



کاربرد روش سطح پاسخ در تحلیل پارامترهای اثرگذار بر حذف کدورت و نماتدها در فرآیند فیلتراسیون مستقیم

جواد عبدالهی^۱، شهناز دانش^{۲*}، معصومه بحرینی^۳، نیما عمرانی^۴

^۱ کارشناس ارشد عمران - محیطزیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳ استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۴ کارشناس ارشد عمران - محیطزیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۱۸
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۱۲
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۱۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۱

کلمات کلیدی:

تصفیه آب سطحی
فیلتراسیون مستقیم
نماتد
کدورت
روش سطح پاسخ

خلاصه: نماتدها به دلیل مقاومت در برابر گندزدایی و قابلیت بلعیدن و انتقال پاتوژن‌ها به شبکه‌های آب‌رسانی شناخته شده هستند. فرآیندهای انعقاد و فیلتراسیون نقش مهمی را در راستای حذف این ارگانیسم‌ها در تصفیه‌خانه‌های آب ایفا می‌نمایند. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر حذف نماتدها، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. اما بررسی هم‌زمان اثرات این پارامترها نیازمند تحلیل‌های آماری مناسب است. در این پژوهش با استفاده از روش سطح پاسخ و طراحی مرکب مرکزی وجهی، تأثیر هم‌زمان غلظت کلرور فریک (به‌عنوان ماده منعقد کننده)، نوع بستر فیلتر و نرخ فیلتراسیون بر کارایی حذف کدورت و نماتدها در فرآیند فیلتراسیون مستقیم بررسی شد. بر اساس نتایج حاصله، متوسط راندمان حذف کدورت، نماتدهای متحرک و نماتدهای غیر متحرک در فیلتر تک‌لایه به ترتیب ۹۶/۶۱، ۹۵/۷۶ و ۴۶/۰۱ درصد بود. با افزایش غلظت کلرور فریک، راندمان حذف نماتدها به مقدار قابل توجهی بهبود یافت. افزایش نرخ فیلتراسیون سبب کاهش کارایی حذف نماتدهای غیر متحرک شد. اما افزایش این متغیر، افزایش غیرمنتظره راندمان حذف نماتدهای متحرک را به دنبال داشت. بروز این رفتار متمایز از نماتدها، موجب استقلال و عدم وابستگی راندمان حذف کل نماتدها (مجموع نماتدهای متحرک و غیر متحرک) به نرخ فیلتراسیون گردید. بر اساس نتایج، به‌کارگیری فیلتراسیون مستقیم برای شرایطی که کدورت ورودی به تصفیه‌خانه کمتر از 5 NTU باشد، توصیه می‌گردد. البته این روش تصفیه بایستی با گندزدایی اولیه همراه گردد تا نماتدهای متحرک را به حالت غیر متحرک درآورده و ضعف فیلترها را در حذف این نماتدها پوشش دهد.

۱- مقدمه

در منابع آب سطحی هستند که دارای طول $1000-100 \mu\text{m}$ و عرض $5-50 \mu\text{m}$ می‌باشند [۳-۵]. این ارگانیسم‌ها ذاتاً تهدیدکننده سلامتی شناخته نمی‌شوند اما توانایی آن‌ها در بلعیدن پاتوژن‌هایی چون شیگلا^۱، سالمونلا^۲، کلیفرم‌های کل^۳، کریپتوسپوریدیوم^۴، اشرشیاکلی^۵ و ویروس‌ها در تحقیقات گوناگون گزارش شده است

طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی و معدنی، ناشی از فعالیت‌های انسان یا رخدادهای طبیعی، در آب حضور دارند. در این میان، ارگانیسم‌ها و میکروارگانیسم‌هایی نظیر نماتدها، باکتری‌ها، پروتوزواها و ویروس‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند؛ چراکه حذف یا غیرفعال سازی ناتمام آن‌ها سلامت عمومی را تهدید می‌نماید [۱، ۲].

نماتدها (کرم‌های لوله‌ای) از جمله زئوپلانکتون‌های شناخته شده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sdanesh@um.ac.ir

- 1 Shigella
- 2 Salmonella
- 3 Coliforms
- 4 Cryptosporidium
- 5 Escherichia coli



بستر عبور و به اعماق پایین تر فیلتر راه یابند. بنابراین، بهبود خصوصیات فلاک‌های ورودی به فیلترها و به‌کارگیری مدیای مناسب، به بهبود عملکرد فرآیند فیلتراسیون در حذف نماتدها کمک قابل توجهی می‌کند.

روش تصفیه در تصفیه‌خانه شماره یک آب مشهد از نوع تصفیه متعارف^۷ است. اما با توجه به کدورت پایین آب خام ورودی به این تصفیه‌خانه که از سدهای کارده و ارداک تأمین آب می‌شود، روش فیلتراسیون مستقیم^۸ در مقطعی از سال می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای روش تصفیه متعارف مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، در سال‌های اخیر به دلیل کاهش بارندگی‌ها در حوضه آبریز سد کارده، سطح آب این سد با کاهش ۵۰ تا ۷۰ درصدی مواجه شده است. این مسئله، سبب افزایش غلظت مواد آلی و بار میکروبی در عمق‌های پایین سد شده و محیط مناسبی را برای رشد و نمو نماتدها فراهم آورده است؛ به گونه‌ای که در گرم‌ترین فصل سال (تابستان)، غلظت متوسط نماتدها در سد کارده به ۲۰۰ عدد در لیتر نیز می‌رسد. از این‌رو، پژوهش حاضر در مقیاس پایلوت با در نظر گرفتن راندمان حذف کدورت و نماتدها به‌عنوان پارامترهای عملکردی فیلتر، به بررسی کارایی روش فیلتراسیون مستقیم و جایگزینی آن با روش تصفیه متعارف در کدورت‌های پایین آب خام پرداخته است. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای غلظت ماده منعقد کننده، نوع بستر فیلتر (فیلتر تک‌لایه^۹ و دو‌لایه^{۱۰}) و نرخ (سرعت) فیلتراسیون^{۱۱} بر راندمان حذف کدورت و نماتدهای متحرک و غیر متحرک در فرآیند فیلتراسیون مستقیم بررسی گردید. ضمناً، به‌منظور طراحی آزمایش‌ها^{۱۲} (DOE) و آنالیز داده‌ها از روش سطح پاسخ^{۱۳} (RSM) و طراحی مرکب مرکزی محاطی^{۱۴} (CCFD) استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی کارایی فرآیند فیلتراسیون مستقیم در حذف کدورت و نماتدها، در مقیاس پایلوت در تصفیه‌خانه شماره

[۳، ۶-۸]. این پاتوژن‌ها حتی پس از چند روز در بدن نماتدها زنده می‌مانند و در صورت تصفیه نامناسب به شبکه آب‌رسانی راه یافته و منجر به اپیدمی شدن بیماری‌های مختلف در بین مصرف‌کنندگان می‌گردند [۴، ۹، ۱۰]. از این‌رو، توانایی نماتدها در محافظت از پاتوژن‌ها در درون بدن خود (تهدید سلامتی) از یک‌سو و ایجاد مشکلات طعم و بو از سوی دیگر، حضور این ارگانیسم‌ها را در آب آشامیدنی مخاطره‌آمیز و ناخوشایند می‌نماید [۱۱].

حضور نماتدها در شبکه آب نشان دهنده کارایی پایین فرآیند تصفیه است. نماتدها در برابر کلر زنی و گندزدایی با پرتو فرابنفش و اوزون بسیار مقاوم می‌باشند [۹، ۱۲-۱۴]. مقاومت آن‌ها در برابر کلر آزاد^۱، سه تا چهار برابر باکتری‌ها و بیشتر از کیست ژیا ردیا^۲ است [۳]. از سوی دیگر، کلر زنی اولیه به دلیل تشکیل تری‌هالومتان‌ها^۳ (THMs) در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های آب در سرتاسر دنیا محدود شده است. بنابراین، نماتدها در صورت عدم حذف در حوضچه‌های ته‌نشینی و عبور از بستر فیلترها، به شبکه آب‌رسانی راه می‌یابند. نتیجتاً، عملیات انعقاد به‌عنوان پیش‌تصفیه و فیلتراسیون به‌عنوان آخرین مرحله جداسازی جامدات از آب، نقش مهمی را در راستای حذف نماتدهای متحرک^۴ (زنده یا فعال) و غیر متحرک^۵ (مرده یا غیرفعال) ایفا می‌نمایند.

کارایی فرآیند فیلتراسیون تحت تأثیر خصوصیات فلاک‌های تشکیل‌شده در فرآیندهای انعقاد و لخته سازی است. به‌طور معمول حذف ذرات ریز و کوچک در بستر فیلترها دشوارتر از سایر ذرات می‌باشد، چراکه این ذرات می‌توانند از مدیای فیلتر جدا گردند و مستقیماً از بستر فیلترها عبور نمایند [۱۵، ۱۶]. بنابراین بهبود خصوصیات فلاک‌های تشکیل‌شده در فرآیندهای انعقاد و لخته سازی، بهبود کارایی فرآیند فیلتراسیون را به دنبال خواهد داشت [۱۷]. در این میان، جداسازی نماتدها از جریان آب در فرآیند فیلتراسیون به علت خصوصیات رفتاری و مورفولوژی آن‌ها دشوارتر از سایر ذرات است. نماتدها با بدن استوانه‌ای صاف و باریک و حرکات سینوسی و شلاقی‌مانند^۶ قادرند از میان حفرات

7 Conventional Treatment

8 Direct filtration

9 Single-media filter

10 Dual-media filter

11 Filtration rate (filtration velocity)

12 Design of experiments

13 Response surface methodology

14 Central composite face-centered design

1 Free chlorine

2 Giardia

3 Trihalomethanes

4 Motile nematodes

5 Non-motile nematodes

6 Whiplike movements

جدول ۱: خصوصیات آب خام در طول دوره آزمایش‌ها
Table 1. Characteristics of raw water during the experiments

مقدار	یکا	پارامتر
۳/۹ - ۴/۱	NTU	کدورت
۷/۶ - ۷/۹	-	pH
۶۷۰ - ۶۹۰	μs/cm	هدایت الکتریکی (EC)
۱۰ - ۱۲	درجه سانتی‌گراد	دما
۱۸ - ۲۳	عدد در لیتر	تعداد نمادهای متحرک
۳۷ - ۴۶	عدد در لیتر	تعداد نمادهای غیر متحرک
۵۶ - ۶۷	عدد در لیتر	تعداد کل نمادها (مجموع نمادهای متحرک و غیر متحرک)

یک آب مشهد به مدت ۱۲ هفته در فصل زمستان انجام شد.

