

اثر سرعت صافی سازی و عمق بستر صافی تند شنی بر کارایی حذف ذرات معلق

محمدرضا مصدقی^۲

حسین بانژاد^۲

مهدی مکاری^۱

(دریافت ۸۸/۸/۱۴ پذیرش ۸۹/۵/۲۰)

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 سرعت صافی سازی و عمق بستر صافی تند شنی بر کارایی حذف ذرات معلق بود. این پژوهش در چهار سرعت صافی سازی (سرعت داریسی) به میزان ۰/۰۸۶، ۰/۱۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۷ سانتی متر بر ثانیه و سه بستر صافی با عمقهای ۲۵، ۵۰ و ۶۰ سانتی متر انجام شد. غلظت کائولینیت در سوسپانسیون ورودی به بالای بستر صافی در تمام آزمایشها ۱۰۰ ppm بود. از دانه‌های شن سیلیسی با میانگین قطر ۰/۵۱ میلی متر به عنوان محیط صافی استفاده شد. نتایج نشان داد که در یک صافی با عمق بستر مشخص، کارایی حذف ذرات معلق در سرعت پایین صافی سازی (۰/۰۸۶ سانتی متر بر ثانیه) نسبت به سرعتهای بالا بیشتر است. در تمام آزمایشها با افزایش عمق بستر صافی از ۲۵ به ۵۰ سانتی متر، کارایی حذف ذرات معلق افزایش یافت ولی بین نتایج به دست آمده در صافی با عمق بستر ۵۰ و ۶۰ سانتی متر، تفاوت معنی داری وجود نداشت ($\alpha=0.01$). توسعه افت فشار در سرعتهای پایین صافی سازی نسبت به سرعتهای بالا، بیشتر بود. در تمام سرعتهای صافی سازی، توسعه افت فشار در عمق ۲۵ سانتی متر، بیشتر از عمقهای ۵۰ و ۶۰ سانتی متر بود. عمق مناسب برای بستر صافی ۵۰ سانتی متر و سرعت مطلوب برای فرایند صافی سازی ۰/۱۷ سانتی متر بر ثانیه به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ذرات معلق، افت فشار، سرعت صافی سازی، صافی تند شنی.

Effect of Filtration Velocity and Rapid Sand Filter Bed Depth on Removal Efficiency of Suspended Particles

Mehdi Mokari¹

Hossein Banejad²

Mohammadreza Mosaddeghi³

(Received Nov. 5, 2010 Accepted Aug. 11, 2010)

Abstract

Removal of particles by filter is a complex process in water treatment. Several factors are involved such as shape and size of filter grains, suspended particle concentration, filtration velocity and filter bed depth. The objective of this study was to evaluate effects of filtration velocity and rapid sand filter bed depth on removal efficiency of suspended particles. Four filtration velocities (0.086, 0.11, 0.14 and 0.17 cm/sec) and three depths of filter bed (25, 50 and 60 cm) were used in this study. Kaolinite concentration in inlet suspension above the filter bed was 100 ppm in each experiment. Silica sand was used as the filter medium with an average diameter of 0.51 mm. The results showed that removal efficiency of suspended particles was greater in low filtration velocity (i.e. 0.086 cm/sec) than high filtration velocities in the filters with specific bed depth. Removal efficiency of suspended particles increased with increasing filter bed depth from 25 to 50 cm in all of the experiments but

1. Grad. Student of Irrigation and Drainage, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan (Corresponding Author) (+98 571) 4440138 mehdimokari@gmail.com
2. Assist. Prof. of Water Eng., College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan
3. Assoc. Prof. of Pedology, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان (نویسنده مسئول) ۴۴۴۰۱۳۸ (+۹۸ ۵۷۱) mehdimokari@gmail.com
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۳- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

there was no significant difference between obtained results in the filter bed with 50 and 60 cm depths ($\alpha=0.01$). Head loss development was greater in low velocities than high velocities. Head loss development was greater in 25 cm depth than 50 and 60 cm depths in all of the filtration velocities. Favorable depth and filtration velocity was obtained 50 cm and 0.17 cm/sec, respectively.

Keywords: Suspended Particles, Head Loss, Filtration Velocity, Rapid Sand Filter.

۱- مقدمه

صافی‌های تند شنی^۱ به‌عنوان مرحله نهایی در تصفیه آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۲ و ۳]. فرایند حذف ذرات توسط صافی پیچیده بوده و به پارامترهای متعددی نظیر ویژگی‌های فیزیکی (اندازه و شکل دانه‌های محیط صافی)، ویژگی‌های شیمیایی سوسپانسیون (غلظت ذرات معلق، قدرت یونی و pH)، منعقد کننده‌های استفاده شده و همچنین پارامترهای اجرایی نظیر سرعت صافی‌سازی و عمق بستر صافی بستگی دارد [۳، ۴ و ۵].

