

ارزیابی کارایی حذف ذرات معلق آب توسط صافی تند شنی با تغییر غلظت ذرات و اندازه دانه‌های محیط بستر صافی

یاسر دعایی^۲

محمد رضا مصدقی^۲

مهدی مکاری^۱

حسین بانژاد^۱

(دریافت ۸۷/۱۲/۱۷ پذیرش ۸۷/۸/۷)

چکیده

فرایند حذف ذرات معلق توسط صافی در تصفیه آب، فرایندی پیچیده است و به پارامترهای متعددی مانند اندازه و شکل دانه‌های محیط بستر صافی، غلظت ذرات معلق، سرعت صافی سازی و عمق بستر صافی بستگی دارد. هدف از این پژوهش بررسی اثر غلظت ذرات معلق و اندازه دانه‌های محیط بستر صافی بر کارایی حذف ذرات (η) بود. این تحقیق برای پنج غلظت کائولینیت به میزان ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ پی‌پی‌ام و در سرعت صافی سازی ۰/۰۸۶ سانتی‌متر بر ثانیه انجام شد. همچنین سه محیط بستر صافی شنی با میانگین اندازه دانه‌های کوچک (۰/۵۱ میلی‌متر)، متوسط (۱ میلی‌متر) و بزرگ (۱/۴۱ میلی‌متر) تهیه شد. عمق بستر صافی در تمام آزمایش‌ها ۲۵ سانتی‌متر بود. نتایج نشان داد که در محیط بستر صافی با اندازه دانه‌های کوچک، با افزایش غلظت ورودی در ساعت‌های اولیه صافی سازی، η افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت که در غلظت‌های پایین، کارایی حذف ذرات معلق مطلوب‌تر است. در هیچ یک از سه محیط بستر صافی استفاده شده، تا غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ذرات کائولن، تفاوت چندانی در کارایی حذف مشاهده نشد. اما در غلظت‌های بیشتر از این مقدار، کارایی حذف به ویژه در محیط با اندازه دانه‌های بزرگ کاهش یافت. در محیط‌های با اندازه دانه‌های متوسط و بزرگ، از همان ساعت‌های اولیه آزمایش، در غلظت‌های بالا، کارایی حذف کاهش یافت. بیشترین کارایی حذف در محیط با اندازه دانه‌های کوچک مشاهده شد. تفاوت‌های کارایی بین محیط با اندازه دانه‌های کوچک و متوسط بسیار بیشتر از تفاوت‌های کارایی بین محیط با اندازه دانه‌های متوسط و بزرگ بود. به عبارت دیگر اندازه بحرانی برای دانه‌های محیط بستر صافی، ۱ میلی‌متر تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: ذرات کائولینیت، صافی تند شنی، غلظت ذرات معلق، محیط بستر صافی، کارایی حذف ذرات.

Evaluation of Particles Removal Efficiency in Rapid Sand Filters by Changing Particle Concentration and Media Grain Size

Hossein Banejad¹

Mehdi Mokari²

Mohammadreza Mosaddeghi³

Yaser Doae²

(Received Mar. 7, 2007 Accepted Oct. 28, 2008)

Abstract

Removal of particles by filter is a complex water treatment process. Several factors are involved that include shape and size of filter grains, particle concentration, filtration velocity, and filter depth. The objective of this study was to evaluate particle removal efficiency (η) by changing particle concentration and media grain size in a rapid sand filter. Five concentrations (100, 200, 300, 400, and 500 ppm) of Kaolin particles and three mean media sizes (0.51, 1, and 1.41 mm) were used. The filter depth and the filtration velocity were 25 cm and 0.086 $cmsec^{-1}$, respectively. Silica sand was used as the filter medium in all the experiments. The results showed that for the filter medium with an average grain size of 0.51 mm, removal efficiency increased with increasing influent particle concentration during the initial hours of filtration. Generally, suspended solids removal efficiency was higher at low particle concentrations. No significant differences were observed in removal

1. Assis. Prof. of Irrigation, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, (Corresponding Author) (+98 811) 8273044 Hossein_Banejad@yahoo.com
2. Grad. Student of Irrigation and Drainage, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan
3. Assis. Prof. of Soil Science, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan

- ۱- استادیار گروه آبیاری دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان. (نویسنده مسئول)
Hossein_Banejad@yahoo.com (۰۸۱۱) ۸۲۷۳۰۴۴
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
- ۳- استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

efficiency for the three media sizes and particle concentrations of up to 300 mg/L, but for concentrations above 300 mg/L, removal efficiency decreased, especially for filter media with an average grain size of 1.41 mm. Removal efficiency decreased in filter media with average grain sizes of 1 and 1.41 mm at high particle concentrations from the very initial hours of filtration. The highest removal efficiency was observed in the filter medium with an average grain size of 0.51 mm. Differences in removal efficiencies between the filter media with average grain sizes of 0.51 and 1 mm were much greater than those between filter media with average grain sizes of 1 and 1.41 mm. In other words, the critical grain size for the filter medium was 1 mm.

Keywords: Kaolinite Particles, Rapid Sand Filter, Suspended Particles Concentration, Filter Media, Particle Removal Efficiency.

۱- مقدمه

از سال ۱۸۹۰ میلادی، یعنی پیش از یک قرن است که از صافی‌های تند شنی^۱ در مرحله نهایی از تصفیه آب استفاده می‌گردد [۴-۱]. سالها بعد همین روش به عنوان مرحله ابتدایی در تصفیه فاضلاب نیز به کار گرفته شد [۵ و ۶].

