

Design a New Polyurethane Filter Modified with Nano-sized Polypyrrole for Improving Municipal Waste Water Quality

SOMAYEH MOSTAFAVI¹, VAHID REZAVERDINEJAD², SAJAD PIRSA^{3*}

1. Ph.D Candidate, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 3. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Urmia University, Urmia, Iran
- (Received: Apr. 30, 2018- Revised: July. 7, 2018- Accepted: Aug. 11, 2018)

ABSTRACT

Many studies have been conducted to investigate the removal of various pollutants from water using nanoparticles. The results indicate that this method has a very high efficiency. In this study, polyurethane filter is modified by nano sized polypyrrole (PPy) and used to improve the quality of the waste water. The chemical polymerization by in place method was used for polymerization of PPy. The Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) was used for characterization of morphology, size and porosity of synthesized nano-polymers. The results indicate that the synthesized polymers are granular and uniformly (≈ 50 to 120 nm) synthesized on the polyurethane filter. Central Composite Design (CCD) was used to study the effect of filtration time and filter height on the improving of waste water quality. The quality of waste water after filtration was checked by spectroscopy and various devices such as BOD meters, salinity gauge and so. The results indicate that designed filter has a good performance in improving the parameters such as total dissolved solids (TDS), biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), color, salinity, hardness and pH from waste water. After data modeling, optimal conditions for improving the quality of waste water such as the number of passing waste water samples from filter and filter thickness were obtained using graphical method. The optimum thickness for the filter is 1.3 centimeters and the most suitable filtration is 8 times.

Keywords: Polymeric filter, Nanostructures, Removal of chemical and physical pollutants, waste water.

طراحی فیلتر پلی‌اورتان اصلاح شده با پلی‌پیرول نانوساختار برای افزایش کیفیت آب پساب‌های شهری

سمیه مصطفوی^۱، وحید رضوردی نژاد^۱، سجاد پیرسا^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۴/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۵/۲۰)

چکیده

مطالعات زیادی در زمینه بررسی حذف آلاینده‌های مختلف از آب با استفاده از نانو ذرات انجام شده است و نتایج بدست آمده بیانگر این است که این روش کارایی بسیار بالایی دارد. در این پژوهش فیلتر پلی‌اورتان اصلاح شده با نانو مواد پلیمری برای بهبود کیفیت فاضلاب استفاده گردید. ساختار فیلتر و اندازه ذرات سنتز شده بوسیله تکنیک‌های FT_IR و SEM بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که پلیمرهای سنتز شده دانه‌ای شکل بوده و به صورت یکنواخت سنتز شده‌اند. اندازه ذرات سنتز شده در حدود ۵۰ تا ۱۲۰ نانومتر می‌باشند. طرح آماری مرکب مرکزی برای بررسی اثر تعداد دفعات فیلتراسیون و نیز ارتفاع فیلتر در بهبود کیفیت نمونه‌ی فاضلاب استفاده شد. کیفیت فاضلاب بعد از عمل فیلترشدن توسط روش اسپکتروسکوپی و دستگاه‌های مختلفی مانند BOD متر و شوری سنج و ... بررسی گردید. نتایج حاصل نشان می‌دهد که این فیلتر کارایی مطلوبی در بهینه کردن پارامترهایی نظیر مقدار کل جامدات محلول، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، رنگ، شوری، سختی و pH از نمونه فاضلاب داشته است. پس از مدلسازی داده‌ها شرایط بهینه جهت بهبود کیفیت فاضلاب از قبیل تعداد دفعات عبوری نمونه‌ی فاضلاب از فیلتر و ضخامت فیلتر با استفاده از روش گرافیکی به دست آمد. بهینه‌ترین ضخامت برای فیلتر ۱/۳ سانتی‌متر و مناسب‌ترین تکرار فیلتراسیون ۸ بار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فیلتر پلیمری، ساختارهای نانو، حذف آلاینده‌های شیمیایی و فیزیکی، فاضلاب.

مقدمه

آب‌ها بطور مستقیم و غیرمستقیم، توسط فعالیت‌های حیاتی انسان در معرض آلودگی‌های شدید قرار می‌گیرند. وجود مواد در محیط‌های مختلف در محدوده‌های خاصی مجاز هستند ولی آلودگی زمانی اتفاق می‌افتد که این مقادیر به طور ناگهانی افزایش قابل توجهی یابند و این افزایش موجب اختلال در روند طبیعی پدیده‌ها شود (Abrishamchi *et al.*, 1995; Andréassian & Wolf, 2001; Margat, 2012; Burkhardt-Holm, 2010; Wolf, 2001). تصفیه آب‌های آلوده و جلوگیری از ورود آلودگی‌ها به منابع آب یکی از موارد قابل توجه است. با توسعه شهرها و افزایش جمعیت آنها و گسترش صنایع روز به روز بر اهمیت کنترل آلودگی محیط‌زیست افزوده شده است (Eisazadeh & Soleimani, 2010; Lashkenari, 2010). تامین منابع آبی با کیفیت مناسب از مهم‌ترین نیازهای انسان امروزی می‌باشد (Alizadeh, 1998). یکی از

کاربردهای فناوری نانو استفاده از نانوفیلترهاست که نقش مؤثری در حفظ محیط‌زیست و صرفه‌جویی در انرژی دارد (Alipour & Rezaei, 2011; Jackiewicz *et al.*, 2013; Mortazavi *et al.*, 2010). سیستم تصفیه آب به روش فیلتراسیون یکی از روش‌های حذف ذرات درشت از آب مثل: سنگ‌ریزه‌ها، شن و ماسه، گل و لای، لجن، جلبک، زنگ‌زدگی داخل لوله‌ها می‌باشد که روش نانوفیلتراسیون یکی از این روش‌های تصفیه مرسوم در دنیا، می‌باشد. از مزایای استفاده از نانوفیلتراسیون در تصفیه آب و پساب عبارتند از: حذف نمک‌های چندظرفیتی (از قبیل آهن، منگنز، اورانیم و برخی آفت‌کش‌ها)، امکان تولید میزان آب تصفیه شده در مقیاس وسیع، از بین بردن انواع باکتری، ویروس و میکروارگانیسم‌ها، حذف آلاینده‌های آلی، حفظ مواد معدنی مورد نیاز سلامت انسان، از بین بردن اثرات مخرب زیست‌محیطی، حذف کدورت آب، سختی و شوری آب، پایین بودن هزینه تصفیه آب و در مجموع همانگونه که اشاره شد عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی زیان‌آور برای محیط‌زیست و انسان (Block, 2001;)

* نویسنده مسئول: pirs7@gmail.com

گرفته بود گزارش دادند و از آن پس استفاده از پلیمرهای هادی در حسگرهای گازی روند روبه‌رشدی را داشته است (Chiang *et al.*, 1978). در سال‌های اخیر استفاده از پلیمرهای هادی در ساخت فیلترهای پلیمری مورد توجه بوده است. فیلترهای پلیمری در صنعت نیز از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد، این فیلترها با خاصیت جذب فیزیکی و شیمیایی بسیار مناسب برخی آلاینده‌ها در حذف و یا کاهش آلاینده‌ها کارایی بالایی دارد (Miasik *et al.*, 1986). در مطالعه‌ای (Wang *et al.* 2016) به تولید کامپوزیت قابل بازیافت تیتانیوم دی‌اکسید-گرافین اکسید برای تصفیه فاضلاب پرداختند. با تولید این نوع کامپوزیت توسط یک روش اولتراسونیک که نانوصفحات گرافین اکسید تیمار شده با نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید توسعه داده شده است، بر مشکلات جداسازی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید تیمار شده با آب غلبه شد (Wang *et al.*, 2016).

در این مقاله پلیمرهای هادی پلی‌پیرول برای اصلاح سطح پلی‌اورتان و ساخت فیلترهای پلیمری استفاده شد. پلی‌پیرول یکی از پلیمرهای رساناست که به‌عنوان پلیمری با کاربردهای فراوان مورد مطالعه قرار گرفته است. از بین پلیمرهای رسانای مختلف، پیرول به آسانی از طریق اکسایش الکتروشیمیایی یا شیمیایی به پلی‌پیرول پلیمر می‌شود. پلی‌پیرول دارای ساختار محکم و انعطاف‌پذیر و گروه‌های با قابلیت تبادل یونی سست است. ساختار ثانوی پلیمرها سطح تماس آنالیت با فیلتر را زیاد می‌کند و از طرف دیگر چون فوم‌های پلی‌اورتان نفوذپذیر می‌باشند آنالیت‌ها به راحتی در معرض فیلترهای تهیه‌شده قرار می‌گیرند (Partridge *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 1995). تاثیر روش پوشش‌دهی و پارامترهای موثر بر مورفولوژی پلیمر توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی مطالعه شد. در این تحقیق پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: مقدار کل جامدات محلول، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، رنگ، شوری، سختی، pH.

بخش تجربی

مواد و تجهیزات

مواد مورد استفاده

در این مطالعه فیبرهای پلی‌استری با پلی‌پیرول پوشانده شد که از آن برای بهبود کیفیت فاضلاب استفاده شده است. مونومر پیرول از شرکت مرک و سایر ترکیبات آلی مورد استفاده از شرکت آلدریج تهیه شدند. این ترکیبات که از شرکت‌های مرک و آلدریج تهیه شده بودند بدون خالص سازی مجدد مورد

Osram HNS/UVC Lamps, 1991; Russell *et al.*, 1982; (Water Purification System; UV Fresher, 2003).