برای نشان دادن مقدار حذف ذراتی نظیر جامدات غیر آلی، باکتری‌ها و ذرات کلوئیدی در داخل بستر صافی، از اندازه‌گیری‌های کدورت استفاده می‌شود [۴، ۶ و ۷]. حذف ذرات معلق توسط صافی شامل دو مرحله است: ابتدا ذرات معلق، توسط مکانیسم‌هایی نظیر ترسیب، پخشیدگی و اثر هیدرودینامیکی^۲ به دانه‌های صافی نزدیک می‌شوند [۸]. سپس این ذرات به سطح دانه‌های صافی می‌چسبند و یا در فضاهای خالی بین دانه‌های محیط صافی گرفتار می‌شوند [۶، ۹ و ۱۰] در نتیجه نفوذپذیری بستر صافی کاهش یافته و افت فشار در داخل بستر صافی افزایش می‌یابد. کاهش نفوذپذیری یا افزایش افت فشار در داخل بستر صافی به‌عوامل متعددی همچون سرعت صافی‌سازی (سرعت دارسی)، اندازه دانه‌های محیط صافی، اندازه ذرات معلق در سوسپانسیون و توزیع اندازه منافذ صافی بستگی دارد [۱۱ و ۱۲]. با مشخص بودن غلظت ذرات معلق در سوسپانسیون ورودی به بالای بستر صافی و سیال خروجی از صافی می‌توان مقدار ذرات مهار شده در داخل بستر صافی را با استفاده از معادله موازنه جرم به‌دست آورد.

کائو^۳ و لاولر^۴ در سال ۱۹۹۵ اثر سرعت صافی‌سازی و عمق بستر را بر عملکرد صافی شنی و توسعه افت فشار در داخل بستر مطالعه کردند. آنها آزمایش‌های خود را در سرعت‌های ۰/۱۸ و ۰/۵۵ سانتی‌متر بر ثانیه و در عمق‌های ۱۹۳، ۵۶۵ و ۷۴۶ میلی‌متر بستر صافی انجام دادند. ایشان از خروجی حوضچه رسوب تصفیه‌خانه شهر دیویس به‌عنوان سوسپانسیون ورودی به بالای بستر صافی استفاده کردند. اندازه ذرات معلق در سوسپانسیون ۸/۶

تا ۱۳/۱ میکرون و میانگین اندازه دانه‌های صافی در آزمایش‌های آنها ۰/۷۸ میلی‌متر بود. نتایج نشان دادند که در یک عمق مشخص، کارایی حذف صافی در سرعت ۰/۱۸، بیشتر از سرعت ۰/۵۵ سانتی‌متر بر ثانیه بود. این نتیجه مشابه با نتیجه به‌دست آمده در این پژوهش بود. مرحله شکست نیز در سرعت ۰/۱۸ سانتی‌متر بر ثانیه و عمق ۱۹۳ میلی‌متر، سریع‌تر از سرعت ۰/۵۵ سانتی‌متر بر ثانیه و عمق ۵۶۵ میلی‌متر اتفاق افتاد. به‌عبارت دیگر کارایی حذف صافی و توسعه افت فشار در عمق ۱۹۳ میلی‌متری سرعت پایین، بیشتر از عمق ۵۶۵ میلی‌متری سرعت بالا بود [۷]. این نتیجه متفاوت با نتایج حاصل از این پژوهش بود. زیرا در این پژوهش کارایی حذف صافی در سرعت ۰/۰۸۶ سانتی‌متر بر ثانیه و عمق ۲۵ سانتی‌متر، کاملاً مشابه با سرعت‌های بالاتر و عمق ۵۰ سانتی‌متر بود. بولر^۵ و کاوناف^۶ در سال ۱۹۹۵ نشان دادند که سرعت صافی‌سازی تنها روی افت فشار اولیه در داخل بستر صافی اثر می‌گذارد و بر توسعه افت فشار در طول کارکرد صافی اثری ندارد. اما نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان داد که سرعت صافی‌سازی بر توسعه افت فشار در طول کارکرد صافی نیز مؤثر است. آنها همچنین نشان دادند که توسعه افت فشار در داخل بستر صافی، به اندازه ذرات معلق در داخل سوسپانسیون ورودی و اندازه دانه‌های محیط صافی بستگی دارد [۴].

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 صافی‌سازی، شبیه‌سازی شود. در این پژوهش سرعت صافی‌سازی مطلوب و عمق مناسب برای بستر صافی به‌گونه‌ای که بتوان به شرایط مطلوب و مقرون به‌صرفه رسید، به‌دست آمد. لازم به ذکر است که در تحقیقات قبلی کمتر به این موضوع پرداخته شده بود. هدف از این پژوهش، بررسی سرعت صافی‌سازی و عمق بستر صافی تند شنی بر کارایی حذف ذرات معلق و توسعه افت فشار در داخل بستر صافی بود.

