقیق شرایط استاندارد کشاورزی را دارا می‌باشد، اما پس از گذشتن پساب از بلوک‌های بتنی استاندارد تخلیه به آب سطحی و چاه جاذب را نیز کسب کرده‌است. و برای تعداد کل کلیفرم‌ها اگرچه اعداد به‌دست آمده با شرایط استاندارد تفاوت دارد، اما نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد در صورت اتخاذ تدابیری هم‌چون افزایش طول بلوک‌چینی و یا ایجاد واحدهای سری تعداد کل کلیفرم‌ها را به‌مرز استاندارد رساند. در واقع این

۴. برای کاهش پارامتر تعداد کل کلیفرم‌ها بهینه‌ترین طرح اختلاط، طرح اختلاط سوم می‌باشد. در این طرح اختلاط برای ۲۰ درصد افزایش ریزدانه، افزایش حدود ۶۳ درصدی کاهش تعداد کل کلیفرم‌ها را به همراه دارد یعنی درصد حذف از ۳۷/۰۵ به ۸۱/۴۹ می‌رسد.

با توجه به معنی دار شدن اکثر طرح اختلاط‌ها نتیجه می‌گیریم، هرچه تخلخل ریزتر شود یا به عبارت دیگر حفرات کوچک‌تر باشد راندمان حذف افزایش می‌یابد. در نهایت با توجه به نکات بحث شده و نتایج گرفته شده با توجه به شرایط انجام این مطالعه، می‌توان گفت طرح اختلاط سوم، (یعنی طرح پایه به همراه ۲۰ درصد وزنی ریزدانه) مناسب‌ترین طرح پیشنهادی برای استفاده بتن متخلخل به‌عنوان بستر بیوفیلیم می‌باشد.

۲. روند تغییرات درصد‌های حذف COD نیز شبیه به BOD می‌باشد، یعنی با افزایش ریزدانه درصد حذف افزایش یافته ولی میزان دبی عبور کرده در واحد زمان کاهش یافته است. حداقل و حداکثر کاهش به ترتیب ۳۳/۶۷ و ۴۰/۵ می‌باشد.

۳. روند کاهش پارامتر TSS در استفاده از بتن‌های متخلخل نیز به این ترتیب است که با افزایش ریزدانه، ملاحظه می‌شود درصد کاهش TSS افزایش می‌یابد و بیشترین کاهش مربوط به طرح اختلاط چهارم می‌باشد. در واقع بتن متخلخل شبیه به یک فیلتر شنی مواد جامد معلق را به دام می‌اندازد، طبیعتاً هرچه بافت این فیلتر ریزتر باشد درصد بیشتری از ذرات معلق از پساب جدا خواهد شد.

منابع مورد استفاده

۱. ترکیان، ا. و م. احمدی. ۱۳۸۵. بیوتکنولوژی زیست‌محیطی مبانی و کاربردها (ترجمه)، مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
۲. جوانی، ح. ر. ۱۳۹۲. بررسی میزان کاهش آلاینده‌های موجود در فاضلاب تصفیه‌شده در سامانه تغذیه مصنوعی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی.
۳. حسین‌زاده حجازی، س. ا. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی دوام روسازی‌های بتنی متخلخل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۴. دایی چینی، م. و ا. محبوبی. ۱۳۸۷. بتن متخلخل (اسفنجی)، چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷.
۵. زارع، ر. ۱۳۸۳. کاربرد بتن متخلخل در تصفیه فاضلاب. مجموعه مقالات اولین همایش دانشجویی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی استهبان، ۱۳-۱۴ اسفندماه.
۶. سقائیان‌نژاد، س. ۱۳۹۱. کاهش بارآلودگی رواناب‌های شهری با استفاده از بتن متخلخل جاذب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۷. سازمان برنامه و بودجه. وزارت نیرو. ۱۳۷۱. مبانی و ضوابط طراحی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و فاضلاب شهری، نشریه شماره ۳-۱۱۸، انتشارات سازمان برنامه و بودجه.
۸. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. سازمان مدیریت منابع آب، دفتر استاندارد مهندسی آب. ۱۳۸۰. راهنمای بهره‌برداری و نگهداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری (تصفیه مقدماتی)، نشریه شماره ۲۳۷، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
۹. شولتز، ک و اوکان. دا. ۱۳۸۳. تصفیه آب‌های سطحی در کشورهای درحال توسعه. انتشارات دانشگاه تهران.
۱۰. عابدی کوپایی، ج. و جواهری‌طهرانی، م. ۱۳۹۲. معرفی کاربردی جدید از بتن متخلخل در مهندسی محیط‌زیست. مجموعه