۲-۱- مشخصات کیفی آب خام ورودی به تصفیه‌خانه شماره یک آب مشهد

در زمان انجام آزمایش‌ها، سدهای ارداک و کارده (با نسبت دبی ۳ به ۱) تأمین‌کننده آب خام تصفیه‌خانه شماره یک مشهد بودند. این آب، علی‌رغم کدورت پایین (کمتر از ۵ NTU)، حاوی بیش از ۵۰ عدد نماد در لیتر بود که حدود یک‌سوم آن را نمادهای متحرک تشکیل می‌دادند. خصوصیات آب خام در طول دوره انجام آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- روش تصفیه و پایلوت تحقیقاتی

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند فیلتراسیون مستقیم، پایلوتی تحقیقاتی در مقیاس نیمه صنعتی متشکل از واحدهای انعقاد و فیلتراسیون احداث گردید. همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است، آب خام پس از تزریق غلظت‌های مشخصی از ماده منعقد کننده و انجام عملیات اختلاط سریع به واحد فیلتراسیون منتقل گردید.

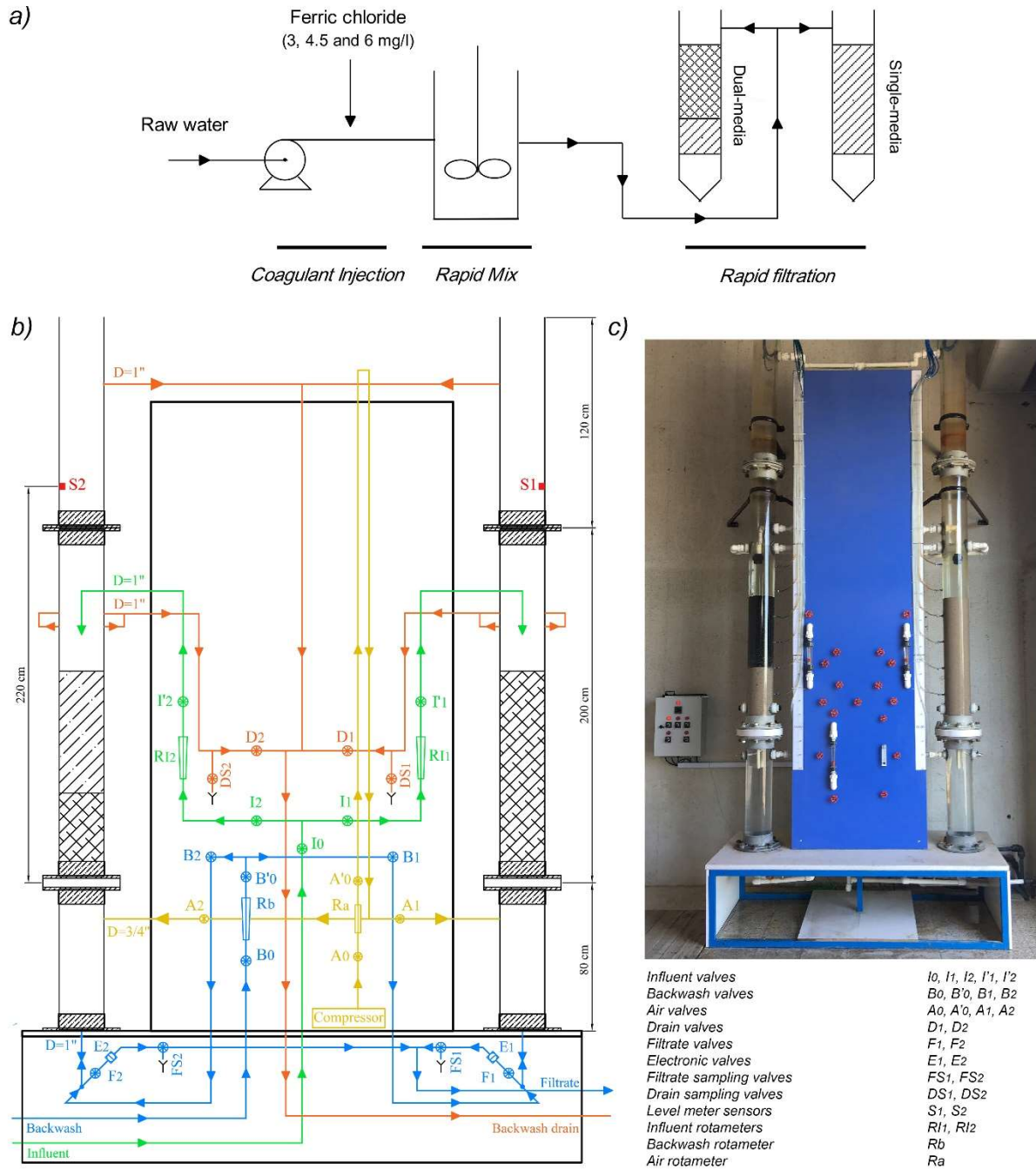
در پژوهش حاضر، برای ارزیابی کارایی فرآیند فیلتراسیون در حذف نمادهای متحرک و غیر متحرک، آب خام بدون انجام کلرزی اولیه به پایلوت احداث شده انتقال یافت تا آب ورودی به واحد فیلتراسیون حاوی هر دو نوع نمادهای متحرک و غیر متحرک باشد. ماده منعقد کننده مورد استفاده در این پژوهش، کلرور فریک بود

که به‌وسیله دوزینگ پمپ قابل تنظیم در غلظت‌های مشخص به خط انتقال آب تزریق شد. در تحقیق حاضر، از کلرور فریک موجود در تصفیه‌خانه شماره یک آب مشهد با وزن مخصوص ۱/۴۲ و غلظت ۵۶۸ g/l استفاده گردید. با توجه به غلظت بالای کلرور فریک موجود، عملیات رقیق‌سازی تا رسیدن به غلظت مورد نیاز صورت گرفت.

گرادیان سرعت و زمان در فرآیند انعقاد، متناسب با روش فیلتراسیون مستقیم تنظیم گردید. بر این اساس در واحد اختلاط سریع، گرادیان سرعت $1100 s^{-1}$ و زمان ماند ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در مطالعه حاضر، با توجه به کدورت پایین و نوسانات کیفی بسیار کم آب خام ورودی، مرحله لخته سازی حذف گردید.

آب خروجی از واحد اختلاط سریع پس از ورود به واحد فیلتراسیون به دو بخش تقسیم و پس از تنظیم دبی توسط رواترها وارد فیلترها شد. پایلوت فیلتراسیون دارای دو ستون فیلتر از جنس پلکسی‌گلس هر یک به ارتفاع ۴ متر، قطر ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت جداره ۴ میلی‌متر بود. این قطر بر اساس استاندارد ASTM D4188-17 به‌منظور کاهش اثر دیواره انتخاب گردید [۱۸]. بر روی هر یک از ستون فیلترها، اتصالاتی برای ورود و خروج آب خام، آب پاکیزه جهت شستشوی معکوس، پساب حاصل از شستشوی معکوس فیلترها و آب تصفیه‌شده تعبیه شد. کد ارتفاعی هر یک از این اتصالات، مطابق نقشه فیلترهای حقیقی ساخته‌شده توسط شرکت دگرمونت^۱ فرانسه برداشت گردید. سیستم کنترل نرخ فیلتراسیون از نوع ارتفاع ثابت-دبی ثابت بود، به‌گونه‌ای که سطح آب در طول عملیات فیلتراسیون

1 Degrémont



شکل ۱: شماتیک فرآیند فیلتراسیون مستقیم (الف)، شماتیک ستون فیلترها (ب) و تصویر فیلترها (ج)
 Fig. 1. Schematic of direct filtration process (a), Schematic of filter columns (b) and picture of filters (c).

جدول ۲: خصوصیات مدیای به کار گرفته شده در فیلترهای تک لایه و دولایه
 Table 2. Media characteristics of single and dual-media filters

مدیا	دانسیتته (kg/l)	تخلخل	d ₁₀ (mm)	d ₆₀ (mm)	ضریب یکنواختی
ماسه	۲/۴۴	۰/۵۱	۰/۷۵	۱/۰۵	۱/۴
آنتراسیت	۱/۴۵	۰/۵۶	۱/۱۵	۱/۹۶	۱/۷

در لام شمارش سدویک رفتار^۵ در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفت [۳، ۲۰، ۲۱]. شناسایی نماتدهای متحرک از طریق مشاهده تحرک یا عدم تحرک هر یک از نماتدها در زیر میکروسکوپ طی مدت زمان یک دقیقه انجام پذیرفت. راندمان حذف نماتدها بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$Ra(\%) = \left(\frac{N_I - N_E}{N_I} \right) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، Ra راندمان حذف نماتدها، N_I تعداد نماتدهای ورودی به فیلتر در لیتر و N_E تعداد نماتدهای خروجی از فیلتر در لیتر است.

