

بهینه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون با هدف حذف ماسه از آب چاه (مطالعه موردی: چاه‌های آب شرب شهر مشهد)

علی دهنوی^۱، ثمانه توکلی امینیان^۲، مسعود روحبخش معیاری^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) dehnavi115@yahoo.com
۲- کارشناس شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد

(دریافت ۹۵/۲/۱۵ پذیرش ۹۵/۵/۲۷)

چکیده

از هیدروسیکلون برای جداسازی جامدات معلق سنگین‌تر از آب از جمله ماسه و سیلت استفاده می‌شود. در این تحقیق پس از شناسایی تمام فاکتورهای مؤثر بر عملکرد هیدروسیکلون‌ها، نسبت به بهینه‌سازی متغیرهای تأثیرگذار با روش طراحی آزمایش تاگوچی اقدام شد. با هدف بهینه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون در حذف ماسه از آب، ۱۸ هیدروسیکلون بر اساس متغیرهای تأثیرگذار شامل قطر ورودی، قطر سرریز، قطر ته‌ریز، قطر بدنه هیدروسیکلون، ارتفاع بخش استوانه‌ای، ارتفاع کل و نیز ارتفاع دیافراگم، طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. برای بهینه‌سازی این هیدروسیکلون‌ها، از دو غلظت حداقلی و حداکثری جامدات معلق (شن و ماسه) اخذ شده از نمونه‌های چاه‌های سطح شهر مشهد به ترتیب معادل ۲۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و با توزیع مشاهده شده، استفاده شد. نتایج آنالیزهای آماری نشان داد که در شرایط بهینه، نسبت قطر ورودی و قطر سرریز به قطر هیدروسیکلون، مشابه و معادل ۰/۲۲۵ و قطر ته‌ریز به آن معادل ۰/۱۵ است. همچنین نسبت ارتفاع بخش استوانه‌ای و ارتفاع دیافراگم به ارتفاع کل هیدروسیکلون نیز به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۰۸ تعیین شد. علاوه بر این، راندمان جرمی حذف ماسه‌ها در شرایط بهینه و بسته به تکرارهای مختلف، بین ۹۵/۹ تا ۹۸/۴ درصد پیش‌بینی شد. این در حالی است که با ساخت هیدروسیکلون بهینه و آزمایش آن در سه تکرار، این رقم بالغ ۹۷/۲±۱/۱ درصد بود. مقایسه نتایج راندمان جرمی پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی نسبت به مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده که با ساخت هیدروسیکلون بهینه انجام شد، نشان داد که نتایج مورد نظر بسیار به هم نزدیک هستند. نسبت‌های هندسی تعیین شده در این تحقیق نیز عموماً در محدوده بین حداقل و حداکثر نسبت‌های ارائه شده در هیدروسیکلون‌های به‌کار رفته در معدن کاری است. از این نسبت‌ها و پس از افزایش مقیاس، می‌توان در ساخت هیدروسیکلون‌های خاص ماسه‌زدایی از آب استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: عملکرد هیدروسیکلون، نسبت‌های هندسی هیدروسیکلون، حذف ماسه، بهینه‌سازی هیدروسیکلون

۱- مقدمه

پدیده ماسه‌دهی چاه در حال حاضر بخش‌های مختلفی از کشور را در بر گرفته است که عمدتاً شامل شمال و شمال غرب کشور می‌شود (Abbas Novinpour 2012, 2013). در شهر مشهد نیز این پدیده در چاه‌های سطح شهر که برای شرب استفاده می‌شود مشاهده شده است (Mashhad Water & Wastewater Co. 2012). برای حذف دانه‌های شن و ماسه و جامدات معلق سنگین‌تر از آب، بدون توجه به نوع منبع آب، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود که یکی از آن‌ها استفاده از هیدروسیکلون است (Hsu et al. 2011). شرکت‌های بسیاری با ساخت انواع هیدروسیکلون‌ها، کارایی آن‌ها را برای حذف شن و ماسه از آب تضمین می‌کنند اما اطلاعاتی نیز از ابعاد بهینه آن‌ها در دسترس عموم قرار نمی‌دهند (NETAFIM Company 2015; John Deere Water Company 2016). لذا تعیین شرایط بهینه فاکتورهای مؤثر بر عملکرد هیدروسیکلون‌ها در حذف ماسه از آب و بومی‌سازی آن در کشور از اهمیت زیادی برخوردار است. 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 (Rahmani 2006). در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، با شبیه‌سازی هیدروسیکلون‌ها قطر ورودی، تابعی از قطر بدنه

پدیده ماسه‌دهی چاه در حال حاضر بخش‌های مختلفی از کشور را در بر گرفته است که عمدتاً شامل شمال و شمال غرب کشور می‌شود (Abbas Novinpour 2012, 2013). در شهر مشهد نیز این پدیده در چاه‌های سطح شهر که برای شرب استفاده می‌شود مشاهده شده است (Mashhad Water & Wastewater Co. 2012). برای حذف دانه‌های شن و ماسه و جامدات معلق سنگین‌تر از آب، بدون توجه به نوع منبع آب، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود که یکی از آن‌ها استفاده از هیدروسیکلون است (Hsu et al. 2011). شرکت‌های بسیاری با ساخت انواع هیدروسیکلون‌ها، کارایی آن‌ها را برای حذف شن و ماسه از آب تضمین می‌کنند اما اطلاعاتی نیز

نسبت‌های هندسی طراحی سیکلون‌های هوا، نشان داد که با افزایش سرعت ورودی از ۸ به ۱۲، ۱۶ و ۱۸ متر بر ثانیه، راندمان کلی جداسازی جامدات معلق به همان ترتیب از ۵۱/۲ درصد به ۵۶/۳، ۵۷/۷ و ۶۳/۱ درصد افزایش یافته است (Rahmani 2000). وی همچنین در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۳ با استفاده از همین هیدروسیکلون، چگونگی حذف ذرات ریز ناشی از عملیات ساب سنگ در کارخانه سنگبری گرانتیت را مورد بررسی قرار داده است (Rahmani 2003). نتایج این تحقیق نیز حاکی است که بر اساس سرعت حدود ۱ تا ۱/۵ متر بر ثانیه در لوله ورودی به هیدروسیکلون، حدود ۹۹ درصد از ذرات بالای ۲۱۰ میکرون و ۳۳ درصد از ذرات بین ۵ تا ۴۴ میکرون با دانسیته ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب توسط این هیدروسیکلون حذف شده‌اند (Rahmani 2003).

