2017, Vol.3, No.2, Pages 55 to 62
Journal of Water and Sustainable Development

سال سوم، شماره ۲، اسفند ۱۳۹۵، صفحات ۵۵ تا ۶۲
نشریه آب و توسعه پایدار

ارزیابی عملکرد هیدروسیکلون‌های مختلف در حذف ماسه از آب چاه (مطالعه‌ی آزمایشگاهی)

علی دهنوی[۱*]، ناصر عادل‌پور[۲]، سید محمدسعید موسوی سوداگر[۳]

۱- استادیار مهندسی محیط زیست، گروه آب و بازیافت پساب، دانشگاه اصفهان.
۲- کارشناس مهندسی آب و فاضلاب، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی اصفهان.
۳- کارشناس مهندسی مکانیک، شرکت آب و فاضلاب مشهد.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: dehnavi115@gmail.com)
تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۹
تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۸

چکیده

در این مقاله، ضمن بررسی میزان ماسه‌دهی سه چاه سطح شهر مشهد در زمان‌های مختلف یک روزکاری، از نتایج آن‌ها در بررسی و بهینه‌سازی هیدروسیکلون‌های مورد آزمایش استفاده شده است. برای این منظور ۱۸ هیدروسیکلون مختلف بر اساس طراحی آزمایش با روش تاگوچی و بر اساس متغیرهای تأثیرگذار طراحی و آزمایش گردید. این متغیرها شامل قطر ورودی، قطر سرریز، قطر ته‌ریز، قطر بدنه‌ی هیدروسیکلون، ارتفاع بخش استوانه‌ای، ارتفاع کل و نیز ارتفاع دیافراگم بودند. برای بهینه‌سازی، از غلظت حداکثری مشاهده شده در نمونه‌های اخذ شده از چاه‌های سطح شهر معادل ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد. نتایج هیدروسیکلون بهینه در مقیاس آزمایشگاهی در دو تکرار نشان داد که راندمان جرمی حذف جامدات، بالغ بر ۱/۱±۹۷/۲ درصد بوده است. در این شرایط، نسبت قطر ورودی و قطر سرریز به قطر هیدروسیکلون مشابه و معادل ۰/۲۲۵ و قطر ته‌ریز به آن معادل ۰/۱۵ تعیین شد. هم‌چنین نسبت ارتفاع بخش استوانه‌ای و ارتفاع دیافراگم به ارتفاع کل هیدروسیکلون نیز به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۰۸ تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: هیدروسیکلون، ماسه‌دهی چاه، حذف ماسه از آب، روش تاگوچی.

Performance Investigation of Different Hydro-cyclones in Sand Removal from Water Wells: A Laboratory Study

A. dehnavi[1*], N. Adelpour[2], S.M.S. Mosavi Sodagar[3]

1- Assistant Professor of Environmental Engineering, Water Treatment and Reuse Group, University of Isfahan, Iran. 2- B.Sc. of Water and wastewater Engineering, Isfahan High Education and Research Institute, Iran. 3- B.Sc. of Fluid Mechanical Engineering, Mashhad Water and Wastewater Company, Iran.

*(Corresponding Author Email: dehnavi115@gmail.com)
Received: 19-1-2016
Accepted: 29-8-2016

Abstract

This study investigates the amount of suspended solid particles in three drinking water wells, conducted several times per day in the city of Mashhad. The results have also been used for the review and optimization of tested hydro-cyclones. For this purpose, 18 different hydro-cyclones, based on the experimental design process of the Taguchi method, were designed and the affecting factors were investigated. These factors include inlet diameter, overflow diameter, apex diameter, body diameter of the hydro-cyclone, the cylindrical height, and the total height of the hydro-cyclone. For the optimization process, the maximum concentration observed within all samples from the Mashhad wells, equating to 100 mg per liter was used. The results of the laboratory study, for two repeats, showed that in optimum conditions, the mass removal efficiency of the suspended solids was up to 97.2 ± 1.1 percent. In these circumstances, the ratio of inlet and overflow diameter size to the hydro-cyclone diameter size was similar and equivalent to 0.225, and the apex diameter size ratio to the hydro-cyclone diameter size was 0.15. Also, the ratio of cylindrical and overflow height to the total height of the hydro-cyclone were 0.12 and 0.08 respectively.

Keywords: Hydro-cyclone, sand in water well, sand separation from water, Taguchi method.