۲-۴- طراحی آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها

بمنظور بررسی عملکرد فرآیند فیلتراسیون مستقیم، آزمایشاتی برای تعیین اثر نوع بستر، مقدار ماده منعقد کننده و نرخ فیلتراسیون بر راندمان حذف نماتدها و کدورت صورت پذیرفت. طراحی آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) انجام شد. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی برای تعیین رابطه بین چندین متغیر مستقل^۶ و یک یا چند متغیر وابسته^۷ (پاسخ) است [۲۲، ۲۳]. در این روش با تعیین تعداد متغیرها و مقادیر کمینه و بیشینه برای هر متغیر، ماتریس آزمایش طراحی و تعداد آزمایش‌ها مشخص می‌گردد. مزیت اصلی روش سطح پاسخ کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز است. اما آزمایش‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که خطای ناشی از کاهش تعداد آزمایش‌ها به مقدار کمینه برسد [۲۲].

در این مطالعه، به منظور طراحی آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آماری نتایج، از نرم‌افزار ۷،۰ Design Expert استفاده شد. طراحی مرکب مرکزی (CCD)، یکی از مشهورترین طراحی‌های درجه دو در روش سطح پاسخ است که در این مطالعه نوع وجهی آن (CCFD) استفاده گردید [۲۴]. بر این اساس، تعداد ۱۳ آزمایش مطابق با طراحی آزمایش صورت گرفته توسط نرم‌افزار پیشنهاد شد.

در مطالعه حاضر، متغیرهای مستقل نرخ فیلتراسیون (X_1) و

همواره در ارتفاع ۱/۲۰ متر بالای سطح بستر تنظیم گردید. شماتیک پیلوت فیلتر به همراه تصویر واقعی آن در شکل‌های ۱-ب و ۱-ج نشان داده شده است.

بسترهای به کار گرفته شده در ستون فیلترها از نوع تک‌لایه و دولایه بود. در فیلتر تک‌لایه از ماسه (با ضخامت ۷۵ سانتیمتر) و در فیلتر دولایه از ماسه و آنتراسیت (به ترتیب با ضخامت‌های ۲۵ و ۵۰ سانتیمتر) به عنوان مصالح بستر استفاده گردید. در پژوهش حاضر تلاش بر آن بود که مصالح بستر منطبق استاندارد ANSI/AWWA B100-16 انتخاب گردند [۱۹]. خصوصیات مصالح به کار گرفته شده در بستر هر یک از فیلترها در جدول ۲ آمده است. جهت مقایسه کارایی فیلترهای تک‌لایه و دولایه، شستشوی معکوس^۱ هر دو فیلتر در شرایط کاملاً یکسان و در سه مرحله متوالی (هوا - آب و هوا - آب) صورت پذیرفت.

۲-۳- اندازه‌گیری کدورت و شمارش نماتدها

کلیه آزمایش‌ها در محل آزمایشگاه تصفیه‌خانه شماره یک آب مشهد انجام شد. اندازه‌گیری کدورت ورودی و خروجی از فیلترها، مطابق با دستورالعمل‌های کتاب روش‌های استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب بر اساس روش نفلومتر انجام شد [۲۰]. جهت اندازه‌گیری کدورت دستگاه‌های کدورت سنج MicroTOL و HACH-2100N استفاده شد که به ترتیب قادر به اندازه‌گیری کدورت با دقت‌های ۰/۰۱ NTU و ۰/۰۰۱ بودند.

شمارش نماتدهای متحرک و غیر متحرک، در هر دوره فیلتراسیون، پس از دوره بلوغ^۲ و با سه تکرار صورت گرفت. در هر تکرار، آب ورودی و خروجی از فیلترهای تک‌لایه و دولایه، به کمک سیستم خلأ سارتوریوس^۳ تغلیظ گردید. در این روش، سه لیتر نمونه آب به کمک خلأ ایجاد شده توسط پمپ و کیوم، از کاغذ صافی سارتوریوس^۴ با اندازه منافذ ۰/۴۵ μm عبور داده شد. در ادامه سطح کاغذ صافی با سه میلی‌لیتر آب مقطر، ۸ الی ۱۰ بار شسته شد تا نماتدها از روی سطح کاغذ صافی جدا و به منظور شمارش راحت‌تر در سه میلی‌لیتر آب مقطر تغلیظ گردند. در نهایت یک میلی‌لیتر از آب تغلیظ شده،

5 Sedgwick-Rafter S52 counting chamber (SPI Supplies Inc., USA)

6 Independent variables

7 Dependent variables

1 Backwash

2 Ripening period

3 Sartorius

4 Sartorius membrane filter (Sartorius AG, Germany)

جدول ۳: سطوح متغیرهای مستقل به شکل مقادیر حقیقی و کد شده (بی‌بعد)
 Table 3. Level of independent variables in terms of the actual and coded units

سطوح و محدوده تغییرات			متغیر
سطح بالا (+۱)	سطح وسط (۰)	سطح پایین (-۱)	
۹	۷	۵	X_1 ، نرخ فیلتراسیون (m/h)
۶	۴/۵	۳	X_2 ، غلظت کلرور فریک (mg/l)

جدول ۴: ماتریس طراحی مرکب مرکزی محاطی برای متغیرهای مورد مطالعه و نتایج آن
 Table 4. Design matrix of central composite face-centered for the study of two experimental variables and obtained results

پاسخ (درصد حذف %)								طراحی آزمایشات		شماره آزمایش
فیلتر دولایه				فیلتر تک‌لایه						
کدورت (Y_8)	نماتد			کدورت (Y_4)	نماتد			غلظت کلرور فریک	نرخ فیلتراسیون	
	متحرک (Y_7)	غیر متحرک (Y_6)	کل (Y_5)		متحرک (Y_3)	غیر متحرک (Y_2)	کل (Y_1)			
۹۳/۹۰	۳۷/۹۲	۸۷/۱۰	۷۱/۴۳	۹۲/۲۵	۳۴/۴۵	۸۳/۸۶	۶۸/۱۲	۳ (-۱)	۹ (+۱)	۱
۹۶/۷۸	۵۱/۷۳	۹۸/۴۵	۸۴/۰۴	۹۶/۶۰	۴۸/۲۷	۹۶/۹۳	۸۱/۹۲	۶ (+۱)	۷ (۰)	۲
۹۷/۲۵	۴۳/۳۵	۹۸/۵۴	۸۱/۸۲	۹۷/۰۸	۴۰/۰۰	۹۸/۵۴	۸۰/۸۰	۶ (+۱)	۵ (-۱)	۳
۹۷/۰۸	۴۹/۹۸	۹۶/۷۸	۸۰/۸۵	۹۶/۹۵	۴۶/۸۸	۹۵/۱۶	۷۸/۷۳	۴/۵ (۰)	۷ (۰)	۴
۹۷/۰۰	۵۱/۵۰	۹۸/۳۳	۸۱/۷۱	۹۶/۸۸	۴۸/۵۰	۹۶/۶۷	۷۹/۵۸	۴/۵ (۰)	۷ (۰)	۵
۹۷/۲۰	۵۱/۷۳	۹۶/۸۸	۸۲/۸۱	۹۷/۰۸	۴۴/۸۰	۹۵/۳۱	۷۹/۵۶	۴/۵ (۰)	۷ (۰)	۶
۹۶/۳۰	۳۵/۷۳	۹۲/۵۵	۷۵/۸۰	۹۶/۱۰	۳۲/۱۴	۸۹/۵۵	۷۲/۶۲	۳ (-۱)	۷ (۰)	۷
۹۵/۳۰	۵۳/۱۲	۹۳/۲۱	۷۹/۱۱	۹۴/۲۵	۴۶/۸۸	۹۱/۵۳	۷۵/۸۳	۴/۵ (۰)	۹ (+۱)	۸
۹۷/۶۰	۵۱/۸۳	۹۸/۲۴	۸۳/۳۲	۹۷/۳۸	۴۴/۴۴	۹۶/۵۰	۷۹/۷۷	۴/۵ (۰)	۷ (۰)	۹
۹۵/۱۷	۵۳/۳۵	۹۴/۸۳	۸۰/۶۹	۹۳/۷۵	۵۰/۰۰	۹۳/۱۰	۷۸/۴۰	۶ (+۱)	۹ (+۱)	۱۰
۹۶/۸۸	۲۶/۶۵	۹۳/۳۳	۷۱/۱۰	۹۶/۷۵	۲۰/۰۰	۹۱/۶۷	۶۷/۷۸	۳ (-۱)	۵ (-۱)	۱۱
۹۷/۵۰	۵۰/۰۳	۹۸/۲۱	۸۲/۱۴	۹۷/۲۲	۴۶/۴۴	۹۶/۴۴	۷۹/۷۷	۴/۵ (۰)	۷ (۰)	۱۲
۹۷/۹۷	۴۱/۲۰	۹۸/۴۸	۷۹/۰۰	۹۷/۵۸	۳۵/۲۹	۹۶/۹۸	۷۶/۰۰	۴/۵ (۰)	۵ (-۱)	۱۳

جدول ۵: معادلات چندجمله‌ای درجه دوم و پارامترهای آماری مرتبط با آنها
Table 5. Second-order polynomial equations and related statistical parameters