فرایند حذف ذرات توسط صافی، پیچیده بوده و به پارامترهای متعددی نظیر ویژگی‌های فیزیکی (اندازه و شکل دانه‌های محیط بستر صافی)، ویژگی‌های شیمیایی سوسپانسیون (غلظت ذرات معلق، قدرت یونی و pH)، منعقدکننده‌های استفاده شده و همچنین پارامترهای اجرایی نظیر سرعت صافی سازی و عمق بستر صافی بستگی دارد [۳، ۷ و ۸].

اگرچه صافی سازی با محیط دانه‌ای، سالهای زیادی است که تحت پوشش و بررسی قرار گرفته است، با این وجود هنوز مدل تحلیلی قابل قبولی برای بهینه کردن پارامترهای این فرایند پیچیده وجود ندارد [۹]. صافی‌های با محیط دانه‌ای قادرند دامنه وسیعی از انواع ذرات، شامل مواد آلی و آلودگی‌های میکربی با چگالی پایین تا مواد معدنی با چگالی بالا را از آب حذف کنند. همچنین ذرات معلق در اندازه کمتر از ۰/۰۱ میکرون تا بیشتر از ۱۰۰ میکرون به راحتی توسط محیط‌های دانه‌ای مهار می‌شوند [۷].

مدل راجاگوپالان^۲ و تاین^۳ در سال ۱۹۷۹ به‌طور گسترده برای پیش‌بینی کارایی حذف ذرات معلق در فرایندهای صافی سازی دانه‌ای استفاده می‌شد. با استفاده از این مدل می‌توان اندازه بحرانی ذرات معلق را تعیین نمود [۱۰]. حذف ذرات در فرایند صافی سازی شامل دو مرحله است. ابتدا ذرات به روشهای مختلفی نظیر پخشیدگی، ترسیب و اثر هیدرودینامیکی^۴ به نزدیک دانه‌های بستر صافی منتقل می‌شوند، سپس این ذرات توسط نیروهای موجود بین آنها و دانه‌های بستر صافی، جذب می‌شوند. این نیروها شامل نیروی واندروالس^۵ و نیروی لایه مضاعف الکتریکی^۶ است [۱۱، ۱۲ و ۱۳].

جگاتیسسن^۷ در سال ۱۹۹۷ آزمایش‌هایی را بر روی ذرات لاتکس^۸ با قطرهای ۰/۴۶ و ۰/۸۱۶ میکرون انجام داد. او در این آزمایش‌ها از یک ستون استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده کرد که با دانه‌های شیشه‌ای به قطر ۰/۱۷۵ میلی‌متر پر شده بود. سرعت صافی سازی ۰/۰۶۹ سانتی‌متر بر ثانیه و قدرت یونی سوسپانسیون در غلظت ۰/۰۱ مولار KCl در این آزمایش ثابت نگه داشته شده بود. وقتی غلظت ورودی تا حدود ۵ میلی‌گرم بر لیتر افزایش پیدا کرد، حذف ذرات در طی مراحل اولیه صافی سازی کاهش یافت. نتایج نشان دادند که در غلظتهای پایین، حذف ذرات بزرگ نسبت به ذرات کوچک بهتر صورت گرفت. اما با افزایش غلظت ورودی، حذف ذرات بزرگ نیز کاهش پذیرفت تا این که در غلظتهای خیلی بالا، حذف ذرات کوچک بهتر از ذرات بزرگ انجام گرفت [۱۴]. سارا و همکاران^۹ طی آزمایش‌هایی که در سرعت صافی سازی ۰/۱۸ سانتی‌متر بر ثانیه و برای اندازه‌های مختلف دانه‌های محیط بستر صافی (۰/۳۹، ۰/۷۸ و ۱/۸۵ میلی‌متر) انجام دادند، مشاهده کردند که کارایی حذف برای ذراتی که اندازه آنها بین ۱/۱ تا ۱/۸ میکرون بود، در عمق ۱۹۳ سانتی‌متر از بستر صافی، برای محیط با اندازه دانه‌های ۰/۷۸ میلی‌متر بیشتر از محیط با اندازه دانه‌های ۱/۸۵ میلی‌متر بود [۱].

از آنجا که برای دستیابی به شرایط مطلوب برای ساخت و اجرای صافی‌های تند شنی در هر منطقه، آزمایش‌های زیادی لازم است و هنوز هم فرمول‌های ریاضی و مدل‌های جامعی که بتواند پاسخگوی تمام جنبه‌های این فرایند پیچیده باشد، وجود ندارد، لذا این ضرورت احساس می‌شود که حتی‌المقدور حالت‌های مختلف فرایند صافی سازی شبیه سازی شود. این مسئله که در پژوهشهای قبلی به ندرت به آن پرداخته شده در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. از سوی دیگر تعیین اندازه بحرانی برای دانه‌های محیط صافی به گونه‌ای که بتوان به شرایط مطلوب و مقرون به صرفه رسید، یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش بوده است.

⁶ Electrical Double Layer

⁷ Jegatheesan

⁸ Latex

⁹ Sara et al.

