

## Investigation of Trapping, Sedimentation and Volumetric Fraction Efficiency of Vortex Settling Basin Using Taguchi Method

MARZIEH DALIR<sup>1</sup>, ALI NAGHI ZIAEI<sup>1\*</sup>, NEDA SHEIKH REZAZADEH NIKOU<sup>1</sup>

1. Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

(Received: Oct. 5, 2020- Revised: Dec. 6, 2020- Accepted: Apr. 12, 2021)

### ABSTRACT

Vortex Settling Basin is an efficient structure for separating sediments in irrigation canals and water and wastewater treatment plants. In this study, experiments in a laboratory basin model were performed to investigate the efficiency of trapping, sedimentation and volumetric fraction in the hydraulic laboratory of Water Science and Engineering Department of Ferdowsi University. The effect of inflow, central orifice diameter, Particle diameter, end sill height, and outlet end weir height on trapping and sedimentation efficiency of the Vortex Basin was investigated using Taguchi and Response Surface Methods. The results showed that in the range of proposed parameters in this study, the inlet flow is the most effective (%40) and the orifice diameter is the least effective (%0.4) parameter for trapping efficiency, and the particle diameter is the most effective (%43) and the outlet end weir height is the least effective (%6.90) parameter for sedimentation efficiency. An experiment with %75.48 trapping efficiency, %67.74 sedimentation efficiency and a small amount of sediment deposited on the floor was determined to be optimal due to a significant reduction in water loss (%8.46). The optimum situation was obtained for a basin with inflow of 22 L/s, orifice diameter of 0.07 m, end sill height of 0.05 m and weir height of 0.03 m. Finally, high- precision relationships were presented to calculate trapping, sedimentation and volumetric fraction.

**Keywords:** Central Orifice Diameter, End Sill Height, Experimental Model, Inlet Flow Rate, Particle Diameter.

---

\*Corresponding Author's Email: [an-ziaei@um.ac.ir](mailto:an-ziaei@um.ac.ir)

## بررسی توأم راندمان تله‌اندازی، رسوبگیری و کسر حجمی حوضچه رسوبگیر گردابی با استفاده از روش تاگوچی

مرضیه دلیر<sup>۱</sup>، علی نقی ضیائی<sup>۱\*</sup>، ندا شیخ رضازاده نیکو<sup>۱</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱/۲۳)

### چکیده

حوضچه رسوبگیر گردابی، سازه‌ای کارآ برای جداسازی رسوبات در کانال‌های آبیاری و تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب می‌باشد. در این مطالعه، آزمایش‌هایی در یک مدل آزمایشگاهی حوضچه، جهت بررسی توأم راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری و کسر حجمی، در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی انجام شد. تاثیر دبی ورودی، قطر روزنه مرکزی، قطر ذرات، ارتفاع آستانه خروجی و ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی بر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری حوضچه گردابی با استفاده از روش تاگوچی و روش سطح پاسخ بررسی شد. نتایج نشان داد که در محدوده پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، برای راندمان تله‌اندازی، دبی ورودی موثرترین (۰/۴۰) و قطر روزنه کم‌تاثیرترین (۰/۰۴) پارامتر و برای راندمان رسوبگیری، قطر ذرات موثرترین (۰/۴۳) و ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی کم‌تاثیرترین (۰/۶۹۰) پارامتر است. شرایط آزمایش با راندمان تله‌اندازی ۷۵/۴۸٪، راندمان رسوبگیری ۶۷/۷۴٪ و مقدار کم رسوب ته‌نشین شده در کف، به دلیل کاهش چشم‌گیر اتلاف آب (۸/۴۶٪)، حالت بهینه تعیین شد. بنابراین در محدوده آزمایش‌های این پژوهش، حوضچه با دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۰۷ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۰۵ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر دارای عملکرد بهینه می‌باشد. در نهایت روابط چندجمله‌ای مرتبه ۲ و با دقت بالا، برای محاسبه راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری و کسر حجمی ارائه شد.