C.V.	S.D	AP	Pred.R ²	Adj.R ²	R ²	روابط رگرسیون	پاسخ
۰/۸۳	۰/۶۴	۳۳/۸۸۴	۰/۹۱۲۴	۰/۹۸۰۹	۰/۹۸۸۹	$+79.47 - 0.37x_1 + 5.43x_2 - 0.68x_1x_2 - 3.53x_1^2 - 2.18x_2^2$	Y ₁
۰/۶۷	۰/۶۳	۳۲/۹۷۸	۰/۹۴۹۹	۰/۹۷۵۸	۰/۹۸۵۹	$+95.97 - 3.12x_1 + 3.91x_2 + 0.59x_1x_2 - 1.61x_1^2 - 2.63x_2^2$	Y ₂
۳/۲۵	۱/۳۴	۳۲/۰۴۴	۰/۹۶۵۴	۰/۹۷۶۲	۰/۹۸۶۱	$+46.07 + 6.01x_1 + 8.61x_2 - 1.11x_1x_2 - 4.63x_1^2 - 5.51x_2^2$	Y ₃
۰/۲۴	۰/۲۳	۳۳/۷۷۵	۰/۹۳۳۱	۰/۹۸۰۸	۰/۹۸۸۸	$+97.13 - 1.86x_1 + 0.39x_2 + 0.29x_1x_2 - 1.29x_1^2 - 0.85x_2^2$	Y ₄
۱/۰۶	۰/۸۵	۲۲/۶۹۹	۰/۹۱۶۷	۰/۹۶۰۴	۰/۹۷۶۹	$+82.24 - 0.11x_1 + 4.70x_2 - 0.37x_1x_2 - 3.37x_1^2 - 2.51x_2^2$	Y ₅
۰/۶۴	۰/۶۱	۲۷/۴۸۵	۰/۹۶۳۷	۰/۹۶۸۵	۰/۹۸۱۶	$+97.72 - 2.53x_1 + 3.14x_2 + 0.63x_1x_2 - 1.94x_1^2 - 2.29x_2^2$	Y ₆
۱/۶۸	۰/۷۷	۵۱/۷۵۸	۰/۹۸۶۲	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۵۱	$+50.95 + 5.53x_1 + 8.02x_2 - 0.32x_1x_2 - 3.64x_1^2 - 7.07x_2^2$	Y ₇
۰/۲۳	۰/۲۲	۲۶/۶۰۰	۰/۹۴۱۳	۰/۹۶۴۵	۰/۹۷۹۳	$+97.29 - 1.29x_1 + 0.35x_2 + 0.23x_1x_2 - 0.69x_1^2 - 0.79x_2^2$	Y ₈

در این رابطه، Y معرف پاسخ، x_i و x_j متغیرهای مستقل اثرگذار بر پاسخ، K بیانگر تعداد متغیرهای مستقل، β_0 ضریب ثابت و β_i و β_{ij} به ترتیب ضرایب جملات درجه یک، درجه دو و برهم‌کنش می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- برازش مدل‌ها و تحلیل معادلات رگرسیون

ماتریس طراحی مرکب مرکزی وجهی (CCFD) به همراه نتایج آزمایش‌ها (به صورت درصد حذف کدورت و نماتدها) در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

بر اساس ماتریس طراحی ارائه شده، معادلات چندجمله‌ای درجه دوم (مدل‌های برازش شده) به صورت تابعی از نرخ فیلتراسیون (x_1) و غلظت کلرور فریک (x_2) به دست آمد که به همراه سایر داده‌های آماری در جدول ۵ ارائه شده‌اند. هر یک از این معادلات، از جملات اصلی x_1 و x_2 ، جملات توان دوم x_1^2 و x_2^2 و جمله اثر متقابل x_1x_2 تشکیل شده‌اند. مطابق روش سطح پاسخ، جملات توان دوم متغیرها، نمایانگر وجود انحنای میان سطوح متغیر است. علامت منفی در کنار جملات، نشان‌دهنده اثر کاهشی آن جمله و علامت مثبت بیانگر اثر افزایشی آن جمله بر متغیر پاسخ است.

مقادیر ضریب تعیین^۲ (R^2) نزدیک به ۱ برای تمامی پاسخ‌ها نشان‌دهنده قدرت مدل‌های برازش یافته در توصیف تغییرات متغیرهای پاسخ به‌عنوان تابعی از متغیرهای مستقل است [۲۵، ۲۶].

غلظت کلرور فریک (X_2) بودند، به طوری که محدوده غلظت کلرور فریک با استفاده از آزمایش جارتست^۱ و مقادیر نرخ فیلتراسیون بر اساس نرخ بهره‌برداری متداول در تصفیه‌خانه شماره یک آب مشهد تعیین شد. بر این اساس غلظت کلرور فریک در محدوده ۳ تا ۶ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد. نرخ فیلتراسیون نیز بین مقادیر ۵ تا ۹ متر بر ساعت تعیین گردید. سطوح متغیرهای مستقل، مطابق طراحی آزمایش صورت گرفته، در جدول ۳ ارائه شده است. ضمناً، راندمان حذف کل نماتدها در فیلتر تک‌لایه (Y_1)، راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک در فیلتر تک‌لایه (Y_2)، راندمان حذف نماتدهای متحرک در فیلتر تک‌لایه (Y_3)، راندمان حذف کدورت در فیلتر تک‌لایه (Y_4)، راندمان حذف کل نماتدها در فیلتر دولایه (Y_5)، راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک در فیلتر دولایه (Y_6)، راندمان حذف نماتدهای متحرک در فیلتر دولایه (Y_7)، راندمان حذف کدورت در فیلتر دولایه (Y_8) به‌عنوان متغیرهای وابسته (پاسخ) انتخاب گردیدند.

تحلیل آماری نتایج برای یافتن رابطه منطقی میان متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها به کمک تحلیل رگرسیون انجام شد. پاسخ‌ها به صورت معادلات چندجمله‌ای درجه دوم مطابق با رابطه (۲) ارائه گردیدند [۲۲].

$$Y = f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

2 Coefficient of determination

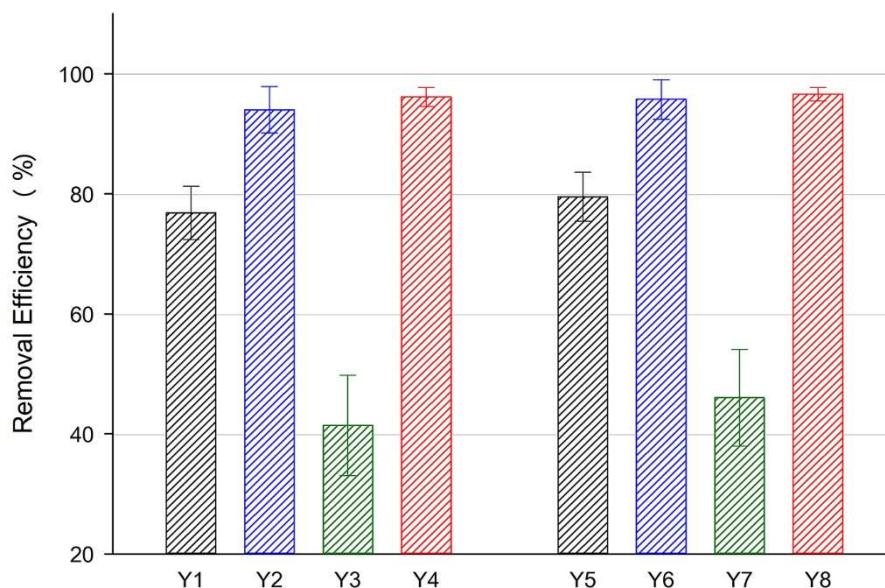
1 Jar test

جدول ۶: تحلیل واریانس برای راندمان حذف کدورت و نماتدها در فیلتر تک لایه
 Table 6. ANOVA for turbidity and nematodes removal: Single-media filter

Term	Y ₁		Y ₂		Y ₃		Y ₄	
	Sum of squares	p-value	Sum of squares	p-value	Sum of squares	p-value	Sum of squares	p-value
<i>Model</i>	۲۵۴/۳۲	<۰/۰۰۰۱	۱۹۲/۶۹	<۰/۰۰۰۱	۸۹۶/۵۳	<۰/۰۰۰۱	۳۲/۳۴	<۰/۰۰۰۱
<i>X₁: Filtration rate</i>	۰/۸۳	۰/۱۹۶۷	۵۸/۳۲	<۰/۰۰۰۱	۲۱۶/۵۷	<۰/۰۰۰۱	۲۰/۷۲	<۰/۰۰۰۱
<i>X₂: FeCl₃ Dosage</i>	۱۷۷/۱۴	<۰/۰۰۰۱	۹۱/۹۴	<۰/۰۰۰۱	۴۴۵/۰۶	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۰	۰/۰۰۴۳
<i>X₁X₂</i>	۱/۸۷	۰/۰۶۹۸	۱/۴۰	۰/۱۰۱۶	۴/۹۶	۰/۱۴۱۳	۰/۳۵	۰/۰۳۷۱
<i>X₁²</i>	۳۴/۴۳	<۰/۰۰۰۱	۷/۱۵	۰/۰۰۳۸	۵۹/۱۰	۰/۰۰۰۷	۴/۵۸	<۰/۰۰۰۱
<i>X₂²</i>	۱۳/۰۸	۰/۰۰۰۸	۱۹/۰۴	۰/۰۰۰۲	۸۳/۸۴	۰/۰۰۰۲	۱/۹۹	۰/۰۰۰۵
<i>Lack of Fit</i>	۲/۱۱	۰/۱۱۷۴	۰/۶۹	۰/۷۳۵۷	۱/۷۸	۰/۸۷۹۱	۰/۲۰	۰/۳۱۷۶

جدول ۷: تحلیل واریانس برای راندمان حذف کدورت و نماتدها در فیلتر دولایه
 Table 7. ANOVA for turbidity and nematodes removal: Dual-media filter