DOI: 10.22067/jwsd.v3i2.53134

مقدمه

وارد شدن رسوبات‌ریزدانه به درون چاه را اصطلاحاً ماسه‌دهی چاه گویند. ماسه‌دهی چاه پدیده‌ای است که در خلال آن، جامدات معلق داخل آب چاه که عمدتاً ماسه و سیلت هستند، به علل مختلفی افزایش می‌یابند. ماسه‌دهی ممکن است به علل مختلفی از قبیل سوراخ شدن لوله‌ی جدار، خوردگی و تخریب اسکرین و غیره ایجاد گردد (آذری، ۱۳۷۵). این موضوع می‌تواند علاوه بر ایجاد مشکلات در نحوه‌ی استفاده از آب (برای مثال در شرب یا استفاده در روش‌های آبیاری تحت فشار)، بر میزان آبدهی چاه نیز تأثیر منفی بگذارد (عباس نوین‌پور، ۱۳۹۱). این پدیده اغلب سبب فرسایش پمپ‌ها، کاهش ظرفیت انتقال خطوط لوله و کانال‌ها، سایش و انسداد روزنه‌ی آب‌پاش‌ها درسیستم‌های آبیاری تحت فشار و غیره می‌گردد. علاوه براین و در صورت استفاده از آب چاه‌های ماسه‌ده برای شرب، مشکلات مختلفی از جمله شکایت مصرف‌کنندگان و تجمع و رسوب ماسه در تاسیسات آبرسانی ایجاد خواهد شد.

برای حذف دانه‌های شن و ماسه و جامدات معلق سنگین‌تر از آب، بدون توجه به نوع منبع آب، از روش‌های مختلفی از جمله ته‌نشینی ثقلی (دانه‌گیری)، فیلترهای میکرو و کارتریج، دستگاه‌های سانتریفوژ و نیز هیدروسیکلون استفاده می‌شود. روش ته‌نشینی ثقلی بسته به دبی مورد نیاز و قطر دانه‌های ذرات، معمولاً به سطح نسبتاً زیادی نیاز دارد و برای حذف ماسه از آب چاه که معمولاً ابعادی میکرونی دارند، مناسب نیست (چالکش امیری، ۱۳۸۸؛ پیکری و مهربانی، ۱۳۸۷). استفاده از فیلترهای میکرو و کارتریج نیز به مکان مناسب و انرژی برق نیاز دارد و بهره‌برداری از آن هزینه‌بر بوده و به همین دلیل معمولاً به عنوان پیش‌تصفیه برای سیستم نانو و اسموز معکوس بکار برده می‌شود (چالکش امیری، ۱۳۸۸؛ پیکری و مهربانی، ۱۳۸۷). روش دیگری که می‌توان برای حذف جامدات معلق از آب و خصوصاً در جداسازی ماسه‌ها از آب استفاده نمود، دستگاه‌های مبتنی بر نیروی سانتریفوژ هستند. این دستگاه‌ها حتی در مقیاس خانگی نیز وجود دارند و استفاده از آن‌ها توأم با صرف انرژی و نیز لزوم نگهداری است و برای حذف ماسه از آب چاه‌ها در مقیاس بزرگ توصیه نمی‌شوند (Environmental Services، ۲۰۱۰). وسیله‌ی دیگری که برای حذف جامدات معلق از سیالات از جمله آب، کاربرد دارد، هیدروسیکلون است. هر چند کارایی این وسیله نیز بر مبنای نیروی گریز از مرکز است، اما سادگی و هزینه‌ی کم و انعطاف پذیری بالا، آن را در قیاس با دستگاه‌های سانتریفوژ، برتری داده و آن را به صورت گسترده‌ای کابردی نموده است به طوری‌که در حال حاضر، یکی از روش‌های کاربردی برای حذف ذرات ماسه از آب، استفاده از هیدروسیکلون است. شرکت‌های بسیاری که در این زمینه فعالیت می‌کنند، با ساخت انواع هیدروسیکلون، کارایی آن‌ها را برای حذف شن و ماسه از آب تضمین می‌نمایند، اما اطلاعاتی نیز از ابعاد بهینه‌ی آن‌ها در دسترس عموم قرار نمی‌دهند (John Deere water company، ۲۰۱۴؛ Netafim company، ۲۰۱۴).