¹ Rapid Sand Filter

² Hydrodynamic Effect

³ Kau

⁴ Lawler

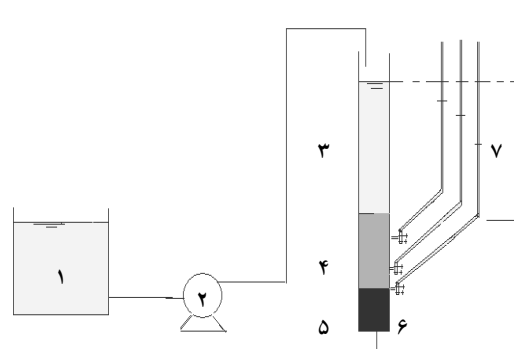
⁵ Bolter

⁶ Kavanaugh

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 کائولینیت زنونز مرند تهیه شد. رس معادن کائولینیت زنونز 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 پژوهش های 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 گردد [۱۳]. برای تعیین اندازه ذرات رس، بر روی نمونه ای از آن آزمایش هیدرومتری انجام شد و اندازه ذرات در دامنه ۱/۳۱ تا ۲ میکرون به دست آمد [۱۳]. از دانه های شن سیلیسی با دامنه اندازه ذرات ۰/۶ - ۰/۴۲ میلی متر، چگالی حقیقی ۲/۶۵، تخلخل ۴۹ درصد، ضریب یکنواختی ۱/۵ و اندازه مؤثر ۰/۴۳ میلی متر به عنوان دانه های محیط بستر صافی در تمام آزمایش های صافی سازی استفاده شد [۱۳].

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



- ۱- مخزن ۳۲۰ لیتری
- ۲- پمپ
- ۳- ارتفاع آب بالای بستر صافی
- ۴- بستر صافی به ضخامت ۶۰ سانتی متر
- ۵- لایه نگهدارنده زیرین
- ۶- خروجی صافی
- ۷- پیزومترها و محل های نمونه برداری

شکل ۱- شمایی از صافی استفاده شده

¹ X-ray Diffraction (XRD)

این پژوهش در چهار سرعت صافی سازی (سرعت دارسی) به ۰/۰۸۶، ۰/۱۱، ۰/۱۴، ۰/۱۷ و ۰/۱۷ سانتی متر بر ثانیه و سه بستر صافی با عمقهای ۲۵، ۵۰ و ۶۰ سانتی متر انجام شد. غلظت کائولینیت در سوسپانسیون ورودی به بالای بستر صافی، در تمام آزمایش ها ۱۰۰ ppm بود زیرا در غلظت های بالاتر از این مقدار، نیاز به شستشوی معکوس برای صافی افزایش پیدا می کند که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست [۱]. از طرف دیگر، کدورت آب قبل از صافی تند شنی در تصفیه خانه، حدود ۵۰ NTU و کمتر است. استفاده از غلظت های بیشتر از ۱۰۰ ppm، کدورت های بسیار بیشتر از ۵۰ NTU ایجاد می کند. سرعت های انتخاب شده در دامنه مجاز برای صافی های تند شنی بود [۱۴]. دانه های شن قبل از این که به عنوان محیط صافی استفاده شوند، با اسید نیتریک کاملاً شسته شدند تا از هرگونه آلودگی که ممکن بود به دانه ها چسبیده باشد، پاک شوند [۱۳]. ابتدا سوسپانسیون کائولینیت با غلظت ۱۰۰ ppm در یک مخزن پلاستیکی ۳۲۰ لیتری تهیه شد. ویژگی های آب مورد استفاده برای تهیه سوسپانسیون در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی های آب مورد استفاده

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

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 فشار اولیه توسط پیزومترهایی که در عمقهای ۲۵، ۵۰ و ۶۰ سانتی متر نصب شده بودند، قرائت گردید. همزمان با قرائت افت فشار در پیزومترها، از این لایه ها نیز نمونه برداری صورت گرفت. نمونه ها در ظرف های شیشه ای به حجم ۵۰ سی سی جمع آوری شدند. برای نمونه برداری از این لایه ها، شیرهایی به همین منظور تعبیه شده بود. نمونه ها به صورت قطره قطره جمع آوری شد تا از ایجاد تلاطم و بر زدن محیط بستر صافی جلوگیری شود. هر مرحله از آزمایش ۴۸۰ دقیقه به طول انجامید. پس از جمع آوری نمونه ها، با استفاده از

