

ارزیابی فنی و اقتصادی استفاده از پمپ‌های دور متغیر در شستشوی معکوس فیلترهای ماسه‌ای تند (مطالعه موردی)

سینا عضدی^۱، مجتبی فاضلی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب و فاضلاب، دانشکده آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران (نویسنده مسئول) ۰۹۱۰۲۰۰۲۸۵۷ sina.azodi@yahoo.com
۲- استادیار گروه مهندسی عمران-آب و فاضلاب، دانشکده آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(دریافت ۹۴/۵/۲۲ پذیرش ۹۵/۱/۱۵)

چکیده

به دلیل تغییرات فیزیکی فیلتر، همچون تغییر در اندازه دانه‌های بستر، شکسته شدن نازل‌ها و تغییرات دمای آب، میزان رژیم شستشو در طول سال تغییر می‌کند. با استفاده از پمپ‌های دور متغیر می‌توان این رژیم بهینه را ثابت نگه داشت. در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی یک فیلتر ماسه‌ای تند تک لایه در ابعاد حقیقی انجام شد و انبساط بهینه بین ۷ تا ۸ درصد به دست آمد. تحقیقات متعدد قبلی نشان داده است که برای جلوگیری از جوشش بستر، جریان آب و هوا باید به آهستگی و به تدریج تا میزان طراحی افزایش یابد؛ در تصفیه‌خانه‌های متعارف با استفاده از شیر کروی این کنترل صورت می‌گیرد که موجب تلفات انرژی و بروز فشارهای متغیر بر روی پمپ‌ها و بلوئر می‌شود. در صورتی که با استفاده از پمپ‌های دور متغیر می‌توان با حفظ فشار نسبتاً ثابت به رژیم شستشوی بهینه دست یافت. پمپ‌های دور متغیر به دلیل تأمین کردن رژیم‌های شستشوی مختلف، این امکان را در اختیار طراحان و بهره‌برداران قرار می‌دهد تا انبساط بهینه را در بستر فیلتر به دست آورند. در این تحقیق میزان انبساط نتایج مثبتی همچون کاهش دوران بلوغ فیلتر، کاهش کدورت خروجی به زیر ۰/۳ NTU و صرفه‌جویی در مصرف آب شستشو به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد و در مصرف برق پمپ‌های شستشوی معکوس، به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد را به همراه داشت.

واژه‌های کلیدی: فیلتر ماسه‌ای تند، شستشوی معکوس، دوران بلوغ، پمپ دور متغیر، انبساط بهینه

۱- مقدمه

کدورت باقیمانده در بستر فیلتر و ناشی از اختلاط مدیا؛ (۳) فاز سوم: ذرات بالای سطح فیلتر که در اثر شستشو خارج نشده‌اند؛ (۴) فاز چهارم: در اثر ترکیب آب ورودی با آب مرحله سوم می‌باشد؛ (۵) فاز پنجم: کدورت کاهش می‌یابد تا فیلتر دوباره به شرایط عادی بازگردد. که این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است (Amirtharajah & Wetstein 1980).

مکانیسم حذف مواد معلق در صافی‌ها پیچیده بوده و کاملاً شناخته شده نیست. ولی می‌توان عنوان نمود که مجموعه‌ای از عملکردهای فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی با توجه به شرایط و مشخصات مختلف سوسپانسیون، مواد و مصالح صافی، کیفیت آب ورودی، نرخ فیلتراسیون و روش بهره‌برداری در این عمل مؤثرند (Mehrabadi 2005). وقتی (۱) افت فشار در صافی از مقدار طراحی بیشتر شود؛ (۲) رخداد نقطه شکست کدورت باعث کاهش کیفیت خروجی به کمتر از حداقل سطح قابل قبول منجر شود یا (۳) زمان کارکرد صافی از مقدار از قبل تعیین شده بیشتر شود، صافی باید تمیز شود. بعد از شستشوی صافی در ابتدای راه‌اندازی فیلتر، کدورت خروجی زیاد بوده و به تدریج کاهش می‌یابد تا به حالت عادی بازگردد این مدت را دوران بلوغ گویند (Qasim 2000). دوران بلوغ فیلتر شامل ۵ مرحله است. این مراحل شامل (۱) فاز تأخیری: آب تمیز کف فیلتر ناشی از آب شستشو؛ (۲) فاز دوم:

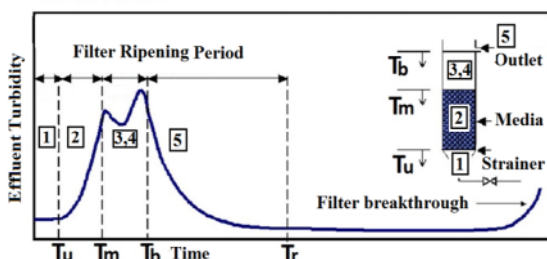


Fig. 1. Schematic of the different stages of filter ripening process

شکل ۱- شماتیک مراحل مختلف دوران بلوغ فیلتر

خوبی شناخته نشده، و برای این مشکل راه حل مناسبی ارائه نشده است. استاندارد (USEPA 1998) کدورت خروجی در دوران بلوغ را $0.3/NTU$ و حداکثر زمان دوران بلوغ را ۱۵ دقیقه اعلام کرده است. به گونه‌ای که بعد از حداکثر ۱۵ دقیقه؛ کدورت خروجی فیلتر به زیر $0.1/NTU$ برسد (USEPA 1998).

بنابراین کاهش کدورت دوران بلوغ فیلتر و ارتقای استاندارد ایران، در سلامت جامعه نقش مؤثری را ایفا می‌کند. در این مطالعه با نصب درایو بر روی پمپ‌های شستشوی معکوس و کاهش رژیم شستشو، شستشوی معکوس بهینه مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور ارتقای عملکرد فیلترهای تصفیه‌خانه شماره ۱ آب قم در بهار ۱۳۹۳ آغاز شد. تصفیه‌خانه شماره ۱ آب قم دبی معادل $1/4$ تا $2/1$ مترمکعب بر ثانیه را تصفیه می‌کند. هدف این پژوهش کاهش دوران بلوغ، کاهش کدورت خروجی، کاهش مصرف آب و برق و جلوگیری از جوشش در سطح بستر بود. درایو کنترل کننده بر روی یکی از سه پمپ شستشوی معکوس این تصفیه‌خانه نصب شد. پس از مطالعات تئوری، آزمایش‌ها بر روی فیلترهای این تصفیه‌خانه صورت گرفت. فیلترهای تصفیه‌خانه آب قم از نوع تک لایه تند ماسه‌ای بوده و تعداد آن‌ها ۲۴ عدد، هرکدام به مساحت 33 مترمربع می‌باشد. شستشوی معکوس فیلترها در سه مرحله صورت می‌گیرد که در مرحله اول فقط هوا، در مرحله دوم آب و هوا و در مرحله سوم فقط از آب برای آب‌کشی فیلتر استفاده می‌شود. در این پژوهش بهینه‌ترین رژیم و زمان شستشو برای مرحله آب‌کشی به دست آمد. در ابتدا مشکلات و راهکارهای کاهش دوران بلوغ بررسی و سپس راهکاری کاربردی برای حل این مشکل ارائه شد. ایستگاه شستشوی معکوس تصفیه‌خانه آب قم شامل سه بلوئر ساخت شرکت KASER آلمان هر کدام با ظرفیت پمپاژ $28/9$ مترمکعب بر دقیقه و دو پمپ دور ثابت ساخت KSB آلمان و یک پمپ همراه با درایو ساخت شرکت PUMPIRAN است. مشخصات دقیق تر پمپ‌ها و فیلترها در ادامه گفته خواهد شد.