هیدروسیکلون یك جداکننده‌ی ثابت است که بر مبنای جدایش ناشی از گریز از مرکز در جریان گردابی که در بدنه‌ی مخروطی-استوانه‌ای هیدروسیکلون تولید شده، استوار است (رحمانی, ۱۳۸۴). در این جداکننده، زمانِ ماند در حد چند ثانیه است که در مقایسه با چندین دقیقه در روش‌های ثقلی قابل توجه است (Hsu و همکاران، ۲۰۱۱). فاکتورهای مختلفی باعث تغییر عملکرد هیدروسیکلون‌ها می‌شوند که قطر ورودی، قطر سرریز، قطر ته‌ریز، قطر استوانه، ارتفاع استوانه، ارتفاع بخش مخروطی و طول دیافراگم از مهمترین آن‌هاست. تأثیر این فاکتورها بر عملکرد هیدروسیکلون‌ها توسط محققین مختلفی بررسی شده منتها معمولاً این بررسی‌ها همه‌جانبه نبوده است. برای مثال Silva و همکارانش در تحقیقی که در سال ۲۰۱۲ انجام دادند، قطر ورودی را تابعی از قطر بدنه‌ی هیدروسیکلون، دبی و نیز راندمان مورد نیاز برای جداسازی دانسته و اعلام کرده‌اند که این قطر باید به‌عنوان یک متغیر مورد بررسی قرار گیرد (Silva و همکارانش، ۲۰۱۲). این محققین حتی اشاره نموده‌اند که این قطر در تعیین حد یا قطر جدایش نیز نقش قابل توجهی دارد و لذا انتخاب مناسب آن، از اهیمت زیادی برخوردار است. در تحقیق دیگری نسبت قطر سرریز به قطر بدنه‌ی هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفته و مقدار ۰/۳۵به عنوان مقدار مناسب تعیین شده است (Arterburn، ۱۹۸۲). این در حالی است که این نسبت در هیدروسیکلون‌های کاربردی با زاویه‌ی کم، متفاوت و توسط محققین مختلف بین ۰/۲تا ۰/۵گزارش شده است (رحمانی, ۱۳۸۴). هم‌چنین درتحقیق دیگری، نقش قطر سرریز و طولی از آن که وارد بدنه‌ی هیدروسیکلون گردیده (ارتفاع دیافراگم)، بسیار با اهمیت ذکر شده است (Arterburn، ۱۹۸۲). در تحقیقی که توسط Martínez و همکارانش انجام و نتایجش در سال ۲۰۰۸ منتشر شد، بررسی جامعی بر روی طول بخشی از دیافراگم که در هیدروسیکلون فرو رفته، به عمل آمده است و در نهایت طول بهینه معادل ۰/۱ ارتفاع کل هیدروسیکلون برای کاهش جریان مدارکوتاه تعیین شده است (Martínez و همکاران، ۲۰۰۸).

از آنجایی‌که بررسی‌های صورت گرفته توسط سایر محققین همه‌جانبه نبوده و عمدتاً شامل تأثیر هم‌زمان همه‌ی متغیرها نیست، لذا در طرح حاضر بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌ها در

مقیاس آزمایشگاهی به عنوان هدف اصلی با لحاظ بررسی تأثیر همه‌ی متغیرهای موثر به صورت هم‌زمان و با کمک طراحی آزمایش با روش تاگوچی مد نظر قرار گرفت. روش تاگوچی که در این تحقیق به نحو مناسبی از آن بهره گرفته شد، یک روش طراحی آزمایش و آنالیز آماری است که در زمینه‌های مختلفی از جمله مهندسی محیط زیست و تصفیه آب و فاضلاب به کار رفته است (Silva و همکاران، ۲۰۱۴؛ Ozyonar، ۲۰۱۶).

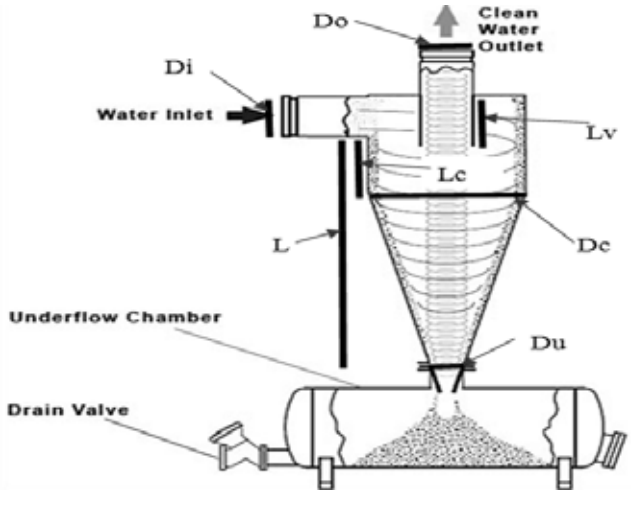
مواد و روش‌ها

- فاکتورهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها:

فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق شامل موارد درج شده در جدول (۱) و نیز شکل (۱) بوده است. برای هریک از این فاکتورها سه سطح بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و نسبت‌های هندسی هیدروسیکلون‌های تحقیقاتی و تجاری مد نظر قرار گرفت که در جدول آورده شده است.