جدول ۴- کدورت آب خروجی از صافی (NTU) برای محیط صافی با عمق بستر ۶۰ سانتی متر در سرعت‌های مختلف صافی‌سازی

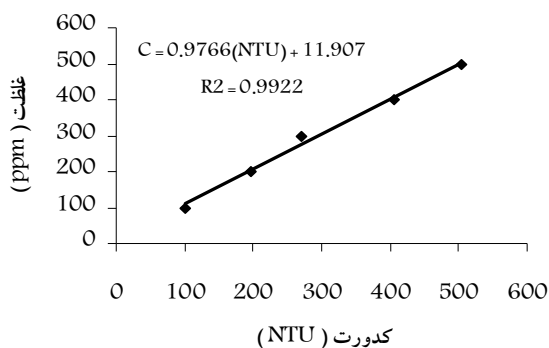
سرعت (cm/sec)	۰/۰۸۶	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۷
زمان (min)	۶۰	۳/۱	۳/۶	۵/۷
۱۲۰	۴	۳/۴	۵/۲	۵/۵
۱۸۰	۲/۸	۲/۸	۶	۶/۵
۲۴۰	۳/۵	۳/۸	۵/۳	۵/۴
۳۰۰	۳/۲	۳/۸	۵/۳	۴/۵
۳۶۰	۲/۶	۳/۱	۴/۸	۶/۹
۴۲۰	۲/۹	۳/۱	۵	۷/۴
۴۸۰	۲	۴/۲	۶	۳

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. پس از آن تمامی کدورت‌های قرائت شده تبدیل به غلظت شد. با داشتن غلظت ورودی و غلظت‌های خروجی از هر لایه، کارایی حذف صافی در زمان‌های مختلف به صورت زیر محاسبه شد [۱۵]

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

که در این رابطه

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



شکل ۲- رابطه بین غلظت ذرات معلق و کدورت

برای بررسی معنی‌دار بودن سرعت صافی‌سازی و عمق بستر بر کارایی حذف صافی، آنالیز آماری بر روی داده‌های کارایی حذف انجام شد.

۲-۲- مساحت سطحی ذرات مهارشده

با معلوم بودن کارایی حذف (η)، حجم سیال ورودی به داخل بستر صافی در مدت ۸ ساعت (V) و غلظت ذرات معلق در

یک کدورت سنج^۱ مدل PC Compact ساخت آلمان، غلظت سوسپانسیون خروجی از هر لایه بر حسب کدورت (NTU) قرائت گردید. داده‌های مربوط به افت فشار و غلظت (کدورت) برای هر مرحله از آزمایش ثبت شد. پس از اتمام هر مرحله از آزمایش‌ها، محیط بستر صافی توسط آب تمیز، کاملاً شسته شد (شستشوی معکوس^۲) تا برای آزمایش بعدی آماده گردد. در طول آزمایش، دما و pH سوسپانسیون نیز اندازه‌گیری می‌شد [۱۳].

کدورت آب خروجی از صافی، برای محیط صافی با عمق بستر ۲۵، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر و سرعت‌های مختلف صافی‌سازی در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲- کدورت آب خروجی از صافی (NTU) برای محیط صافی با عمق بستر ۲۵ سانتی متر در سرعت‌های مختلف صافی‌سازی

سرعت (cm/sec)	۰/۰۸۶	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۷
زمان (min)	۶۰	۱۴/۴	۱۱/۹	۱۸/۳
۱۲۰	۵/۹	۱۲/۲	۱۳	۲۰
۱۸۰	۵/۹	۱۳/۹	۱۶/۶	۱۸
۲۴۰	۴/۵	۱۷/۵	۱۲/۴	۱۹/۵
۳۰۰	۶/۹	۱۲/۴	۱۳/۵	۲۵
۳۶۰	۵/۶	۱۹	۱۲/۱	۳۱
۴۲۰	۵/۳	۱۶/۷	۱۴/۲	۲۵
۴۸۰	۵/۵	۱۱/۹	۱۲/۶	۱۹/۹

جدول ۳- کدورت آب خروجی از صافی (NTU) برای محیط صافی با عمق بستر ۵۰ سانتی متر در سرعت‌های مختلف صافی‌سازی

سرعت (cm/sec)	۰/۰۸۶	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۷
زمان (min)	۶۰	۴/۱	۴/۲	۷/۸
۱۲۰	۳/۱	۴	۵	۷/۸
۱۸۰	۳/۸	۲/۲	۷	۸
۲۴۰	۳/۳	۲/۸	۵/۳	۵/۸
۳۰۰	۲/۶	۳/۷	۵/۳	۱۱/۱
۳۶۰	۳	۳/۸	۳/۶	۱۲/۴
۴۲۰	۵/۲	۳/۱	۶/۴	۱۱/۱
۴۸۰	۳/۴	۳	۴/۷	۵/۱