از آنجایی که تحقیقات مختلف قبلی انجام شده اولاً بیشتر در کانه‌آرایی و معدن‌کاری بوده و ثانیاً همه‌جانبه نبوده و عمدتاً شامل تأثیر هم‌زمان همه متغیرها نیست، لذا در طرح حاضر، ضمن در نظر گرفتن همه فاکتورهای مؤثر بر عملکرد یک هیدروسیکلون، بررسی و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها جهت استفاده در طرح‌های حذف ماسه از آب به‌عنوان هدف اصلی تحقیق مطرح شد. با این هدف، بررسی تأثیر همه متغیرهای مؤثر به‌صورت هم‌زمان و با کمک طراحی آزمایش با روش تاگوچی مدنظر قرار گرفت. در نهایت نیز با ساخت هیدروسیکلون بهینه، عملکرد آن در شرایط واقعی مورد بررسی قرار گرفت و با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی مقایسه شد. 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 (Reyani et al. 2015; Silva et al. 2014; Mirahsani et al. 2015).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- فاکتورهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها

فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق شامل موارد درج شده در جدول ۲ بوده است. این فاکتورها بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای گسترده انتخاب شده به نحوی که شامل تمام متغیرهای تأثیرگذار بر عملکرد یک هیدروسیکلون می‌شود. در مراجع مختلف و از جمله، فاکتورهای مؤثر بر عملکرد یک هیدروسیکلون و نیز نسبت‌های

هیدروسیکلون، دبی و نیز راندمان مورد نیاز برای جداسازی معرفی شد. این قطر باید به‌عنوان یک متغیر مورد بررسی قرار گیرد (Silva et al. 2012). در پژوهشی در سال ۱۹۸۲ در خصوص انتخاب اندازه مناسب هیدروسیکلون‌ها، نسبت قطر سرریز به قطر بدنه هیدروسیکلون مورد بررسی قرار گرفت و مقدار این نسبت معادل ۰/۳۵ تعیین نمود (Arterburn 1982). این در حالی است که نسبت قطر سرریز به قطر بدنه هیدروسیکلون در هیدروسیکلون‌های کاربردی و با زاویه‌ی کم در بخش کیفی شکل، متفاوت و توسط محققان مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۵ گزارش شده است (Rahmani 2006).

علاوه بر این، در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ در خصوص تعیین ارتفاع بهینه دیافراگم، بررسی جامعی بر روی طول بخشی از دیافراگم که در هیدروسیکلون فرو رفته به عمل آمده و ارتفاع بهینه معادل ۰/۱ ارتفاع کل هیدروسیکلون تعیین شد (Martinez et al. 2008).

در پژوهش دیگری نسبت مناسب ارتفاع استوانه به قطر آن ۰/۵ معرفی شده و در طرح پیشنهادی دیگری مقدار ۰/۵۵ برای این نسبت ارائه شده که تفاوت چندانی ندارد (Coelho & Medronho 2001).

در پژوهش دیگر ارتفاعی برابر با ۵ برابر قطر استوانه برای زوایای کمتر از ۳۰ درجه برای کل ارتفاع شامل بخش استوانه‌ای و بخش مخروطی پیشنهاد شده است (Rahmani 2006). در طرح‌ها و مدل‌های مختلف مرسوم که در کانه‌آرایی و معدن‌کاری کاربرد دارند، طول کل هیدروسیکلون شامل بخش استوانه‌ای و بخش مخروطی به‌صورت متغیر و بین ۲/۷ تا ۷/۷ برابر قطر هیدروسیکلون گزارش شده است (Rahmani 2006). در جدول ۱، نسبت‌های برخی از هیدروسیکلون‌های طرح‌های رایج که البته عمدتاً در کانه‌آرایی و معدن‌کاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند درج شده است.

علاوه بر متغیرهای طراحی و سازه‌ای، در تحقیقی در خصوص کاربرد هیدروسیکلون در جداسازی ذرات در سال ۲۰۰۰ اشاره شده که با افزایش غلظت در خوراک ورودی، قطر جدایش افزایش یافته و در نتیجه راندمان جرمی هیدروسیکلون کاهش خواهد یافت (Cilliers 2000). رحمانی در سال ۲۰۰۰ در تحقیقی با عنوان طراحی و ساخت سیکلون جهت جداسازی ذرات از آب و پس از طراحی و ساخت یک هیدروسیکلون با قطر ۱۰ سانتی‌متر بر اساس

جدول ۱- خلاصه‌ای از طرح‌های معروف و نسبت‌های هندسی آن‌ها (با زاویه‌ی کم در بخش مخروطی) (Rahmani 2006)

Table 1. Summary of well-established cyclone types and their geometric ratios (with a low angle at the cone section) (Rahmani 2006)

Hydrocyclon type	Dc (mm)	Geometric ratio					Cone angle (degree)
		Di/Dc	Do/Dc	Lc/Dc	L/Dc	Lv/L	
Ritema	75	0.28	0.34	0.40	5	0.08	20
Bradley	38	0.133	0.20	0.33	6.85	10.048	9
Mozley	22	0.154	0.241	0.57	7.43	0.077	6
Mozley	44	0.160	0.25	0.57	7.71	0.074	6
Demco	102	0.244	0.313	0.833	3.9	0.214	20