Term	Y ₅		Y ₆		Y ₇		Y ₈	
	Sum of squares	p-value	Sum of squares	p-value	Sum of squares	p-value	Sum of squares	p-value
<i>Model</i>	۲۱۱/۴۰	<۰/۰۰۰۱	۱۳۹/۳۴	<۰/۰۰۰۱	۸۳۷/۸۹	<۰/۰۰۰۱	۱۵/۷۴	<۰/۰۰۰۱
<i>X₁: Filtration rate</i>	۰/۰۷۹	۰/۷۴۹۸	۳۸/۵۲	<۰/۰۰۰۱	۱۸۳/۵۸	<۰/۰۰۰۱	۹/۹۵	<۰/۰۰۰۱
<i>X₂: FeCl₃ Dosage</i>	۱۳۲/۷۲	<۰/۰۰۰۱	۵۹/۲۳	<۰/۰۰۰۱	۳۸۶/۱۹	<۰/۰۰۰۱	۰/۷۵	۰/۰۰۵۳
<i>X₁X₂</i>	۰/۵۳	۰/۴۱۶۱	۱/۵۷	۰/۰۷۹۲	۰/۴۰	۰/۴۳۷۲	۰/۲۰	۰/۰۷۷۹
<i>X₁²</i>	۳۱/۴۵	۰/۰۰۰۳	۱۰/۴۲	۰/۰۰۱۱	۳۶/۶۲	۰/۰۰۰۱	۱/۳۰	۰/۰۰۱۲
<i>X₂²</i>	۱۷/۴۴	۰/۰۰۱۷	۱۴/۴۵	۰/۰۰۰۴	۱۳۸/۰۷	<۰/۰۰۰۱	۱/۷۱	۰/۰۰۰۵
<i>Lack of Fit</i>	۱/۳۱	۰/۷۱۷۲	۰/۱۶	۰/۹۶۱۸	۰/۶۹	۰/۸۴۹۵	۰/۰۵۵	۰/۸۴۷۸



شکل ۲: میانگین درصد حذف کدورت و نماتدها در فیلترهای تک‌لایه و دولایه
 Fig. 2. Average percent removal of turbidity and nematodes in single and dual-media filters

متغیرهای مستقل انتخاب‌شده در مدل تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ‌ها دارند. از طرف دیگر، خطاهای حاصل از عدم انطباق مدل برای تمامی پاسخ‌ها قابل‌چشم‌پوشی است ($p\text{-value} > 0.05$). بنابراین با توجه به تحلیل دو آزمون فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های ارائه‌شده دارای اعتبار کافی هستند.

مقادیر $p\text{-value}$ کمتر از ۰/۰۵ برای متغیرهای مستقل x_1 (نرخ فیلتراسیون) و x_2 (غلظت کلرور فریک) در پاسخ‌های Y_2, Y_3, Y_6 و Y_7 (راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک و متحرک در فیلترهای تک‌لایه و دولایه) و پاسخ‌های Y_4 و Y_8 (راندمان حذف کدورت در فیلترهای تک‌لایه و دولایه)، بیانگر این مهم است که هر دو متغیر مستقل بر متغیرهای پاسخ تأثیرگذار بوده و در سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ مهم و معنی‌دار می‌باشند. این در حالی است که در پاسخ‌های Y_1 و Y_5 (راندمان حذف کل نماتدها در فیلترهای تک‌لایه و دولایه)، مقادیر $p\text{-value}$ برای متغیر مستقل x_1 ، بیشتر از ۰/۰۵ بوده و معنی‌دار نیستند.

۳-۲- اثر نوع بستر بر کارایی فرآیند فیلتراسیون

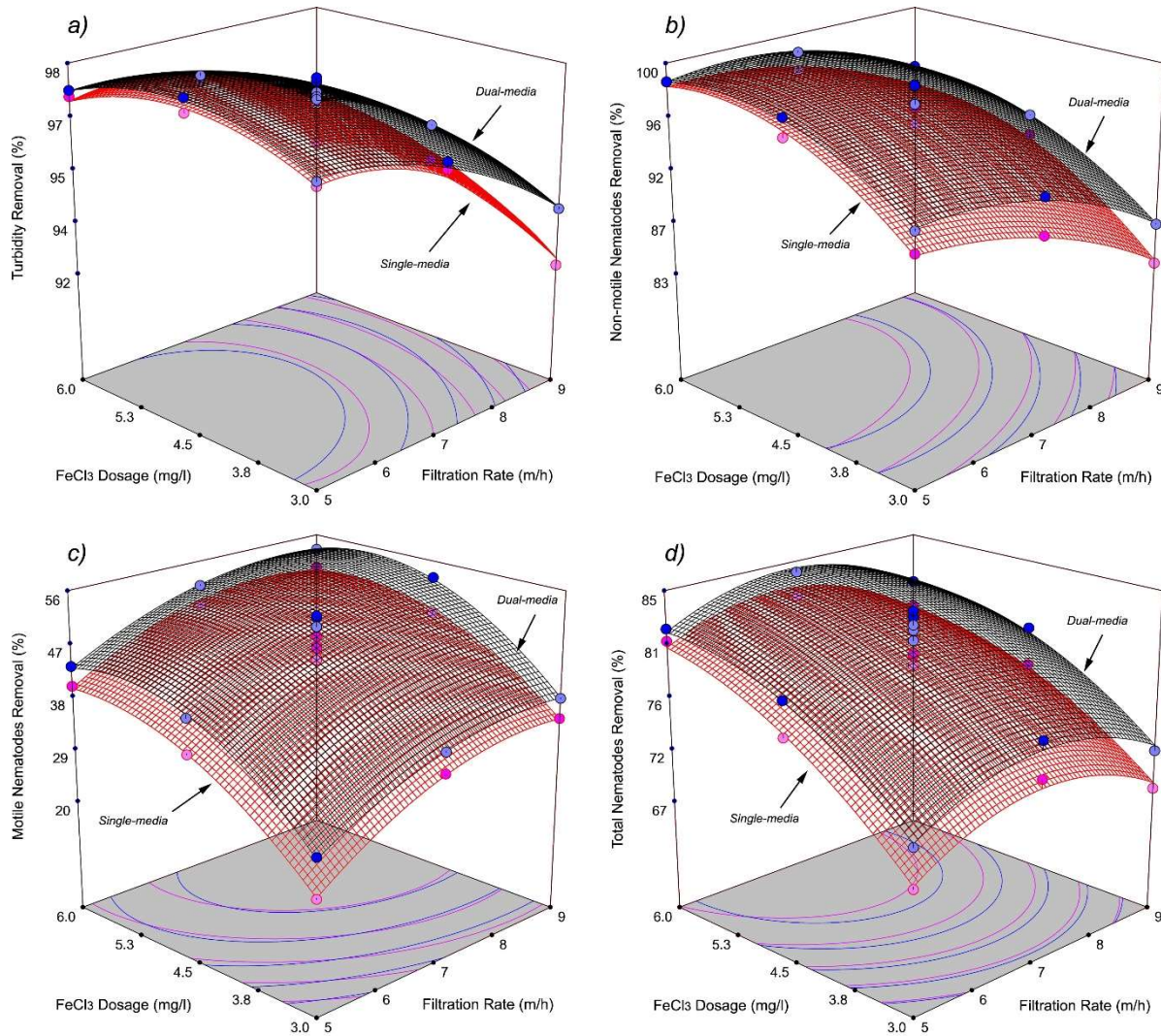
به‌منظور بررسی تأثیر نوع بستر بر عملکرد فیلترها، میانگین راندمان حذف کدورت و نماتدها مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۲). در فیلتر تک‌لایه، میانگین درصد حذف کل نماتدها، نماتدهای

به‌علاوه، اختلاف کم میان مقادیر R^2 و $adjusted R^2$ (ضریب تعیین تعدیل‌شده) در تمامی مدل‌ها نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل در مدل به‌درستی انتخاب شده‌اند [۲۲]. شاخص دقت کافی^۱ (AP) که بیانگر نسبت سیگنال به نویز می‌باشد؛ برای تمامی پاسخ‌ها بیشتر از ۴ بوده که مقداری مطلوب است. ضمناً، مقادیر ضریب تغییرات^۲ ($CV\%$) برای تمامی پاسخ‌ها در دامنه مجاز (کمتر از ۱۰ درصد) قرار دارد [۲۷].

به‌منظور بررسی معنی‌داری و درجه اهمیت متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر متغیرهای پاسخ، از تحلیل واریانس^۳ (ANOVA) در سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ استفاده گردید که نتایج آن برای فیلترهای تک‌لایه و دولایه در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

جهت ارزیابی مدل، دو آزمون کلی در تحلیل واریانس بررسی می‌گردد. در آزمون اول باید مقدار $p\text{-value}$ برای مدل کمتر از ۰/۰۵ ($significant$) و در آزمون دوم خطاهای حاصل از عدم انطباق^۴، کم و قابل‌چشم‌پوشی ($not\ significant$) باشد (مقادیر $p\text{-value}$ بیش‌تر از ۰/۰۵ باشد) [۲۲، ۲۸]. با توجه به جدول‌های ۶ و ۷، مقادیر $p\text{-value}$ برای تمامی مدل‌ها کمتر از ۰/۰۰۰۱ بوده و در سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ ، معنی‌دار هستند. این موضوع نشان می‌دهد که

1 Adequate Precision
 2 Coefficient of variation
 3 Analysis of variance
 4 Lack of fit



شکل ۳: منحنی‌های سه‌بعدی سطح پاسخ فیلترهای تک‌لایه و دولایه برای (الف) حذف کدورت، (ب) حذف نامتحرک، (ج) حذف نامتحرک، (د) حذف کل نامتحرک

Fig. 3. Response surface 3D plots of single and dual-media filters for (a) turbidity removal, (b) non-motile nematodes removal, (c) motile nematodes removal and (d) total nematodes removal

نموده و عمق مؤثر فیلتر افزایش می‌یابد. در این حالت، اکثر ذرات معلق ورودی به فیلتر توسط لایه بالایی (آنتراسیت) به دام افتاده درحالی‌که لایه پایینی (ماسه) به‌عنوان یک مانع اضافی برای حذف ذرات باقی‌مانده عمل می‌نماید و کیفیت آب را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد [۲۹]. به همین دلیل در مطالعه حاضر، فیلتر دولایه در مقایسه با فیلتر تک‌لایه از راندمان نسبتاً بیشتری در حذف کدورت و نامتحرک برخوردار بود. نتایج حاصل از این مطالعه با یافته‌های سایر پژوهش‌ها مطابقت دارد. رشیدی مهرآبادی و ترابیان (۲۰۰۶) و معمار زاده و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعاتی نشان دادند که فیلترهای