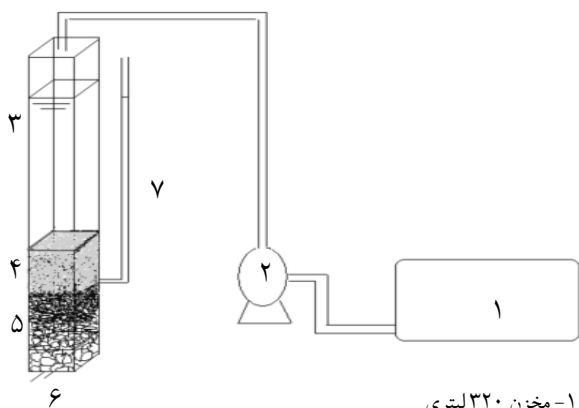
¹ Rapid Sand Filter

² Rajagopalan

³ Tien

⁴ Hydrodynamic Effect

⁵ Van der Walls



- ۱- مخزن ۳۲۰ لیتری
- ۲- پمپ
- ۳- ارتفاع آب بالای بستر صافی
- ۴- بستر صافی به ضخامت ۲۵ سانتی متر
- ۵- لایه نگهدارنده زیرین
- ۶- خروجی صافی
- ۷- پیرومتر و محل نمونه برداری

شکل ۱- شمایی از صافی استفاده شده

این پژوهش در پنج غلظت کائولینیت به میزان ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ پی پی ام، سه محیط بستر صافی با میانگین اندازه دانه‌های کوچک ۰/۵ میلی متر، متوسط ۱ میلی متر و بزرگ ۱/۴۱ میلی متر و در سرعت صافی سازی (سرعت دارسی) ۰/۰۸۶ سانتی متر بر ثانیه انجام شد. در واقع این تحقیق در ۱۵ مرحله آزمایش انجام شد. عمق بستر صافی در تمام آزمایش‌ها ۲۵ سانتی متر بود. علت انتخاب این غلظتها اولاً رسیدن سریع به افت بار و ثانیاً حذف بیشتر ذرات معلق در داخل محیط بستر صافی بود. از سوی دیگر، این غلظتها، نمونه شبیه سازی شده از آلودگی‌های طبیعی ذرات معلق هستند. سرعت انتخاب شده نیز در دامنه مجاز برای صافی‌های تند شنی است. دانه‌های شن قبل از اینکه به عنوان جمع کننده مورد استفاده قرار گیرند با اسید نیتریک کاملاً شسته شدند، تا از هرگونه آلودگی که ممکن بود به دانه‌ها چسبیده باشد، پاک شوند.

ابتدا غلظت مشخصی از سوسپانسیون کائولینیت در یک مخزن ۳۲۰ لیتری تهیه شد. ویژگی‌های آب مورد استفاده برای تهیه سوسپانسیون در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های آب مورد استفاده

| ویژگی | مقدار |
|---|-------|
| pH | ۷/۸ |
| کدورت (NTU) | ۱/۵ |
| سختی (mg.lit^{-1}) | ۱۸۵ |
| رسانایی الکتریکی ($\mu\text{mohs.cm}^{-1}$) | ۴۵۷ |
| دما (C) | ۲۵-۲۲ |

هدف از این تحقیق بررسی اثر غلظت ذرات معلق و اندازه دانه‌های محیط بستر صافی بر کارایی حذف ذرات کائولینیت است. از آنجایی که طراحی مناسب صافی‌های تند شنی برای تصفیه خانه‌های آب و فاضلاب نیاز به آزمایش‌های فراوان دارد، لذا شبیه سازی شرایط مختلف فرایند صافی سازی با توجه به پارامترهای فیزیکی و هیدرودینامیکی مانند غلظت سیال ورودی، سرعت صافی سازی و اندازه دانه‌های محیط بستر صافی، در رسیدن به این هدف کمک زیادی خواهد کرد.

۲- مواد و روشها

در این تحقیق از خاک رس کائولینیت به عنوان ذرات معلق در آب استفاده شد. برای این منظور، ابتدا خاک رس از معادن کائولن زنوز مرند تهیه شد. رس معادن کائولن زنوز مرند از خالص ترین معادن کائولینیت ایران است. سعی شد که کائولینیت به صورت طبیعی باشد و هیچ گونه تغییر و خالص سازی در آن صورت نگیرد. برای اطمینان از وجود کائولینیت در نمونه برداشت شده از معدن، تجزیه پراکنش اشعه ایکس^۱ روی رس تهیه شده، انجام شد و صحت این مطلب به اثبات رسید. قابل ذکر است که در پژوهشهای صافی سازی، خلوص کائولینیت در نمونه تهیه شده، خیلی مهم نیست زیرا سعی می شود از آن، به همان صورت که در طبیعت یافت می شود، استفاده شود. برای تعیین اندازه ذرات رس، بر روی نمونه‌ای از آن آزمایش هیدرومتری انجام شد و اندازه ذرات در دامنه ۱/۳۱ تا ۲ میکرون به دست آمد.

از دانه‌های شن سیلیسی با اندازه‌های مختلف به عنوان دانه‌های محیط بستر صافی در تمام آزمایش‌های صافی سازی استفاده شد. ویژگی‌های کامل این مواد در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های مواد محیط بستر صافی

| محیط بستر صافی | دامنه اندازه ذرات (میلی متر) | چگالی حقیقی (gcm^{-3}) | تخلخل (درصد) | ضریب یکتواختی | اندازه مؤثر (میلی متر) |
|----------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------|---------------|------------------------|
| ریز | ۰/۴۲-۰/۶ | ۲/۶۵ | ۴۹ | ۱/۵ | ۰/۴۳ |
| متوسط | ۱/۱۷-۰/۸۳ | ۲/۶۵ | ۴۸ | ۱/۵ | ۰/۸۶ |
| درشت | ۱/۶۵-۱/۱۷ | ۲/۶۵ | ۴۶ | ۱/۵ | ۱/۲۲ |

شمایی از صافی استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

^۱ X-ray Diffraction (XRD)

پس از آن تمامی کدورت‌های قرائت شده تبدیل به غلظت شد. با داشتن غلظت ورودی و غلظت‌های خروجی، کارایی حذف صافی در زمان‌های مختلف به صورت زیر محاسبه شد

$$\eta = 1 - \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

که در این رابطه

C غلظت خروجی، C₀ غلظت ورودی و η کارایی حذف دانه‌های بستر صافی است.