۲-۱- راهکارهای کاهش دوران بلوغ فیلتر

به صورت تجاری شرکتی با نام ABB از سال ۲۰۰۸ به نصب درایو و دور متغیر کردن پمپ‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب و

میزان و مدت دوران بلوغ فیلتر و یا اثرات دوران بلوغ فیلتر^۱ به پارامترهای بسیاری بستگی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به کیفیت آب ورودی، میزان رژیم شستشو، کیفیت آب شستشو، نوع دانه بندی فیلتر، درست بودن پیش تصفیه‌ها به خصوص فرایند انعقاد و لخته‌سازی اشاره کرد (Cranston & Amirtharajah 1987). تاکنون دو تئوری پیشرفته در رابطه با فهم پدیده دوران بلوغ فیلتر ارائه شده است. یک نظریه از بررسی پایلوتی به دست آمده که بستر آن کاملاً تمیز بوده است. بر اساس این نظریه ذرات باقیمانده در بین بستر شنی فیلتر می‌تواند به عنوان یک بستر عمل کند و راندمان عملکرد فیلتر را در زمان راه‌اندازی افزایش دهد. این تئوری به نام "تئوری جمع کننده اضافی"^۲ نام گرفت. این تئوری مرحله پنجم دوران بلوغ فیلتر را توجیه می‌کند. در تئوری دوم پایلوتی مورد استفاده قرار گرفت که بستر شن آن دارای کدورت باقیمانده از شستشوی قبلی فیلتر بوده و در واقع در این نظریه دوران بلوغ علاوه بر کدورت آب خام ورودی، شامل کدورت باقیمانده از عملیات شستشو نیز می‌باشد. این تئوری "کدورت باقی مانده در اثر شستشوی معکوس"^۳ نام گرفت. بر اساس تئوری دوم مراحل ۱ تا ۴ دوران بلوغ توجیه می‌شود. می‌توان گفت که هم تئوری "جمع کننده‌های اضافی" و هم تئوری "کدورت باقی مانده در اثر شستشوی معکوس" در دوران بلوغ نقش دارد (Amburgey et al. 2003).

متوسط تعداد کیست خروجی در دوران بلوغ صافی چندین برابر متوسط تعداد کیست خروجی در کل عملکرد دوران صافی است (Mehrabadi 2004). حد مطلوب کدورت در استاندارد ملی ایران، کمتر یا مساوی $1NTU$ و حداکثر مجاز آن در استاندارد ایران $5NTU$ ذکر شده است (Iran National Standard 2007). برای دستیابی به $99/9$ درصد حذف کیست ژیا ردیا توسط صافی‌ها، لازم است کدورت آب خروجی از آنها کمتر از مقدار ذکر شده در استاندارد و در حدود $0.3/NTU$ باشد. بنابراین به نظر می‌رسد استاندارد کدورت آب خروجی از صافی‌ها نیاز به بررسی مجدد داشته باشد (Mehrabadi et al. 2004). ثابت شده است که ۹۰ درصد از ذرات عبوری از یک فیلتر خوب بهره‌برداری شده می‌تواند متعلق به دوران بلوغ باشد. دوران بلوغ فیلتر تاکنون به

¹ FRS (Filter Ripening Sequence)

² Additional collector

³ Backwash remnant particles

طولانی است بار سطحی بر روی فیلترهای دیگر افزایش یافته و کیفیت آب تحت تأثیر قرار می‌گیرد. اگر یکی از فیلترها خراب و از مدار خارج شود، بار سطحی دوباره افزایش یافته و این روش کارایی خود را از دست می‌دهد (Cotton et al. 1996). (۵) محدوده زمانی برای شستشوی انبساطی از زیر فیلتر^۱ به دست آوردن نقطه بهینه شستشو می‌تواند ممکن باشد به گونه‌ای که با کاهش نیروی برشی بر روی سطح دانه‌های بستر، از طریق کاهش جریان آب شستشوی معکوس، از خروج ذرات جلوگیری شده و به این ترتیب راندمان حذف ذرات توسط دانه‌های بستر افزایش می‌یابد. جریان شستشوی کم ممکن است ذرات داخل فیلتر را کمتر جدا کند ولی راندمان حذف ذرات را بالا خواهد برد (Amburgey 2004).

همه‌ی راه حل‌های ارائه شده به غیر از راه حل شستشوی معکوس از طریق روش ETSW، دارای مشکلات و نقص‌هایی است که سبب می‌شود بهره‌برداران تصفیه‌خانه‌های آب از این روش‌ها استفاده نکنند و یا بسیار کم استفاده کنند. روش شستشوی معکوس ETSW روش نوینی است که در سال ۲۰۰۵ میلادی ارائه شده است (Amburgey 2004). آزمایش‌ها بر روی یک پایلوت در بهترین شرایط انجام شده و فرض بر این قرار گرفته است که انعقاد و لخته‌سازی در شرایط بهینه باشد و پیش تصفیه فیلتر نیز به خوبی کار کند. به گونه‌ای که با شستشوی عادی حداکثر کدورت در دوران بلوغ این فیلتر ۳/۰ NTU بوده که با روش شستشوی معکوس ETSW به زیر ۱/۰ NTU رسیده است. این شرایط در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های کشورهای در حال توسعه به خصوص ایران وجود ندارد و در شرایط معمول در همه تصفیه‌خانه‌های ایران حداکثر کدورت دوران بلوغ فیلتر به ۲ NTU تا ۳ NTU می‌رسد. ضمن آن‌که در تصفیه‌خانه‌های کشورهای پیشرفته نیز، با تغییر شرایط انعقاد و لخته‌سازی و تغییر دمای آب و یا تغییر در نوع دانه‌بندی فیلتر، باید رژیم شستشو تغییر کند در غیر این صورت کدورت دوران بلوغ نه تنها کاهش نمی‌یابد بلکه با افزایش هم مواجه می‌شود. در این پژوهش با پذیرش تئوری شستشوی معکوس ETSW، مبنی بر این که با کاهش رژیم شستشو می‌توان دوران بلوغ را حذف کرد، راهکاری ارائه شده است که بتوان دوران بلوغ همه‌ی فیلترها را نسبت به شرایطی که دارند کاهش داد. در این

فاضلاب اقدام کرده و در چند تصفیه‌خانه از ایالات متحده آمریکا و استرالیا و تایلند و غیره این کار انجام شده و نتایج مثبتی را هم در برداشته است. برای مثال تصفیه‌خانه‌ای واقع در جنوب شرقی کوئینزلند استرالیا که آب ۶۵۰۰۰۰ نفر را تأمین می‌کند در ایستگاه پمپاژ شستشوی معکوس خود از پمپ دور متغیر استفاده کرده است. برای کاهش دوران بلوغ فیلتر تاکنون پنج راه حل ارائه شده است. که موارد زیر است: (۱) دور ریختن آب در ابتدای راه‌اندازی فیلتر تا زمانی که کیفیت آب خروجی به حد مطلوب برسد که یک روش معمول است (Cleasby et al. 1989). در این روش به دلیل میزان تلفات زیاد آب مورد استفاده قرار نگرفته است. همچنین در بعضی موارد بعد از چند ساعت دور ریختن آب کیفیت مطلوب حاصل نشده است (Bucklin et al. 1988). (۲) استفاده از مواد منعقدکننده در آب شستشوی معکوس: مواد پلیمر یا منعقدکننده‌ها سبب می‌شود تا مدت دوران بلوغ کاهش یافته و کیفیت خروجی در دوران بلوغ افزایش یابد (Cleasby et al. 1992). این روش همراه با چالش‌هایی است. اول این‌که اضافه کردن مواد منعقدکننده به آب شستشو در شکل فلوک‌ها تأثیر می‌گذارد و باعث انتقال آنها به آب خروجی می‌شود. دوم این‌که تشخیص مقدار دقیق مواد منعقدکننده در زمان کوتاه شستشوی فیلتر با توجه به تغییرات در کیفیت آب ورودی، به مطالعات دقیق پایلوتی نیاز دارد (Logsdon et al. 2002).