غیر متحرک، نامتحرک، کدورت به ترتیب به ترتیب ۷۶/۸۴، ۹۴/۰۲، ۴۱/۳۹ و ۹۶/۱۴ درصد حاصل شد. این در حالی است که اعداد مذکور برای فیلتر دولایه به ترتیب برابر با ۷۹/۵۲، ۹۵/۷۶، ۴۶/۰۱ و ۹۶/۶۱ درصد بود. بررسی مقادیر مذکور برتری فیلتر دولایه در حذف کدورت و نامتحرک را نشان می‌دهد. در فیلتر تک‌لایه ماسه‌ای از تمامی ضخامت بستر استفاده بهینه نشده و تنها بخش‌های بالایی بستر در حذف ذرات ناخالصی مشارکت می‌نمایند. درحالی‌که، در فیلتر دولایه ماسه-آنتراسیت، مواد معلق ورودی به فیلتر به علت اندازه مؤثر بیشتر ذرات آنتراسیت (تخلخل بیشتر)، به عمق‌های پایینی بستر نفوذ

فیلتراسیون به دنبال دارد. به طوری که بیشترین درصد حذف کدورت در فیلترهای تک لایه (۹۷/۵۸ درصد) و دولایه (۹۷/۹۷ درصد) در غلظت ۴/۵ میلی گرم بر لیتر کلرور فریک (آزمایش شماره ۱۳) به دست آمد. در واقع با تزریق غلظت‌های بیش از مقدار بهینه، مقادیر اضافی ماده منعقد کننده باعث ایجاد بار مثبت اضافی یا به عبارت دیگر پتانسیل معکوس گردیده و پایدارسازی مجدد ذرات کلوئیدی را باعث می‌شود [۳۸]. این موضوع منجر به کاهش بازده فرآیند انعقاد، افزایش کدورت خروجی از فیلترها و تغییر ناچیز در راندمان حذف نماتدها گردید. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، در فیلتر تک لایه با افزایش غلظت کلرور فریک از ۳ به ۴/۵ و سپس از ۴/۵ به ۶ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف نماتدهای متحرک به ترتیب ۵۴/۶ و ۵/۲۲ درصد و راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک به ترتیب ۶/۰۳ و ۰/۸۶ درصد افزایش یافت. به همین ترتیب برای فیلتر دولایه نیز مقادیر راندمان حذف نماتدهای متحرک به ترتیب ۵۲/۱۰ و ۸/۱۶ درصد و راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک به ترتیب ۷/۳۹ و ۱/۴۳ درصد افزایش پیدا کرد. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که به طور کلی با افزایش غلظت کلرور فریک از ۴/۵ به ۶ میلی گرم بر لیتر، گرادیان افزایش راندمان حذف نماتدها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. دیواکاران و پیلا (۲۰۰۲) نیز طی مطالعه‌ای نشان دادند که غلظت‌های بالاتر از دوز بهینه ماده منعقد کننده در فرآیند انعقاد سبب پایداری مجدد ذرات معلق می‌گردد [۳۹]. همچنین عروجی و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی بر روی فرآیند انعقاد و لخته سازی در مقیاس آزمایشگاهی (با استفاده از دستگاه جارست) گزارش نمودند که دوزهای اضافی کیتوسان به عنوان کمک منعقد کننده سبب افزایش کدورت می‌گردد [۴۰].

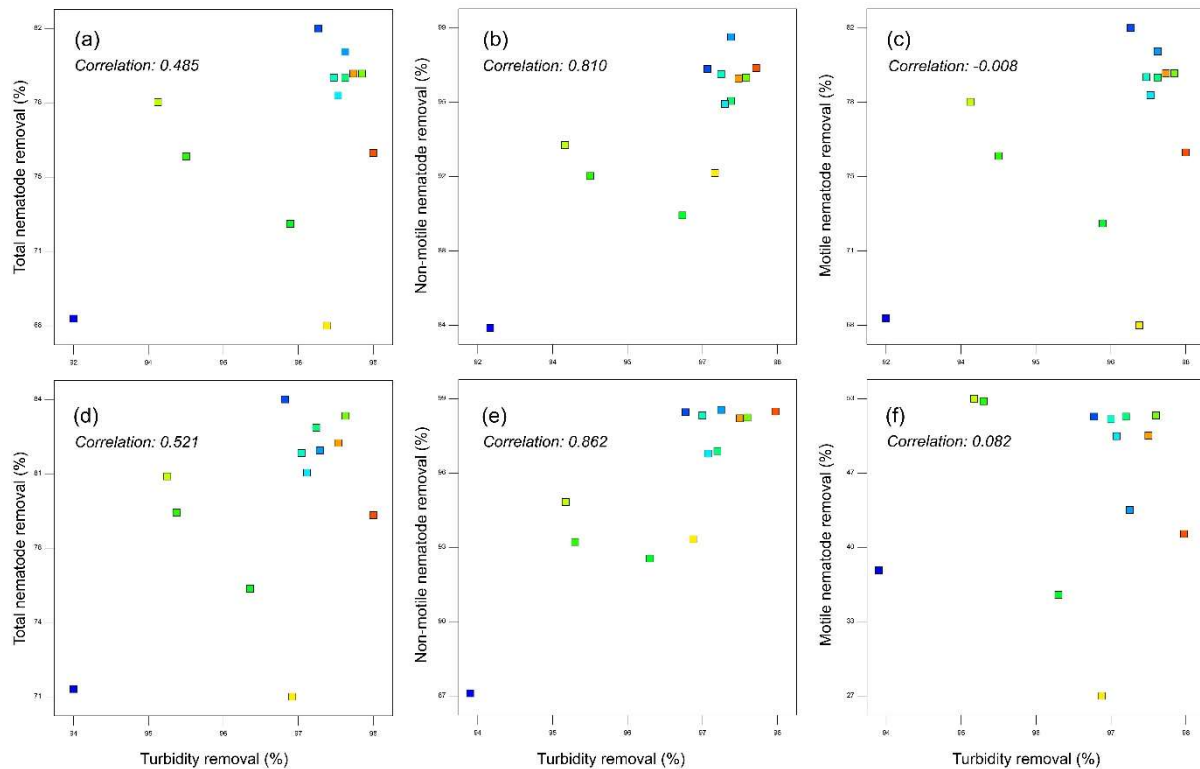
منحنی سطح پاسخ در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب نشان می‌دهد که فارغ از غلظت ماده منعقد کننده و نوع بستر، با افزایش نرخ فیلتراسیون، درصد حذف کدورت و نماتدهای غیر متحرک کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش نرخ فیلتراسیون، نیروهای برشی در میان حفرات بستر افزایش یافته و منجر به انتقال راحت‌تر ذرات و نماتدهای به دام افتاده در بستر، به خارج از فیلتر می‌گردد. مکاری و همکاران (۲۰۱۰) و گائو و همکاران (۲۰۱۲) نیز در پژوهش‌هایی مشابه نشان دادند که در یک فیلتر شنی با عمق بستر مشخص، کارایی حذف ذرات معلق در سرعت‌های پایین فیلتراسیون بیشتر است [۴۱، ۴۲]. نتایج مطالعه سبیری و همکاران (۲۰۱۷) نیز مشخص نمود که با افزایش

چندلایه در مقایسه با فیلتر تک لایه عملکرد بهتری در حذف نماتدها دارند [۳۰، ۳۱].

مطابق با داده‌های ارائه شده، ضعف اصلی فیلترهای دارای بستر گرانوله در حذف نماتدها متوجه بخش غیر متحرک آن است؛ به گونه‌ای که میانگین راندمان حذف نماتدهای متحرک در فیلترهای تک لایه و دولایه کمتر از ۵۰ درصد بوده و کارایی ناکافی این دو فیلتر را در حذف نماتدهای متحرک نشان می‌دهد. البته نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشین نیز نشان داده است که در فیلترهای ماسه‌ای، ۵۵ تا ۷۵ درصد از نماتدهای متحرک از بستر عبور می‌نمایند [۲، ۳۲، ۳۳]. قدرت حرکت بالای نماتدهای متحرک، کوچک بودن قطر نماتدها در مقایسه با حفرات بستر و ضخامت کم بسترهای مورد استفاده (۷۵ سانتی متر) از عوامل اصلی پایین بودن راندمان حذف نماتدهای متحرک در این مطالعه هستند [۳۱، ۳۴]. از سوی دیگر، مقایسه مقادیر انحراف استاندارد برای راندمان حذف نماتدها (که توسط نوار خطا در شکل ۲ به نمایش در آمده است) نشان دهنده نوسانات بالاتر راندمان حذف نماتدهای متحرک در هر دو بستر تک لایه و دولایه است.