۳- نتایج و بحث

از آنجا که هدف اصلی این پژوهش بررسی جنبه‌های فیزیکی مهار ذرات در درون محیط متخلخل بود، بنابراین از جنبه‌های شیمیایی این فرایند صرف‌نظر شد. در واقع در این پژوهش، بیشتر مهار ذرات مورد توجه بود، و به چسبیدن ذرات^۳ روی دانه‌های بستر صافی کمتر پرداخته شد.

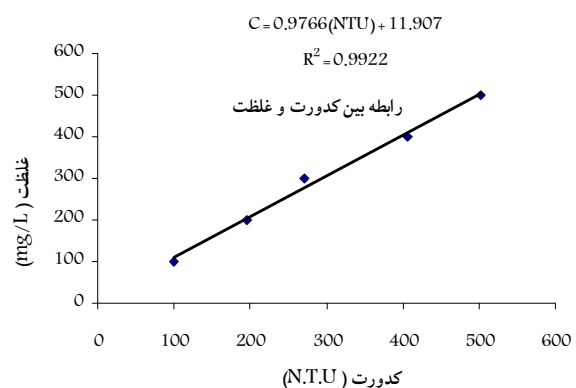
در شکل‌های ۳ تا ۷ به ترتیب اثر اندازه دانه‌های بستر صافی بر کارایی حذف ذرات معلق در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ پی‌پی‌ام نشان داده شده است. در محیط بستر صافی با اندازه دانه‌های کوچک، با افزایش غلظت در ساعت‌های اولیه صافی‌سازی، η افزایش می‌یابد. علت این پدیده آن است که چون قطر ذرات کاتولینیت بزرگ‌تر از یک میکرون است، ترسیب، پدیده غالب برای انتقال آنها به سطح دانه‌های بستر صافی است. این پدیده در غلظت‌های بالای ذرات معلق بیشتر رخ می‌دهد. از سوی دیگر با افزایش غلظت ذرات ورودی، سطح قابل پوشش جمع‌کننده‌ها افزایش می‌یابد. اهمیت این موضوع برای ذرات بزرگ‌تر از یک میکرون قابل توجه است. وقتی که غلظت ذرات بالاست، امکان تماس بین ذرات و دانه‌های بستر صافی افزایش پیدا می‌کند و بنابراین سطح بیشتری از دانه‌های بستر صافی توسط ذرات پوشیده می‌شوند. در نتیجه، کارایی حذف ذرات معلق افزایش می‌یابد. اما به تدریج با گذشت زمان و با افزایش غلظت، کارایی حذف کاهش می‌پذیرد، به طوری که در ساعت‌های پایانی آزمایش، کاهش کارایی در غلظت‌های بالا به خوبی مشهود است. با گذشت زمان از کارکرد صافی، منافذ بیشتری از محیط توسط ذرات معلق اشغال می‌شوند که در غلظت‌های بالا، کاهش منافذ در اثر مهار ذرات معلق، سریع‌تر اتفاق می‌افتد. چون دبی جریان ثابت است، با کاهش حجم منافذ، سرعت آب منفذی افزایش می‌یابد که به دنبال آن، ذرات مهار شده دوباره جدا می‌شوند و کارایی حذف ذرات معلق افت می‌کند.

در محیط‌های با اندازه دانه‌های متوسط و بزرگ، از همان ساعت‌های اولیه آزمایش، در غلظت‌های بالا کارایی حذف کاهش

سپس مخلوط به کمک یک همزن، کاملاً به هم زده شد تا ذرات رس به صورت معلق در آب باقی بمانند. با استفاده از یک پمپ، سوسپانسیون به بالای بستر صافی پمپ گردید. در همین زمان، دبی خروجی از صافی با استفاده از یک شیر تنظیم شد. پس از تنظیم دبی و ثابت شدن ارتفاع آب بالای بستر در ۱/۵ متر، افت بار اولیه توسط پیزومتر که در عمق ۲۵ سانتی‌متری بستر صافی نصب شده بود، قرائت گردید. همزمان با قرائت افت بار در پیزومتر، از این لایه نیز نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها در ظرف‌های شیشه‌ای به حجم ۵۰ سی‌سی جمع‌آوری شدند. برای نمونه‌برداری، در این لایه شیری تعبیه شده بود. نمونه‌ها به صورت قطره قطره جمع‌آوری شد، تا از ایجاد تلاطم و برهم زدن محیط بستر صافی جلوگیری شود. هر مرحله از آزمایش، ۴۸۰ دقیقه به طول انجامید. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها، با استفاده از یک کدورت‌سنج^۱ مدل PC Compact ساخت آلمان، غلظت سوسپانسیون خروجی از هر لایه برحسب کدورت (NTU) قرائت گردید. داده‌های مربوط به افت بار و غلظت (کدورت) برای هر مرحله از آزمایش، ثبت می‌شد. پس از اتمام هر مرحله از آزمایش‌ها، محیط بستر صافی توسط آب تمیز، کاملاً شسته شد (شست‌وشوی معکوس^۲) تا برای آزمایش بعدی آماده گردد. در طول آزمایش، دما و pH سوسپانسیون نیز اندازه‌گیری می‌شد.