فیلترهای نانوکامپوزیت یکی از پرکاربردترین فیلترها می‌باشند که در صنایع مختلف مانند صنایع آب و فاضلاب، پساب صنایع غذایی، در زمینه‌های کشاورزی مانند کیفیت آب-های مورد نیاز آبیاری محصولات کشاورزی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. کامپوزیت از ترکیب و اختلاط چند ماده حاصل می‌شود. کامپوزیت‌ها موادی جامد و مصنوعی هستند که از ترکیب دو یا چند جزء (یا فاز) که از نظر شیمیایی یا فیزیکی کاملاً متفاوتند تشکیل شده باشند. این اجزاء به صورت منظم یا پراکنده کنار هم قرار گرفته‌اند و لایه مشترکی بین آنها وجود دارد. این زمینه‌ها نقش چسباندن اجزاء به یکدیگر و محافظت اجزاء را در برابر عوامل مکانیکی و جوی همچون رطوبت بر عهده دارند. نانوکامپوزیت عبارت است از کامپوزیتی که حداقل یکی از اجزای تشکیل‌دهنده آن در ابعادی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد. در مواد نانوکامپوزیت، به جزء پخش‌شونده که به صورت الیاف، صفحات مسطح ریز، ذرات و یا حتی حفره‌ها، ترک‌ها و غیره در ابعاد نانومتری باشند، فاز دوم اطلاق می‌شود و همینطور به جزء پیوسته در نانوکامپوزیت‌ها که می‌تواند در ابعاد نانومتری و یا بالاتر باشد فاز زمینه می‌گویند. در دسته‌ای از مواد نانوکامپوزیت، فاز دوم، موادی با دمای ذوب بالا مانند سرامیک‌ها و یا فلزات بوده، فاز زمینه ماده‌ای با دمای ذوب پایین مانند پلیمر و سرامیک و فلز با دمای ذوب پایین است. اما در دسته دیگر، فاز زمینه ماده‌ای سرامیکی یا فلزی با دمای ذوب بالا و فاز دوم ماده‌ای پلیمری یا سرامیکی و یا فلزی با دمای ذوب پایین‌تر است. نانوکامپوزیت‌ها خواص فیزیکی و مکانیکی از قبیل استحکام، سختی، چقرمگی و مقاومت حرارتی بالایی در محدوده وسیعی از دما دارند. در بین نانوکامپوزیت‌ها بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانوکامپوزیت‌های پلیمری، خواص بی-نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموماً دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند. تقویت پلیمرها با استفاده از مواد آلی و معدنی بسیار مرسوم می‌باشد (Azizi *et al.*, 2016; Davoodi *et al.*, 2016; Koh *et al.*, 2008; Mahapatra *et al.*, 2013; Ren *et al.*, 2007; Rytwo, 2012; Sheng *et al.*, 2010; Vital de Oliveira *et al.*, 2016).

سابقه بکارگیری پلیمرهای هادی در حسگر به سال ۱۹۷۸ برمی‌گردد. Chiang *et al.* (1978) افزایش شازنده برابری هدایت الکتریکی را برای پلی‌استیلنی که در معرض بخار ید قرار

داده شد و با کمک همزن شیشه‌ای تمام آب داخل بشر به داخل فوم نفوذ داده شد. در بشر دیگری ۲۰۰ میلی لیتر محلول ۰/۲ مولار کلرید آهن ۳ تهیه شد. در نهایت در حالی که بشر حاوی فوم پلی‌اورتانی بر روی شیکر قرار دارد محتویات محلول کلرید آهن ۳ در مدت ۳۰ دقیقه آرام آرام به داخل بشر حاوی فوم ریخته شد و تمامی محلول به داخل فوم نفوذ داده شد. واکنش سنتز پلی‌پیرول در درون فوم به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط ادامه پیدا کرد. در طول سنتز پلیمر محلول داخل بشر توسط شیکر مکانیکی شیک می‌شد. پس از انجام واکنش سنتز پلیمر، فوم پلی‌اورتان پوشش داده شده با پلی‌پیرول از بشر سنتزی خارج شد و به صورت مکانیکی آب آن گرفته شد. در انتها فوم پوشش داده شده با پلی‌پیرول در آن با دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت خشک گردید.

تحلیل SEM

به منظور بررسی اندازه و مورفولوژی نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصویر SEM با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی LEO 1430VP محصول مشترک کشورهای آلمان و انگلستان، تهیه شد.

طیف FT-IR پلی‌پیرول سنتز شده:

برای بررسی سنتز پلی‌پیرول و ساختار پلیمرهای سنتز شده، از پلیمرهای سنتز شده طیف FT-IR تهیه شد. تصاویر FT-IR با استفاده از دستگاه FTIR Spectroscopy, Spectrom RXI ساخت کشور انگلستان ثبت شد.

استفاده از فیلتر پلی‌اورتان برای بهبود کیفی فاضلاب

بعد از تهیه فیلترهای پلی‌اورتان که نانوذرات بر روی آن سنتز شد شکل فیزیکی فیلتر طراحی شد و پارامترهای مختلفی مانند طول ابعاد فیلتر بهینه‌سازی گردید. بعد از طراحی و بهینه‌سازی شکل فیزیکی و پارامترهای فیزیکی فیلتر به طور مستقیم در زمان‌ها و شرایط مختلف در تماس با نمونه آبی قرار گرفت. میزان حذف مواد سرطانزا، بدطعم و بدبوکننده‌های موجود در آب بعد از عمل فیلترشدن توسط روش اسپکتروسکوپی و دستگاه‌های مختلفی مانند BOD متر و شوری سنج و ... بررسی گردید.

طراحی شکل فیلتر

در این مطالعه از فیلترهایی با طول ۶ سانتی‌متر و عرض ۳ سانتی‌متر و ارتفاعات متغیر ۱، ۲/۵ و ۴ سانتی‌متر استفاده شده است. شکل شماتیک از فیلتر طراحی شده به صورت شکل (۱) می‌باشد. پارامترهایی که قبل و بعد از عملیات فیلتراسیون بررسی شدند عبارتند از: رنگ، سختی، شوری، pH، مواد کل جامد، BOD و COD.

استفاده قرار گرفتند. در تمام آزمایشات و برای تهیه‌ی محلول از آب مقطر دو بار تقطیر استفاده شد. سرنگ هاملتونی ۱۰ و ۲۵ میکرولیتری و پیت‌های مدرج ۲ و ۵ میلی‌لیتری برای برداشتن حجم‌های مورد نیاز بکار رفت. فوم پلی‌اورتان از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است.

۱-۲-۲- دستگاه‌های استفاده شده

دستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از:

BOD متر: برای اندازه‌گیری BOD از دستگاه BOD

TRAK شرکت HACH، ساخت کشور اتریش استفاده شد.

COD متر: برای اندازه‌گیری COD ابتدا باید نمونه‌ها هضم

شوند، چون هضم شیمیایی نمونه‌ها یک پیش نیاز برای محاسبه مقادیر COD می‌باشد. بدین منظور از دستگاه راکتور حرارتی مدل DRB 200 شرکت HACH کشور اتریش استفاده شد. برای قرائت COD از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل DR 2800 شرکت HACH کشور اتریش استفاده شد.

TDS متر: برای اندازه‌گیری TDS از دستگاه pH & TDS

METER, Crison MM 40، ساخت کشور اسپانیا استفاده شد.

فتومتر: برای سنجش میزان سختی کل و رنگ از دستگاه

فتومتر ۷۵۰۰، شرکت Palintest ساخت کشور انگلستان استفاده شد.

pH متر: برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH- METER,

Crison pH 25، ساخت کشور اسپانیا استفاده شد.

شوری سنج: برای اندازه‌گیری شوری از دستگاه شوری

سنج دستی مدل MT- 128، ساخت کشور چین استفاده شد.

روش آزمایش

روش‌های استفاده شده:

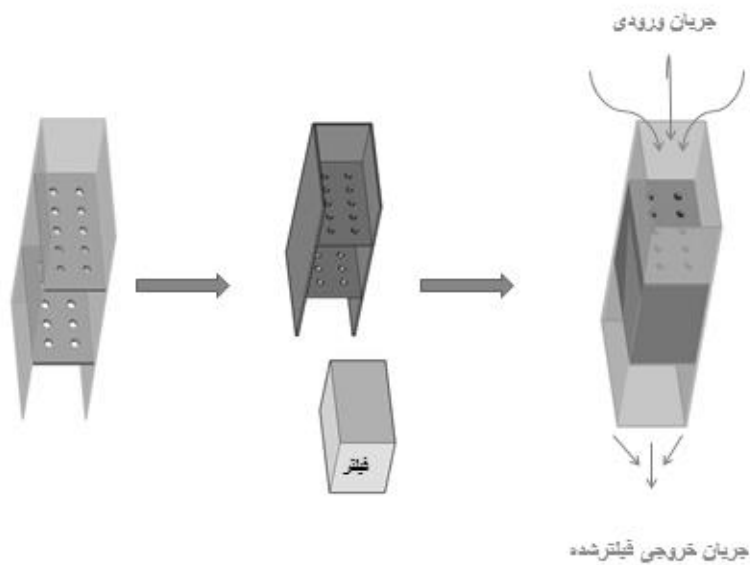
تهیه فیلتر پلی‌اورتان - پلی‌پیرول

آماده سازی مقدماتی

برای آماده سازی فوم پلی‌اورتان ابتدا فوم توسط محلول و آب شوینده شسته شد و سپس در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید.