جدول ۱- فاکتورهای مورد بررسی و سطوح انتخابی آن‌ها

نام متغیر	علامت مشخصه در شکل (۱)	علامت مشخصه در تحلیل	مشخصات سطوح (میلی‌متر)		
			سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
قطر ورودی به هیدروسیکلون	Di	A	۶	۹	۱۴
قطر سرریز	Do	B	۶	۹	۱۴
قطر ته‌ریز	Du	C	۶	۹	۱۴
قطر هیدروسیکلون در بخش استوانه‌ایی	Dc	D	۴۰	۵۰	۶۰
ارتفاع بخش استوانه‌ای هیدروسیکلون	Lc	E	۲۵	۳۰	۳۵
کل ارتفاع هیدروسیکلون (بخش استوانه و قیفی‌شکل)	L	F	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰
طولی از دیافراگم که در بدنه هیدروسیکلون فرو رفته است	Lv	G	۱۵	۲۰	۲۵



شکل ۱- نمایش شماتیک متغیرهای مختلف طرح بر تصویر یک هیدروسیکلون

- طراحی آزمایش:

از طراحی آزمایش برای کاهش تعداد آزمایشات، استفاده شد. در طرح حاضر و در صورت بکارگیری تعداد سطوح متغیرهای اشاره شده و با فرض یک تکرار برای هر آزمایش، بالغ بر۲۱۸۷ (تعداد متغیرها تعداد سطح×تعداد تکرار) آزمایش برای بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌ها تحت یک غلظت مورد نیاز است. این تعداد آزمایش بسیار زیاد بوده و در صورت لزوم انجام، هزینه‌های زیادی را بر طرح تحمیل می‌نمود. برای کاهش تعداد آزمایشات، از طراحی آزمایش با روش تاگوچی استفاده شد. بر اساس این روش و با توجه به فاکتورهای موردنظر و نیز سطوح آن‌ها، یک ماتریس متعامد M-18، طراحی و انتخاب گردید. این ماتریس با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4 که مبتنی بر کاربرد روش تاگوچی است تعریف شد (Roy، ۲۰۰۱). از این ماتریس که در جدول (۲) نشان داده شده و هر ردیف آن مترادف با یک آزمایش است، مشخص می‌گردد که تنها ۱۸ آزمایش بجای ۲۱۸۷ آزمایش، نیاز است. قابل ذکر این‌که در این تحقیق هر آزمایش با دو تکرار انجام شد.

جدول ۲- ماتریس متعامد M-18 به همراه فاکتورها، سطوح آن‌ها و ترکیب آزمایشات

ترکیب آزمایشات	فاکتورها و سطوح آن‌ها						
	Di	Do	Du	Dc	Lc	L	Lv
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۱	۲	۲	۳	۳
۵	۲	۲	۲	۳	۳	۱	۱
۶	۲	۳	۳	۱	۱	۲	۲
۷	۳	۱	۲	۱	۳	۲	۳
۸	۳	۲	۳	۲	۱	۳	۱
۹	۳	۳	۱	۳	۲	۱	۲
۱۰	۱	۱	۳	۳	۲	۲	۱
۱۱	۱	۲	۱	۱	۳	۳	۲
۱۲	۱	۳	۲	۲	۱	۱	۳
۱۳	۲	۱	۲	۳	۱	۳	۲
۱۴	۲	۲	۳	۱	۲	۱	۳
۱۵	۲	۳	۱	۲	۳	۲	۱
۱۶	۳	۱	۳	۲	۳	۱	۲
۱۷	۳	۲	۱	۳	۱	۲	۳
۱۸	۳	۳	۲	۱	۲	۳	۱

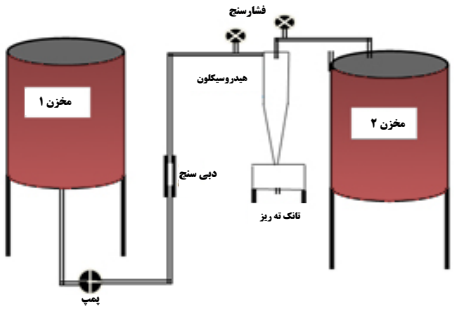
- مشخصات هیدروسیکلون‌های ۱۸ گانه:

هیدروسیکلون‌های ۱۸ گانه در مقیاس آزمایشگاهی بر اساس جدول (۲) از جنس استیل ساخته شدند. دبی ورودی به هیدروسیکلون‌ها معادل ۱۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در این حالت و با توجه به سه سطح در قطر ورودی، سرعت آب ورودی به هیدروسیکلون‌ها به ترتیب از قطر بزرگ به کوچک حدود ۱/۶۲، ۳/۹۳ و ۸/۸۵ متر برثانیه بود. با توجه به این‌که سرعت نقش به‌سزایی در راندمان هیدروسیکلون دارد، سعی شد که حداقل دو سرعت کاربردی (حدود ۱/۶ و ۴ متر برثانیه) و نیز یک سرعت بیشتر (حدود ۹ متر بر ثانیه) برای ارزیابی مدنظر قرار گیرد.