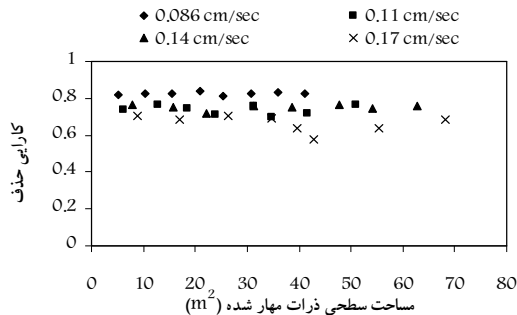
۲-۱- تحلیل داده‌ها

ابتدا رابطه بین غلظت و کدورت محاسبه شد. برای این کار، غلظت‌های مشخصی از سوسپانسیون کائولینیت تهیه گردید و توسط دستگاه کدورت سنج، کدورت‌های آنها اندازه‌گیری شد. با استفاده از

¹ Turbidometer

² Back Wash

صافی سازی طراحی می‌شوند. در شکل ۳ کارایی حذف ذرات کائولینیت به عنوان تابعی از مساحت سطحی ذرات مهار شده، در سرعت‌های مختلف صافی سازی برای محیط صافی با اندازه دانه‌های ۰/۵۱ میلی‌متر و عمق ۲۵ سانتی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۳- اثر سرعت‌های مختلف صافی سازی بر کارایی حذف ذرات کائولینیت در محیط صافی با عمق بستر ۲۵ سانتی‌متر

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، کارایی حذف صافی در سرعت پایین صافی سازی (۰/۰۸۶ سانتی‌متر بر ثانیه)، نسبت به سرعت‌های دیگر بیشتر است. زیرا در سرعت پایین، ذرات معلق فرصت بیشتری برای مهار شدن در بین منافذ بستر صافی و یا چسبیدن^۱ به سطح دانه‌های صافی را دارند. علاوه بر این، ریخت شناسی^۲ ذرات مهار شده در داخل بستر صافی که توسط سرعت صافی سازی کنترل می‌شود، می‌تواند اثر مهمی در مهار شدن ذرات معلق ایفا کند که در این پژوهش به این موضوع پرداخته نشد [۱۷]. علت محتمل دیگر برای پایین بودن کارایی حذف ذرات معلق در سرعت‌های بالای صافی سازی این است که در سرعت‌های بالا، منطقه سایه^۳ افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه، امکان تماس ذرات معلق با سطح دانه‌های محیط صافی کاهش یافته و ذرات معلق نمی‌توانند به سطح دانه‌های صافی بچسبند [۵]. از طرفی چون قطر ذرات کائولینیت بزرگ‌تر از یک میکرون است، پدیده غالب برای انتقال آنها به سطح دانه‌های بستر صافی، ترسیب است. این پدیده در سرعت‌های پایین، بیشتر از سرعت‌های بالا اتفاق می‌افتد.

کارایی حذف ذرات معلق در سرعت ۰/۱۷ سانتی‌متر بر ثانیه نسبت به سرعت‌های دیگر زودتر کاهش می‌یابد. علت این پدیده آن است که در این سرعت، به دلیل بالا بودن نیروی هیدرودینامیک^۴ وارده از طرف آب به ذرات معلق مهار شده در داخل بستر صافی، این ذرات همراه با آب جابه‌جا شده و از بستر صافی خارج می‌شوند

سوسپانسیون (C_0)، مساحت سطحی ذرات مهار شده به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$M = V \times C_0 \quad (2)$$

که در این رابطه

M جرم کل ذرات کائولینیت وارد شده به داخل بستر در مدت ۸ ساعت بر حسب کیلوگرم است.

جرم کل ذرات کائولینیت مهار شده در داخل بستر با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید

$$M_\sigma = M \times \eta \quad (3)$$

که در این رابطه

M_σ جرم کل ذرات کائولینیت مهار شده در داخل بستر در مدت ۸ ساعت بر حسب کیلوگرم است.

با توجه به معلوم بودن چگالی ذرات کائولینیت (2700 Kg.m^{-3})، حجم کل ذرات کائولینیت مهار شده در داخل بستر قابل محاسبه است

$$V_\sigma = \frac{M_\sigma}{\rho_p} \quad (4)$$

که در این رابطه

V_σ حجم کل ذرات کائولینیت مهار شده در داخل بستر بر حسب مترمکعب است.