راه‌اندازی فیلتر با تأخیر: در این روش بعد از زمان شستشو، آب خروجی بسته شده و آب ورودی تا زمانی که فیلتر پر شود باز می‌ماند و به این ترتیب با عبور فلوک‌های آب ورودی از فیلتر، بستر فیلتر گرفته شده و دوران بلوغ کاهش می‌یابد. ولی این روش نیز با مشکلاتی همراه است. اول این‌که زمان خارج بودن فیلتر از مدار در حین عملیات شستشو افزایش می‌یابد. و دوم این‌که با مشکلات بیولوژیکی همراه است. بنابراین استفاده از این روش هم توصیه نمی‌شود (Huck et al. 1998). (۴) راه‌اندازی فیلتر به صورت آهسته: در این روش در یک دوره مشخص، خروجی فیلتر به صورت آهسته باز می‌شود تا فیلتر به شرایط عادی بازگردد. در واقع این روش این فرصت را به فیلتر می‌دهد که ذرات را از آب جدا کند و به شرایط استاندارد خود برسد. در تصفیه‌خانه‌هایی که خروجی هر فیلتر به طور دقیق قابل کنترل باشد، این روش کاربرد دارد. به دلیل آن‌که مدت در مدار قرار گرفتن فیلتر بعد از شستشو با این روش

¹ Extended Terminal Subfluidization Wash (ETSW)

ریاضی؛ ۳) به صورت چشمی و کنترل کدورت سطح فیلتر. مدل‌های ریاضی ارائه شده برای فیلترهایی صدق می‌کند که در زمان شستشو، شناورسازی کامل رخ دهد (Bhargava & Ojha 1989). در مرحله سوم شستشو، رژیم شستشو کاهش داده می‌شود و نمی‌توان از مدل‌های ریاضی استفاده کرد. با استفاده از کدورت سنج آنلاین نیز نمی‌توان زمان حدودی را به دست آورد؛ دلیل آن هم این است که در انتهای شستشو، نوسانات کدورت بسیار زیاد بوده و امکان اشتباه در آن وجود دارد. چنین دستگاه‌هایی در انتهای شستشو و با صاف شدن آب بالانس شده و زمان دقیق را در اختیار می‌گذارند. بهترین راهکار کنترل چشمی در ابتدا و اندازه‌گیری کدورت خروجی آب شستشو در انتهای زمان شستشو است. به دلیل کاهش رژیم شستشو، مدت زمان شستشو افزایش می‌یابد و تا زمانی که کدورت خروجی آب شستشو، به یک میزان ثابت برسد زمان شستشو ادامه خواهد داشت. بنابراین باید به این نکته توجه کرد که نتایج به دست آمده در این پژوهش مختص تصفیه‌خانه آب قم است و برای اجرای این روش در تصفیه‌خانه‌های دیگر، آزمایش‌ها باید دوباره صورت گیرد.

۲-۳- به دست آوردن انبساط بهینه در مرحله سوم شستشو و ثابت نگه داشتن آن در طول سال

بعد از به دست آوردن رژیم شستشوی بهینه، انبساط بهینه برای فیلترهای تک لایه تند ماسه‌ای از معادلات (۱) و (۲) قابل محاسبه است

$$E = 100 \times \left(\frac{(1-e)}{1 - \left(\frac{U_b}{V_c}\right)^{0.22}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$V_s = \left(\frac{0.018 \times (\rho_s - \rho_w)^2 \times g^2}{\rho_w \times \mu} \right)^{\frac{1}{3}} \times d_{60} \quad (2)$$

که در آن

E انبساط بستر، U_b سرعت شستشوی معکوس بر حسب متر در ثانیه، V_s سرعت ته‌نشینی ذره بر حسب متر در ثانیه، e تخلخل بستر در حالت عملکرد فیلتر، ρ_s دانسیته ذره بر حسب کیلوگرم بر متر

راهکار از پارامتر انبساط بستر به عنوان یک شاخص برای تعیین رژیم شستشوی بهینه استفاده شده است. بر اساس تئوری "جمع‌کننده‌های اضافی" باید رژیم شستشو در مرحله آب‌کشی کاهش داده شود و بر اساس تئوری "کدورت باقیمانده در اثر شستشوی معکوس" باید زمان شستشو افزایش یابد تا از کدورت دوران بلوغ کاسته شود.

۲-۲- به دست آوردن زمان و رژیم شستشوی بهینه در مرحله سوم شستشو

در مرحله اول شستشو از هوا برای ایجاد تلاطم و سایش بین ذرات و جدا کردن فلوک از بستر استفاده می‌شود. در مرحله دوم آب نیز به هوا اضافه می‌شود. هدف از این مرحله حل شدن فلوک‌های جدا شده با آب بیشتر، و سهولت در جدا شدن فلوک‌ها است. در حالت کلی مراحل اول و دوم، تلاطم لازم را ایجاد می‌کنند تا در مرحله سوم شستشو، فلوک‌های جدا شده از فیلتر خارج شوند. با تغییر دبی شستشو در مرحله سوم، و مقایسه دوران بلوغ هر آزمایش، می‌توان رژیم شستشوی بهینه را به دست آورد. به دلیل آن که آزمایش‌ها بر روی پایلوت، شرایط حقیقی تصفیه‌خانه مانند نوع انعقاد و لخته‌سازی، پیش تصفیه و شرایط بستر فیلتر را نمی‌تواند نشان دهد و میزان پارامترهایی همچون دمای آب، دبی ورودی، کدورت آب قبل از فیلتر در یک تصفیه‌خانه واقعی در طول ۲۴ ساعت در حال تغییر است، باید آزمایش‌ها بر روی یک فیلتر حقیقی و در شرایط ثابت انجام شود تا نتایج به دست آمده قابلیت مقایسه را داشته باشد. برای ایجاد شرایط ثابت، آزمایش‌ها بر روی فیلترهایی که در یک روز شستشو می‌شوند انجام شد و از خطای شرایط گوناگون فیلترها صرف نظر شد. برای آن که کار ساده‌تر شود می‌توان در روزها و شرایط گوناگون با انجام آزمایش‌های متعدد، محدوده رژیم بهینه را مشخص کرد و در نهایت مقدار دقیق آن را در یک روز به دست آورد.

به دلیل آن که آب تمیز برای شستشو استفاده می‌شود، زمان شستشو بسیار مهم است. طولانی شدن پروسه شستشوی معکوس سبب هدر رفت آب می‌شود (Mcglhorn 2003). برای تشخیص مدت زمان شستشو در مرحله آب‌کشی، سه روش وجود دارد: (۱) اندازه‌گیری کدورت خروجی آب شستشو؛ (۲) استفاده از مدل‌های

مشخص است به غیر از استفاده از پمپ‌های دور متغیر این گونه روش‌ها با اتلاف انرژی و آب همراه هستند. بنابراین بهینه‌ترین روش، استفاده از پمپ‌های دور متغیر در تغییر رژیم شستشو است (ABB 2013).