پوشش‌دهی فوم پلی‌اورتان با پلی‌پیرول به روش پلیمریزاسیون در محل

برای پوشش‌دهی فوم پلی‌اورتان، در یک بشر ۵۰۰ میلی لیتری ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر ریخته شد و سپس به آن مقداری پیرول تقطیر شده اضافه گردید تا غلظت پیرول ۰/۱ مولار باشد. بشر بر روی شیکر الکتریکی قرار داده شد و به مدت ۱۰ دقیقه شیک شد تا پیرول به طور کامل در داخل آب پخش شود. فوم پلی‌اورتانی مکعبی با ابعاد ۵×۳×۶ سانتی‌متر به داخل بشر انتقال



شکل ۱- نمایی از ساختمان فیلتر طراحی شده به همراه جریان ورودی و خروجی

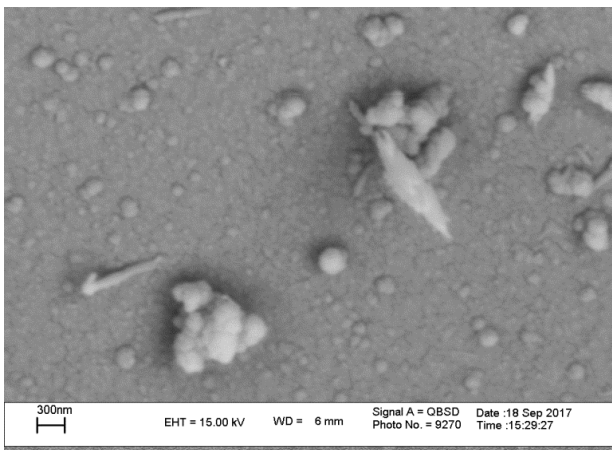
بررسی شده جهت پیش‌بینی متغیرهای پاسخ ارائه شد. همچنین شرایط بهینه متغیرهای آزمایش جهت کمینه یا بیشینه کردن مقدار متغیرهای پاسخ توسط این نرم‌افزار مشخص شد.

نتایج و بحث

بررسی ساختار پلیمرهای سنتز شده

تحلیل SEM

به منظور بررسی اندازه و مورفولوژی نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل (۲) تصویر SEM فیلتر پلی‌اورتان اصلاح شده با پلی‌پیرول را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که پلیمرهای سنتز شده دانه‌ای شکل بوده و به صورت یکنواخت سنتز شده‌اند. اندازه ذرات سنتز شده در حدود ۵۰ تا ۱۲۰ نانومتر می‌باشند.



شکل ۲- تصویر SEM فیلتر پلی‌اورتان اصلاح شده با پلی‌پیرول

تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش به منظور استخراج مدل و یافتن بیشترین تاثیر از روش سطح پاسخ استفاده شد. در این تحقیق نیز برای بررسی اثر تعداد دفعات عبوری نمونه‌ی فاضلاب از فیلتر و ضخامت فیلتر از طراحی آزمایش بر اساس طرح مرکب مرکزی استفاده می‌شود. بدین منظور اثر دو فاکتور تعداد دفعات عبوری نمونه‌ی فاضلاب از فیلتر و ضخامت فیلتراسیون در طی سیزده آزمایش متفاوت بررسی شده و نتایج بهینه‌ی آزمایش (بهترین ضخامت فیلتراسیون و بهترین تعداد دفعات عبوری نمونه‌ی فاضلاب از فیلتر) مشخص می‌گردد. در این آزمایش متغیرهای مستقل شامل تعداد دفعات عبوری (X_1) و ضخامت فیلتراسیون (X_2) می‌باشند. برای هر یک از متغیرهای مورد مطالعه یک سطح بالا (با کد +۱) و یک سطح متوسط (با کد ۰) و یک سطح پایین (با کد -۱) در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به سطح هر یک از متغیرها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- متغیرها و سطوح مربوط به متغیرها در طرح مرکب مرکزی

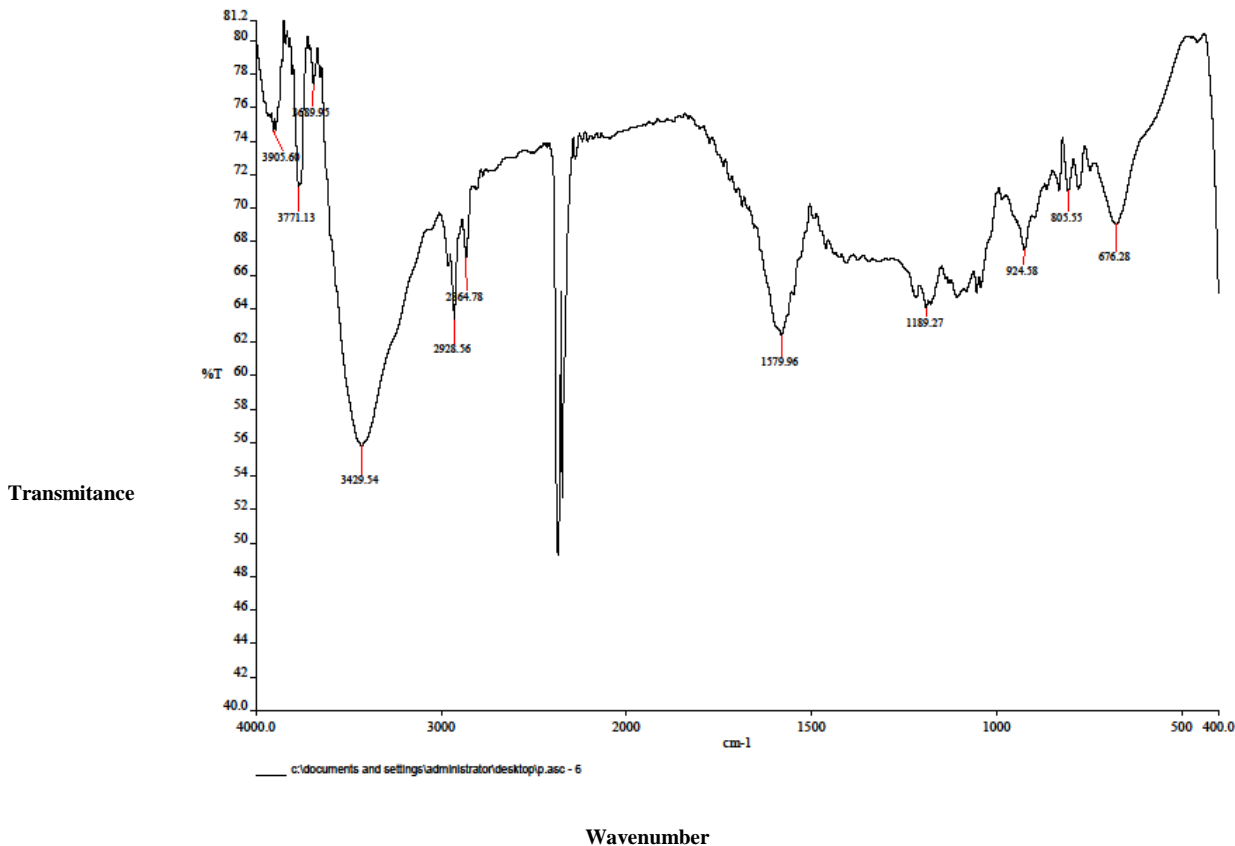
محدوده و سطوح			متغیرها
سطح بالا	سطح متوسط	سطح پایین	
+۱	۰	-۱	تکرار
۱۰	۵	۲	ضخامت (سانتی‌متر)
۴	۲/۵	۱	

تجزیه و تحلیل آماری نتایج نیز با استفاده از نرم‌افزار Design- Expert و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) انجام شد. با این نرم‌افزار مدل ریاضی چند جمله‌ای برای متغیرهای

طیف FT-IR پلی پیرول سنتز شده

برای بررسی سنتز پلی پیرول و ساختار پلیمرهای سنتز شده، از پلیمرهای سنتز شده طیف FT-IR تهیه شد. شکل (۳) طیف مربوط به پلی پیرول با آنیون دوپان کلرید را نشان می‌دهد. پیک‌های موجود در ناحیه 1540 و 1454 cm^{-1} به ترتیب

مربوط به ارتعاش‌های کششی C-N و C=C می‌باشند، پیک‌های موجود در ناحیه 1300 و 1176 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی مسطح =CH- می‌باشد و نیز نشان می‌دهد که پلی پیرول در حالت دوپه قرار دارد.



شکل ۳- طیف FT-IR پلی پیرول با آنیون دوپان کلرید ۲-۳- طراحی آزمایش

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (\text{رابطه ۱})$$

(رابطه ۲)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

در این معادلات X_i و X_j فاکتورهای مستقل و $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ ضرایب رگرسیون بدست آمده از روش حداقل مربعات می‌باشند.

روش رویه پاسخ و انتخاب شرایط بهینه کیفیت فاضلاب

در این تحقیق برای بیان ارتباط بین متغیرها و پاسخ‌های بدست آمده از روش سطح پاسخ استفاده شد. با استفاده از این روش می‌توان شرایط بهینه آزمایش را به صورت گرافیکی توسط منحنی‌های سه‌بعدی به دست آورد. منحنی‌های سطح پاسخ برای پارامترهای کیفی فاضلاب در شکل‌های (۴) تا (۱۰) نشان داده

جدول (۲)، طرح آزمایش مورد استفاده برای پارامترهای کیفی و نتایج ارزیابی متغیرهای پاسخ را شرح می‌دهد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج نیز با استفاده از نرم افزار Design-Expert و تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) انجام شد. بدین منظور اثر دو فاکتور تعداد دفعات عبوری نمونه‌ی فاضلاب از فیلتر و ضخامت فیلتراسیون در سه سطح بررسی شده و نتایج بهینه‌ی آزمایش مشخص می‌گردد. پاسخ‌های بدست آمده شامل پارامترهای کیفی بهینه می‌باشد.

برای در نظر گرفتن اثرات تداخلی و همزمان پارامترهای کیفی بر مشخصه‌های مورد بررسی فیلتر، تجزیه و تحلیل‌های واریانس صورت گرفت و مدل‌های ریاضی تعیین شد (جدول (۳)). همچنین با استفاده از نرم افزار Design-Expert مشخص شد مدل خطی و درجه ۲ برای متغیرهای پاسخ حکم فرماست.

نشان می‌دهد. نهایتاً شکل (۱۱) به‌طور همزمان پاسخ‌های همه متغیرهای کیفی مورد نظر را نسبت به پارامترهای ضخامت و تکرار فیلتراسیون را نشان می‌دهد.