با فرض اینکه ذرات کائولینیت کروی شکل باشند، حجم و مساحت سطحی آنها از روابط زیر محاسبه می‌شود

$$V_p = \frac{4}{3} \pi a_p^3 \quad (5)$$

$$S_p = 4 \pi a_p^2 \quad (6)$$

که در این رابطه

V_p حجم یک ذره کائولینیت بر حسب مترمکعب، a_p شعاع ذره بر حسب متر و S_p مساحت سطحی یک ذره کائولینیت بر حسب مترمربع است.

حال با توجه به معلوم بودن حجم کل ذرات کائولینیت مهار شده در داخل بستر و حجم یک ذره کائولینیت، تعداد ذرات کائولینیت و مساحت سطحی آنها محاسبه می‌شود.

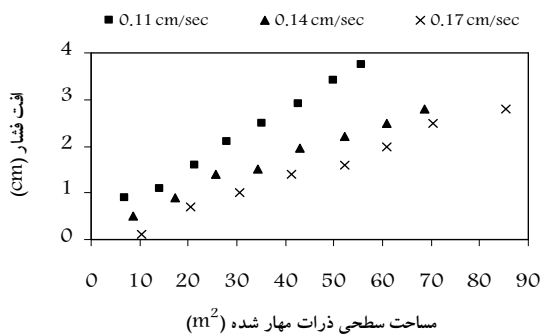
رسوب ویژه نیز از تقسیم حجم کل ذرات کائولینیت مهار شده در داخل بستر در مدت ۸ ساعت بر حجم بستر صافی که ابعاد آن مشخص است، به دست می‌آید [۱۶].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر سرعت صافی سازی

اثر سرعت صافی سازی بر کارایی حذف ذرات معلق بسیار مهم است زیرا اغلب صافی‌های تند شنی، برای سرعت‌های بالای

1 Attachment
2 Morphology
3 Shadow Zone
4 Hydrodynamic Force

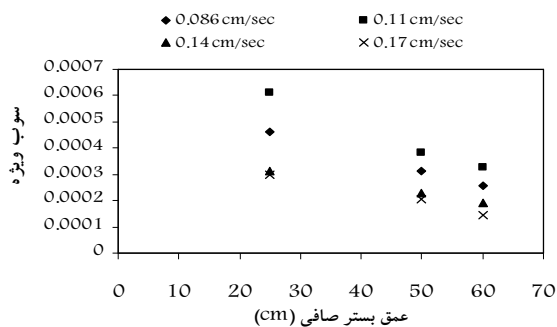


شکل ۵- اثر سرعت‌های مختلف صافی‌سازی بر توسعه افت فشار در داخل بستر صافی

دو علت است: اول ریخت شناسی ذرات مهار شده در داخل بستر و دوم نحوه توزیع ذرات مهار شده در عمق بستر صافی.

۳-۲- توزیع ذرات کائولینیت در داخل بستر صافی

در شکل ۶ اثر سرعت‌های مختلف صافی‌سازی بر نحوه توزیع ذرات کائولینیت در عمق‌های مختلف بستر صافی نشان داده شده است.



شکل ۶- اثر سرعت‌های مختلف صافی‌سازی بر نحوه توزیع ذرات کائولینیت در عمق‌های مختلف بستر صافی

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، توزیع ذرات مهار شده در عمق‌های مختلف بستر صافی غیر یکنواخت است. رسوب ویژه^۲ که در این شکل از آن استفاده شده است، نسبت حجم رسوب تشکیل شده در داخل بستر به حجم کل بستر است که بدون بعد می‌باشد. کائو و لاولر در سال ۱۹۹۵ بیان کردند که سرعت صافی‌سازی، عمق نفوذ ذرات مهار شده در داخل بستر صافی را کنترل می‌کند [۷]. در حالی که ویراپاننی^۳ و وایسنر^۴ در سال ۱۹۹۷ معتقد بودند

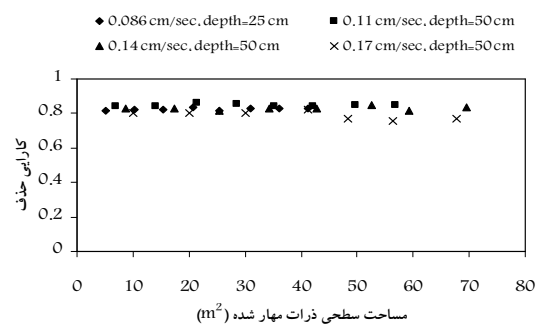
² Specific Deposit

³ Veerapaneni

⁴ Wiesner

و در نتیجه کیفیت آب در خروجی صافی کاهش می‌یابد. پدیده رسیدگی^۱ در سرعت ۰/۱۷ سانتی‌متر بر ثانیه نسبت به سرعت‌های دیگر زودتر اتفاق می‌افتد. ورود بیشتر ذرات معلق در این سرعت نسبت به سرعت‌های پایین‌تر، می‌تواند یکی از علت‌های این پدیده باشد. زیرا در این حالت منافذ بستر صافی، به دلیل ورود ذرات معلق زیاد، سریع‌تر مسدود می‌شوند بنابراین ذرات معلق بعدی که به محیط صافی وارد می‌گردند، باید به ناچار از داخل این ذرات عبور کنند. به عبارت دیگر ذرات مهار شده، خود به محیطی برای مهار ذرات ورودی به داخل بستر صافی تبدیل می‌شوند که در نتیجه آن، پدیده رسیدگی اتفاق می‌افتد و کارایی حذف صافی افزایش می‌یابد.