**واژه‌های کلیدی:** ارتفاع آستانه خروجی، دبی ورودی، قطر روزنه مرکزی، قطر ذرات، مدل آزمایشگاهی.

### مقدمه

به طور معمول حوضچه‌های رسوبگیر گردابی، در نزدیکی کانال‌های آبیاری و زهکشی یا تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب برای تله‌اندازی رسوب معلق در آب ساخته می‌شوند. رسوب همراه جریان منجر به کاهش ظرفیت شبکه‌های انتقال و یا آسیب در لوله‌ها، توربین‌ها و پمپ‌ها می‌گردد. علی‌رغم اینکه امکان حذف کامل ذرات رسوبی از جریان نمی‌باشد، لازم است میزان رسوب جریان به حدی کاهش داده شود تا از آسیب وارده به سازه‌های آبی اجتناب گردد. حوضچه‌های ته‌نشینی امکان ته‌نشینی ذرات رسوب معلق را در کف حوضچه با کاهش سرعت ذره میسر می‌سازند. طراحی ابعاد این نوع از حوضچه‌ها، در راندمان تله‌اندازی رسوب، بسیار حائز اهمیت است. در <sup>۱</sup> VSB، جریان به صورت مماسی وارد حوضچه استوانه‌ای شکلی با روزنه مرکزی در کف آن می‌شود. گردابه ترکیبی (ترکیب گردابه‌های آزاد و اجباری) درون محفظه منجر به حرکت ذرات رسوبی سنگین‌تر از آب به سمت پیرامون حوضچه می‌گردد که ناشی از نیروی گریز از مرکز می‌باشد. ماهیت گردابه آزاد، اندازه حرکت محوری را در

سراسر سامانه حفظ می‌کند که منجر به افزایش معکوس سرعت مماسی در جهت شعاعی در میدان جریان می‌شود و شکل‌گیری گردابه اجباری نزدیک به روزنه مرکزی مانع از خروج جریان مازاد آب از روزنه VSB می‌گردد. جریان‌های ثانویه منجر به حرکت لایه‌های سیال نزدیک کف حوضچه به سمت روزنه مرکزی می‌شوند از آنجایی که ذرات رسوبی همراه جریان مسیر مارپیچی را طی می‌کنند، طول ته‌نشینی در این نوع از حوضچه‌ها طولانی‌تر از حوضچه‌های رسوبگیر مستطیلی با ابعاد مشابه خواهد بود (S. R. Nikou, 2019).

مطالعات بسیاری بر روی مکانیزم و عملکرد جریان رسوبی در حوضچه رسوبگیر گردابی انجام شده است که با توجه به هندسه نوعی حوضچه، محل جانمایی ورودی و خروجی جریان، ابعاد مدل، اندازه و جنس ذره و ... نتایج متمایزی حاصل شده است. برخی از مطالعات انجام شده شامل (Curi et al., 1975)؛ (Cecen, 1977)؛ (Mashauri, 1986)؛ (Paul et al., 1991)؛ (Keshavarzi and Gheisi, 2006)؛ (Athar et al., 2002&2003)؛ (Ansari Athar, 2012)؛ (Chapokpour and Farhoudi, 2011)

\* نویسنده مسئول: an-ziaei@um.ac.ir

بین ۰/۰۷۴ و ۰/۳۰ میلی‌متر انتخاب شد. در شرایط جریان پادساعت‌گرد، راندمان تله‌اندازی در حدود ۶۰٪ تعیین شد. برای افزایش راندمان تله‌اندازی، دفلکتوری در ورودی تعبیه شد. در نتیجه این تغییر، هسته هوای مرکزی از موقعیت مناسب خود منحرف شده و راندمان تله‌اندازی کاهش یافت. به منظور تثبیت هسته هوای مرکزی روی روزنه مرکزی، آزمایش دیگری با دفلکتور در جهت ساعت‌گرد انجام شد و در نهایت راندمان تله‌اندازی حوضچه به ۶۸٪ افزایش یافت. (Chapokpour, 2011)