شده است. این شکل‌ها منحنی‌های رویه پاسخ پارامترهای مقدار کل جامدات محلول، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، رنگ، شوری، سختی و pH بر اساس ضخامت فیلتر و تعداد دفعات عبوری نمونه‌ی فاضلاب از فیلتر را

جدول ۲- طرح آزمایش مرکب مرکزی و نتایج ارزیابی متغیرهای پاسخ

اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (%)	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (%)	سختی (%)	رنگ (%)	مقدار کل جامدات محلول (%)	اسیدیته (%)	شوری (%)	ضخامت	تکرار	آزمایش
۹۸/۰۷	۹۸/۰۴	۲۴/۵۶	۵۶/۵۲	۱۸/۴۵	۳۸/۵۲	۴۰/۰۰	۰	۰	۱
۹۸/۰۴	۹۸/۰۲	۲۴/۵۶	۵۸/۷۰	۱۸/۳۰	۳۷/۷۰	۵۰/۰۰	۰	۰	۲
۹۵/۱۷	۹۵/۱۶	۵۸/۳۹	۳۹/۱۳	۲۳/۸۶	۴۴/۲۶	۱۰/۰۰	۱	-۱	۳
۹۸/۵۵	۹۸/۵۱	۲۱/۰۵	۶۴/۱۳	۲۳/۶۴	۴۵/۰۸	۵۰/۰۰	۰	۱	۴
۹۸/۰۰	۹۷/۹۶	۲۶/۳۲	۵۶/۵۲	۱۸/۲۳	۳۸/۵۲	۴۰/۰۰	۰	۰	۵
۹۹/۰۳	۹۹/۰۶	۳۱/۵۸	۵۲/۱۷	۴۵/۲۴	۸۵/۲۵	۲۰/۰۰	۱	۱	۶
۹۸/۰۷	۹۸/۰۴	۲۲/۸۱	۵۵/۴۳	۱۸/۵۲	۳۸/۵۲	۴۰/۰۰	۰	۰	۷
۹۹/۰۳	۹۹/۰۶	۳۳/۳۳	۴۵/۶۵	۳۰/۶۷	۵۴/۱۰	۲۰/۰۰	۱	۰	۸
۹۷/۱۰	۹۷/۰۵	۳۸/۶۰	۶۸/۴۸	۱۴/۴۹	۳۷/۷۰	۳۰/۰۰	۰	-۱	۹
۹۹/۷۸	۹۹/۷۸	۱/۷۵	۵۸/۷۰	۳۳/۸۲	۶۶/۳۹	۴۰/۰۰	-۱	۱	۱۰
۹۸/۱۶	۹۸/۱۳	۲۴/۵۶	۵۵/۴۳	۱۸/۷۴	۳۹/۳۴	۳۰/۰۰	۰	۰	۱۱
۹۹/۳۵	۹۹/۳۲	۲۴/۵۶	۶۵/۲۲	۲۳/۷۲	۴۸/۳۶	۴۰/۰۰	-۱	۰	۱۲
۹۹/۷۱	۹۹/۷۲	۵۰/۸۸	۳۰/۴۳	۱۸/۰۱	۴۳/۴۴	۴۰/۰۰	-۱	-۱	۱۳

جدول ۳- مدل‌های ریاضی برای بیان ارتباط بین پاسخ‌ها و متغیرهای مستقل

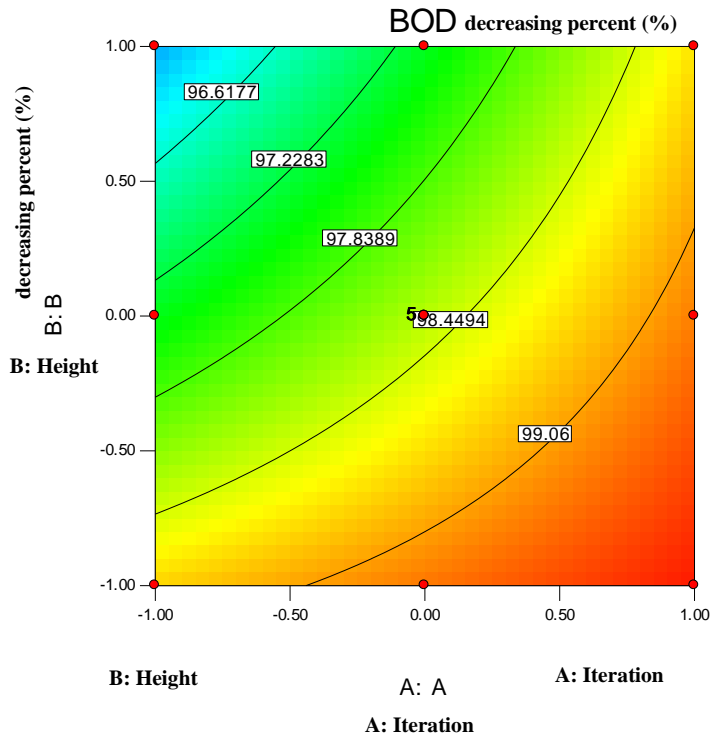
ضرایب تبیین	معادله رگرسیون	پاسخ
$R^2 = 0.844069$ $R^2_{adjusted} = 0.763249$	$Y = 98.31288 + 0.89775A - 0.93397B + 0.474025A*B$	اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی
$R^2 = 0.741887$ $R^2_{adjusted} = 0.660377$	$Y = 98.29585 + 0.9028A - 0.92377B + 0.4887A*B$	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی
$R^2 = 0.673535$ $R^2_{adjusted} = 0.629017$	$Y = 29.14979 - 14.7661A + 3.508775B$	سختی
$R^2 = 0.669475$ $R^2_{adjusted} = 0.572757$	$Y = 48.32344 + 6.159417A - 2.89857B + 1.08695A*B + 13.18402A^2 - 0.13118B^2$	رنگ
$R^2 = 0.7556206$ $R^2_{adjusted} = 0.641479$	$Y = 20.1505 + 7.722283A + 4.03855B + 2.809288A*B + 4.240938A^2 + 3.051338B^2$	مقدار کل جامدات محلول
$R^2 = 0.784831$ $R^2_{adjusted} = 0.683575$	$Y = 41.2359 + 11.88517A + 4.234833B + 5.123125A*B + 7.377026A^2 + 6.147526B^2$	اسیدیته
$R^2 = 0.892403$ $R^2_{adjusted} = 0.795267$	$Y = 34.61538 + 5A - 11.6667B + 1.25A*B$	شوری