- طراحی و ساخت پایلوت مورد استفاده:

برای ارزیابی عملکرد هیدروسیکلون‌های ساخته شده و تعیین مشخصات هیدروسیکلون بهینه، پایلوت مناسبی طراحی، ساخته و در محل آمایشگاه بر اساس شرایط عملیاتی چاه‌های سطح شهر مشهد، مورد استفاده قرار گرفت. پایلوت موردنظر شامل قسمت‌های مختلفی از جمله مخازن خوراک اولیه و سرریز نهایی، مخزن جمع‌آوری ته‌ریز، پمپ‌های ایجاد فشار و تغذیه‌ی خوراک، هیدروسیکلون‌های مختلف بر مبنای طراحی آزمایش، فشارسنج و سایر متعلقات مورد نیاز بود. در شکل (۲)، نمایی شماتیک از پایلوت مورد استفاده نشان داده شده است. در این پایلوت، غلظت مشخصی از جامدات (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) در مخزن شماره ۱ ایجاد و توسط پمپ به هیدروسیکلون وارد می‌شد. این غلظت بر اساس غلظت حداکثری مشاهده شده در سه چاه سطح شهر مشهد انتخاب گردید. دانه‌بندی مورد نظر نیز مبتنی بر دانه‌بندی مشاهده شده در این چاه‌ها بود. در مسیر عبور جریان از مخزن شماره ۱، یک روتامتر قرار گرفته بود که به‌وسیله‌ی آن دبی ورودی به هیدروسیکلون در مقدار مناسب تثبیت می‌گردید. هم‌چنین قبل و بعد از هیدروسیکلون از فشارسنج برای تعیین افت‌هد هیدروسیکلون استفاده شد. سیال داخل مخزن شماره ۱ توسط بلوئر در طول انجام آزمایش به خوبی مخلوط می‌شد تا یک مخلوط همگن از ماسه‌ها ایجاد شود. با توجه به حجم مخزن و با توجه به

دبی مصرفی، انجام هر تست حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه طول می‌کشید. هر آزمایش با دو تکرار انجام شد و بعد از انجام هر آزمایش، ماسه‌های جمع‌آوری شده در مخزن ته‌ریز هیدروسیکلون‌ها جمع آوری و بر روی آن آزمایشTSS بر اساس دستورالعمل مبتنی بر روش‌های استاندارد آب و فاضلاب، انجام گردید (APHA، ۲۰۰۵).



شکل ۱- تصویر شماتیک پایلوت مورد استفاده

- چگونگی آنالیز نتایج:

برای آنالیز نتایج بر مبنای ترکیبات ارائه شده‌ی مبتنی بر طراحی آزمایش و ماتریس متعامد M-18، از نرم افزار Qualitek-4 و آنالیز سیگنال به نویز و آنالیز واریانس استفاده گردید (Roy، ۲۰۰۱). از آنجایی‌که در این تحقیق از شاخص راندمان جرمی حذف جامدات به‌عنوان شاخص ارزیابی عملکرد هیدروسیکلون استفاده شد، شاخص کیفیت "بزرگتر- بهتر" در آنالیز استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس مجموع دو تکرار آزمایش‌ها (تکرار ۱ و ۲) در جدول (۳) و نسبت‌های هندسی مناسب در شرایط بهینه‌ی فاکتورها براساس آزمایشات ۱۸گانه‌ی هیدروسیکلون‌های آزمایشگاهی در جدول (۴)، ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس تحلیل تکرارهای ۱ و ۲

فاکتور	درجات آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	مجموع خالص	درصد تأثیر
A	۲	۱/۳۶	۰/۶۸	۶۶/۸	۱/۳۴	۲۷/۶
B	۲	۱/۶۲	۰/۸۱	۷۹/۸	۱/۶۰	۳۳/۰
C	۲	۰/۹۳	۰/۴۶	۴۵/۵	۰/۹۱	۱۸/۷
D	۲	۰/۴۶	۰/۲۳	۲۲/۷	۰/۴۴	۹/۱
E	۲	۰/۱۸	۰/۰۹	۹/۱	۰/۱۶	۳/۴
F	۲	۰/۲۰	۰/۱	۹/۸	۰/۱۸	۳/۷
G	۲	۰/۰۷	۰/۰۴	۳/۵	۰/۰۵	۱/۰
سایر/خطا	۳	۰/۰۳	۰/۰۱	-	-	۳/۶

جدول ۴- نسبت‌های هندسی و راندمان جرمی در شرایط بهینه

نسبت‌های هندسی	مقدار در این تحقیق (در شرایط بهینه)	مقدار در طرح‌های رایج (رحمانی، ۱۳۸۴)		راندمان جرمی (٪) (در شرایط بهینه)	
		حداقل	حداکثر	پیش‌بینی شده	اندازه‌گیری شده
Di/Dc	۰/۲۲۵	۰/۱۳۳	۰/۲۸		
Do/Dc	۰/۲۲۵	۰/۲	۰/۳۴		
Du/Dc	۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۲۸	۹۸/۳	۹۷/۲±۱/۱
Lc/L	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۲۱۴		
Lv/L	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱		