جدول ۲- فاکتورهای مورد بررسی و سطوح انتخابی آن‌ها

Table 2. Factors examined and their selected levels

Factors	Symbol	Levels value (mm)		
		Level 1	Level 2	Level 3
Inlet diameter	Di	6	9	14
Overflow diameter	Do	6	9	14
Underflow diameter	Du	6	9	14
Cylindrical diameter	Dc	40	50	60
Cylindrical height	Lc	25	30	35
Hydrocyclon height	L	150	200	250
Vortex finder height	Lv	15	20	25

۲-۲- طراحی آزمایش و مشخصات هیدروسیکلون‌های مورد آزمایش

از طراحی آزمایش برای کاهش تعداد آزمایش‌ها استفاده شد. در طرح حاضر با وجود سه سطح برای هر یک از متغیرهای اشاره شده و با فرض یک تکرار برای هر آزمایش، بالغ بر ۲۱۸۷ آزمایش برای بررسی عملکرد هیدروسیکلون‌ها برای فقط یک غلظت، مورد نیاز بود. این درحالی است که در این طرح، دو غلظت حداقل و حداکثری به عنوان غلظت خوراک مدنظر بود. در این صورت، استفاده از طرح‌های فاکتوریل کامل علاوه بر زمان زیاد برای انجام طرح، هزینه‌های زیادی نیز بر طرح تحمیل می‌کرد. برای کاهش تعداد آزمایش‌ها، از طراحی آزمایش با روش تاگوچی به عنوان یکی از روش‌های فاکتوریل جزئی استفاده شد. بر اساس این روش و با توجه به فاکتورهای مورد نظر و نیز سطوح آن‌ها، یک ماتریس متعامد M-18، طراحی و انتخاب شد. این ماتریس با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4 که مبتنی بر کاربرد روش تاگوچی است تعریف شد (Roy 2001). با به کارگیری این ماتریس با ۱۸ ردیف، مشخص شد که تنها ۱۸ آزمایش به جای ۲۱۸۷ آزمایش به ازای هر غلظت نیاز است. قابل ذکر این‌که، در این تحقیق، آزمایش غلظت حداقل با یک تکرار و غلظت حداکثر با دو تکرار انجام شد.

مختلف هیدروسیکلون‌های رایج درج شده است که همگی بر مبنای نسبتی از قطر هیدروسیکلون بیان شده‌اند (Rahmani 2006). برای هر یک از این فاکتورها سه سطح بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و نسبت‌های هندسی هیدروسیکلون‌های تحقیقاتی و تجاری در نظر گرفته شد که در جدول ۲ آورده شده است. سطوح مورد نظر در تحقیق حاضر به نحوی انتخاب شد تا نسبت‌های هندسی مختلف ایجاد شده در ترکیبات مختلف ممکن، از حداقل‌های طرح‌های رایج موجود کمتر و از مقادیر حداکثر آن‌ها نیز بیشتر باشد تا دامنه‌ی وسیع‌تری از نسبت‌های هندسی طرح‌های مرسوم و تجاری موجود را شامل شود. از آنجایی که دبی ورودی به تمام هیدروسیکلون‌ها ثابت و معادل ۱۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد، لذا با توجه به سه سطح در قطر ورودی (مطابق جدول ۲)، سرعت آب ورودی به هیدروسیکلون‌ها به ترتیب از قطر بزرگ به کوچک، ۱/۶۲، ۳/۹۳ و ۸/۸۵ متر بر ثانیه بود. با توجه به این‌که این سرعت نقش به‌سزایی در راندمان و عملکرد هیدروسیکلون دارد، سعی شد که حداقل دو سرعت کاربردی (حدود ۱/۶ و ۴ متر بر ثانیه) و نیز یک سرعت بیشتر (حدود ۹ متر بر ثانیه)، برای ارزیابی مدنظر قرار گیرد که این موضوع نیز در انتخاب سطوح مورد نظر در تحقیق حاضر مؤثر بوده است.

در مخزن ته‌ریز هیدروسیکلون‌ها، جمع‌آوری و پس از خشک کردن بر اساس نحوه‌ی آزمایش TSS بر اساس دستورالعمل مبتنی بر روش‌های استاندارد آب و فاضلاب، وزن آن مشخص مشخص می‌شد (WEF & APHA 2005). در نهایت نیز راندمان حذف بر اساس وزن کل جامدات معلق ورودی و نیز وزن کل جامدات معلق جدا شده، محاسبه و استفاده شد.

۲-۴- دانه‌بندی و غلظت‌های حداقلی و حداکثری مورد استفاده در آزمایش‌ها

دانه‌بندی مورد استفاده در آزمایش‌ها بر مبنای دانه‌بندی مشاهده شده در محدوده طرح (سه چاه شهر مشهد) انتخاب شد. به این منظور از میانگین سه دانه‌بندی مشاهده‌ای در ماسه‌های استخراج شده از آب سه چاه که البته دارای دانه‌بندی بسیار نزدیک به هم بودند، استفاده شد. همچنین از غلظت‌های ۲۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان غلظت‌های حداقلی و حداکثری خوراک ورودی بر اساس منحنی دانه‌بندی مورد نظر استفاده شد.