۲-۱- تحلیل داده‌ها

ابتدا رابطه بین غلظت و کدورت محاسبه شد. برای این کار غلظت‌های مشخصی از سوسپانسیون کاتولینیت تهیه گردید و توسط دستگاه کدورت‌سنج، کدورت‌های آنها اندازه‌گیری شد. با استفاده از یک رابطه رگرسیونی خطی ساده، رابطه بین کدورت و غلظت با دقت زیاد به دست آمد. این رابطه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- رابطه بین غلظت ذرات معلق و کدورت

¹ Turbidometer
² Back Wash

³ Attachment

می‌یابد. با این تفاوت که در ۶۰ دقیقه اول از کارکرد صافی، کاهش کارایی در غلظتهای مختلف روندی مشابه دارد ولی با گذشت زمان، اختلاف بین کارایی حذف در غلظتهای مختلف افزایش پیدا می‌کند. علت این پدیده آن است که در محیط‌های با اندازه متوسط و بزرگ، منافذ محدودتری برای مهار ذرات وجود دارد. بنابراین با افزایش غلظت به دلیل ورود تعداد بیشتری از ذرات معلق به درون محیط متخلخل، منافذ موجود به سرعت توسط ذرات اشغال شده و مهار ذرات بعدی کمتر رخ می‌دهد که پیامد آن کاهش کارایی و افزایش کدورت در خروجی از صافی است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین کارایی حذف در محیط با اندازه دانه‌های کوچک مشاهده شد. راجاگوپالان و تاین در سال ۱۹۷۶ و راجاگوپالان و همکاران در سال ۱۹۸۲ پیشنهاد کردند که بین کارایی حذف در صافی‌های مختلف شرایط زیر برقرار است [۸]

$$\eta_1 \left(\frac{L_1}{dc_1} \right) = \eta_2 \left(\frac{L_2}{dc_2} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه

η_1 و η_2 کارایی حذف ذرات در دو صافی با شرایط مختلف، L_1 و L_2 عمق بستر صافی و dc_1 و dc_2 قطر دانه‌های محیط بستر صافی هستند.

با توجه به رابطه ۱ چون عمق بستر صافی مورد بررسی ثابت بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که

$$L_1 = L_2 \rightarrow \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{dc_1}{dc_2} \quad (3)$$

که در این رابطه

η نسبت غلظت سوسپانسیون در خروجی به غلظت سوسپانسیون در ورودی است. بنابراین هر چه مقدار آن کمتر باشد، مطلوب‌تر است.

با توجه به رابطه ۳ می‌توان دریافت که با افزایش قطر دانه‌های محیط بستر صافی، کارایی حذف کاهش می‌یابد. این رابطه با نتایج تجربی به دست آمده در این پژوهش نیز همخوانی دارد. زیرا با مشاهده نتایج به دست آمده، می‌توان فهمید که با افزایش قطر دانه‌های محیط بستر صافی، کارایی حذف ذرات معلق کاهش یافته است. از سوی دیگر یکی از دلایل مهم و تأثیرگذار بر مهار ذرات در درون محیط متخلخل، توزیع اندازه منافذ است. از آنجا که توزیع اندازه منافذ، تابعی از توزیع اندازه ذرات محیط متخلخل است، لذا می‌توان فهمید که در محیط‌های با اندازه دانه‌های کوچک، به دلیل پیچیدگی و کوچک بودن اندازه منافذ نسبت به محیط‌های با اندازه دانه‌های بزرگ، میزان مهار ذرات بیشتر است. همچنین محیط‌های با اندازه دانه‌های بزرگ، فضای خالی کمتری فراهم می‌کنند و

بنابراین مهار ذرات، کمتر اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر در محیط‌های با اندازه دانه‌های بزرگ به دلیل بزرگ بودن اندازه منافذ، ذرات معلق بدون آنکه بین منافذ گرفتار شوند به مسیر حرکت خود ادامه می‌دهند. از طرف دیگر در محیط بستر صافی با اندازه دانه‌های کوچک اثر نیروهای واندروالس-لندن نیز بیشتر است که این خود نیز به حذف ذرات معلق کمک می‌کند.

زو و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۶، از ذرات کروی لاتکس با قطرهای ۰/۵، ۱/۱، ۳/۱ و ۵/۱ میکرون به عنوان ذرات کلئیدی و از شن کوارتزی با میانگین اندازه‌های ۰/۳۳، ۰/۷۸، ۱/۴، ۱/۲ و ۰/۹۸ میلی‌متر به عنوان محیط بستر صافی استفاده کردند. آنها آزمایش‌های خود را در یک ستون شیشه‌ای به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و به قطر ۲/۵ سانتی‌متر انجام دادند و به نتایجی مشابه با نتایج به دست آمده در این پژوهش دست یافتند. آنها مشاهده کردند که وقتی اندازه دانه‌های محیط بستر صافی از ۰/۷۸ به ۰/۹۸ میلی‌متر کاهش پیدا کرد، درصد ذرات کلئیدی نگه داشته شده در درون محیط متخلخل از ۱ درصد به ۵۰ درصد افزایش پیدا کرد. در واقع بیشترین راندمان حذف ذرات کلئیدی، برای محیط با اندازه دانه‌های ۰/۹۸ میلی‌متر مشاهده شد. همچنین به دلیل شکل نامنظم دانه‌های شن، با افزایش غلظت ذرات کلئیدی، فضاهای خالی باریک‌تر شده و این منافذ، محل‌های مناسبی برای نگهداشتن ذرات کلئیدی بودند. به عبارت دیگر در غلظتهای بالای ذرات کلئیدی ($10^9 \times 1/45$)، که برحسب تعداد ذرات در میلی‌لیتر حجم سوسپانسیون محاسبه شده است، میزان نگهداشتن ذرات کلئیدی بیشتر بود [۱۵].