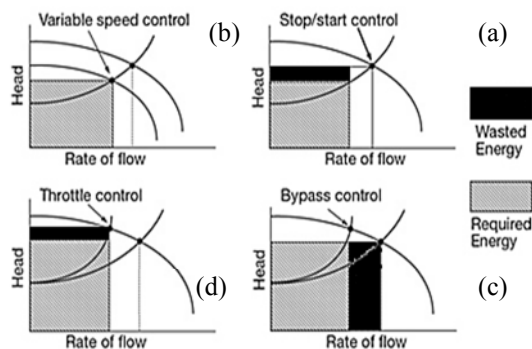


Fig. 2. Different discharge control methods employed and the corresponding energy and water losses

شکل ۲- استفاده از روش‌های گوناگون در کنترل دبی و میزان اتلاف انرژی و آب در آنها

برقراری همزمان تشابه سینماتیکی و تشابه دینامیکی در پمپ‌ها محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند که عملاً تشابه پمپ‌ها را غیر ممکن می‌سازد. لذا باید اصل مهم‌تر را انتخاب و اصلاحاتی را برای اثرات دیگر اصول نامتشابه در نظر گرفت. پمپ‌هایی که تشابه سینماتیکی را ارضاء کنند، به "پمپ‌های مشابه" موسوم هستند (Taebi & Chamani 2006) از طریق روابط و ثابت‌های پمپ‌های مشابه، معادلات ۳، ۴ و ۵ برای یک پمپ به دست می‌آید

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (5)$$

که در آن

مکعب، ρ_w دانسیته آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، d_{60} اندازه منافذ سرنده استاندارد که ۶۰ درصد وزن مواد بستر را عبور می‌دهد بر حسب متر، g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه و μ ویسکوزیته دینامیک بر حسب کیلوگرم بر متر در ثانیه است (Qasim et al. 2000). همانطور که در روابط ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، انبساط بستر علاوه بر میزان رژیم شستشو، به پارامترهایی همچون چگالی و ویسکوزیته آب و نوع دانه‌بندی بستر وابسته است. از آنجا که چگالی و ویسکوزیته آب نیز با دمای آب تغییر می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که دو پارامتر دانه‌بندی بستر و دمای آب، فاکتورهای هستند که تغییر در آنها، میزان انبساط را به ازای یک رژیم ثابت شستشو در طول سال تغییر می‌دهد و دیگر انبساط یکنه ایجاد نمی‌شود. بنابراین باید رژیم شستشو با تغییر دمای آب و نوع دانه‌بندی بستر در طول سال تغییر کند تا انبساط همواره در شرایط بهینه باقی بماند.

۲-۴- استفاده از پمپ دور متغیر در شستشوی معکوس فیلتر

تغییر دبی پمپ شستشو از چند روش ممکن است که شامل: الف) کنترل دبی از طریق روشن و خاموش کردن پمپ‌ها^۱؛ ب) استفاده از پمپ دور متغیر^۲؛ ج) از طریق جریان کنار گذر^۳ و د) از طریق شیر کنترل دبی^۴ می‌باشد. شکل ۲-۱ نشان می‌دهد که برای کنترل دبی، از روشن و خاموش کردن پمپ‌ها در مدار استفاده شده است. این عمل راندمان پمپ را پایین آورده و مصرف برق را افزایش می‌دهد. این مصرف انرژی در شکل ۲-۱ به صورت افزایش هد پمپ نمایش داده شده است. در شکل ۲-۲ برای کنترل دبی از پمپ دور متغیر استفاده شده و نمودار پمپ با نمودار افت تطابق یافته و هیچ‌گونه اتلاف آب و انرژی به وجود نیامده است. در شکل ۲-۳ برای کنترل دبی از شیر بای‌پس استفاده شده که این عمل باعث اتلاف آب می‌شود و این اتلاف آب به رنگ مشکی پر رنگ بر روی نمودار دبی مشخص شده است. در شکل ۲-۴ با استفاده از شیر، دبی کنترل شده که این روش نیز با افزایش مصرف برق همراه بوده و در شکل به صورت افزایش هد نمایش داده شده است. اما همانطور که در شکل ۲

¹ Stop/start control

² Variable speed control

³ Bypass control

⁴ Throttle control

⁵ Homologous pumps

طریق پمپ دور متغیر باید تغییر کند تا E (میزان انبساط بهینه) ثابت باقی بماند. کاهش دوران بلوغ و کدورت تنها یکی از اهداف استفاده از پمپ‌های دور متغیر در شستشوی معکوس فیلتر است. جلوگیری از جوشش بستر و کاهش مصرف آب و برق از دیگر اهداف استفاده از پمپ دور متغیر در شستشوی فیلتر بوده که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۲-۵- جلوگیری از جوشش بستر با استفاده از پمپ دور متغیر
برای جلوگیری از بلند شدن بستر از لایه‌ی نگه‌دارنده در هنگام شستشوی معکوس، در مرحله اول شستشو باید شیرها به آرامی باز شوند. در غیر این صورت بین لایه نگه‌دارنده و بستر شنی فاصله‌ای پدید می‌آید. همانطور که در شکل ۴ مشخص است اگر این پدیده اتفاق بیفتد بستر فیلتر در چندین نقطه خواهد شکست و پدیده جوشش اتفاق خواهد افتاد. معمولاً به دلیل هزینه و آسیب‌هایی که باز و بسته کردن شیرها به پمپ‌های شستشو وارد می‌کند در بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها در مرحله‌ی اول شستشو، پمپ و بلوئر به صورت صد در صد وارد مدار می‌شوند و پدیده جوشش اتفاق می‌افتد (Susumu 2000). پمپ‌های دور متغیر می‌توانند این مشکل را حل کرده و با گرفتن برنامه‌ای از قبل تنظیم شده به آهستگی وارد مدار شوند و بدون آن‌که پمپ آسیب ببیند از جوشش بستر جلوگیری نمایند.

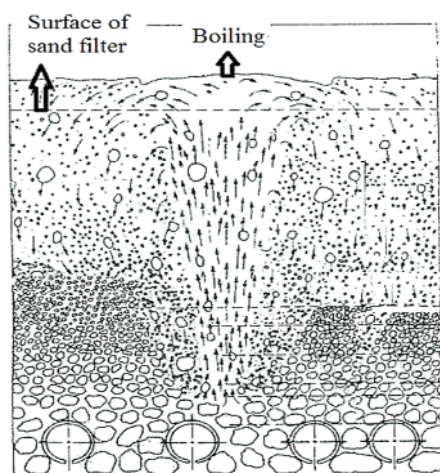


Fig. 4. Boiling at the filter bed surface due to high and sudden air or water discharge during the wash off process
شکل ۴- جوشش در سطح بستر فیلتر در اثر دبی زیاد و ناگهانی هوا یا آب در هنگام شستشو

Q دبی پمپ، H هد پمپ، P توان الکتروموتور و n دور الکتروموتور می‌باشد. با استفاده از این روابط می‌توان منحنی‌های پمپ دور متغیر را در هر دوری رسم کرد. شکل ۳ نمودار پمپ را در دورهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است نمودار پمپ با کاهش دور پمپ به صورت موازی با نمودار قبلی خود پایین آمده و در هر نقطه‌ای قابل تنظیم است. با تغییر دور می‌توان نمودار افت مدار را با نمودار پمپ در راندمان حداکثر منطبق نمود. در شکل ۳ نمودارهای هم راندمان مشخص شده است. منحنی ارائه شده در شکل ۳ برای پمپ‌های گریز از مرکز بوده و برای پمپ‌های دیگر نمودار متفاوت است. چگونگی تغییر نمودار پمپ با دور، روابط ۳، ۴ و ۵ را تأیید می‌کند (Fazeli 2009).