۲-۵- چگونگی آنالیز نتایج

آنالیز نتایج بر مبنای ترکیبات ارائه شده مبتنی بر طراحی آزمایش و ماتریس متعامد M-18، با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4 و کاربرد آنالیز سیگنال به نویز و آنالیز واریانس انجام شد (Roy 2001). از آنجایی که در این تحقیق از شاخص راندمان جرمی حذف جامدات به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد هیدروسیکلون استفاده شد، شاخص کیفیت "بزرگتر-بهرتر" در آنالیز استفاده شد. همچنین، شاخص کیفیت "کوچکتر-بهرتر" در آنالیز افت هد به کار رفت.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۳، نتایج خام آزمایش غلظت‌های حداقلی و حداکثری برای ۱۰ ترکیب اولی آزمایش‌ها بر مبنای ماتریس متعامد M-18، به عنوان نمونه درج شده است. بررسی آماری بین نتایج کامل دو گروه شامل غلظت حداقلی و حداکثری با آزمون t مستقل، نشان داد که نتایج این دو گروه تفاوت معنی‌داری با هم ندارند ($p\text{-value}=0/250$) و لذا غلظت در محدوده تعریف شده در این تحقیق، تأثیری بر راندمان حذف نداشته است. در ادامه و با استفاده

هیدروسیکلون‌های ۱۸ گانه نیز از جنس استیل ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳- پایلوت مورد استفاده

برای ارزیابی عملکرد هیدروسیکلون‌های ساخته شده و تعیین مشخصات هیدروسیکلون بهینه، پایلوت مناسبی طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. پایلوت مورد نظر شامل قسمت‌های مختلفی از جمله مخازن خوراک اولیه و سرریز نهایی (از جنس ورق گالوانیزه)، مخزن جمع‌آوری ته‌ریز (از جنس استیل)، پمپ‌های ایجاد فشار و تغذیه خوراک، هیدروسیکلون‌های مختلف بر مبنای طرح آزمایش، فشارسنج و سایر متعلقات بود. در شکل ۱، نمایی شماتیک از پایلوت مورد استفاده، نشان داده شده است. در این پایلوت، غلظت مشخصی از جامدات (در دو حالت حداقل و حداکثر) در مخزن ۱ ایجاد و توسط دو پمپ موازی مدل Marquis با محدوده دبی ۵ تا ۴۰ لیتر در دقیقه به یکی از هیدروسیکلون‌های ساخته شده مبتنی بر ماتریس متعامد M-18 وارد می‌شد. در مسیر عبور جریان، یک روتامتر قرار گرفته بود که به وسیله آن دبی ورودی به هیدروسیکلون در مقدار مناسب تثبیت می‌شد. همچنین، قبل و بعد از هیدروسیکلون از فشارسنج مدل AT تایوانی با دقت ۰/۰۵ بار برای تعیین افت هد هیدروسیکلون‌ها استفاده شد. سیال داخل مخزن ۱ توسط بلوتر 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 عبوری، انجام هر آزمایش حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه به طول می‌انجامید. بعد از انجام هر آزمایش، ماسه‌های جمع‌آوری شده

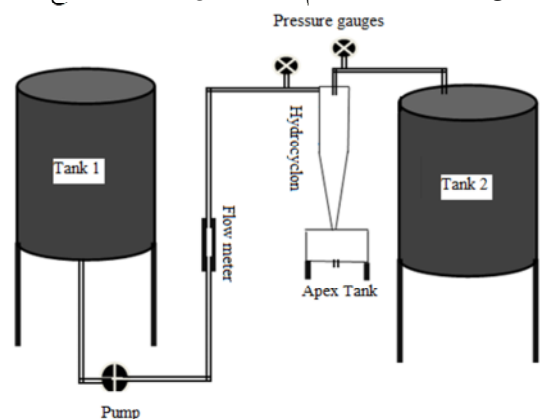


Fig. 1. Schematic view of the pilot hydrocyclone
شکل ۱- تصویر شماتیک پایلوت مورد استفاده

جدول ۳- نتایج خام آزمایش ۱۰ ترکیب اول به تفکیک غلظت و تکرار

Table 3. Raw data from the first set of 10 compounds in terms of concentration and repetition

Experiment compounds	TSS (20 mg/L)	TSS (100 mg/L)	
		Test 1	Test 2
1	86.6	87.2	93.2
2	84.5	80.3	92.6
3	84.5	79.6	91.6
4	90.8	89.9	94.4
5	86.5	85.9	93
6	84.1	79.6	91.6
7	82.7	76.4	90.1
8	83.9	77	91.1
9	80.6	76.2	90
10	86.6	87.1	93.1

جدول ۴- برخی از شاخص‌های آماری آنالیز نتایج آزمایش‌های ۱۸ گانه به تفکیک غلظت (بر حسب میلی‌گرم در لیتر) و تکرار

Table 4. Statistical indices obtained from the statistical analysis of the 18 experiments

Factor	Degrees of freedom	TSS (20 mg/L)		TSS (100 mg/L) (two tests)		All the tests together (TSS=20, TSS=100 mg/L)	
		V*	PI*	V*	PI*	V*	PI*
Di	2	43.6	25.1	0.68	27.4	0.6	27.3
Do	2	53.5	31	0.8	33.1	0.7	33.1
Du	2	38	21.8	0.7	18.7	0.4	20.1
Dc	2	8	3.9	0.2	9.1	0.2	7.6
Lc	2	5.8	2.6**	0.1	3.4	0.08	3.1
L	2	16.3	8.8	0.1	3.7	0.1	5.2
Lv	2	0.5	0**	0.07	1.1**	0.02	0.3**
Other/Error	2	1.5	6.8	0.03	3.5	0.01	3.3
Expected efficiency (%)	-	95.9		98.4		97.7	