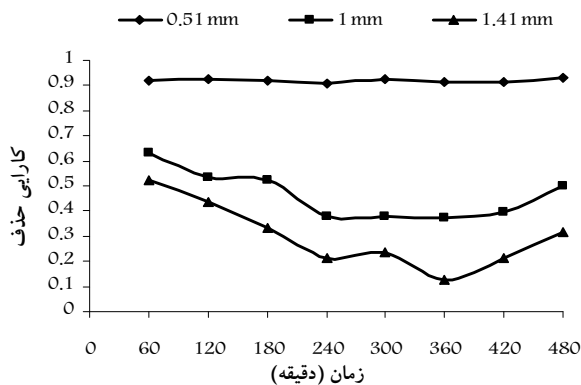
در غلظتهای مختلف سوسپانسیون، تفاوت‌های کارایی بین محیط با اندازه دانه‌های کوچک و متوسط بسیار بیشتر از تفاوت‌های کارایی بین محیط با اندازه دانه‌های متوسط و بزرگ است. این موضوع نشان می‌دهد که یک اندازه بحرانی برای دانه‌های محیط بستر صافی وجود دارد که برای محیط‌های درشت‌تر از آن، مهار ذرات حساسیت کمی به افزایش اندازه دانه‌های محیط بستر صافی نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه، می‌توان گفت که اندازه بحرانی دانه‌های محیط بستر صافی برای حذف ذرات کائولن حدود ۱ میلی‌متر است. این روند به ویژه در غلظتهای بالا به خوبی قابل مشاهده است. این نتیجه بسیار مهم و کاربردی است، زیرا تعیین اندازه دانه‌های محیط بستر صافی در طراحی فیلترها در مقیاسه با انتخاب سرعت صافی‌سازی مشکل‌تر است.

در یک غلظت ثابت، دامنه تغییرات کارایی (افزایش یا کاهش) در طول مدت کارکرد صافی یعنی ۴۸۰ دقیقه، برای محیط با اندازه

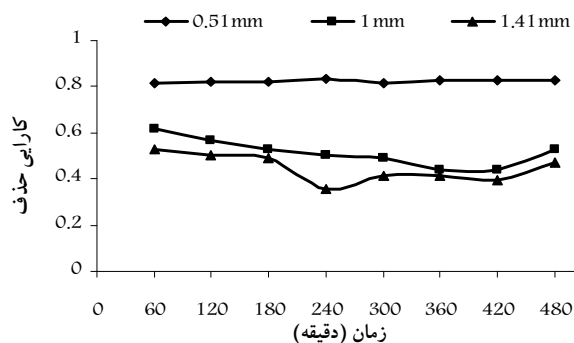
^۱Xu et al.

صافی با میانگین اندازه دانه‌های ۰/۵۱، ۱ و ۱/۴۱ میلی‌متر نشان داده شده است. کدورت آب خروجی در محیط صافی با میانگین اندازه دانه‌های ۰/۵۱ میلی‌متر از دو محیط دیگر کمتر است. با افزایش غلظت در هر سه محیط صافی، کدورت آب خروجی افزایش پیدا می‌کند.

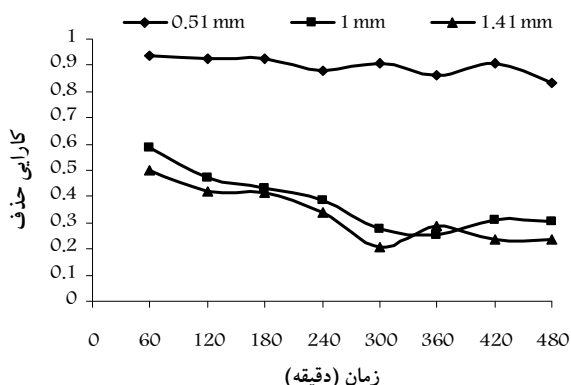
دانه‌های بزرگ، بیشتر است. مرحله رسیدگی^۱ در محیط بستر صافی با اندازه دانه‌های بزرگ، سریع‌تر اتفاق می‌افتد که این به دلیل محدود بودن منافذ محیط برای مهار ذرات است. به عبارت دیگر در محیط با اندازه دانه‌های بزرگ، ذرات مهار شده، زودتر در نقش جمع‌آوری کننده عمل کرده و به حذف ذرات بعدی کمک می‌کنند. در جدولهای ۳ تا ۵، کدورت آب خروجی از صافی در سه محیط



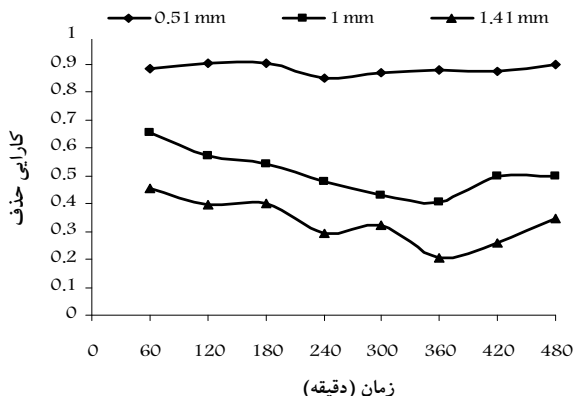
شکل ۵- اثر اندازه دانه‌های محیط بستر صافی بر کارایی حذف ذرات کائولن در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر