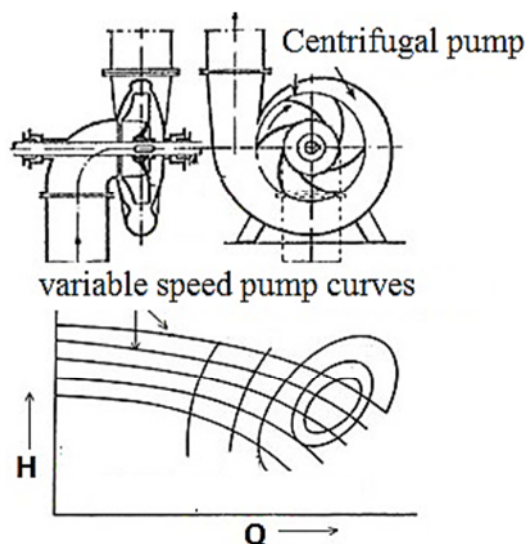


Fig. 3. Schematic curve for a variable speed pump at different speeds

شکل ۳- شماتیک منحنی یک پمپ دور متغیر در دورهای مختلف

بنابراین با در اختیار داشتن پمپ دور متغیر هم می‌توان میزان انبساط بهینه را به دست آورد و هم این که با دادن دستورالعملی به پمپ، این میزان انبساط بهینه را در طول سال ثابت نگه داشت. به این ترتیب دوران بلوغ فیلتر حذف و عملکرد آن ارتقا می‌یابد. دستورالعملی که به پمپ داده می‌شود تا در طول سال انبساط بهینه را ثابت نگه دارد از طریق روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید. در طول سال و با تغییر در نوع دانه‌بندی بستر و تغییر دمای آب، V_s (سرعت ته‌نشینی ذرات بستر) تغییر می‌کند. بنابراین U_b (رژیم شستشو) از

برای رسم منحنی افت کل باید هم از رابطه کارمن کوزنی^۳ و هم از رابطه افت لوله‌ها و شیرآلات استفاده کرد. معادلات ۶، ۷، ۸ و ۹ از ترکیب معادلات افت لوله‌ها و شیرآلات با رابطه کارمن کوزنی به دست آمده است. با استفاده از این معادلات می‌توان منحنی افت کل بعد از پمپ شستشوی معکوس را به دست آورد.

$$H_T = aQ^2 + bQ + C \quad (6)$$

$$a = \left(\frac{0.0828 \times L_p}{D_p^5 \times (-2 \log(\frac{z}{3.71 \times D_p}))^2} + \frac{K}{D_p^4} + K_n \right) + \left(\frac{1.75 \times (1-e) \times L}{\phi \times e^3 \times 2 \times g \times d_{10} \times A^2} \right) \quad (7)$$

$$b = \frac{150 \times (1-e)^2 \times L \times \mu}{2 \times d_{10} \times \rho_w \times e^3 \times g \times A \times \phi} \quad (8)$$

$$C = h_{st} \quad (9)$$

که در آن

K_n ثابت افت نازل‌ها، H_T افت هد کل بر حسب متر، z ضریب زبری لوله بر حسب متر، K مجموع ثابت افت شیرآلات، D_p قطر لوله رانش پمپ بر حسب متر، L_p طول لوله رانش پمپ بر حسب متر، h_{st} افت هد استاتیکی بر حسب متر، ϕ فاکتور شکل ذره، نسبت e تخلخل، d_{10} اندازه مؤثر بر حسب متر، L عمق بستر بر حسب متر، A سطح مقطع فیلتر بر حسب متر مربع، g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه، ρ_w چگالی آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، μ ویسکوزیته مطلق آب بر حسب نیوتون ثانیه بر متر مکعب و Q دبی شستشوی معکوس فیلتر بر حسب متر مکعب در ثانیه می‌باشد. جدول ۱ مشخصات فنی فیلتر شماره ۶ تصفیه‌خانه آب قم را در هنگام انجام آزمایش نشان می‌دهد.

۲-۶- ارزیابی اقتصادی نصب درایو بر روی پمپ‌های شستشوی معکوس

بالغ بر ۲۰ درصد مصرف انرژی الکتروموتورهای جهان در ایستگاه‌های پمپاژ صرف می‌شود که بیش از ۵۰ درصد آن مربوط به تأمین آب است. از سوی دیگر مطالعات کلانی که منجر به تهیه دستورالعمل تعیین هزینه‌های ایستگاه‌های پمپاژ توسط HIE^۱ شده نشان می‌دهد که از مجموع هزینه‌های دوره عملکرد^۲، بیش از ۴۰ درصد مربوط به مصرف انرژی و بیش از ۳۵ درصد مربوط به هزینه‌های نگهداری ایستگاه می‌باشد. در حالی که هزینه احداث ایستگاه، کمتر از ۲۵ درصد از کل هزینه ایستگاه را شامل می‌شود (Fazeli 2009). با کاهش رژیم شستشو در مرحله آخر، مصرف آب نیز کاهش می‌یابد. همچنین درایو تغییر دور سبب می‌شود که راندمان عملکرد پمپ افزایش یافته و با توان کمتری کار کند. بنابراین در مصرف برق نیز صرفه‌جویی خواهد شد. به دلیل آن‌که پمپ همواره در نقطه بهینه کار می‌کند عمر آن نیز افزایش پیدا کرده و تنش‌های وارد به پمپ از بین می‌رود. بنابراین از لحاظ اقتصادی، قیمت نصب یک درایو با صرفه‌جویی که در مصرف آب و برق به همراه خواهد داشت در کمتر از یک سال تأمین، و خرید و نصب درایو برای تصفیه‌خانه‌های آب مقرون به صرفه خواهد بود.

۲-۷- نحوه انجام آزمایش‌ها

برای به دست آوردن رژیم شستشوی مناسب لازم است دبی پمپ مشخص شود. برای به دست آوردن دبی پمپ سه راهکار وجود دارد که عبارت است از: (۱) استفاده از مانومتر و کاتالوگ پمپ؛ (۲) استفاده از فلومتر؛ (۳) استفاده از منحنی مشخصه مدار و کاتالوگ پمپ. از آنجایی که مانومتر و فلومتر دارای نوسان است و اطلاعات دقیقی را در اختیار نمی‌گذارد پیشنهاد می‌شود که حتی الامکان از طریق روش سوم، دبی پمپ مشخص شود. البته با استفاده از فلومتر می‌توان روش سوم را کنترل کرد تا نتایج دقیق‌تر باشد. در این پژوهش از روش سوم برای به دست آوردن دبی استفاده شد تا بتوان دستورات لازم را به پمپ داد. به دلیل وجود لوله، شیرآلات، بستر شنی فیلتر و نازل‌ها بعد از قسمت رانش پمپ شستشوی معکوس،

¹ Hydraulic Institute and Euro pump (HIE)

² Life Cycle Costs (LCC)

³ Carmen-Kozeny

$$\left. \begin{array}{l} (1) \text{ هوا } \frac{46 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} - 4 \text{ min} \\ (2) \text{ آب : } \frac{27 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} + \text{هوا : } \frac{46 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} - 4 \text{ min} \\ (3) \text{ آب } \frac{28}{5} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} - 11 \text{ min} \end{array} \right\}$$

هدف از مرحله اول و دوم شستشو، ایجاد تلاطم برای جدا کردن فلوک‌هاست به گونه‌ای که تمام فلوک‌ها چه در زیر و چه در سطح فیلتر از بستر جدا شود. رژیم‌های شستشوی پیش‌بینی شده در مرحله اول و دوم، این تلاطم را به خوبی ایجاد کرده و نیازی به تغییر ندارد. بنابراین در این پژوهش، تنها مرحله سوم شستشو مورد مطالعه قرار گرفت.