*V=variance and PI= percent influenced

سطح تعریف شده، تغییر معنی‌داری در نتایج ایجاد نکرده است و لذا انتخاب هر یک از سطوح تعریف شده آن در طرح حاضر، قابل قبول بوده است. نکته قابل توجه دیگر، این‌که با تغییر غلظت در محدوده غلظت‌های به کار رفته در این طرح، درصد‌های مورد نظر به ازای هر فاکتور، تغییر چندانی نداشته و راندمان مورد نظر در شرایط بهینه نیز بین ۹۵/۹ تا ۹۸/۴ درصد تغییر داشته است. این در حالی است که آنالیز سه تکرار با هم، راندمان حذفی بالغ بر ۹۷/۷ درصد را برای شرایط بهینه پیشنهاد نموده که برای بررسی آن لازم بود با تعیین سطوح بهینه، هیدروسیکلون مورد نظر ساخته و آزمایش شود. با تعیین سطوح بهینه هر یک از فاکتورهای مورد بررسی، نسبت‌های هندسی هیدروسیکلون بهینه محاسبه شد که در جدول ۵ درج شده است. با ساخت هیدروسیکلون بهینه و آزمایش آن در سه تکرار مختلف، راندمان آن در شرایط بهینه بالغ بر $1/1 \pm 97/2$ درصد تعیین شد که بسیار به مقدار پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی نزدیک بود. این موضوع نشان داد که استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، علیرغم محدودیت‌های آن در

از روش تاگوچی، آنالیزهای لازم به تفکیک هر گروه و نیز همه تکرارها به صورت یک جا (با توجه به عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین گروه‌ها) انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. همچنین در جدول ۵، نسبت‌های هندسی بهینه بر اساس آنالیز نتایج آزمایش‌های ۱۸ گانه هیدروسیکلون‌ها ارائه شده است. از ارقام درج شده در ستون‌های مربوط به درصد تأثیر جدول ۴ مشخص می‌شود که در تمام حالات، سه متغیر اول شامل قطر ورودی، قطر سرریز و قطر ته‌ریز که البته به نوعی زاویه بخش مخروطی هیدروسیکلون را نیز نمایندگی می‌کند، سهمی بین ۷۷/۹ تا ۸۰/۵ درصد از نتیجه نهایی را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین این سه فاکتور به عنوان مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر نتیجه نهایی که در اینجا راندمان جرمی حذف ذرات شن و ماسه بوده، ایفای نقش کرده‌اند. جالب توجه این‌که، درصد تأثیر این سه فاکتور در سه حالت آنالیز شده بسیار به هم نزدیک بوده و تغییر در شرایط بهره‌برداری، تأثیری در این سهم نداشته است. همچنین در سطح اطمینان ۹۵ درصد، فاکتور ارتفاع دیافراگم (Lv) قابل صرف نظر کردن بوده و در سه

جدول ۵- نسبت‌های هندسی بهینه در طرح حاضر و راندمان جرمی در شرایط بهینه

Table 5. Optimized geometric ratios and the mass removal efficiency under optimal conditions

Geometric ratio	Value in this study	Value in literature		Mass efficiency (%)	
		Min	Max	Expected value	Measured value
Di/Dc	0.225	0.133	0.28	97.7	97.2±1.1
Do/Dc	0.225	0.2	0.34		
Du/Dc	0.15	0.04	0.28		
Lc/L	0.12	0.048	0.214		
Lv/L	0.08	0.1	0.1		

است حتی بخش استوانه‌ای حذف شود ولی بخش مخروطی قابل حذف نیست (Rahmani 2006). نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که اصولاً حذف بخش استوانه‌ای امکانپذیر نبوده و اتفاقاً این ارتفاع در تحقیق حاضر ۲/۵ برابر حداقل نسبت موردنظر در طرح‌های رایج بوده است. همچنین، نسبت این ارتفاع به قطر هیدروسیکلون در تحقیق حاضر حداقل ۲۵ درصد بیش از مقادیر ارائه شده توسط برادلی و دمکو بوده است. آن‌ها به ترتیب مقادیر $0.5/Dc$ و $0.55/Dc$ را برای این نسبت پیشنهاد کرده‌اند (Coelho & Medronho 2001).

بررسی در خصوص ارتفاع کل هیدروسیکلون نیز به‌عنوان یکی از فاکتورهای دیگر مورد سنجش، نشان می‌دهد که بازدهی جدایش باید با بدنه روی هم‌رفته طولانی‌تر، افزایش یابد (Rahmani 2006). ریتما ارتفاعی برابر با $5Dc$ را برای زوایای کمتر از ۳۰ درجه برای کل ارتفاع شامل بخش استوانه‌ای و بخش مخروطی پیشنهاد نموده است (Rahmani 2006). در طرح حاضر، زاویه مخروطی در شرایط بهینه، کمتر از ۱۰ درجه و ارتفاع کل نیز حداقل ۲۰ درصد بیشتر از مقادیر اعلام شده توسط ریتما بوده است که احتمالاً، علت آن را باید در اختلاف بین غلظت جامدات معلق مورد استفاده و نیز بسته بودن یا باز بودن ته‌ریز جستجو کرد. با بررسی نسبت ارتفاع دیافراگم به کل ارتفاع هیدروسیکلون در سه سطح، مشخص شد که در شرایط بهینه، این نسبت 0.08 بوده است که به مقدار ارائه شده توسط مارتینز نزدیک است. مارتینز و همکاران بر اساس تحقیقات جامع خود، نسبت 0.1 را پیشنهاد دادند (Martinez et al. 2008). بررسی بیشتر نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵ درصد، تغییرات این فاکتور در دامنه سه سطح مورد بررسی در این تحقیق، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر راندمان حذف نداشته و لذا از هر یک از سطوح می‌توان در ساخت هیدروسیکلون بهینه استفاده نمود.