Design-Expert® Software

BOD
 • Design Points
 99.8068
 95.1691

X1 = A: A
 X2 = B: B

Actual Factor
 C: C = PPy

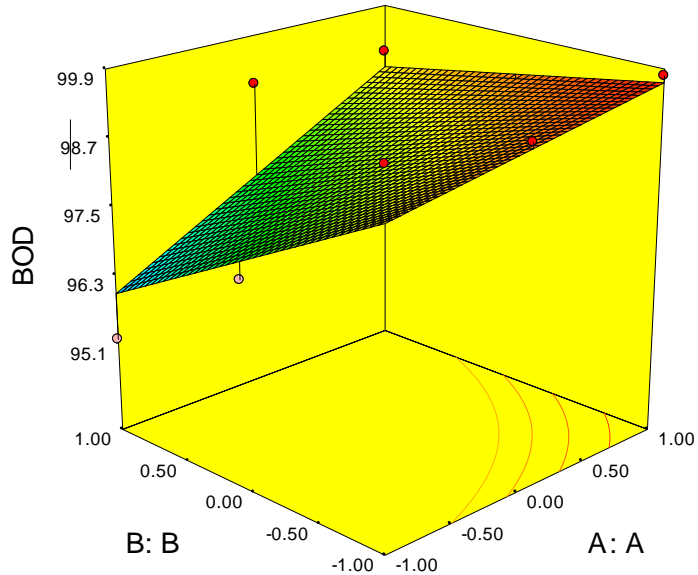


Design-Expert® Software

BOD
 99.8068
 95.1691

X1 = A: A
 X2 = B: B

Actual Factor
 C: C = PPy



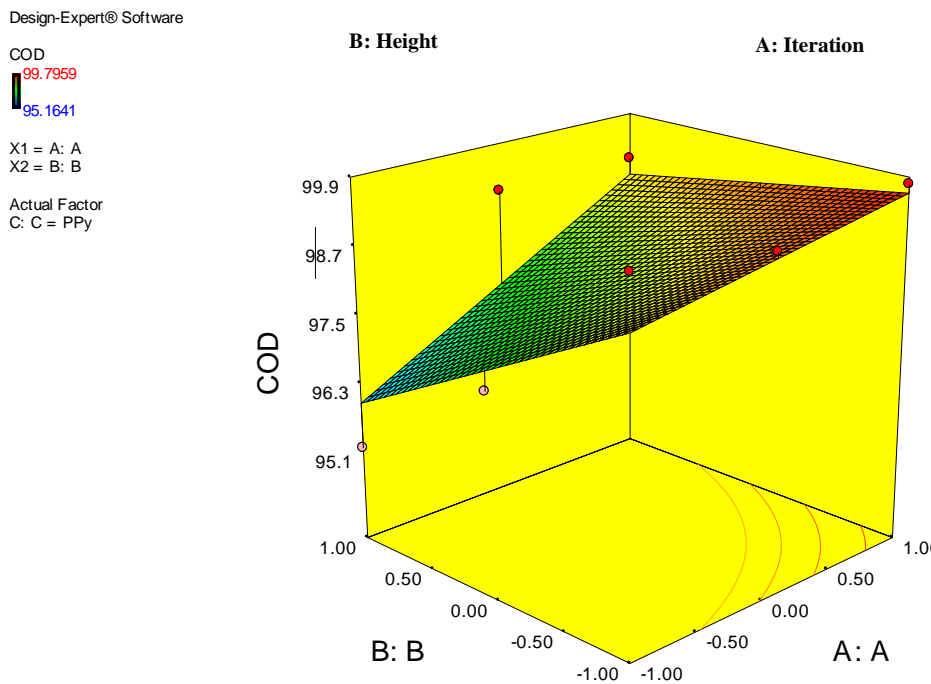
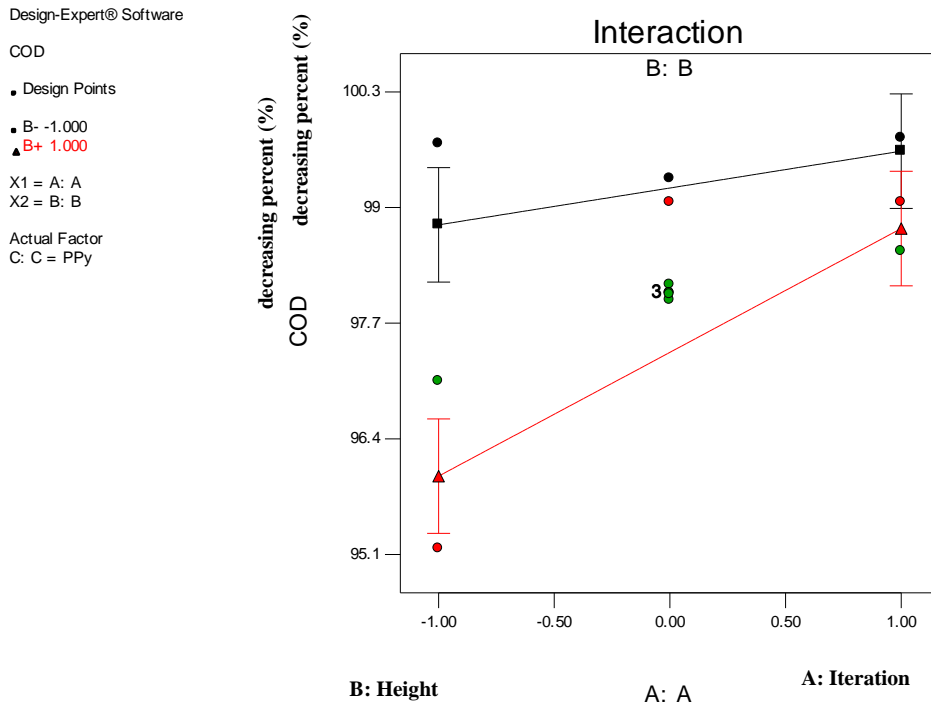
شکل ۴- سطوح پاسخ درصد کاهش BOD بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

ضخامت حداقل و حداکثر فیلتر وجود دارد. در شرایط حداقل ضخامت فیلتر و حداکثر ضخامت فیلتر با افزایش تکرار فیلتراسیون، BOD کاهش می‌یابد. شکل سه بعدی نشان می‌دهد که هر چه ارتفاع فیلتر کم باشد و یا به عبارت دیگر فیلتر فشرده‌تر باشد (یعنی پروسیت یا نفوذپذیری کمتری

با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود کم‌ترین BOD (بیشترین درصد کاهش) وقتی بدست می‌آید که تکرار فیلتراسیون حدوداً ۷ تا ۱۰ بار باشد و ضخامت فیلتراسیون حدوداً ۱ سانتی‌متر باشد. همچنین نمودار برهمکنش نشان می‌دهد که در تکرارهای پایین فیلتراسیون اختلاف بیشتری بین

BOD از پساب سیستم تصفیه فاضلاب شهر مرودشت به روش لاگون هوادهی و ارتقای کیفی سیستم با استفاده از فیلتر قلوه سنگی به این نتیجه رسیده‌اند که هر چه ارتفاع فیلتر کمتر باشد قدرت یا کارایی فیلتر بهتر خواهد بود

داشته باشد) کارایی فیلتر جهت کاهش BOD بهتر خواهد بود. هرچه ارتفاع فیلتر یا پروسیته فیلتر زیادتر می‌شود کارایی فیلتر جهت کاهش BOD کمتر می‌شود. Ghaneian *et al.*, (2014) در تحقیقی تحت عنوان بررسی حذف پارامترهای TSS, COD,



شکل ۵- سطوح پاسخ درصد کاهش COD بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

فیلتراسیون، COD کاهش می‌یابد. شکل سه بعدی نشان می‌دهد که هر چه ارتفاع فیلتر کم باشد و یا به عبارت دیگر فیلتر فشرده‌تر باشد (یعنی پروسیته یا نفوذپذیری کمتری داشته باشد) کارایی فیلتر جهت کاهش COD بهتر خواهد بود. هر چه ارتفاع فیلتر یا پروسیته فیلتر زیادتر می‌شود کارایی فیلتر جهت کاهش COD کمتر می‌شود.

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود کم‌ترین COD (بیشترین درصد کاهش) وقتی بدست می‌آید که تکرار فیلتراسیون حدوداً ۷ تا ۱۰ بار باشد و ضخامت فیلتراسیون حدوداً ۱ سانتی‌متر باشد. همچنین نمودار برهمکنش نشان می‌دهد که در تکرارهای پایین فیلتراسیون اختلاف بیشتری بین ضخامت حداقل و حداکثر فیلتر وجود دارد. در شرایط حداقل ضخامت فیلتر و حداکثر ضخامت فیلتر با افزایش تکرار