Farhoudi and Housheer (2011) حوضچه گردابی با قطر ۱/۵ متر و قطر روزنه ۰/۰۷۵ متر را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌ها با سه دبی ورودی ۲۰/۹۷، ۳۰/۹۷ و ۳۴/۳۸ لیتر بر ثانیه، سه اندازه رسوب مختلف (۰/۲۷، ۰/۳۲ و ۰/۵۵ میلی‌متر) با چگالی مخصوص ۲/۶۵، و سه نرخ تزریق رسوب متفاوت (۶۷، ۱۲۰ و ۱۷۰ گرم بر ثانیه) انجام شده است. راندمان تله‌اندازی برای حالت‌های مختلف در محدوده ۴۵-۹۴٪ بود. ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی ورودی و نرخ تغذیه رسوب، راندمان تله‌اندازی افزایش می‌یابد (Ansari and Athar, 2012) and مشابه به حوضچه مدل اول (Athar et al., 2002) انجام دادند. با افزایش نسبت قطر (نسبت عرض حوضچه به قطر روزنه مرکزی)  $(D/d_o)$  و نسبت عرض (نسبت قطر حوضچه به عرض کانال ورودی)  $(D/B)$ ، راندمان تله‌اندازی رسوب افزایش یافته است. (Esmaili et al., 2012) برای بررسی تاثیر قطر روزنه روی عملکرد حوضچه رسوبی گردابی، آزمایش‌هایی را روی حوضچه‌ای با قطر ۲/۱۴ متر با قطر روزنه ۰/۰۳۶، ۰/۰۴۶ و ۰/۰۵۹ متر انجام دادند. نتایج نشان داد که با ثابت نگه داشتن راندمان تله‌اندازی، می‌توان با افزایش قطر روزنه مرکزی، میزان رسوب‌زدایی از کف حوضچه را افزایش داد. پس از تجزیه و تحلیل نتایج، برای ایجاد تعادل بین رسوب‌زدایی و کسر حجمی (رسوب‌زدایی بیشتر با کسر حجمی کم)، اندازه روزنه ۰/۰۴۶ متر، به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد. Sanei et al. (2013) با تعبیه صفحات مستغرق در کف حوضچه رسوبگیر گردابی، مشکل ته‌نشست درصدی از رسوبات در کف حوضچه را بررسی کردند. در پژوهش آنها، قطر ۲/۱۴ متر برای حوضچه و قطر ۰/۰۴۶ متر برای روزنه مرکزی انتخاب شده است. از ماسه بادی با قطر متوسط ۰/۱۵ میلی‌متر به عنوان ذره رسوب استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه بود. ایشان نتیجه گرفتند که کاهش فاصله شعاعی قرارگیری صفحات از روزنه باعث افزایش رسوب‌گذاری در کف می‌شود. در فاصله شعاعی بیشتر از روزنه، صفحات با هدایت رسوبات کف به سمت روزنه،

and Esmaili et al., (2012)؛ Sanei et al., (2013)؛ Pishgar Keshavarzi, (2018)؛ Hajiahmadi et al., (2014)؛ and Rehman et al., (2017)؛ Mulligan et al., (2018) و Nikou and Ziaei, (2019). با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، عملکرد حوضچه نسبت به نسبت کسر حجمی، راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری بررسی می‌شود، تعدادی از مطالعات انجام شده بر روی حوضچه‌های گردابی بر مبنای پارامترهای مذکور ارائه می‌شود.

Curi et al., (1975) مخزن استوانه‌ای با قطر ۰/۹ متر و روزنه مرکزی با قطرهای ۰/۰۱۲۷، ۰/۰۲۵۴ و ۰/۰۵۰۸ متر مدلسازی کردند. کانال‌های ورودی و خروجی مماس با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار داشتند. کانال ورودی هم سطح با کف حوضچه و کانال خروجی ۰/۰۵ متر بالاتر از کف حوضچه بود. از عدس سبز و قرمز، پلی استایرن سفید، توف آتشفشانی<sup>۱</sup> (سنگ متشکل از خاکستر آتشفشانی) و چوب شکسته با اندازه متوسط ۲/۱۲ میلی‌متر به عنوان مواد آزمایشگاهی استفاده شده است. راندمان تله‌اندازی در محدوده ۴۸ تا ۸۹٪ بود. آنها نشان دادند که برای راندمان تله‌اندازی بهینه، نسبت کسر حجمی آب مساوی ۵٪ باشد و اگر این نسبت بیشتر از ۵٪ شود، راندمان تله‌اندازی مستقل از اندازه روزنه یا میزان دبی شستشو می‌باشد. (Athar et al., 2002)