بررسی اثرات متقابل فاکتورها، در طرح حاضر قابل اعتماد بوده و نتایج پیش‌بینی شده توسط آن، منطبق با نتایج واقعی بوده است و لذا اثرات متقابل مهمی وجود نداشته است. در بررسی بیشتر مشخص شد که راندمان حذف در بدترین شرایط در بین ترکیبات مختلف، معادل $73/3$ درصد خواهد بود که حدود ۲۴ درصد کمتر از راندمان در شرایط بهینه است که همچنان راندمان مناسبی به شمار می‌رود. در پژوهشی در سال ۲۰۱۳، از هیدروسیکلونی با ته‌ریز باز در حذف جامدات معلق استفاده شده است. هیدروسیکلون مورد استفاده تنها قادر بود حدود $47/3$ درصد از جامدات معلق قابل ته‌نشینی را جدا نماید و لذا از این هیدروسیکلون به‌عنوان یک روش پیش تصفیه استفاده شد (Al-Fatlawi & Al-Hashimi 2013).

برای قیاس نسبت‌های هندسی برای شرایط بهینه‌ای که در این تحقیق تعیین شد با نسبت‌های رایج در هیدروسیکلون‌های معروف، مقادیر موردنظر برای این هیدروسیکلون‌ها در دو دامنه حداقل و حداکثر نیز در جدول ۵ آورده شده است. قیاس نسبت‌های تعیین شده در تحقیق حاضر با نسبت‌های حداقلی و حداکثری در هیدروسیکلون‌های رایج نشان می‌دهد که در تمام موارد، نسبت‌های تعیین شده در این تحقیق کمتر از حداکثر و بیشتر از حداقل ارائه شده در این طرح‌ها بوده که در نوع خود شایان توجه است. شاید علت اصلی این موضوع، غلظت جامدات و نیز توزیع ذرات متفاوت در طرح‌های مختلف و در طرح حاضر بوده باشد. علاوه بر این، ممکن است بسته بودن ته‌ریز در طرح حاضر و باز بودن ته‌ریز در نمونه‌های به کاررفته در طرح‌های کانه‌آرایی، علت تفاوت بوده باشد. بررسی بیشتر نشان داد که در شرایط بهینه، ارتفاع بخش استوانه‌ای معادل 0.12 ارتفاع کل هیدروسیکلون بوده است. برخی از هیدروسیکلون‌های با قطر کوچک، دارای قسمت‌های استوانه‌ای بسیار کوتاه و یا بدون آن می‌باشند. این در حالی است که ممکن

نحوی که با تغییر سطح قطر ورودی از ۶ به ۹ و ۱۴ میلی‌متر (به ترتیب معادل سرعت‌های ۸/۸۵، ۳/۹۳ و ۱/۶۲ متر بر ثانیه) و طی شرایط بهینه برای سایر فاکتورها، پیش‌بینی شد که بیشترین راندمان حذف در سرعت ۳/۹۳ متر بر ثانیه (معادل قطر ورودی ۹ میلی‌متر) به وقوع پیوسته و کاهش یا افزایش سرعت باعث کاهش راندمان حذف خواهد شد (شکل ۳). عدد رینولدز متناظر با این سرعت‌ها به ترتیب ۴۵۹۵۰، ۳۰۶۱۰ و ۱۹۶۳۰ بوده است. این نتایج هر چند با کلیت نتایج یانگ و همکاران در خصوص محدوده مناسب رینولدز در ایجاد حداکثر راندمان حذف در تطابق است ولی با یافته‌های رحمانی که در آن با افزایش سرعت از ۸ تا ۱۸ متر بر ثانیه، راندمان جرمی حذف از ۵۱/۲ به ۶۳/۱ درصد افزایش یافته، در تضاد آشکار است (Rahmani 2000; Yang et al. 2010). علت این تناقض را احتمالاً باید در دیگر متغیرهای تأثیرگذار و از جمله توزیع ذرات و نیز مشخصات هندسی هیدروسیکلون مورد آزمایش جستجو نمود زیرا در تحقیق دیگر رحمانی، نتایج متفاوتی ارائه شده است. در تحقیق دیگر ایشان در سال ۲۰۰۳، که از همان هیدروسیکلون و با دانه‌بندی و ذرات متفاوت استفاده شده، ۹۹ درصد از ذرات در سرعت حدود ۱ تا ۱/۵ متر بر ثانیه حذف شده‌اند و لذا می‌توان نتیجه گرفت که در تحقیق اخیر، افزایش سرعت به بیش از ۱/۵ متر بر ثانیه و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، حداقل باعث افزایش بیشتر راندمان نخواهد شد (Rahmani 2003).

علاوه بر یافته‌های فوق، در شکل ۲، تغییرات راندمان مورد نظر با

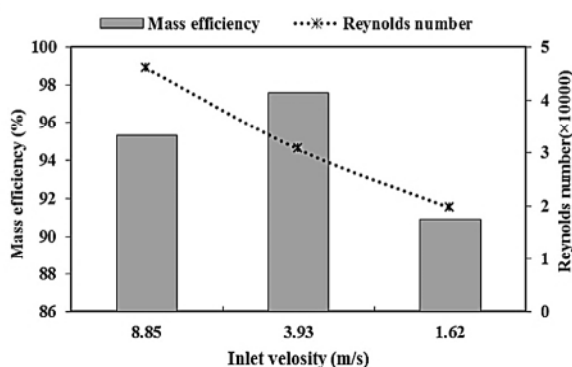


Fig. 3. Predicted variations in efficiency and Reynolds number with variations in hydrocyclone inlet diameter to the under optimal conditions of other factors are optimal

شکل ۳- پیش‌بینی تغییرات راندمان و عدد رینولدز با تغییر سطح قطر ورودی به هیدروسیکلون در شرایط بهینه برای سایر فاکتورها