۳-۱- به دست آوردن انبساط بهینه با استفاده از پمپ دور متغیر برای به دست آوردن رژیم شستشوی بهینه در مرحله سوم شستشو، ابتدا باید محدوده آن را مشخص کرد. با انجام آزمایش‌های متعدد در طول ۶ ماه محدوده رژیم شستشو بهینه به دست آمد که این رژیم شستشو انبساط ۷ درصد را شامل می‌شود. در نهایت برای ارائه نتایجی که قابلیت مقایسه را داشته باشد و چگونگی به دست آوردن میزان انبساط دقیق، چهار آزمایش بر روی فیلترهای ۶، ۷، ۸ و ۹ فیلترهای تصفیه‌خانه آب قم در شرایط ثابت صورت گرفت. این شرایط به شرح زیر است:

$$\text{بار سطحی فیلتر}^1 (FR) = \frac{7/3 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$\text{مدت عملکرد فیلتر}^2 (FRT) = 48 \text{ hr}$$

$$\text{دمای آب} = 22^\circ \text{C}$$

$$\text{کدورت ورودی قبل از فیلترها} = 3/38 \text{ NTU}$$

در شکل ۵ رژیم شستشوی مورد آزمایش در مرحله سوم آب‌کشی فیلترها، نشان داده شده است. شکل ۵-a، رژیم شستشو آب‌کشی فیلتر در حالت عادی است. در این حالت دو پمپ دور ثابت در مدار هستند. همانطور که در شکل مشخص است در این حالت دبی ۱۸۸۰ مترمکعب در ساعت به دست آمده است. با قرار

جدول ۱- مشخصات فنی فیلتر شماره ۶ تصفیه‌خانه آب قم (در زمان آزمایش)

Table 1. Technical specifications of Filter No. 6 operated at Qom Water Treatment Plant (at test time)

Technical specifications of Filter No. 6		Measure
K_n	Nozzle drop constant	0.23
K	Sum of valve drop constants	0.00025
L_p	pump discharge pipe length (m)	26.4
ϕ	particle shape factor	1
d_{10}	effective size (m)	0.0008
A	filter cross-section area (m^2)	66
ρ_w	water density (kg/m^3)	997.675
M	absolute water viscosity ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)	0.000951
Z	pipe roughness coefficient (m)	0.001
D_p	pump discharge pipe diameter (m)	0.45
h_{st}	static head loss (m)	2.1
e	porosity ratio	0.4
L	bed depth (m)	1
g	gravity (kg/m^3) (m/s^2)	9.81
ρ_s	particle density	2650
d_{60}	Mesh size of a standard sieve passing 60% of the sand material weight (m)	0.0012

آزمایش‌ها بر روی فیلترهای شماره ۶، ۷، ۸ و ۹ تصفیه‌خانه آب قم و در شرایط ثابت صورت گرفت. تمام مشخصات این فیلترها مشابه هم بوده اما به دلیل فاصله متفاوت با ایستگاه پمپاژ و کم بودن قطر لوله رانش، اندکی منحنی افت آنها با یکدیگر متفاوت است که این تفاوت در رسم منحنی‌های افت آنها لحاظ شده است. با جایگذاری اطلاعات جدول ۱ در روابط ۶، ۷، ۸ و ۹ ثابت‌های a, b, c به دست می‌آید

$$a=3.327 \quad b=0.97 \quad c=2.1$$

$$H_T = 3.327 \times (3600)^2 \times Q^2 + 0.97 \times 3600 \times Q + 2.1 \quad (10)$$

که در آن

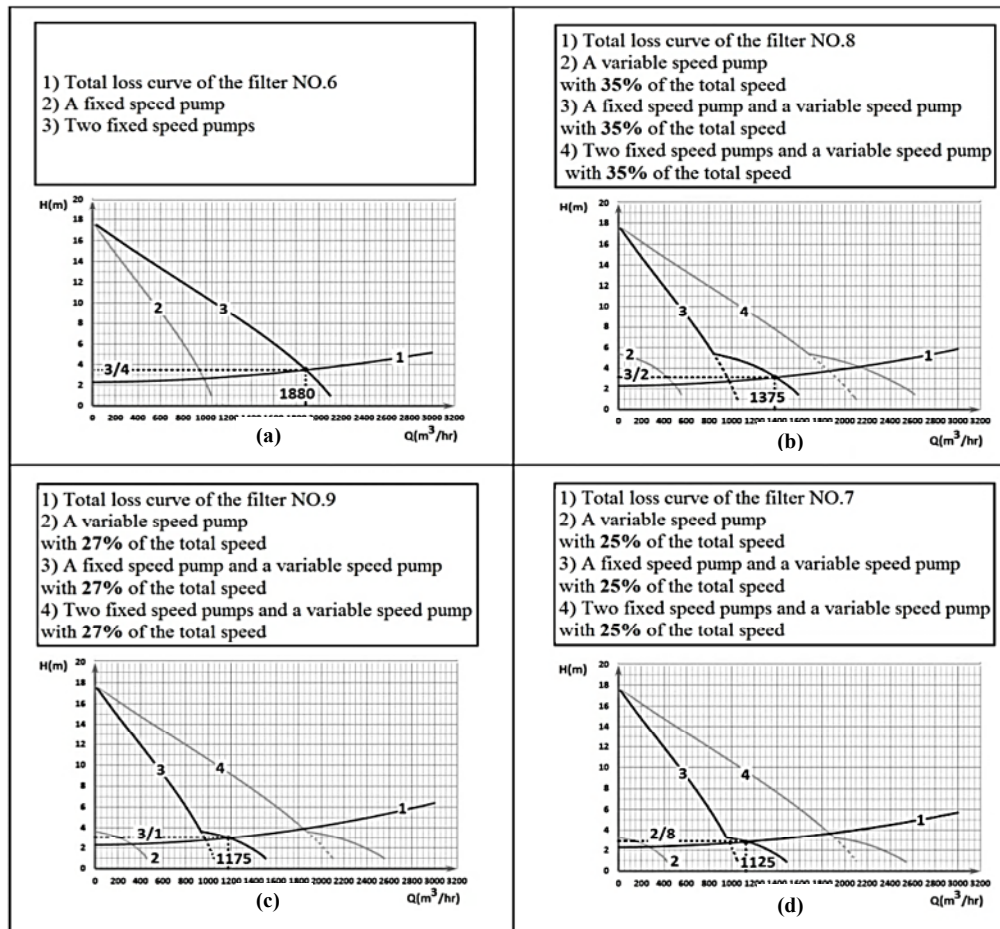
H_T افت هد کل بر حسب متر و Q دبی شستشوی معکوس فیلتر بر حسب متر مکعب در ساعت است. با استفاده از رابطه ۱۰ می‌توان نمودار افت فیلتر شماره ۶ را رسم کرد. به همین ترتیب نمودار افت کل فیلترهای شماره ۷، ۸ و ۹ نیز رسم می‌شود. با استفاده از کاتالوگ پمپ و منحنی افت کل و روابط پمپ دور متغیر می‌توان دبی پمپ را به دست آورد.

۳- نتایج و بحث

در شرایط عادی، شستشوی فیلترهای تصفیه‌خانه آب قم در سه مرحله صورت می‌گیرد که مراحل آن به شرح زیر است:

¹ Filtration Rate (FR)

² Filtration Run Time (FRT)



شکل ۵- رژیم شستشوی مورد آزمایش در مرحله سوم آبکشی فیلترها

نمودار پمپ‌ها رسم شده‌اند. بعد از هر شستشو کدورت خروجی در زمان راه‌اندازی فیلتر رسم و دوران بلوغ هر یک به دست آمد. در شکل ۶ فیلتر شماره ۶ به صورت عادی شستشو داده شده و به همین علت دارای پیک کدورت است. فیلترهای شماره ۸، ۹ و ۷ با استفاده از پمپ دور متغیر رژیم شستشوی آنها کاهش پیدا کرده و میزان کدورت نیز در آنها به زیر 0.3 NTU رسیده است. همانطور که در شکل ۶ مشخص است انبساط $7/3$ درصد کمترین کدورت را در دوران بلوغ دارد و همواره کدورت آن زیر 0.3 NTU است. در واقع شستشوی با انبساط $17/36$ درصد به مدت ۱۱ دقیقه به شستشوی با انبساط $7/3$ درصد به مدت ۱۶ دقیقه تغییر داده شد که این کاهش انبساط و افزایش زمان شستشو، سبب حذف دوران بلوغ می‌شود. لذا انبساط بهینه در مرحله سوم شستشو $7/3$ درصد است.