شکل ۳- اثر اندازه دانه‌های محیط بستر صافی بر کارایی حذف ذرات کائولن در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

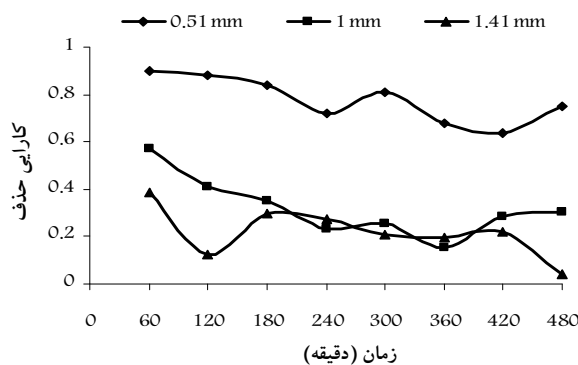


شکل ۶- اثر اندازه دانه‌های محیط بستر صافی بر کارایی حذف ذرات کائولن در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر



شکل ۴- اثر اندازه دانه‌های محیط بستر صافی بر کارایی حذف ذرات کائولن در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

^۱ Ripening Stage



شکل ۷- اثر اندازه دانه‌های محیط بستر صافی بر کارایی حذف ذرات کائولن در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

جدول ۳- کدورت آب خروجی از صافی (NTU) برای محیط صافی با میانگین اندازه دانه‌های ۵۱/۰ میلی‌متر در غلظت‌های مختلف سوسپانسیون

| غلظت (ppm) | ۵۰۰ | ۴۰۰ | ۳۰۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | زمان (min) |
|------------|-----|------|------|------|-----|------------|
| | | | | | | ۶۰ |
| ۶۰ | ۳۹ | ۱۳/۹ | ۱۳ | ۱۱/۴ | ۶/۷ | ۶۰ |
| ۱۲۰ | ۵۰ | ۱۸/۱ | ۱۰/۶ | ۸ | ۵/۹ | ۱۲۰ |
| ۱۸۰ | ۷۰ | ۱۹ | ۱۳/۳ | ۷/۷ | ۵/۹ | ۱۸۰ |
| ۲۴۰ | ۱۳۱ | ۳۸ | ۱۶/۹ | ۱۸/۶ | ۴/۵ | ۲۴۰ |
| ۳۰۰ | ۸۵ | ۲۵ | ۱۱ | ۱۴/۳ | ۶/۹ | ۳۰۰ |
| ۳۶۰ | ۱۵۲ | ۴۵ | ۱۴/۳ | ۱۳/۱ | ۵/۶ | ۳۶۰ |
| ۴۲۰ | ۱۷۵ | ۲۶ | ۱۴/۳ | ۱۳/۹ | ۵/۳ | ۴۲۰ |
| ۴۸۰ | ۱۱۷ | ۵۶ | ۹/۲ | ۹/۲ | ۵/۵ | ۴۸۰ |

جدول ۴- کدورت آب خروجی از صافی (NTU) برای محیط صافی با میانگین اندازه دانه‌های ۱ میلی‌متر در غلظت‌های مختلف سوسپانسیون

| غلظت (ppm) | ۵۰۰ | ۴۰۰ | ۳۰۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | زمان (min) |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
| | | | | | | ۶۰ |
| ۶۰ | ۲۰۸ | ۱۵۸ | ۱۰۰ | ۵۹ | ۲۷ | ۶۰ |
| ۱۲۰ | ۲۹۰ | ۲۰۵ | ۱۳۰ | ۷۶ | ۳۲ | ۱۲۰ |
| ۱۸۰ | ۳۲۰ | ۲۲۰ | ۱۳۴ | ۸۲ | ۳۶ | ۱۸۰ |
| ۲۴۰ | ۳۸۰ | ۲۴۰ | ۱۷۹ | ۹۵ | ۳۹ | ۲۴۰ |
| ۳۰۰ | ۳۷۰ | ۲۸۵ | ۱۷۹ | ۱۰۵ | ۴۰ | ۳۰۰ |
| ۳۶۰ | ۴۲۰ | ۲۹۴ | ۱۸۰ | ۱۱۰ | ۴۵ | ۳۶۰ |
| ۴۲۰ | ۳۵۵ | ۲۷۰ | ۱۷۳ | ۹۱ | ۴۵ | ۴۲۰ |
| ۴۸۰ | ۳۴۴ | ۲۷۳ | ۱۴۲ | ۹۱ | ۳۶ | ۴۸۰ |

جدول ۵- کدورت آب خروجی از صافی (NTU) برای محیط صافی با میانگین اندازه دانه‌های ۴۱/۱ میلی‌متر در غلظت‌های مختلف سوسپانسیون

| غلظت (ppm) | ۵۰۰ | ۴۰۰ | ۳۰۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | زمان (min) |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
| | | | | | | ۶۰ |
| ۶۰ | ۳۰۳ | ۱۹۲ | ۱۳۵ | ۱۰۰ | ۳۶ | ۶۰ |
| ۱۲۰ | ۴۳۷ | ۲۲۵ | ۱۶۰ | ۱۱۲ | ۳۹ | ۱۲۰ |
| ۱۸۰ | ۳۴۶ | ۲۲۷ | ۱۹۳ | ۱۱۱ | ۴۰ | ۱۸۰ |
| ۲۴۰ | ۳۶۱ | ۲۵۸ | ۲۲۹ | ۱۳۳ | ۵۴ | ۲۴۰ |
| ۳۰۰ | ۳۹۳ | ۳۱۳ | ۲۲۲ | ۱۲۷ | ۴۸ | ۳۰۰ |
| ۳۶۰ | ۳۹۹ | ۲۸۰ | ۲۵۷ | ۱۵۱ | ۴۸ | ۳۶۰ |
| ۴۲۰ | ۳۸۸ | ۳۰۰ | ۲۳۰ | ۱۴۰ | ۵۰ | ۴۲۰ |
| ۴۸۰ | ۴۷۹ | ۳۰۰ | ۱۹۸ | ۱۲۲ | ۴۲ | ۴۸۰ |