علاوه بر بررسی راندمان حذف جرمی ذرات و کنترل آن با ساخت و آزمایش هیدروسیکلون بهینه، چگونگی تغییرات راندمان با تغییرات سرعت ورودی، تغییرات عدد رینولدز و نیز تغییرات افت فشار در این هیدروسیکلون (هیدروسیکلون بهینه) مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش سرعت ورودی از ۲/۷۵ به ۳/۹۳ متر بر ثانیه (با تغییرات دبی از حدود ۱۰/۵ به ۱۵ لیتر در دقیقه)، راندمان حذف از حدود ۹۱ به حدود ۹۷/۲ درصد افزایش یافته و افزایش بیشتر سرعت تا ۵/۲۴ متر بر ثانیه (دبی ۲۰ لیتر بر دقیقه)، تغییر محسوسی بر افزایش راندمان حذف نداشته است (شکل ۲). این سرعت‌ها به ترتیب عدد رینولدزی معادل ۲۱۴۲۰، ۳۰۶۱۰ و ۴۰۸۱۰ را در ورودی به هیدروسیکلون ایجاد کردند. پژوهشی در سال ۲۰۱۰ نشان داد که کم بودن و یا زیاد بودن بیش از حد عدد رینولدز، باعث کاهش راندمان حذف خواهد شد (Yang et al. 2010). البته محدوده عدد رینولدز این محققان برای حداکثر راندمان حذف با هیدروسیکلون‌های مختلف آزمایش شده توسط آن‌ها، متفاوت و بین ۹۰۰۰۰ تا ۱۰۵۰۰۰ گزارش شده که قطعاً علاوه بر مشخصات هندسی هیدروسیکلون مورد استفاده، توزیع ذرات نیز در محدوده مناسب مورد نظر اثرگذار بوده است. در طرح حاضر، راندمان حذف از یک طرف در رینولدز بین ۳۰۶۱۰ تا ۴۰۸۱۰، تغییر محسوسی نکرده است و از طرف دیگر در این محدوده، بیشترین مقدار راندمان نیز به دست آمده است و کاهش عدد رینولدز به ۲۱۴۲۰، راندمانی حدود ۹۰ درصد را ایجاد نموده است. برای بررسی بیشتر این موضوع، از امکان پیش‌بینی روش آنالیز تاگوجی استفاده شد به

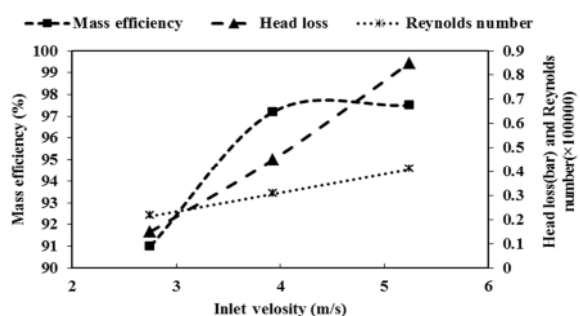


Fig. 2. Variations in efficiency, head loss, and Reynolds number with variations in velocity at the optimized hydrocyclone inlet

شکل ۲- تغییرات راندمان، افت هد و عدد رینولدز با تغییر سرعت در ورودی هیدروسیکلون بهینه

تعیین شد. همچنین نسبت ارتفاع بخش استوانه‌ای و ارتفاع دیافراگم به ارتفاع کل هیدروسیکلون نیز به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۰۸ تعیین شد. نتایج پیش‌بینی راندمان در شرایط بهینه و بر اساس سه تکرار آزمایشگاهی توسط روش تاگوچی، حاکی از راندمانی بالغ بر ۹۷/۷ درصد بود و این در حالی است که در چنین شرایطی، افت هد نیز بالغ بر ۰/۴ بار پیش‌بینی شد. بر اساس شرایط بهینه و با هدف تأیید و نیز صحت‌سنجی نتایج پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی، هیدروسیکلون بهینه ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در سه تکرار مشابه نشان داد که در شرایط بهینه، راندمان جرمی حذف جامدات معلق بالغ بر $1/1 \pm 97/2$ درصد بوده که بسیار به نتایج پیش‌بینی شده نزدیک است. از طرف دیگر، بررسی فشارهای ورودی و خروجی از این هیدروسیکلون نیز حاکی از افت هدی معادل $0/4 \pm 0/43$ بار بود. نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت‌های ارائه شده با نسبت‌های هیدروسیکلون‌های رایج که عمدتاً در معدن‌کاری و برای غلظت‌های جرمی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، متفاوت است. لذا پیشنهاد می‌شود که صحت‌سنجی این تحقیق با غلظت‌های مختلف جرمی و نیز توزیع ذرات مختلف مشاهده شده در چاه‌های تأمین آب، مورد بررسی بیشتر قرار گیرد و در صورت نیاز نسبت‌های مناسبی برای استفاده در ماسه‌زدایی از آب چاهای شرب و کشاورزی تحت شرایط مختلف بهره‌برداری تعیین شود. همچنین توصیه می‌شود که با تعیین ثابت‌های افزایش مقیاس، هیدروسیکلون با مقیاس مناسب نیز ساخته و مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

۵- قدردانی

نویسندگان وظیفه خود می‌دانند که از مدیران محترم شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد، مسئولان محترم دفتر تحقیقات آن شرکت و نیز ناظر محترم طرح جناب آقای مهندس موسوی بابت همکاری موثر در انجام این طرح که در راستای قرارداد شماره ۹۳۱۱۸۹۴۷ مورخ ۹۳/۸/۲۰ شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد با دانشگاه اصفهان صورت گرفت، قدردانی نماید.