از ارقام درج شده در ستون آخر جدول ۳ (درصد تأثیر) مشخص می‌گردد که سه فاکتور اول شامل قطر ورودی، قطر سرریز و قطر ته‌ریز که البته به نوعی زاویه‌ی بخش مخروطی هیدروسیکلون را نیز نمایندگی می‌کند، بیشترین نقش را در عملکرد هیدروسیکلون یا همان راندمان جداسازی جرمی ذرات داشته‌اند. به عبارت دیگر، تأثیر این سه فاکتور در نتیجه نهایی در مجموع بالغ بر

۸۰ درصد بوده است. علاوه براین و در سطح اطمینان ۹۰ درصد، فاکتور ارتفاع دیافراگم (G) قابل صرفنظر کردن بوده و در سه سطح تعریف شده، تغییر معناداری در نتایج ایجاد نکرده است. سایر فاکتورها با وجود نقش ناچیز در نتیجه‌ی نهایی، همچنان از اهمیت برخوردار بوده و در سطح اطمینان یاد شده، قابل صرفنظر کردن نیستند.

پس از تعیین سطوح بهینه، نسبت‌های هندسی هیدروسیکلون بهینه محاسبه گردید (جدول ۴) و با هدف قیاس این نسبت‌ها با نسبت‌های رایج در هیدروسیکلون‌های معروف، نسبت‌های رایج نیز در دو دامنه‌ی حداقل و حداکثر در آن جدول درج شد. همچنین در جدول (۵)، نسبت‌های موردنظر در طرح‌های خاص نیز برای مقایسه آورده شده است (رحمانی، ۱۳۸۴). نسبت‌های تعیین شده در تحقیق حاضر و مقایسه‌ی آن‌ها با نسبت‌های مشابه در طرح‌های رایج بیانگر این موضوع است که در تمام موارد، نسبت‌های تعیین شده کمتر از حداکثر و بیشتر از حداقل مقدار نسبت‌های مشابه در طرح‌های رایج بوده که در نوع خود شایان توجه است. احتمالاً علت اصلی این موضوع، غلظت جامدات و نیز توزیع ذرات متفاوت در طرح‌های مختلف و طرح حاضر بوده باشد. علاوه براین، بسته بودن ته‌ریز در طرح حاضر و باز بودن آن در طرح‌های رایج نیز می‌تواند یکی از دلایل این موضوع باشد.

بررسی نسبت‌های هندسی تعیین شده در تحقیق حاضر حاکی است که ارتفاع بخش استوانه‌ای معادل ۰/۱۲ ارتفاع کل هیدروسیکلون می‌باشد. برخی از هیدروسیکلون‌های با قطر کوچک، دارای قسمت‌های استوانه‌ای بسیار کوتاه و یا بدون آن هستند (رحمانی، ۱۳۸۴). این در حالی است که ممکن است حتی بخش استوانه‌ای حذف گردد، ولی بخش مخروطی قابل حذف نیست. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که اصولاً حذف بخش استوانه‌ای امکانپذیر نبوده و اتفاقاً این ارتفاع در تحقیق حاضر حدود ۷۰ درصد نسبت به حداقل ارتفاع در طرح‌های رایج، بیشتر است. چنانچه از ارقام درج شده در جدول (۵) مشخص است، در اغلب موارد این نسبت کمتر از ۰/۱ بوده است؛ منتها باید توجه داشت که احتمالا توزیع ذرات و غلظت جامدات نیز می‌تواند در تعیین نسبت مناسب آن اهمیت داشته باشد. بررسی بیشتر نشان داد که Bradley مقدار ۰/۵Dc را برای ارتفاع بخش استوانه‌ای معرفی کرده و این در حالی است که در طرح پیشنهادی Demco، مقدار ۰/۵۵Dc برای این ارتفاع ارائه شده که تفاوت ناچیزی با مقدار ارائه شده توسط Bradley دارد (Coelho و Medronho، ۲۰۰۱). در طرح حاضر این مقدار حدود ۲۵ درصد بیش از مقادیر ارائه شده توسط این محققین تعیین گردید.