Design-Expert® Software

Hardness

• Design Points

• B- -1.000

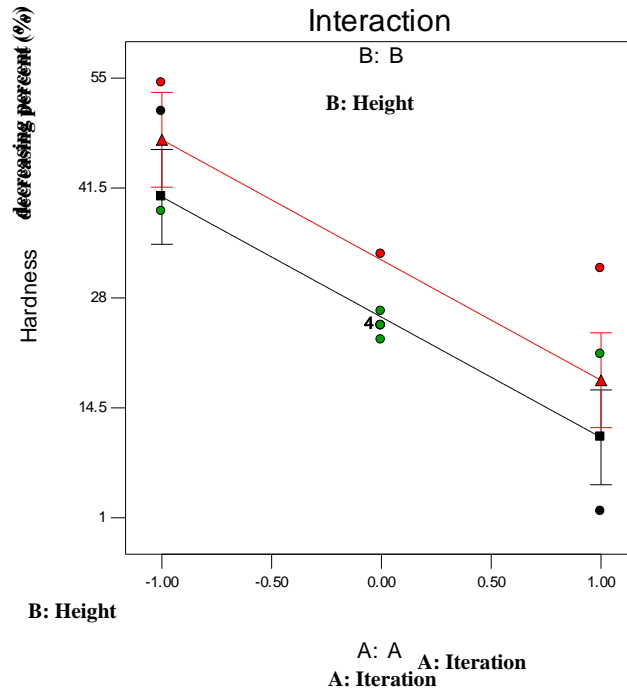
▲ B+ 1.000

X1 = A: A

X2 = B: B

Actual Factor

C: C = PPy



Design-Expert® Software

Hardness

54.386

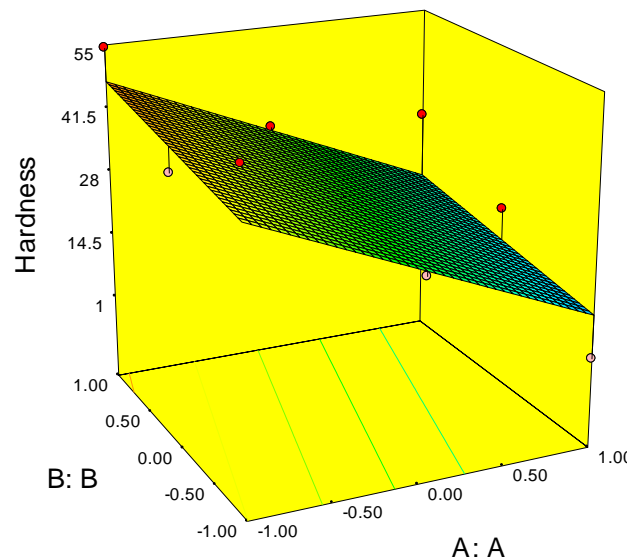
1.7544

X1 = A: A

X2 = B: B

Actual Factor

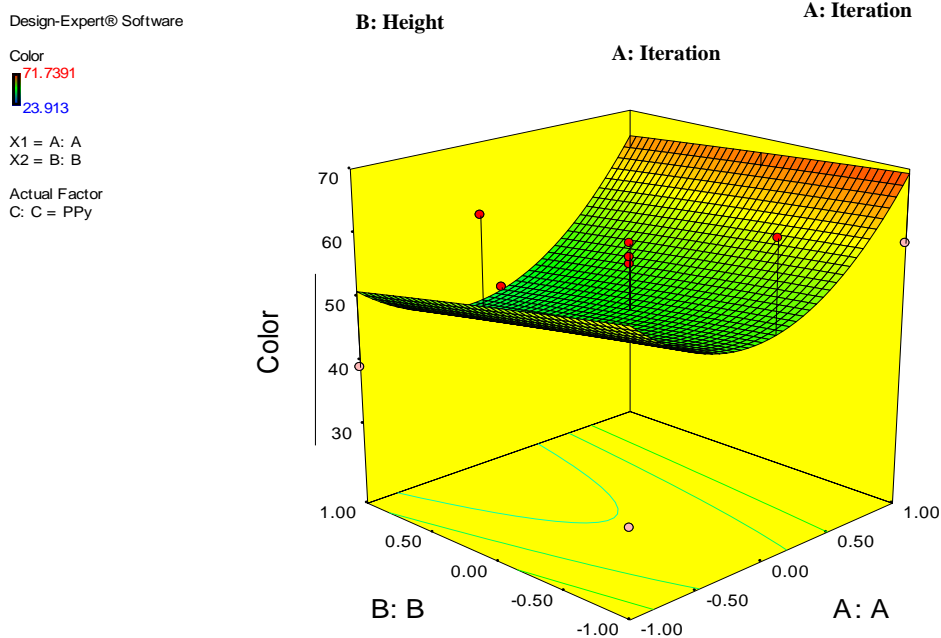
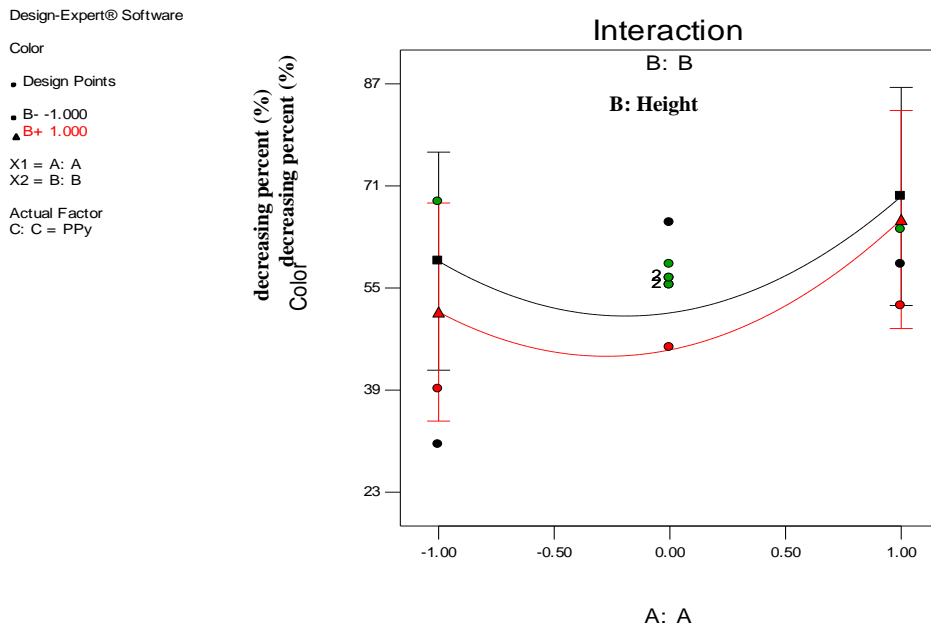
C: C = PPy



شکل ۶- سطوح پاسخ درصد کاهش Hardness بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

می‌دهد که در کل تکرارهای فیلتراسیون اختلاف معنی داری بین ضخامت حداقل و حداکثر فیلتر وجود ندارد. در شرایط حداقل و حداکثر ضخامت فیلتر با افزایش تکرار فیلتراسیون، Hardness افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود کم‌ترین Hardness (بیشترین درصد کاهش) وقتی بدست می‌آید که تکرار فیلتراسیون حدوداً ۲ تا ۴ بار باشد و ضخامت فیلتراسیون حدوداً ۱ تا ۴ سانتی‌متر باشد. همچنین نمودار برهمکنش نشان



شکل ۷- سطوح پاسخ درصد کاهش Color بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

ضخامت فیلتر و حداکثر ضخامت فیلتر با افزایش تکرار فیلتراسیون، در تکرارهای پایین رنگ افزایش یافته و به تدریج در تکرارهای بالاتر کاهش می‌یابد. در کل تکرارهای فیلتراسیون اختلاف معنی داری بین ضخامت حداقل و حداکثر فیلتر وجود ندارد.

با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود کم‌ترین رنگ (بیشترین درصد کاهش) وقتی بدست می‌آید که تکرار فیلتراسیون حدوداً ۱۰ بار باشد و ضخامت فیلتراسیون حدوداً ۱ تا ۴ سانتی‌متر باشد. همچنین نمودار برهمکنش نشان می‌دهد که در شرایط حداقل

Design-Expert® Software

TDS

• Design Points

■ B- -1.000

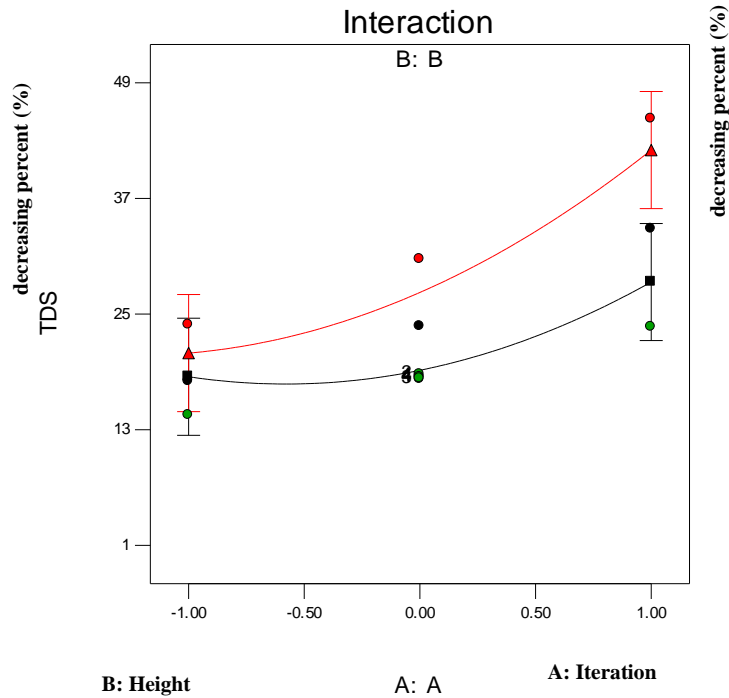
▲ B+ 1.000

X1 = A: A

X2 = B: B

Actual Factor

C: C = PPy



Design-Expert® Software

TDS

■ 45.2416

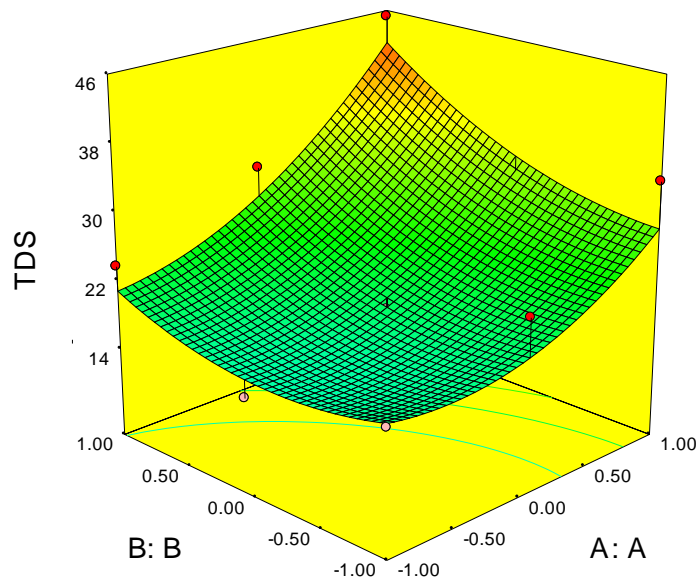
■ 1.8302

X1 = A: A

X2 = B: B

Actual Factor

C: C = PPy



شکل ۸- سطوح پاسخ درصد کاهش TDS بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

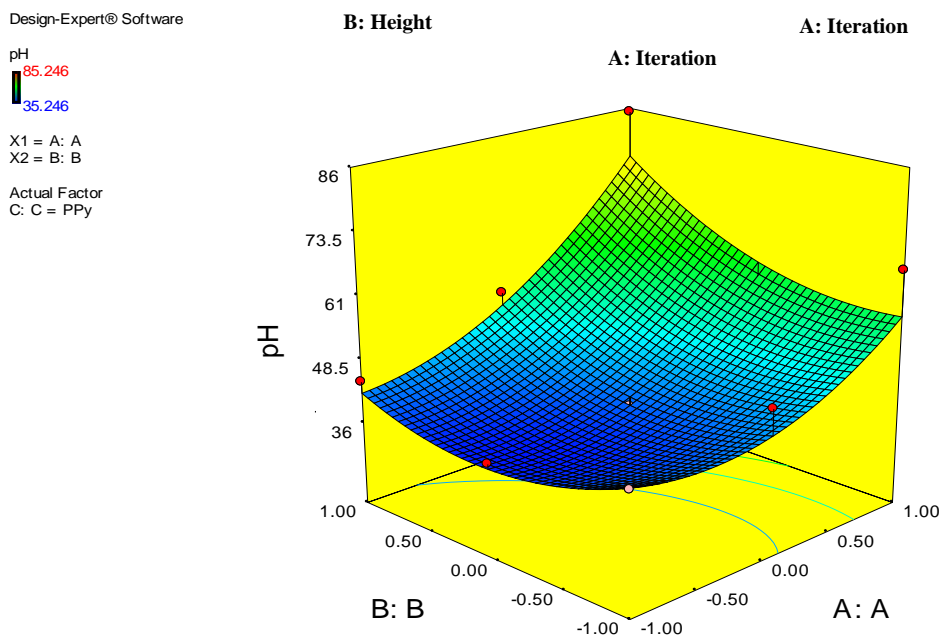
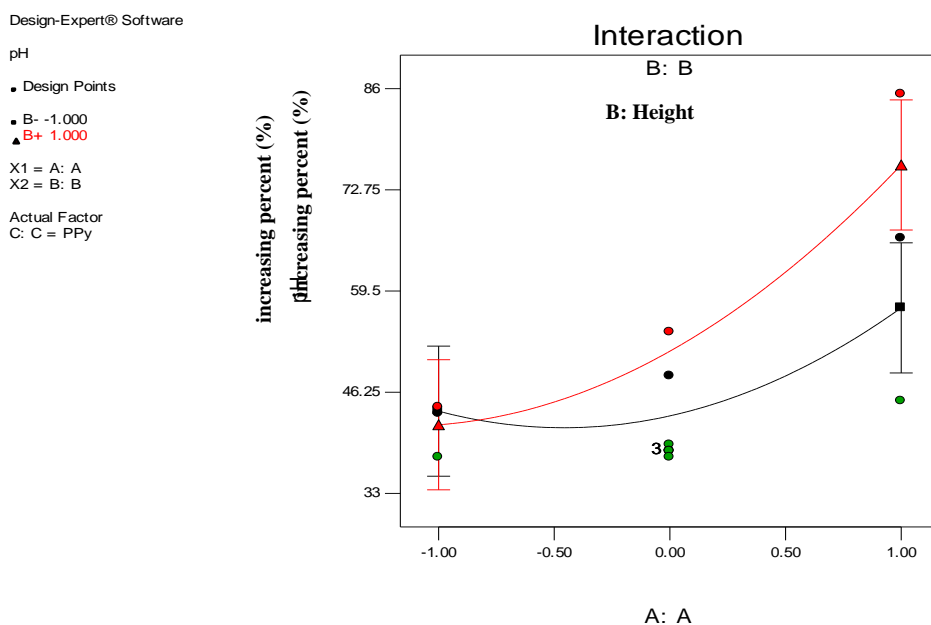
بیشتری بین ضخامت حداقل و حداکثر فیلتر وجود دارد. در شرایط حداقل و حداکثر ضخامت فیلتر با افزایش تکرار فیلتراسیون، TDS کاهش می‌یابد. شکل سه بعدی نشان می‌دهد که هر چه ارتفاع فیلتر کم باشد و یا به عبارت دیگر فیلتر فشرده‌تر باشد (یعنی پروسیته یا نفوذپذیری کمتری داشته