۳-۳- اثر غلظت ماده منعقد کننده و نرخ فیلتراسیون بر کارایی فرآیند فیلتراسیون

منحنی‌های سه بعدی سطح پاسخ ارائه شده در شکل ۳، تأثیر هم‌زمان نرخ فیلتراسیون و غلظت کلرور فریک (به عنوان ماده منعقد کننده) را بر راندمان حذف کدورت و نماتدها در فیلترهای تک لایه و دولایه، نشان می‌دهند. بررسی سطوح پاسخ، نشان دهنده افزایش راندمان حذف کدورت و نماتدها با افزایش غلظت کلرور فریک است. ماده منعقد کننده با ناپایدارسازی بار ذرات معلق و کلوئیدی شرایط را برای تجمع ذرات و تشکیل فلاک‌ها فراهم می‌آورد [۳۵-۳۷]. به طور کلی افزایش غلظت ماده منعقد کننده، زمینه ناپایداری ذرات بیشتری را فراهم می‌نماید که نتیجتاً منجر به شکل گیری فلاک‌های بیشتر با اندازه‌های بزرگ‌تر می‌شود. این موضوع باعث به دام افتادن تعداد بیشتری از ذرات معلق و نماتدها در بستر فیلتر شده و راندمان حذف آن‌ها را افزایش می‌دهد. با این وجود، همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌گردد، تزریق ماده منعقد کننده با غلظت‌هایی بیش از مقدار بهینه، کاهش راندمان حذف کدورت را در تمامی نرخ‌های



شکل ۴: همبستگی بین راندمان حذف کدورت و راندمان حذف: (الف) کل نماتدها در فیلتر تک‌لایه، (ب) نماتدهای غیر متحرک در فیلتر تک‌لایه، (ج) نماتدهای متحرک در فیلتر تک‌لایه، (د) کل نماتدها در فیلتر دولایه، (ه) نماتدهای غیر متحرک در فیلتر دولایه و (و) نماتدهای متحرک در فیلتر دولایه
Fig. 4. Correlation between turbidity removal and removal of: (a) total nematodes in single-media filter, (b) non-motile nematodes in single-media filter, (c) motile nematodes in single-media filter, (d) total nematodes in dual-media filter, (e) motile nematodes in dual-media filter non-motile nematodes in dual-media filter and (f)

غیر متحرک گردد؛ راندمان حذف نماتدهای متحرک افزایش می‌یابد. در پژوهشی مشابه، پترسون و همکاران (۱۹۶۶) نیز گزارش نمودند که در اثر افزایش بار هیدرولیکی وارد بر فیلتر ماسه‌ای از ۵ به ۱۵ متر بر ساعت، تحرک نماتدهای متحرک کاهش و راندمان حذف این دسته از نماتدها افزایش می‌یابد [۳۲].

منحنی سطح پاسخ ارائه‌شده در شکل ۳-د، تأثیر هم‌زمان متغیرهای مستقل را بر راندمان حذف کل نماتدها (مجموع نماتدهای متحرک و غیر متحرک) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، راندمان حذف کل نماتدها تا بار هیدرولیکی ۷ متر بر ساعت افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در واقع بیش‌ترین راندمان حذف نماتدها در نرخ فیلتراسیون متوسط (۷ متر بر ساعت) به دست آمد (آزمایش شماره ۲). هرچند بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول‌های ۶ و ۷، تأثیر نرخ فیلتراسیون بر راندمان حذف کل نماتدها از لحاظ آماری *not significant* است ($p\text{-value} > 0.05$). در حقیقت رفتار متفاوت نماتدهای متحرک و غیر متحرک در برابر

نرخ فیلتراسیون در فیلتر دولایه ماسه - آنتراسیت، راندمان حذف کدورت و ریز جلبک‌ها کاهش می‌یابد [۴۳].

مطابق با منحنی سطح پاسخ ارائه‌شده در شکل ۳-ج، در غلظت‌های ثابت کلرور فریک، با افزایش نرخ فیلتراسیون، راندمان حذف نماتدهای متحرک در فیلترهای تک‌لایه و دولایه افزایش می‌یابد. این رفتار غیرمنتظره از نماتدهای متحرک، می‌تواند به علت آشفته‌گی جریان به وجود آمده در میان تخلخل بستر فیلتر در بارهای هیدرولیکی بالا باشد. به‌گونه‌ای که با افزایش نرخ فیلتراسیون و ایجاد اغتشاش در میان حفرات بستر، نماتدهای متحرک، تحرک خود را از دست داده و رفتاری مشابه نماتدهای بی‌تحرک (تحرک به‌قدری کاهش یافته که می‌توان نماتد را غیر متحرک در نظر گرفت) از خود بروز می‌دهند و متعاقباً راحت‌تر توسط بستر فیلتر به دام می‌افتند. در صورتی که با افزایش نرخ فیلتراسیون، مقدار کاهش تحرک نماتدهای متحرک بیشتر از کاهش راندمان حذف نماتدهای

به عبارت دیگر، کیفیت بالای آب خروجی از فیلترها از لحاظ راندمان حذف کدورت، لزوماً بیانگر عدم وجود نماتدها نیست و این موضوع مجدداً اهمیت بررسی مکانیسم‌های حذف نماتدها در تصفیه‌خانه‌های آب (که به صورت متداول شاخص کدورت را ملاک ارزیابی عملکرد قرار می‌دهند) را آشکار می‌سازد.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تأثیر غلظت کلرور فریک، نوع بستر و نرخ فیلتراسیون بر راندمان حذف کدورت و نماتدها در فرآیند فیلتراسیون مستقیم بررسی گردید. در این مطالعه از روش سطح پاسخ (RSM) و طراحی مرکب مرکزی محاطی (CCFD) برای طراحی آزمایش‌ها استفاده گردید. مهم‌ترین نتایج حاصل از مطالعه حاضر در ادامه آورده شده است:

• فیلتر دولایه در مقایسه با فیلتر تک‌لایه عملکرد بهتری را در حذف کدورت و نماتدها از خود نشان داد. میانگین درصد حذف کدورت، نماتدهای غیر متحرک، نماتدهای متحرک و کل نماتدها برای فیلتر تک‌لایه به ترتیب ۹۶/۱۴، ۹۴/۰۲، ۴۱/۳۹ و ۷۶/۸۴ درصد حاصل شد. این در حالی است که اعداد مذکور برای فیلتر دولایه به ترتیب برابر با ۹۶/۶۱، ۹۵/۷۶، ۴۶/۰۱ و ۷۹/۵۲ درصد بود.

• با افزایش غلظت کلرور فریک، راندمان حذف نماتدها (کل نماتدها، نماتدهای غیر متحرک و نماتدهای متحرک) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت.

• راندمان حذف کدورت و درصد حذف نماتدهای غیر متحرک با افزایش نرخ فیلتراسیون، کاهش یافت. این در حالی است که افزایش این متغیر افزایش غیرمنتظره درصد حذف نماتدهای متحرک را به دنبال داشت.

• اثر متفاوت نرخ فیلتراسیون بر رفتار نماتدهای متحرک و غیر متحرک سبب گردید تا راندمان حذف کل نماتدها (مجموع نماتدهای متحرک و غیر متحرک) مستقل از نرخ فیلتراسیون باشد.

• رابطه همبستگی میان درصد حذف کدورت با درصد حذف نماتدهای غیر متحرک، متحرک و کل نماتدها به ترتیب بسیار قوی، بدون رابطه و متوسط بود.

با در نظر گرفتن تمامی نتایج فوق، در شرایطی که کدورت آب ورودی به فیلترها پایین باشد، به‌کارگیری روش فیلتراسیون مستقیم

تغییرات نرخ فیلتراسیون (افزایش راندمان حذف نماتدهای متحرک در اثر افزایش نرخ فیلتراسیون و کاهش راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک با افزایش نرخ فیلتراسیون) باعث شد تا در مطالعه حاضر، راندمان حذف کل نماتدها مستقل از نرخ فیلتراسیون باشد. این در حالی است که پیش از شروع آزمایش‌ها منطقی به نظر می‌رسید که با افزایش نرخ فیلتراسیون راندمان حذف نماتدها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یابد. پژوهش سث و همکاران (۱۹۶۸) نیز هم‌راستا با نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بار هیدرولیکی تأثیر بسیار ناچیزی بر راندمان حذف نماتدها دارد [۳۳]. نتایج پژوهش هارینگتون و همکاران (۲۰۰۳) نیز مشخص نمود که افزایش نرخ فیلتراسیون از ۵ به ۱۹ متر بر ساعت تأثیر محسوسی بر راندمان حذف پاتوژن‌هایی چون کریپتوسپوریدیوم و اشرشیاکلی و باکتریوفاژها ندارد [۴۴]. این در حالی است که رشیدی مهرآبادی و ترابیان (۲۰۰۶) به این نتیجه رسیدند که با افزایش بار هیدرولیکی، راندمان حذف نماتدها کاهش می‌یابد [۳۱].

۳-۳-۱- رابطه همبستگی میان درصد حذف کدورت و نماتدها

در شکل ۴، همبستگی آماری بین درصد حذف کدورت و درصد حذف نماتدها نشان داده شده است. با توجه به این شکل، رابطه همبستگی بسیار قوی بین درصد حذف نماتدهای غیر متحرک و درصد حذف کدورت وجود دارد. به‌طوری‌که، مقادیر همبستگی میان این دو پاسخ در فیلترهای تک‌لایه و دولایه به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۸۶ به دست آمد. در واقع، نماتدهای غیر متحرک رفتاری مشابه با کدورت را در برابر تغییرات نرخ فیلتراسیون و غلظت کلرور فریک از خود نشان داده و با افزایش راندمان حذف کدورت، راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقادیر همبستگی برای درصد حذف کدورت و درصد حذف نماتدهای متحرک به ترتیب صفر و ۰/۰۸ به دست آمد که بیانگر عدم همبستگی این دو پاسخ است. از طرف دیگر، مقادیر همبستگی برای راندمان حذف کدورت و حذف کل نماتدها در فیلترهای تک‌لایه و دولایه به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۵۲ حاصل گردید که بیانگر رابطه همبستگی متوسط است. بدین ترتیب این‌گونه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش راندمان حذف کدورت، راندمان حذف نماتدهای غیر متحرک قطعاً افزایش می‌یابد اما درصد حذف نماتدهای متحرک وابسته به درصد حذف کدورت نیست.