- مقالات هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه زاهدان، ۱۷-۱۸ اردیبهشت ماه.
۱۱. عابدی کوپایی، ج. و جواهری طهرانی، م. ۱۳۹۲. معرفی استفاده از بتن متخلخل جهت فراهم نمودن آب شرب در شرایط اضطراری. مجموعه مقالات اولین همایش ملی بحران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان (اصفهان)، ۲۵-۲۶ اردیبهشت ماه.
۱۲. معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. وزارت نیرو. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا. دفتر نظام فنی و اجرایی. ۱۳۸۹. ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب های برگشتی و پساب ها. نشریه ۵۳۵، انتشارات معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور.
۱۳. وزارت نیرو. دفتر استاندارد مهندسی آب. ۱۳۸۲. راهنمای بهره برداری و نگهداری از تصفیه خانه های فاضلاب شهری (تصفیه طبیعی و برکه های تثبیت)، نشریه ۲۷۰-الف، انتشارات سازمان برنامه و بودجه.

14. ACI Committee 211. 2006. Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete. ACI 211.3R Report.
15. ACI Committee 522. 2006. Pervious Concrete. ACI 522R-06 Report.
16. Choi, I. S., S. H. Jang and J. M. Oh. 2010. Examination for purification ability of water quality by applying the porous concrete. Korean J. Limnol 35(4): 312-319.
17. Fernandez, M. R., M. G. Casabona, V. N. Anupama, B. krishnakumar, G. A. Curutchet, D. L. Bernik. 2010. PDMS-based porous particles as support beds for cell immobilization: Bacterial Biofilm formation as a function of porosity and polymer composition. Colloid. Surface B. 81: 289-296.
18. Han, Y., K. Johnson, D. Hayes, H. Xu and Y. Choi. 2013. Novel mathematical modeling on pilot scale of plug-flow. Biotechnol Bio Eng. 18: 989-999.
19. Nadav, I., G. Arye, J. tarchitzky and Y. Chen. 2012. Enhanced infiltration regime for treated wastewater purification in Soil Aquifer Treatment. (SAT). J. Hydrol. 421: 275-283.
20. Park, S., B. Byung, J. Lee and Y. Jang. 2010. A study on the seawater purification characteristics of water-permeable concrete using recycled aggregate. Resour Conserv Recy. 54: 658-665.
21. Sikka R., Nayyar V. and Sidhu S.S. 2009. Monitoring of Cd pollution in soil and plant irrigation with untreated sewage water in some industrialize cities of Punjab India. Environ. Monit Assess. 154: 53-64.
22. Simmones R. W. Ahmad W. Noble A. D. Blummel M. Evans A. and Weckenbrock. P. 2009. Effect of long-term un-treated domestic wastewater reuse on soil quality wheat grain and straw yields and attributes of fodder quality. Irrigation Sci. 24: 95-112.
23. Stevik, T. K., K. AA, G. Ausland and J. F. Hanssen. 2004. Retention and removal of pathogenic bacteria in wastewater percolating through porous media: a review. Water Res. 38: 1355-1367.
24. Taghizadeh, M. M., A. Torabian, M. Borghei and A. H. Hassani. 2007. Feasibility study of water purification using vertical porous concrete filter. J. Environ. Sci. Tech. 4(4): 505-512.
25. Tawfik, A., F. El-Gohary and H. Temmink. 2010. Treatment of domestic wastewater in an up-flow anaerobic sludge blanket reactor followed by moving bed Biofilm reactor. Bioprocess Biosyst Eng. 33: 267-27.
26. Tennis, P. D., M. L. Leming and D. J. Akers. 2004. Pervious Concrete Pavements, Portland Cement Assoc. ISBN 0-89312-242-4.
27. Wilson, J., L. Boutilier, R. Jamieson, P. Havard and C. Lake. 2011. Effects of Hydraulic Loading Rate and Filter Length on the Performance of Lateral Flow Sand Filters for On-Site Wastewater Treatment. J. Hydrol. Eng. 10: 359-368.
28. Wu, Y. F., X. W. Lu, Y. Jia and J. Shi. 2010. Water quality improvement and community Characteristics In simulated rivers using porous concrete embankments. Sustain. Environ. Res. 20(5): 317-323.