در شکل ۴ اثر سرعت‌های مختلف صافی‌سازی بر کارایی حذف ذرات کائولینیت در عمق‌های مختلف بستر صافی نشان داده شده است.



شکل ۴- اثر سرعت‌های مختلف صافی‌سازی بر کارایی حذف ذرات کائولینیت در عمق‌های مختلف بستر صافی

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، کارایی حذف ذرات کائولینیت در سرعت صافی‌سازی ۰/۰۸۶ سانتی‌متر بر ثانیه و عمق ۲۵ سانتی‌متر، مشابه کارایی حذف این ذرات در عمق ۵۰ سانتی‌متر و سرعت‌های دیگر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن به یک کارایی حذف مطلوب در یک صافی با اندازه دانه‌های مشخص، با افزایش سرعت صافی‌سازی، عمق بستر صافی باید افزایش پیدا کند.

در شکل ۵ افت فشار به عنوان تابعی از مساحت سطحی ذرات مهار شده در سرعت‌های مختلف صافی‌سازی نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش سرعت صافی‌سازی، افت فشار کاهش می‌یابد [۱۶ و ۱۷]. افت فشار ایجاد شده در داخل بستر صافی به مساحت سطحی ذرات مهار شده بستگی دارد [۶]. تغییرات افت فشار در داخل بستر صافی به

¹ Ripening Stage

که سرعت صافی‌سازی، ریخت‌شناسی ذرات مهار شده را کنترل می‌کند [۱۶].

با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت که در سرعت‌های مختلف صافی‌سازی، عمق ۲۵ سانتی‌متر بستر صافی بیشترین نقش را در مهار ذرات معلق داشته است. زیرا به دلیل همگن بودن و تک اندازه بودن ذرات کائولینیت در سوسپانسیون ورودی و همچنین همگن بودن محیط صافی، تمام ذرات از شانس یکسانی برای مهار شدن در داخل بستر صافی برخوردارند [۶]. بنابراین ذرات کائولینیت ابتدا در عمق ۲۵ سانتی‌متری بستر صافی مهار می‌شوند و به تدریج و با گذشت زمان از کارکرد صافی و پر شدن منافذ این عمق، به عمق‌های پایین‌تر حرکت می‌کنند. مهار بیشتر ذرات کائولینیت در عمق ۲۵ سانتی‌متر، باعث افزایش سریع افت فشار در این عمق نسبت به عمق‌های دیگر می‌شود. در تمام آزمایش‌ها، تفاوت زیادی بین نتایج در عمق ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر بستر صافی وجود نداشت.

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در یک صافی با عمق بستر مشخص، کارایی حذف ذرات معلق و توسعه افت فشار در داخل بستر در سرعت پایین صافی‌سازی (۰/۰۸۶ سانتی‌متر بر ثانیه) نسبت به سرعت‌های بالا بیشتر است. از آنجایی که در سرعت پایین، توسعه افت فشار در داخل بستر سریع‌تر از سرعت‌های دیگر صورت می‌گیرد، صافی زودتر به مرحله شکست^۱ می‌رسد و لازم است که در فواصل زمانی کوتاه با شستشوی معکوس تمیز شود و این از لحاظ اقتصادی برای یک تصفیه‌خانه که باید روزانه حجم زیادی آب را

¹ Breakthrough Stage

۵- مراجع

- 1- Skouras, E.D., Burganos, V.N., Paraskeva, C.A., and Payatakes, A.C. (2007). "Simulation of the dynamic behavior of horizontal granular filters." *J. Separation, and Purification Technol.*, 56, 325-339.
- 2- Vigneswaran, S., and Song, C.J. (1986). "Mathematical modeling of the entire cycle of deep bed filtration." *J. Water, Air and Soil Poll.*, 29 (2), 155-164.
- 3- Vigneswaran, S., and Thiyagaran, M. (1984). "Application of filtration theories to groundwater recharge problems." *J. Water, Air and Soil Poll.*, 2 (4), 417-428.
- 4- Boller, M.A., and Kavanaugh, M.C. (1995). "Particle characteristics and head loss increase in granular media filtration." *J. Wat. Res.*, 29(4), 1139-1149.
- 5- Han ko, C., and Elimelech, M. (2000). "The "shadow effect" in colloid transport and deposition dynamics in granular porous media: Measurements and mechanisms." *J. Environ. Sci. Technol.*, 34(17), 3681-3689.
- 6- Darby, J.L., and Lawler, D.F. (1990). "Ripening in depth filtration: Effect of particle size on removal and head loss." *J. Environ. Sci. Technol.*, 24(7), 1069-1079.