دادن اطلاعات جدول ۱ در روابط ۲ و ۱ میزان انبساط در این حالت $17/36$ درصد به دست می‌آید. در شکل ۵-b، بر روی فیلتر شماره ۸ رژیم شستشو کاهش یافته و یک پمپ دور ثابت با یک پمپ دور متغیر با دور 35 درصد دور کل، وارد مدار شده است. در این حالت دبی 1375 متر مکعب در ساعت به دست آمد. با استفاده از روابط ۲ و ۱ انبساط در این حالت $10/3$ درصد به دست آمد. در شکل ۵-c، یک پمپ دور ثابت و یک پمپ دور متغیر با دور 27 درصد دور کل در مدار است. در این حالت با استفاده از روابط ۲ و ۱ انبساط بستر فیلتر $7/3$ درصد محاسبه شد. در شکل ۵-d، یک پمپ دور ثابت و یک پمپ دور متغیر با دور 25 درصد دور کل در مدار است. در این حالت با استفاده از روابط ۲ و ۱ انبساط بستر فیلتر $6/4$ درصد محاسبه شد. در شکل ۵، نمودارهای ۱ و ۳ نشان دهنده نقطه کاری هستند و نمودارهای ۲ و ۴ صرفاً برای درک بیشتر

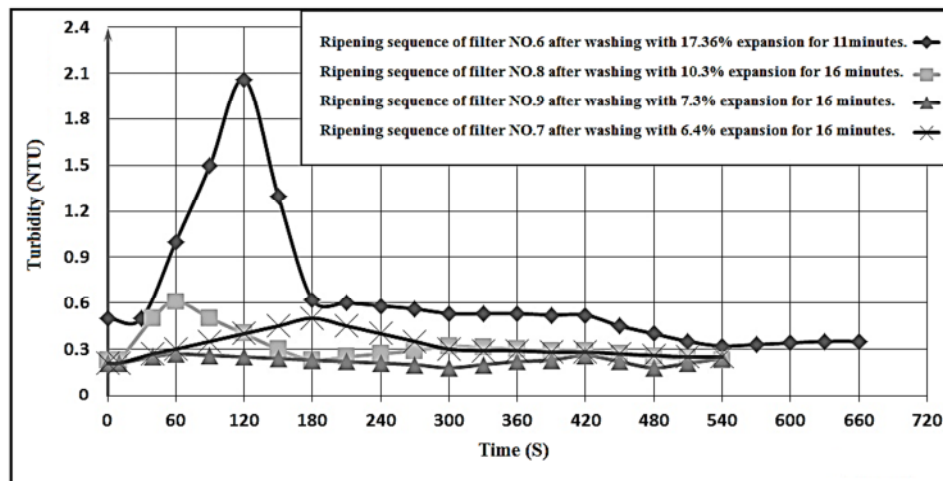


Fig. 6. Filter ripening period after washing at different expansion rates

شکل ۶- دوران بلوغ فیلترها بعد از شستشو با انبساط‌های مختلف

به صورت دستی، سخت و زمان‌بر است. برای حل این مشکل باید از روابط ۱ و ۲ کمک گرفت. با استفاده از این روابط می‌توان برنامه‌ی کامپیوتری ساده‌ای به درایو پمپ داد تا پمپ به صورت خودکار رژیم شستشو را تغییر دهد و انبساط در شرایط بهینه باشد. با استفاده از یک سنسور دما و جدول تغییرات ویسکوزیته آب، رژیم شستشو متناسب با دما تغییر می‌کند. اما برای تغییرات دانه‌بندی بستر هر ماه با نمونه‌گیری از بستر فیلتر و اندازه‌گیری d_{60} آن، می‌توان اطلاعات تغییرات دانه‌بندی بستر را ماهانه به برنامه درایو پمپ داد تا رژیم شستشو متناسب با آن تغییر کند.

۳-۳- جلوگیری از جوشش بستر با استفاده از بلوئر دور متغیر
همچنین با استفاده از درایو متصل به بلوئر، مدت زمانی که لازم است تا بلوئر به دور صد در صد برسد به ۳۰ ثانیه افزایش داده شد. تا به این ترتیب از ایجاد شوک و جوشش در سطح بستر جلوگیری شده و انبساط به صورت یکنواخت صورت گیرد.

۴-۳- صرفه جویی در مصرف آب و برق با استفاده از پمپ‌های دور متغیر

در تصفیه‌خانه آب قم در تابستان ۱۵۴ مترمکعب در روز و در زمستان ۳۷۵ مترمکعب در روز، در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود که این میزان آب برای شهر قم قابل توجه است. همچنین کاهش مصرف برق از ۳۱ کیلووات ساعت در روز به ۲۳ کیلووات

۲-۳- ثابت نگه داشتن انبساط بهینه در طول سال به وسیله پمپ دور متغیر

همانطور که گفته شد با دبی ۱۱۷۵ مترمکعب بر ساعت، انبساط بهینه ۷/۳ درصد حاصل شد. با تقسیم دبی به دست آمده بر سطح مقطع فیلتر که در اینجا ۲ تا ۳۳ مترمربع است، رژیم شستشو ۱۷/۸ متر مکعب بر متر مربع در ساعت به دست می‌آید. طبق روابط ۱ و ۲ انبساط بهینه علاوه بر رژیم شستشو، به دما و نوع دانه‌بندی بستر نیز وابسته است. برای ثابت نگه داشتن انبساط بهینه در طول سال باید رژیم شستشو در طول سال متناسب با دمای آب و نوع دانه بستر تغییر کند تا انبساط بستر در حالت بهینه ثابت بماند. در تصفیه‌خانه آب قم دمای آب بین ۸ تا ۲۵ درجه سلسیوس در طول سال تغییر می‌کند. همچنین d_{60} (اندازه‌ی منافذ سرند استاندارد) که ۶۰ درصد وزن مواد بستر را عبور می‌دهد) بسترها در زمانی که سیلیس بستر نو است ۰/۹ میلی‌متر بوده و با گذشت زمان و در اثر ساییدگی، بعد از یک سال به ۱/۲ میلی‌متر می‌رسد. طبق شکل ۷ برای آن که انبساط ۷/۳ درصد در تصفیه‌خانه آب قم ثابت بماند باید رژیم شستشو را با استفاده از پمپ دور متغیر در طول سال تغییر داد. در تصفیه‌خانه آب قم طبق شکل ۷-a با تغییر d_{60} باید رژیم شستشو در این مدت تغییر کند تا انبساط ثابت بماند. همچنین با تغییر دمای آب در زمستان و تابستان، ویسکوزیته آب تغییر کرده و طبق شکل ۷-b رژیم شستشو باید تغییر کند تا انبساط همچنان ۷/۳ درصد باقی بماند. اما اجرای چنین دستورالعملی