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود کم‌ترین TDS (بیشترین درصد کاهش) وقتی بدست می‌آید که تکرار فیلتراسیون حدوداً ۸ تا ۱۰ بار باشد و ضخامت فیلتراسیون حدوداً ۳/۵ تا ۴ سانتی‌متر باشد. همچنین نمودار برهمکنش نشان می‌دهد که در تکرارهای بالای فیلتراسیون اختلاف

ضخامت حداقل و حداکثر فیلتر وجود دارد. در شرایط حداقل ضخامت و حداکثر ضخامت فیلتر با افزایش تکرار فیلتراسیون، pH افزایش می‌یابد. شکل سه بعدی نشان می‌دهد که هر چه ارتفاع فیلتر کم باشد و یا به عبارت دیگر فیلتر فشرده‌تر باشد (یعنی پروسسته یا نفوذپذیری کمتری داشته باشد) کارایی فیلتر جهت افزایش pH کمتر خواهد بود. هرچه ارتفاع فیلتر یا پروسسته فیلتر زیادتر می‌شود کارایی فیلتر جهت افزایش pH بهتر می‌شود.

باشد) کارایی فیلتر جهت کاهش TDS کمتر خواهد بود. هرچه ارتفاع فیلتر یا پروسسته فیلتر زیادتر می‌شود کارایی فیلتر جهت کاهش TDS بهتر می‌شود.

با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود بیشترین pH (بیشترین درصد افزایش) وقتی بدست می‌آید که تکرار فیلتراسیون حدوداً ۷ تا ۱۰ بار باشد و ضخامت فیلتراسیون حدوداً ۴ سانتی‌متر باشد. همچنین نمودار برهمکنش نشان می‌دهد که در تکرارهای بالای فیلتراسیون اختلاف بیشتری بین



شکل ۹- سطوح پاسخ درصد افزایش pH بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

Design-Expert® Software

Salinity

• Design Points

■ B- -1.000

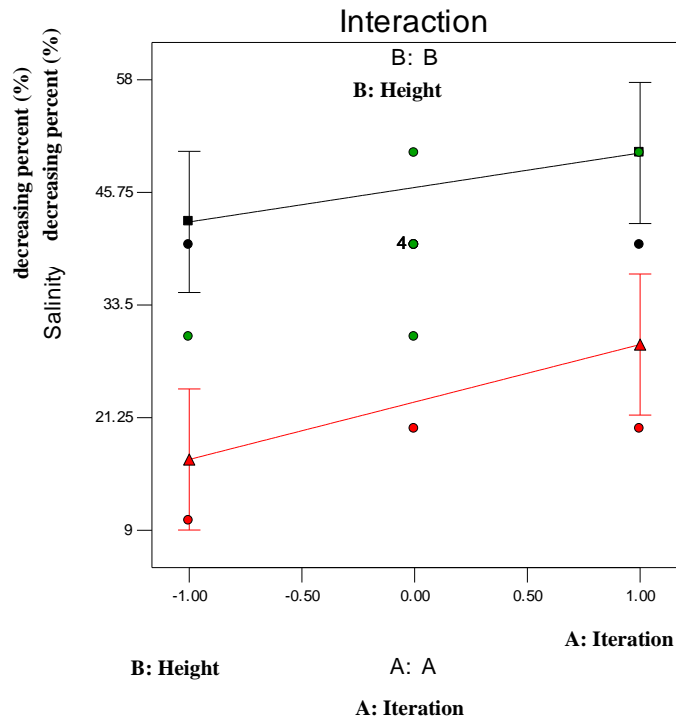
▲ B+ 1.000

X1 = A: A

X2 = B: B

Actual Factor

C: C = PPy



Design-Expert® Software

Salinity

55

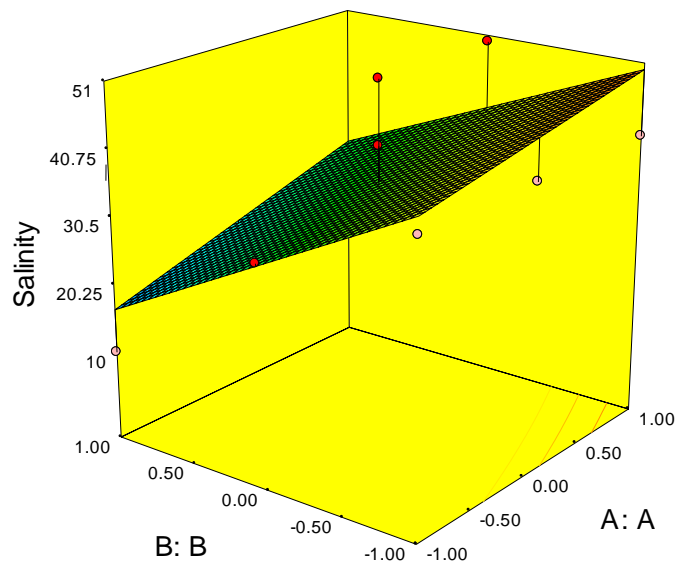
10

X1 = A: A

X2 = B: B

Actual Factor

C: C = PPy



شکل ۱۰- سطوح پاسخ درصد کاهش Salinity بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

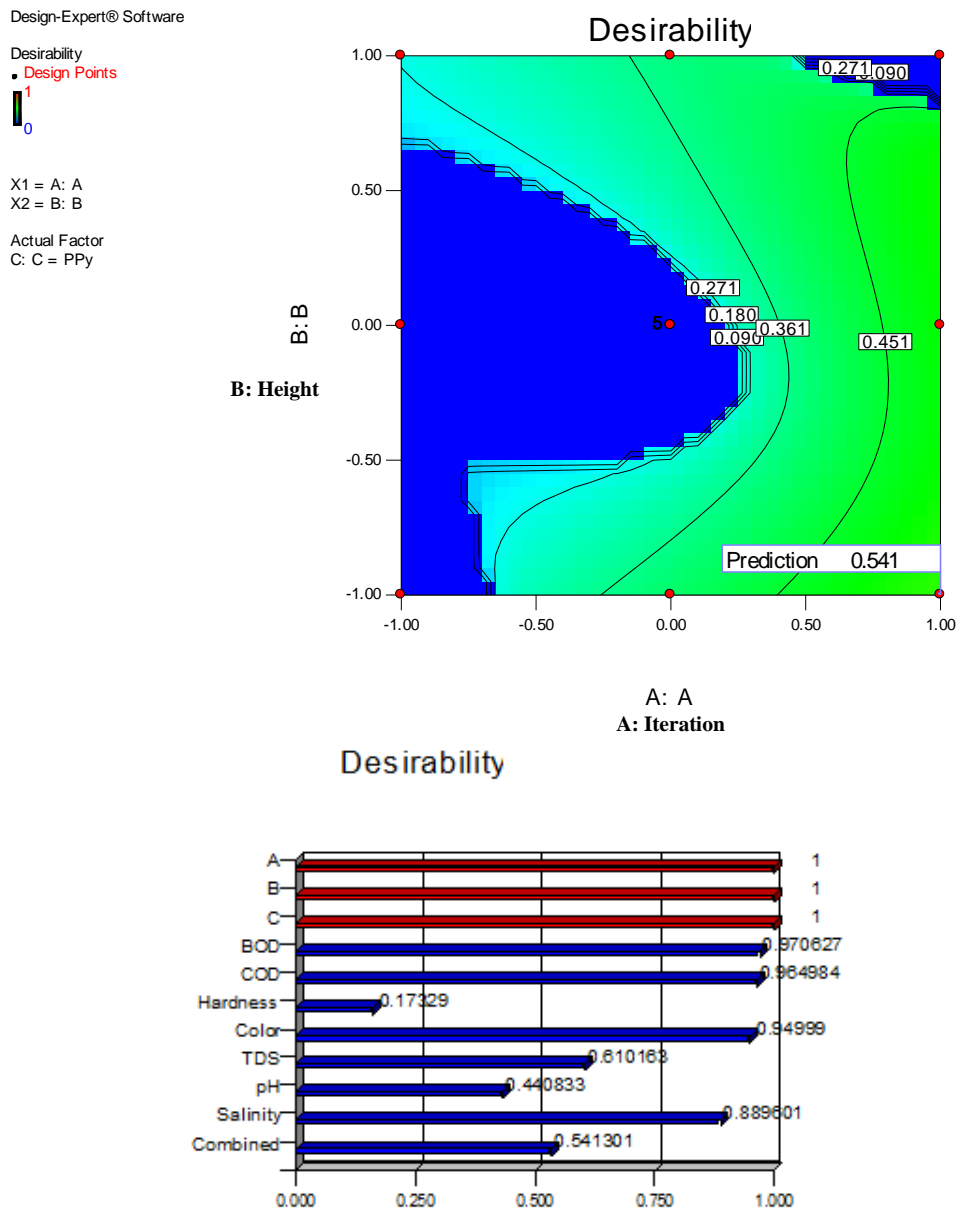
درجه شوری کاهش می‌یابد. شکل سه بعدی نشان می‌دهد که هر چه ارتفاع فیلتر کم باشد و یا به عبارت دیگر فیلتر فشرده‌تر باشد (یعنی پروسیته یا نفوذپذیری کمتری داشته باشد) کارایی فیلتر جهت کاهش درجه شوری بهتر خواهد بود. هرچه ارتفاع فیلتر یا پروسیته فیلتر زیادتر می‌شود کارایی فیلتر جهت کاهش درجه شوری کمتر می‌شود.