تصفیه‌کند، مقرون به صرفه نیست. از طرفی با افزایش سرعت صافی‌سازی، عمق بستر صافی باید افزایش پیدا کند. لذا با توجه به شرایط حاکم بر فرایند صافی‌سازی در این پژوهش (محیط صافی با میانگین اندازه دانه‌های ۵۱/۰ میلی‌متر و غلظت ۱۰۰ ppm ذرات کائولینیت)، سرعت مطلوب برای صافی‌سازی، ۰/۱۷ سانتی‌متر بر ثانیه و عمق بستر صافی ۵۰ سانتی‌متر به دست آمد. زیرا در این سرعت و عمق، هم کارایی حذف ذرات کائولینیت در حد قابل قبول برای آب شرب (کدورت کمتر از ۲۰ NTU) است و هم توسعه افت فشار در داخل بستر از سرعت‌های دیگر کمتر است.

در تمام آزمایش‌ها با افزایش عمق بستر صافی از ۲۵ به ۵۰ سانتی‌متر، کارایی حذف صافی افزایش می‌یابد ولی بین نتایج به دست آمده در عمق ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد ($\alpha=0/01$). به همین دلیل عمق مناسب برای بستر صافی در این پژوهش ۵۰ سانتی‌متر پیشنهاد شد زیرا عمق‌های بیشتر از این مقدار، نه تنها تأثیر چندانی در کارایی حذف صافی ندارد بلکه باعث افزایش مواد محیط صافی می‌شود که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.

پدیده رسیدگی در سرعت صافی‌سازی ۰/۱۷ سانتی‌متر بر ثانیه نسبت به سرعت‌های دیگر زودتر اتفاق می‌افتد که این خود می‌تواند به بهبود کارایی حذف صافی در این سرعت کمک کند.

در تمام سرعت‌های صافی‌سازی به کار گرفته شده در این پژوهش، عمق ۲۵ سانتی‌متر بستر صافی، بیشترین نقش را در حذف ذرات کائولینیت داشت و توسعه افت فشار در این عمق نیز از عمق‌های دیگر بیشتر بود.

- 7- Kau, S.M., and Lawler, D.F. (1995). "Dynamics of deep bed filtration: Velocity, depth, and media." *J. Environ. Eng.*, 121(12), 850-859.
- 8- Tufenkji, N., and Elimelech, M. (2004). "Correlation equation for predicting single-collector efficiency in physicochemical filtration saturated porous media." *J. Environ. Sci. Technol.*, 38(2), 529-536.
- 9- Jegatheesan, V., and Vigneswaran, S. (2005). "Deep bed filtration: mathematical models and observations." *J. Critical Review in Environ. Sci. Technol.*, 35, 515-569.
- 10- Wiesner, M.R. (1999). "Morphology of particle deposits." *J. Environ. Eng.*, 125(12), 1124-1132.
- 11- Chang, Y.I., and Chan, H.C. (2005). "Network simulation for deep bed filtration of Brownian particles- a supplement." *J. Chem. Engr. Sci.*, 60 (10), 2827-2831.
- 12- Chang, Y.I., Chen, S.C., Chan, H.C., and Lee, E. (2004). "Network simulation for deep bed filtration of Brownian particles." *J. Chem. Eng. Sci.*, 59 (9), 4467-4479.
- 13- Banejad, H., Mokari, M., Mosaddeghi, M., and Doae, Y. (2008). "Evaluation of particles removal efficiency in rapid sand filters by changing particle concentration and media grain size." *J. of Water and Wastewat.*, 68, 40-47. (In Persian)
- 14- Punmia, B.C., Jain, A.K., and Jain, A.K. (2003). *Water supply engineering*, Laxmi pub., New Delhi.
- 15- Shin, C. (2006) "Finite element simulation of deep bed filtration." *J. Chem. Engr. Sci.*, 61, 2324-2329.
- 16- Mays, D.C., and Hunt, J.R. (2005). "Hydrodynamic aspects of particle clogging in porous media." *J. Environ. Sci. Technol.*, 39(2), 577-584.
- 17- Veerapaneni, S., and Wiesner, M.R. (1997). "Deposit morphology and head loss development in porous media." *J. Environ. Sci. Technol.*, 31(10), 2738-2744.