جدول ۵ - خلاصه‌ای از طرح های معروف و نسبت‌های هندسی آن‌ها (با زاویه‌ی کم در بخش مخروطی) (رحمانی، ۱۳۸۴)

نوع هیدروسیکلون	D_c (میلی‌متر)	D_i/D_c	D_o/D_c	Lc/L	زاویه مخروط (درجه)
طرح Ritema	۷۵	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۰۸	۲۰
طرح Bradley	۳۸	۰/۱۳۳	۰/۲	۰/۰۴۸	۹
طرح Mozley	۲۲	۰/۱۵۴	۰/۲۴۱	۰/۰۷۷	۶
طرح Mozley	۴۴	۰/۱۶۰	۰/۲۵	۰/۰۷۴	۶
طرح Demco	۱۰۲	۰/۲۴۴	۰/۳۱۳	۰/۲۱۴	۲۰

بررسی‌های قبلی در خصوص ارتفاع کل هیدروسیکلون نیز نشان می‌دهد که بازدهی جدایش باید با بدنه‌ی روی هم‌رفته‌ی طولانی‌تر، افزایش یابد (رحمانی، ۱۳۸۴). Ritema ارتفاعی برابر با 5Dc را برای کل ارتفاع شامل بخش استوانه‌ای و بخش مخروطی و البته برای زوایای بخش مخروطی کمتر از ۳۰ درجه پیشنهاد کرده است (رحمانی، ۱۳۸۴). در طرح حاضر، زاویه‌ی بخش مخروطی در شرایط بهینه کمتر از ۱۰ درجه بوده است و ارتفاع کل نیز حداقل ۲۰ درصد بیشتر از مقادیر اعلام شده توسط Ritema تعیین شد که احتمالاً علت آن، اختلاف در غلظت جامدات معلق مورد استفاده و نیز بسته بودن ته‌ریز در طرح حاضربوده است.

علاوه بر بررسی فاکتورهای قبلی، ارتفاع دیافراگم نیز به عنوان یکی از متغیرهای تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در مقدمه ذکر شد، براساس نتایج تحقیقات Martínez و همکارانش (۲۰۰۸)، نسبت ارتفاع بهینه‌ی دیافراگم به کل ارتفاع هیدروسیکلون در دبی‌های مختلف، معادل ۰/۱ تعیین شده است. در تحقیق حاضر این نسبت ۰/۰۸ تعیین گردید که بسیار به مقدار ارائه شده توسط آن‌ها نزدیک است. بررسی بیشتر در خصوص این فاکتور نشان داد که تغییرات جزیی آن در دامنه‌ی سه سطح مورد بررسی و در سطح اطمینان ۹۰ درصد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر راندمان جرمی حذف نداشته است.

از آنجایی‌که هدف از بهینه‌سازی انجام شده، تعیین سطوح بهینه و تعیین راندمان در این سطوح بود، مقدار راندمان در این سطوح نیز توسط برنامه‌ی Qualitek-4 پیش‌بینی گردید.

این رقم که معادل ۹۸/۳ درصد بود در جدول (۴) درج گردیده است. این مقدار با ساخت هیدروسیکلون بهینه و انجام آزمایشات تائیدی مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفت. با آزمایش هیدروسیکلون بهینه در دو تکرار مختلف، راندمان آن در شرایط بهینه بالغ بر ۱/۱±۹۷/۲ درصد تعیین گردید که بسیار به مقدار پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی (۹۸/۳ درصد) نزدیک بود. این موضوع در کنار نتایج دو آزمایش تائیدی دیگر نشان داد که استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، علیرغم محدودیت‌های آن در بررسی اثرات متقابل فاکتورها، در طرح حاضر قابل اعتماد بوده و نتایج پیش‌بینی شده توسط آن منطبق با نتایج واقعی بوده است. این موضوع نشان داد که در بررسی‌های انجام شده، اثرات متقابل مهمی وجود نداشته است. از آنجایی که لازم بود از نتایج این تحقیق برای ساخت هیدروسیکلون بهینه‌ی نهایی و نصب و آزمایش آن بر روی یکی از چاه‌های آب شرب شهر مشهد استفاده گردد، وجود یا عدم وجود اثرات متقابل از اهمیت زیادی برخوردار بود که با آزمایش هیدروسیکلون بهینه و آزمایشات تائیدی دیگر، مشخص گردید که اثرات متقابل مهمی وجود نداشته است.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در طرح حاضر تمام متغیرهای طراحی مؤثر بر عملکرد هیدروسیکلون‌ها در جداسازی ذرات معلق از آب، مورد بررسی قرار گرفت. با این هدف و بر اساس طراحی آزمایش با روش تاگوچی،۱۸ هیدروسیکلون مختلف در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و برای غلظت جامدات معلق معادل ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت نسبت‌های هندسی در شرایط بهینه تعیین گردید. در این شرایط، نسبت قطر ورودی و قطر سرریز به قطر هیدروسیکلون، معادل ۰/۲۲۵ و قطر ته‌ریز به آن معادل ۰/۱۵ تعیین شد. هم چنین نسبت ارتفاع بخش استوانه‌ای و ارتفاع دیافراگم به ارتفاع کل هیدروسیکلون نیز به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۰۸ تعیین گردید. علاوه بر این، نتایج پیشی‌بینی راندمان در شرایط بهینه توسط روش تاگوچی حاکی از راندمانی بالغ بر ۹۸/۳ درصد بود. بر اساس شرایط بهینه و با هدف تایید و نیز صحت‌سنجی نتایج پیش‌بینی شده، هیدروسیکلون بهینه ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در دو تکرار مشابه نشان داد که در شرایط بهینه، راندمان جرمی حذف جامدات معلق بالغ بر۱/۱±۹۷/۲ درصد بوده که بسیار به نتایج پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی نزدیک بود. از آنجایی‌که نسبت‌های ارائه شده در این تحقیق با نسبت‌های هیدروسیکلون‌های رایج که عمدتاً در معدن‌کاری و برای غلظت‌های جرمی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، متفاوت بود، پیشنهاد می‌گردد این تحقیق با غلظت‌های مختلف جرمی و نیز توزیع ذرات مختلف نیز مورد بررسی قرار گیرد و نسبت‌های مناسبی برای استفاده در ماسه‌زدایی از آب چاه‌های شرب و کشاورزی تعیین گردد. هم‌چنین توصیه می‌گردد که با تعیین ثابت‌های افزایش مقیاس، هیدروسیکلون با مقیاس مناسب نیز ساخته و مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان وظیفه‌ی خود می‌دانند که از مدیران محترم شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد و نیز مسئولان محترم دفتر تحقیقات آن شرکت بابت همکاری موثر در انجام این طرح که در راستای قرارداد شماره ۹۳۱۱۸۹۴۷مورخ ۹۳/۸/۱۸ شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد با دانشگاه اصفهان صورت گرفت، تقدیر و تشکر نماید.