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- برای به‌دست آوردن آبی با کیفیت مطلوب لازم است از صافی‌هایی با اندازه دانه‌های کوچک ۵/۰ میلی‌متر استفاده شود.
- به‌طور کلی می‌توان گفت که در غلظت‌های پایین، کارایی حذف ذرات معلق مطلوب‌تر است. برای هر سه محیط بستر صافی استفاده شده، تا غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ذرات کائولن، تفاوت خیلی زیادی بین کارایی حذف مشاهده نشد، اما در غلظت‌های بیشتر از این مقدار، کارایی حذف به ویژه در محیط با اندازه دانه‌های بزرگ کاهش یافت. توصیه می‌شود که در غلظت‌های بیشتر از این مقدار با استفاده از یک پیش‌تصفیه ساده در حوضچه‌های رسوب، غلظت تا حد مطلوب کاهش داده شود.
- یکی از مشکل‌ترین مراحل طراحی در صافی‌های تند شنی، تعیین

اندازه دانه‌های محیط صافی است. زیرا کاهش اندازه دانه‌های محیط بستر صافی باعث افت سریع بار در محیط بستر صافی می‌گردد، که به دنبال آن لازم است محیط بستر صافی را شست‌وشو داد. از طرف دیگر افزایش دانه‌های محیط بستر صافی باعث کاهش کارایی حذف ذرات می‌گردد. اما افزایش اندازه دانه‌های محیط بستر صافی تا حدی بر کاهش کارایی حذف ذرات اثر می‌گذارد و از آن به بعد اثر آن بر کاهش کارایی حذف، چشمگیر نیست. بنابراین یک اندازه بحرانی برای دانه‌های بستر صافی وجود دارد که برای محیط‌های درشت‌تر از آن، مهار ذرات حساسیت کمی به افزایش اندازه دانه‌های محیط بستر صافی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، می‌توان گفت که اندازه بحرانی دانه‌های محیط بستر صافی برای حذف ذرات کائولن ۳۱/۱-۲ میکرومتر، حدود ۱ میلی‌متر است.

- 1- Kau, S. M., and Lawler, D. F. (1995). "Dynamics of deep bed filtration: velocity, depth, and media." *Environ. Eng.*, 121(12), 850-859.
- 2- Shin, C. (2006). "Finite element simulation of deep bed filtration." *Chem. Eng. Sci.*, 61 (8), 2324-2329.
- 3- Vigneswaran, S., and Song, C. J. (1986). "Mathematical modeling of the entire cycle of deep bed filtration." *Water, Air and Soil Poll.*, 29 (2), 155-164.
- 4- Vigneswaran, S., Ngo, H. H., and Jeyaseelan, J. (1997). "Application of non-conventional filtration technologies in pollution control." *Environ. Monitoring Assess*, 44 (1-3), 231-240.
- 5- Mackie, R. I., and Zhao, Q. (1999). "A framework for modeling removal in the filtration of poly disperse suspensions." *Wat. Res.*, 33(3), 794-806.
- 6- Vigneswaran, S., and Thiyagaran, M. (1984). "Application of filtration theories to groundwater recharge problems." *Water, Air and Soil Poll.*, 22 (4), 417-428.
- 7- Boller, M. A., and Kavanaugh, M. C. (1995). "Particle characteristics and head loss increase in granular media filtration." *Wat. Res.*, 29(4), 1139-1149.
- 8- Han ko, C., and Elimelech, M. (2000). "The "shadow effect" in colloid transport and deposition dynamics in granular porous media: measurements and mechanisms." *Environ. Sci. Technol.*, 34(17), 3681-3689.
- 9- Jegatheesan, V., and Vigneswaran, S. (1997). "The effect of concentration on the early stages of deep bed filtration of submicron particles." *Wat. Res.*, 31(11), 2910-2913.
- 10- Qi, S. (1998). "Expression for critical suspended particle size in granular media filtration processes." *Wat. Res.*, 32(9), 2856-2859.
- 11- Chang, Y. I., and Chan, H. C. (2005). "Network simulation for deep bed filtration of Brownian particles-a supplement." *Chem. Eng. Sci.*, 60(10), 2827-2831.
- 12- Elimelech, M., and O'Melia, C. R. (1990). "Kinetics of deposition of colloidal particles in porous media." *Environ. Sci. Technol.*, 24(10), 1528-1536.
- 13- Stephan, E. A., and Chase, G. G. (2001). "A preliminary examination of zeta potential and deep bed filtration activity." *Separation and Purification Technol.*, 21(3), 219-226.
- 14- Jegatheesan, V., and Vigneswaran, S. (2000). "Transient stage deposition of submicron particles in deep bed filtration under unfavorable conditions." *Wat. Res.*, 34(7), 2119-2131.
- 15- Xu, S., Gao, B., and Saiers, J. E. (2006). "Straining of colloidal particles in saturated porous media." *Water Resource Res.*, 42 (12).