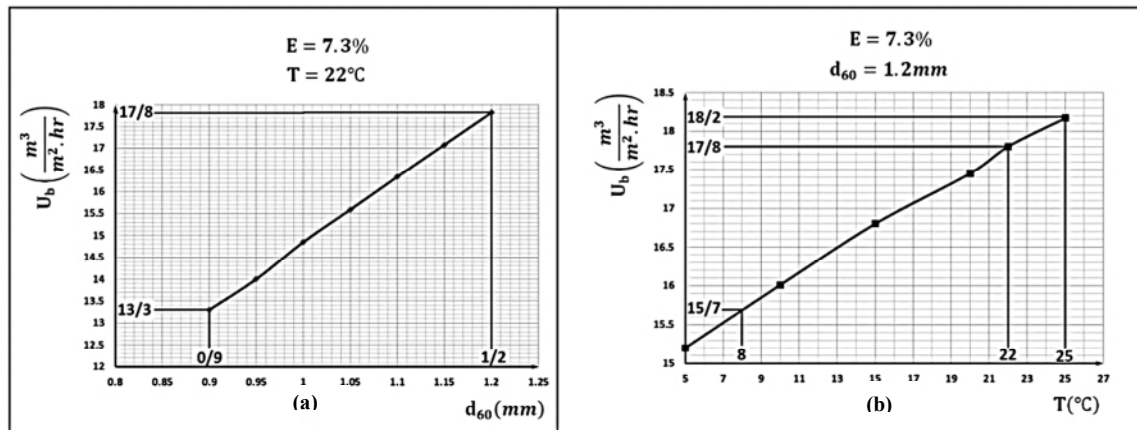


Fig. 7. Effects of type of bed grading and water temperature on optimum washing regime

شکل ۷- تأثیرات نوع دانه بندی بستر و دمای آب بر رژیم شستشوی بهینه

۲- منعطف شدن بخش شستشو در برابر تغییرات: با استفاده از پمپ‌های دور متغیر بخش شستشوی فیلتر در برابر تغییراتی همچون تغییر بار سطحی فیلتر، کدورت ورودی، دمای آب، تغییر نوع دانه بندی بستر و غیره منعطف شده و همواره فیلتر در شرایط بهینه قرار می‌گیرد.

۳- صرفه‌جویی در مصرف آب و برق:

به‌صورت کلی استفاده از پمپ دور متغیر در شستشوی فیلترها، سبب می‌شود که در مصرف آب شستشو به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد و در مصرف برق ایستگاه پمپاژ آب شستشو، ۳۰ تا ۵۰ درصد صرفه‌جویی شود.

۵- قدردانی

از آقای مهندس نظرزاده معاون محترم شرکت آب و فاضلاب استان قم که با راهنمایی‌ها و حمایت‌هایشان اجرای این پژوهش را میسر کردند، کمال سپاس و قدردانی به‌عمل می‌آید.

ساعت در روز نیز از نتایج استفاده از پمپ دور متغیر در تصفیه‌خانه آب قم بوده است. در این پژوهش محدودیت‌هایی همچون کم بودن تعداد درایوهای تصفیه‌خانه سبب شد که راندمان پمپ‌ها در حالت حداکثر قرار نگیرد. اگر همه پمپ‌های شستشو دارای درایو باشد، آنگاه راندمان عملکرد پمپ در حالت حداکثر قرار گرفته و صرفه‌جویی در مصرف برق نیز بیشتر از مقدار گفته شده خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایجی که استفاده از پمپ‌های دور متغیر در شستشوی معکوس فیلترهای تند ماسه‌ای به همراه دارد عبارت‌اند از:

۱- کاهش دوران بلوغ فیلتر:

همانطور که گفته شد ۹۰ درصد از ذرات عبوری از یک فیلتر خوب بهره‌برداری شده می‌تواند متعلق به دوران بلوغ باشد. با کاهش دوران بلوغ فیلتر از طریق شستشوی نوین و صحیح فیلترهای تصفیه‌خانه‌های آب، می‌توان در ارتقای کیفیت آب آشامیدن جامعه نقش مؤثری را ایفا کرد.

References

- ABB, 2013, *Application guide NO.2 using variable speed drives (VSDs) in pump applications*, 1st Ed., Andrademax, Zurich.
- Amburgey, J.E., 2004, "Optimization of the extended terminal subfluidization wash (ETSW) filter backwashing procedure", *Water Research*, 39(11), 314-330.
- Amburgey, J.E., Amirtharajah, A., Brouckaert, B.M. & Spivey, N.C., 2003, "An enhanced backwashing technique for improved filter ripening", *J. Am. Water Works Assoc*, 95 (12), 81-94.

- Amirtharajah, A. & Wetstein, D.P., 1980, "Initial degradation of effluent quality during filtration", *Am. Water Works Assoc.*, 72 (10), 518-524.
- Bhargava, D.S. & Ojha, C.S.P., 1989, "Theoretical analysis of backwash time in rapid sand filters", *Water Research*, 23(5), 581-587.
- Bucklin, K., Amirtharajah, A. & Cranston, K.O., 1988, *The characteristics of initial effluent quality and its implications for the filter to waste procedure*, 1st Ed., American Water Works Association Research Foundation, Denver.
- Cleasby, J.L., Dharmarajah, A.H., Sindt, G.L. & Baumann, E.R., 1989, *Design and operation guidelines for optimization of the high-rate filtration process: Plant survey results*, 1st Ed., American Water Works Association Research Foundation, Denver.
- Cleasby, J.L., Sindt, G.L., Watson, D.A. & Baumann, E.R., 1992, *Design and operation guidelines for optimization of highrate filtration process: Plant demonstration studies*, 1st Ed., American Water Works Association Research Foundation, Denver.
- Colton, J.F., Hillis, P. & Fitzpatrick, C.S.B., 1996, "Filter backwash and start-up strategies for enhanced particulate removal", *Water Research*, 30 (10), 2502-2507.
- Cranston, K.O. & Amirtharajah, A., 1987, "Improving the initial quality of a dual-media filter by coagulants in the backwash", *J. Am. Water Works Assoc.*, 79 (12), 50-63.
- Fazeli, M., 2009, *Pumps and pumping station design*, 1st Ed., Abbaspour, Tehran. (In Persian)
- Huck, P.M., Finch, G.R., Hruday, S.E., Pepler, M.S., Amirtharajah, A., Bower, E.J., Albritton, W.L. & Gammie, L., 1998, *Design of biological processes for organics control*, 1st Ed., American Water Works Association Research Foundation, Denver.
- Iran National Standard, 2007, *Guidelines for quality control in water treatment plants*, No. 318. (In Persian)
- Logsdon, G.S., Hess, A.F., Chipps, M.J. & Rachwal, A.J., 2002, *Filter maintenance and operations guidance manual*, 1st Ed., American Water Works Association Research Foundation, Denver.
- McGlohorn, G., 2003, *Filter assessment manual*, 1st Ed., South Carolina Department of Health and Environmental Control (DHEC), Columbia.
- Mehrabadi, R. A., 2005, *Coagulation and flocculation in water treatment*, 1st Ed., Abbaspour University, Tehran. (In Persian)
- Mehrabadi, R. A., Razeghi, N., Turabian, A. & Mobedi, I., 2004, "Effect of primary filter ripening period on efficiency of Giardia cyst removal and present a method for improving", *Journal of Environmental Studies (JES)*, 30(33), 61-68. (In Persian)
- Mehrabadi, R. A., Razeghi, N., Turabian, A. & Mobedi, I., 2004, "Need to review national standard output water turbidity from water treatment plant", *Journal of Environmental Studies (JES)*, 30(35), 61-68. (In Persian)
- Qasim, S.R., Motley, E.M. & Zhu, G., 2000, *Water works engineering: Planning, design and operation*, 1st Ed., Prentice Hall, New Jersey.
- Susumu, K., 2000, *Integrated design and operation of water treatment facilities*, 2nd Ed., Wiley, New York.
- Taebi, A. & Chamani, M.R., 2006, *Water distribution systems*, 2nd Ed., Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Persian)
- United States Environmental Protection Agency, 1998, *Optimizing water treatment plant performance using the composite correction program*, 1st Ed., USEPA.