منابع

آذری، م.ص. ۱۳۷۵. ارزیابی عملکرد ژئوتکستایل در افزایش راندمان و جلوگیری از ماسه‌دهی چاه‌های آب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس. تهران.

پیکری، م. و مهربانی، ا. ۱۳۸۷. مبانی تصفیه آب. چاپ سوم. انتشارات ارکان دانش. اصفهان.

چالکش امیری، م. ۱۳۸۸. اصول تصفیه آب. چاپ هفتم. انتشارات ارکان دانش. اصفهان.

رحمانی، ع.ا. ۱۳۸۴. هیدروسیکلون‌ها. انتشارات سایه گستر. قزوین.

عباس‌نوین‌پور، ا. ۱۳۹۱. ارائه راهکارهای مناسب عملی برای حل مشکل ماسه‌دهی چاه‌ها (مطالعه موردی: چاه‌های دشت سلماس). گزارش طرح تحقیقاتی. گروه زمین‌شناسی. دانشکده علوم دانشگاه ارومیه. ارومیه.

APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA). 21st Edition.

Arterburn R.A. 1982. The sizing and selection of hydrocyclones. Design and Installation of Comminution Circuits, 1: 597-607.

Coelho M.A.Z. and Medronho R.A. 2001. A model for

hydrman-hydrocyclone-manual.pdf).

Ozyonar F. 2016. Optimization of operational parameters of electrocoagulation process for real textile wastewater treatment using Taguchi experimental design method. Desalination and Water Treatment, 57(6): 2389–2399.

Roy R.K. 2001. Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement. John Wiley & Sons. New York.

Silva M.B., Carneiro L.M., Silva J.P.A., dos Santos Oliveira I., Izário Filho H.J. and de Oliveira Almeida C.R. 2014. An Application of the Taguchi Method (Robust Design) to Environmental Engineering: Evaluating Advanced Oxidative Processes in Polyester-Resin Wastewater Treatment. American Journal of Analytical Chemistry, 5: 828-837.

Silva A.C., Silva E.M.S. and Matos J.D.V. 2012. A modification in Plitt´s for hydrocyclones simulation. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 13(3): 753-758.

performance prediction of hydrocyclones. Chemical Engineering Journal, 84(1): 7-14.

Environmental Services. 2010. Environmental Fact sheet: Sand and sediment in water supply wells. Technical report. New Hampshire Department Environmental Services. United States.

Hsu C.Y., Wu S.J. and Wu R.M. 2011. Particles Separation and Tracks in a Hydrocyclone. Tamkang Journal of Science and Engineering, 14(1): 65-70.

John Deere Water Company. 2014. F1000-Hydrocyclone Sand Separator. Technical report. (Available from http://www.powerplastics.com/downloads/F1000-Hydrocyclone-sand-separator_0811_5000.pdf)

Martínez L.F., Lavín A.G., Mahamud M.M. and Bueno J.L. 2008. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47(2): 192-199.

Netafim Company. 2014. Hydrocyclone sand separators. Technical report. (Available from http://www.netafimusa.com/files/literature/agriculture/filters/