در بهینه‌سازی چند هدفه ممکن است شرایط بهینه یک

با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود کم‌ترین درجه شوری (بیشترین درصد کاهش) وقتی بدست می‌آید که تکرار فیلتراسیون حدوداً ۷ تا ۱۰ بار باشد و ضخامت فیلتراسیون حدوداً ۱ سانتی‌متر باشد. همچنین نمودار برهمکنش نشان می‌دهد که در تکرارهای پایین فیلتراسیون اختلاف بیشتری بین ضخامت حداقل و حداکثر فیلتر وجود دارد. در شرایط حداقل ضخامت و حداکثر ضخامت فیلتر با افزایش تکرار فیلتراسیون،

برای یافتن پاسخ بهینه استفاده شده است. جدول (۴) پاسخ‌های بهینه برای متغیرهای کیفی فاضلاب و متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد.

پاسخ با شرایط بهینه پاسخ‌های دیگر همسو نباشد، بنابراین از دو روش گرافیکی و روش عددی برای یافتن جواب قابل قبول استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش گرافیکی (شکل ۱۱)



شکل ۱۱- سطوح پاسخ درصد تغییرات BOD, COD, pH, Hardness, color, TDS and Salinity بر مبنای تکرار و ضخامت فیلتراسیون

پلیمری با اصلاح سطح پلی اورتان با نانوذرات پلی پیرول به صورت سنتز کنترل شده در فاز محلول تهیه گردید. پلیمریزاسیون در محیط مایع با دپان کلرید صورت گرفت. بعد از تهیه فیلترهای پلی اورتان که نانوذرات بر روی آن سنتز شد شکل فیزیکی فیلتر طراحی شد و پارامترهای مختلفی مانند طول ابعاد فیلتر بهینه‌سازی گردید. بعد از طراحی و بهینه‌سازی شکل فیزیکی و پارامترهای فیزیکی فیلتر به طور مستقیم در

جدول ۴- نتایج بهینه با استفاده از مدل سطح پاسخ

متغیرها	مقادیر بهینه	مقادیر انتخابی
تکرار	۷-۹	۸
ضخامت (سانتی‌متر)	۱-۱/۵	۱/۳

نتیجه‌گیری

در این طرح فیلتر پلی اورتان اصلاح شده با نانو مواد پلیمری برای بهبود کیفیت فاضلاب با کارایی بالا استفاده شد. فیلترهای

و ضخامت فیلتر از طراحی آزمایش بر اساس طرح مرکب مرکزی استفاده شد. نتایج بدست آمده از مدل ریاضی و روش سطح پاسخ برهمکنش بین ضخامت فیلتراسیون و تکرار فیلتراسیون را نشان داد. بهینه ترین ضخامت برای فیلتر ۱/۳ سانتی متر و مناسب ترین تکرار فیلتراسیون ۸ بار می باشد.

نمادها

H: Height
 I: Iteration
 R^2 : Coefficient of determination
 R^2_{adj} : Adjusted Coefficient of determination
 X_i, X_j : Independent factors
 Y: Response variable
 $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$: Regression coefficients
 ε : Error

REFERENCES

- Abrishamchi, A., Afshar, A., & Jamshid, B. (1995). *Waste water engineering, treatment, disposal and reuse, 3rd, ed.* 1 (597-8), 15-411. (In Farsi).
- Alipour, V., & Rezaei, L. (2011). Upgrading of the mono media filters in water treatment plants by changing filter media. *Iranian Journal of Health and Environment*, 3 (4), 431-38. (In Farsi).
- Alizadeh, A. (1998). *Principles of applied hydrology.* (In Farsi).
- Andréassian, V., & Margat, J. (2012). Rivers and Rivals. *Quae publishing*, Versailles.
- Azizi, E., Ghayebzadeh, M., Dargahi, A., Hemati, L., Beikmohammadi, M., & Sharafi, K. (2016). Determination of Effective Parameters on Removal of Organic Materials from Pharmaceutical Industry Wastewater by Advanced Oxidation Process (H_2O_2/UV). *Arch Hyg Sci* 2016, 5 (2), 69-74.
- Block, S. S. (2001). Disinfection, sterilization, and preservation, 4th ed; Lippincott Williams & Wilkins. 33-34, 553-565.
- Burkhardt-Holm, P. (2010). Endocrine disrupters and water quality: a state-of-the-art review. *International Journal of Water Resources Development*, 26 (3), 477-93.
- Chiang, C. K., Fincher, C. R., Park, Y. W., Heeger, A. J., Shirakawa, H., Louis, E. J., Gau, S. C., & MacDiarmid, G. (1978). Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene. *Phys. Rev. Lett*, 40, 1472-1483.
- Davoodi, R., Almasi, A., HoseiniAhagh, M., Dargahi, A., & Karami, A. (2016). A Mathematical model for organic matter removal in constructed wetlands case study: wastewater treatment plant of Qasr-e Shirin, Iran. *International Journal Of Pharmacy & Technology*, ISSN: 0975-766X, CODEN: IJPTFI. (In Farsi).
- Eisazadeh, H., & Soleimani Lashkenari, M. (2010). *Synthesis of nano-composites polyaniline using different stabilizers for separation arsenic of water and waste water.* M.Sc. Thesis of chemical engineering, Babol Noshirvani university of technology, Iran. (In Farsi).
- Ghaneian, M. T., Mohammad Hassani, S., Mirhosseini, S. A., & Hashemzadeh, B. (2014). Investigation of removing BOD, COD, TSS of Marvdasht city's waste water system using aerated lagoon method and improvement the quality of system using crushed filter. *1st international conference on new findings of agriculture natural resources and environment*, 10 pages. (In Farsi).
- Jackiewicz, A., Podgorski, A., Gradon, L., & Michalski, J. (2013). Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. *KONA Powder and Particle Journal*, 30, 244-55.
- Koh, Y., Chiu, T., Boobis, A., Cartmell, E., Pollard, S., Scrimshaw, M., & Lester, J. (2008). A sensitive and robust method for the determination of alkylphenol polyethoxylates and their carboxylic acids and their transformation in a trickling filter wastewater treatment plant. *Chemosphere*, 73 (4), 551-556.
- Lenth, RV. (2009). Response-Surface Methods in R, using rsm. *Journal of Statistical Software*, 32 (7), 1-17.
- Mahapatra, A., Mishra, B., & Hota, G. (2013). Adsorptive removal of Congo red dye from wastewater by mixed iron oxide-alumina nanocomposites. *Ceramics International*, 39, 5443-5451.
- Miasik, J., Hopper, A., & Tofield, B. (1986). Conducting Polymer Gas Sensors. 82, 1117-1126.
- Mortazavi, B., Barikbin, B., & Moussavi, GR. (2010). Survey of nano filtration performance for hexavalent chromium removal from water containing sulfate. *Iranian Journal of Health and Environment*, 3 (3), 281-90. (In Farsi).
- Osram HNS/UVC Lamps. (1991). *Technical Information; MKAB/UV*, Edition Aug, 3-6.

- Partridge, A. C., Milestone, C. B., Too, C. D., & Wallace, G. G. (1997). Ion Transport Membranes Based on Conducting Polymers. 132, 245-253.
- Ren, X., Shon, H., Jang, N., Lee, Y., Bae, M., Cho, K., & Kim, I. (2007). Novel membrane bioreactor (MBR) coupled with a nonwoven fabric filter for household wastewater treatment. *Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)*, Korea, 500-712.
- Russell, A. D., Hugo, W. B., & Ayliffe, G. A. J. (1982). Principles and practice of disinfection, Preservation and sterilization. 534-547.
- Rytwo, G. (2012). The Use of Clay-Polymer Nanocomposites in Wastewater Pretreatment. *The ScientificWorld Journal*, Article ID 498503, 7 pages.
- Sheng, G., Yu, H., & Li, X. (2010). Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. *Biotechnology Advances*, 28, 882-894.
- Vital de Oliveira, O., Tavares Costa, L., & Roberto Leite, E. (2016). Molecular modeling of a polymer nanocomposite model in water and chloroform solvents. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1092, 52-56.
- Wang, G., Feng, W., Zeng, X., Wang, Z., Feng, C., McCarthy, D., Deletic, A., & Zhang, X. (2016). Highly recoverable TiO₂/GO nanocomposites for stormwater disinfection. *Water Research*, 94, 363-370
- Water Purification System; UV Fresher, NEC Environment Engineering Ltd. (2003). *from NEC catalogue*, 61, NN-9507.
- Wolf, A. T. (2001). Water and Human Security. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 118 (29).
- Zhou, M., Persin, M., Kujawski, W., & Sarrazin, J. (1995) Electrochemical Preparation of Polypyrrole Membranes and their Application in Ethanol-Cyclohexane Separation by Pervaporation. 108, 89-96.