افت هد نیز نشان داده شده است. چنانکه از این نمودار مشخص است متناسب با افزایش سرعت ورودی و نیز افزایش راندمان حذف، افت هد افزایش قابل ملاحظه‌ای نموده است. در شرایط بهینه، افت هد اندازه‌گیری شده در حدود $0/43$ بار بوده و با افزایش سرعت، مقدار آن به حدود $0/85$ بار رسیده و این در حالی است که در این بازه، راندمان حذف هیچ تغییر محسوسی نداشته است. در تحقیقی که نتایج آن در سال ۲۰۰۷ منتشر شد، بازه‌ی افت هد مناسب برای حذف جامدات معلق در یک هیدروسیکلون مورد استفاده به عنوان پیش‌تصفیه در سیستم آبیاری قطره‌ای را بین $0/1$ تا $0/3$ بار تعیین شد. افت هد ایجاد شده در این آزمایش‌ها نیز در بازه $0/1$ تا $0/6$ بار بوده است و بیشترین راندمان حذف حدود ۹۷ درصد در افت هد حدود $0/2$ بار گزارش شده است. در این تحقیق همچنین مشخص شده که افزایش بیش از حد افت هد، باعث کاهش راندمان شده است (Soccol et al. 2007). بررسی افت هد در تحقیق حاضر در ترکیبات مختلف و آنالیز با روش تاگوچی، نشان داد که در شرایط بهینه‌ی حذف ذرات، افت هد هیدروسیکلون بهینه بالغ بر $0/4$ بار خواهد بود. این موضوع نیز با آزمایش هیدروسیکلون مورد نظر در سه تکرار مختلف بررسی شد که افت هدی بالغ بر $0/4 \pm 0/43$ بار را نتیجه داد که اولاً بسیار به مقدار پیش‌بینی شده با روش آنالیز تاگوچی نزدیک بود و ثانیاً از نقطه نظر تأمین انرژی لازم، افت هد چندان بزرگی هم به شمار نمی‌رود و به ارقام تعیین شده توسط سوکول و همکاران هم نزدیک است.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در طرح حاضر تمام متغیرهای طراحی مؤثر بر عملکرد هیدروسیکلون‌ها برای جداسازی ذرات معلق (دانه‌های شن و ماسه) از آب مورد بررسی قرار گرفت. با این هدف و بر اساس طراحی آزمایش با روش تاگوچی، ۱۸ هیدروسیکلون مختلف ساخته و برای غلظت جامدات معلق معادل ۲۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت نسبت‌های هندسی در شرایط بهینه تعیین شد. در این شرایط، نسبت قطر ورودی و نیز قطر سرریز به قطر هیدروسیکلون معادل $0/225$ و قطر ته‌ریز به آن معادل $0/15$

References

- Abbas Novinpour, E., 2013, "Providing practical and appropriate ways to solve the problem of sand wells (Case study: Salmas plain wells)", Office of Vice Chancellor for Research and Technology, Urmia University. (In Persian)
- Abbas Novinpour, E., 2012, "Wells sand problem in the final part of Urmia plain", *Proc., Fifth National Conference on Earthquake*, PNU, Zanjan, Iran. (In Persian)
- Al-Fatlawi, A. H. W. & Al-Hashimi, O. A. H., 2000, "Improve water quality by cyclone separator as a pre-treatment technique", *International Journal of Chemical, Environmental and Biological Sciences*, 1(4), 576-583.
- Arterburn, R. A., 1982, "The sizing and selection of hydrocyclones", *Design and Installation of Comminution Circuits*, 1, 597-607.
- Cilliers, J., 2000, *Hydrocyclones for particle size separation*, Academic Press, Manchester, UK.
- Coelho, M. A. Z. & Medronho, R. A., 2001, "A model for performance prediction of hydrocyclones", *Chemical Engineering Journal*, 84(1), 7-14.
- Hsu, C.Y., Wu, S.J. & 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, 2016, "F1000-Hydrocyclone sand separator", John Deere water company, <<http://www.deere.com/Common/docs/Products/equipment/water/irrigation-and-water-management/filtration/f1000/datasheet-f1000.pdf>>(May 2016).
- Martínez, L. F., Lavín, A. G., Mahamud, M. M. & Bueno, J. L., 2008, "Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(2), 192-199.
- Mashhad Water and Wastewater Co., 2012, *Report for experimental and analytical evaluation in cyclones*, Mashhad, Iran. (In Persian)
- Mirahsani, A., Badiei, A., Shahbazi, A., Hasheminejad, H. & Sartaj, M., 2015, "Optimization of the adsorption of malachite green on the NH₂-SBA-15 nano-adsorbent using the Taguchi method by Qualitek-4 software an isotherm, kinetic, and thermodynamic study", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 25 No.6 (94), 10-19. (In Persian)
- NETAFIM Company., 2016, "Hydrocyclone sand separators", NETAFIM company, <<http://www.netafimusa.com/wp-content/uploads/2016/10/M052-Hydrocyclone-mining.pdf>>. (May 2016).
- Rahmani, A., 2000, "Design and construction of cyclone for separating particles from water", *Proc., Second National Conference on Environmental Health*, Tehran, 38-45. (In Persian)
- Rahmani, A., 2003, "Design and construction of cyclone for separating particles from water", *Journal of Water and Wastewater*, 42, 42-58. (In Persian)
- Rahmani, A.A., 2006, *Hydrocyclones*, Saye Gostar, Qazvin. (In Persian)
- Reyhani, A., Sepehrinia, K., Seyed Shahabadi, S. M., Rekabdar, F. & Gheshlaghi, A., 2015, "Optimization of operating conditions in ultrafiltration process for produced water treatment via Taguchi methodology", *Desalination and Water Treatment*, 54(10), 2669-2680.
- Roy, R. K., 2001, *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*, John Wiley and Sons, New York.
- Silva, A. C., Silva, E. M. S. & Matos, J. D. V., 2012, "A modification in Plitt'S for hydrocyclones simulation", *International Journal of Recent Research and Applied Studies*, 13(3), 753-758.
- 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.
- Soccol, O. J., Rodrigues, L. N., Botrel, T. A. & Ullmann, M. N., 2007, "Evaluation of hydrocyclone as pre-filter in irrigation system", *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 50(2), 193-199.
- WEF. APHA., 2005, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Washington DC, USA.
- Yang, Q., Wang, H.L., Liu, Y. & Li, Z.M., 2010, "Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations", *Separation and Purification Technology*, 74(3), 271-279.