- [9] F. Bichai, B. Barbeau, P. Payment, Protection against UV disinfection of *E. coli* bacteria and *B. subtilis* spores ingested by *C. elegans* nematodes, *Water Research*, 43(14) (2009) 3397-3406.
- [10] J. Mott, A. Harrison, Nematodes from river drift and surface drinking water supplies in southern Ontario, *Hydrobiologia*, 102(1) (1983) 27-38.
- [11] W.H. Organization, Guidelines for drinking-water quality, 4th ed., WHO, Geneva, 2017.
- [12] N. Grech, F. Rijkenberg, Injection of electrolytically generated chlorine into citrus microirrigation systems for the control of certain waterborne root pathogens, *Plant Disease*, 76(5) (1992) 457-461.
- [13] H. Hugo, A. Malan, Occurrence and control of plant-parasitic nematodes in irrigation water: a review, *South African Journal of Enology and Viticulture*, 31(2) (2010) 169-180.
- [14] K.W. Tang, C. Dziallas, H.P. Grossart, Zooplankton and aggregates as refuge for aquatic bacteria: protection from UV, heat and ozone stresses used for water treatment, *Environmental Microbiology*, 13(2) (2011) 378-390.
- [15] L. Fabrizi, B. Jefferson, S.A. Parsons, A. Wetherill, P. Jarvis, The role of polymer in improving floc strength for filtration, *Environmental Science & Technology*, 44(16) (2010) 6443-6449.
- [16] J. Kim, J.E. Tobiason, Particles in filter effluent: The roles of deposition and detachment, *Environmental Science & Technology*, 38(22) (2004) 6132-6138.
- [17] R. Jiao, R. Fabris, C.W. Chow, M. Drikas, J. van Leeuwen, D. Wang, Z. Xu, Influence of coagulation mechanisms and floc formation on filterability, *Journal of Environmental Sciences*, 57 (2017) 338-345.
- [18] A. International, ASTM D4188-17, Standard Practice for Performing Pressure In-Line Coagulation-Flocculation-Filtration Test in Water, in, West Conshohocken, PA, 2017.
- [19] A.W.W. Association, ANSI/AWWA B100-16 Granular Filter Material, in, AWWA, 2016.
- [20] A.P.H. Association, A.W.W. Association, W.E. Federation, Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed., American Public Health
- به‌واسطه راندمان بالای آن در حذف کدورت و نماتدها توصیه می‌گردد. تغییر در روش تصفیه (از تصفیه متعارف به فیلتراسیون مستقیم) در شرایط مناسب، کاهش هزینه‌های انرژی و هزینه‌های مواد اولیه (به‌واسطه مصرف کمتر ماده منعقد کننده در سیستم فیلتراسیون مستقیم در مقایسه با تصفیه متعارف) را به دنبال دارد. ضمناً توصیه می‌گردد به‌طور حتم برای حذف نماتدهای متحرک که امکان عبور از بستر را دارند، فرآیند پیش اکسیداسیون و یا ضدعفونی اولیه صورت پذیرد. در این شرایط نماتدهای متحرک به غیر متحرک تبدیل شده و بدین ترتیب امکان حذف آن‌ها به کمک فیلترها فراهم می‌گردد.

۵- مراجع

- [1] J. Kim, D.F. Lawler, The influence of hydraulic loads on depth filtration, *Water Research*, 46(2) (2012) 433-441.
- [2] J. Mott, G. Mulamootil, A. Harrison, A 13-month survey of nematodes at three water treatment plants in Southern Ontario, Canada, *Water Research*, 15(6) (1981) 729-738.
- [3] A.W.W. Association, M7 Problem Organisms in Water: Identification and Treatment, 3rd ed., American Water Works Association, 2004.
- [4] F. Bichai, Y. Dullemon, W. Hijnen, B. Barbeau, Predation and transport of persistent pathogens in GAC and slow sand filters: a threat to drinking water safety, *Water Research*, 64 (2014) 296-308.
- [5] E.-M. Zetsche, F.J. Meysman, Dead or alive? Viability assessment of micro- and mesoplankton, *Journal of Plankton Research*, 34(6) (2012) 493-509.
- [6] K.N. Caldwell, B.B. Adler, G.L. Anderson, P.L. Williams, L.R. Beuchat, Ingestion of *Salmonella enterica* serotype Poona by a free-living nematode, *Caenorhabditis elegans*, and protection against inactivation by produce sanitizers, *Applied and Environmental Microbiology*, 69(7) (2003) 4103-4110.
- [7] O. Huamanchay, L. Genzlinger, M. Iglesias, Y.R. Ortega, Ingestion of *Cryptosporidium* oocysts by *Caenorhabditis elegans*, *Journal of Parasitology*, 90(5) (2004) 1176-1178.
- [8] A. Locas, B. Barbeau, V. Gauthier, Nematodes as a source of total coliforms in a distribution system, *Canadian Journal of Microbiology*, 53(5) (2007) 580-585.

- biological organisms in Isfahan water treatment plant, *Journal of Water and Wastewater*, 21(1) (2010) 76-83 (in Persian).
- [31] A. Rashidi Mehrabadi, A. Torabian, Evaluating the efficiency of direct filtration in the removal of free-living nematodes, *Journal of Environmental Studies*, 32(39) (2006) 75-82 (in Persian).
- [32] R.L. Peterson, R. Engelbrecht, J.H. Austin, Free-living nematode removal by rapid sand filters, *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 92(1) (1966) 229-244.
- [33] A.K. Seth, M.G. George, J.K. Bewtra, V.P. Sharma, Nematode removal by rapid sand filtration, *American Water Works Association*, 60(8) (1968) 962-968.
- [34] N. Matsumoto, T. Aizawa, S. Ohgaki, T. Hirata, K. Toyooka, T. Kanbayashi, Y. Tsutsumi, T. Hasegawa, Removal methods of nematoda contained in the effluent of activated carbon, *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(3) (2002) 183-190.
- [35] A.W.W. Association, A.S.o.C. Engineers, *Water Treatment Plant Design*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 2012.
- [36] J.C. Crittenden, R.R. Trussell, D.W. Hand, K.J. Howe, G. Tchobanoglous, *MWH's water treatment: principles and design*, John Wiley & Sons, 2012.
- [37] J.K. Edzwald, *Water Quality and Treatment A Handbook on Drinking Water*, McGrawHill, 2010.
- [38] T.K. Trinh, L.S. Kang, Response surface methodological approach to optimize the coagulation–flocculation process in drinking water treatment, *Chemical Engineering Research and Design*, 89(7) (2011) 1126-1135.
- [39] R. Divakaran, V.S. Pillai, Flocculation of river silt using chitosan, *Water Research*, 36(9) (2002) 2414-2418.
- [40] N. Orooji, A. Takdastan, A. Kargari, G. Raeesi, Efficiency of Chitosan with Polyaluminum Chloride in Turbidity Removal from Ahwaz Water Treatment Plant Influent, *Journal of Water and Wastewater*, 23(4) (2012) 70-77 (in Persian).
- [41] P. Gao, G. Xue, X.-s. Song, Z.-h. Liu, Depth filtration using novel fiber-ball filter media for the treatment of high-turbidity surface water, *Separation and Purification Technology*, 95 (2012) 32-38.
- Association, 2012.
- [21] W.a.W.C.o. Iran, *Work Instruction for sampling, Identifying and counting free living Nematode in water*, in, 2017.
- [22] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed., John Wiley & Sons, New York, USA, 2017.
- [23] M.A. Bezerra, R.E. Santelli, E.P. Oliveira, L.S. Villar, L.A. Escalera, Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, *Talanta*, 76(5) (2008) 965-977.
- [24] B. Kakoi, J.W. Kaluli, P. Ndiba, G. Thiong'o, Optimization of Maerua Decumbent bio-coagulant in paint industry wastewater treatment with response surface methodology, *Journal of Cleaner Production*, 164 (2017) 1124-1134.
- [25] M.E. Abdullahi, M.A. Abu Hassan, Z. Zainon Noor, R. Raja Ibrahim, Integrated air stripping and non-thermal plasma system for the treatment of volatile organic compounds from wastewater: statistical optimization, *Desalination and Water Treatment*, 57(34) (2016) 16066-16077.
- [26] S. Ghafari, H.A. Aziz, M.H. Isa, A.A. Zinatizadeh, Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum, *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3) (2009) 650-656.
- [27] E. Rosales, M. Sanromán, M. Pazos, Application of central composite face-centered design and response surface methodology for the optimization of electro-Fenton decolorization of Azure B dye, *Environmental Science and Pollution Research*, 19(5) (2012) 1738-1746.
- [28] S.S. Moghaddam, M.A. Moghaddam, M. Arami, Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: optimization through response surface methodology, *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3) (2010) 651-657.
- [29] J. Shin, C. O'Melia, Pretreatment chemistry for dual media filtration: model simulations and experimental studies, *Water Science and Technology*, 53(7) (2006) 167-175.
- [30] M. Memarzadeh, P. Najafi, M. Afuni, Efficiency of garnet mineral used in three-layer filters to remove turbidity and

- dual-media filter performances for microalgae removal, *Environmental Technology*, 38(3) (2017) 345-352.
- [44] G.W. Harrington, I. Xagorarakis, P. Assavasilavasukul, J.H. Standridge, Effect of filtration conditions on removal of emerging waterborne pathogens, *Journal-American Water Works Association*, 95(12) (2003) 95-104.
- [42] M. Mokari, H. Banejad, M. Mosaddeghi, Effect of Filtration Velocity and Rapid Sand Filter Bed Depth on Removal Efficiency of Suspended Particles, *Journal of Water and Wastewater*, 22(2) (2011) (in Persian).
- [43] N.-E. Sabiri, E. Monnier, V. Raimbault, A. Massé, V. Séchet, P. Jaouen, Effect of filtration rate on coal-sand

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Abdollahi, SH. Danesh, M. Bahreini, N. Emrani, Application of response surface methodology in the analysis of parameters influencing the removal of turbidity and nematodes in direct filtration process, Amirkabir J. Civil Eng., 52(9) (2020) 2155-2170.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15951.6086](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15951.6086)