Athar در یک مطالعه به بررسی و تعیین راندمان تله‌اندازی رسوب در حوضچه گردابی برای دو هندسه مختلف پرداختند. در مدل اول، محور کانال‌های ورودی و خروجی به صورت هم‌سطح است و به صورت مماسی به حوضچه گردابی متصل بود. در حالی که در مدل دوم کانال‌های خروجی و ورودی در فاصله‌ای مساوی با قطر حوضچه از یکدیگر، تعبیه شده‌اند. آزمایش‌هایی با دبی‌های ۸-۲۲ لیتر بر ثانیه در حوضچه‌ای با قطر ۱ متر و قطر روزنه ۰/۱ متر انجام شدند. رسوب با تراکم نسبی ۲/۶۵ و در اندازه‌های ۰/۰۵۵، ۰/۱۴۶، ۰/۲۲، ۰/۴۸۵، ۰/۵۵۸ و ۰/۹۳۱ میلی‌متر تزریق شد. راندمان تله‌اندازی رسوب برای هر دو هندسه ذکر شده در شرایط مختلف با تغییر در دبی ورودی (۸-۲۲ لیتر در ثانیه)، دبی خروجی از روزنه (با نسبت کسر حجمی ۸-۱۷٪)، اندازه رسوب (۰/۲۲-۰/۰۵ میلی‌متر) و تفاوت سطح بین کف کانال خروجی و کف حوضچه گردابی (۰/۰۵-۰/۱۲۵ متر) اندازه‌گیری شد که در محدوده ۲۰ تا ۹۰٪ بود. (Keshavarzi and Gheisi, 2006)

بهبود راندمان تله‌اندازی، حوضچه گردابی با قطر ۱ متر و قطر روزنه ۰/۰۵ متر را برای ذرات رسوب ریز مورد آزمایش قرار دادند. نرخ تغذیه رسوب با میزان ثابت ۷۰/۵ گرم در ثانیه و اندازه رسوب

روزنه، قطر ذرات رسوب، ارتفاع آستانه خروجی و ارتفاع سرریز انتهایی کانال خروجی) بر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری و کسر حجمی حوضچه گردابی بررسی شد. به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش تاگوجی برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد و پس از مشخص شدن شرایط هر آزمایش و انجام آزمایش‌های تعیین شده در روش تاگوجی، خروجی هر آزمایش (شامل نسبت کسر حجمی، راندمان تله‌اندازی و راندمان رسوب‌گیری) بررسی و سطح تاثیر هر پارامتر تعیین شد و موثرترین پارامتر نسبت به شرایط بهینه مشخص شد.

## مواد و روش‌ها

### ابزار مورد استفاده و روش انجام آزمایش

در پژوهش حاضر، آزمایش‌ها در یک مجموعه آزمایشگاهی با سامانه بسته گردش آب در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. این مجموعه متشکل از کانال ورودی (به طول ۴ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر)، حوضچه گردابی (به قطر ۱ متر، و ارتفاع ۰/۴ متر با شیب کف ۱:۱۰ به سمت روزنه مرکزی (برای تسهیل حرکت رسوبات به سمت روزنه) و قطر روزنه ۰/۱ متر) و کانال خروجی (به طول ۳ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر) می‌باشد (شکل ۱ الف). در این مجموعه، کانال ورودی و خروجی در یک خط مستقیم و به صورت مماسی به حوضچه متصل شده‌اند.

برای انجام آزمایش‌ها از یک مخزن متحرک برای تأمین آب استفاده شد. به منظور کاهش تلاطم جریان ورودی، توری‌های فلزی با شبکه‌بندی درشت در مخزن کوچک واقع در ابتدای مدل، تعبیه شد. هم‌چنین صفحه شناوری از جنس فوم برای کاهش اغتشاشات و امواج سطحی جریان، در ابتدای کانال ورودی تعبیه شد. دبی به روش حجمی و با استفاده از یک ظرف مدرج با گنجایش بیش از ۲۰۰ لیتر اندازه‌گیری شد. هم‌چنین اندازه‌گیری عمق آب در کانال ورودی و خروجی با استفاده از عمق‌سنج دستی با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر انجام شد.

از دستگاه تغذیه رسوب که در ۱/۵ متری حوضچه تعبیه شد، برای تزریق رسوب به داخل کانال استفاده شد (شکل ۱ ب). این دستگاه شامل قیف بزرگ برای ذخیره رسوب و یک لوله افقی با میله مارپیچ متصل به روزنه انتهایی قیف است. در ابتدا با اعمال مقادیر مختلف نرخ تزریق رسوب، دستگاه کالیبره شد. به منظور

رسوب‌زدایی از کف را افزایش می‌دهند. با قرارگیری صفحات در فاصله‌های شعاعی کم، کسر حجمی کاهش می‌یابد. Hajiahmadi *et al.*, (2014) به منظور کنترل تجمع رسوبات در کف حوضچه رسوبگیر گردابی، از صفحات مستغرق انحنادار در قطاع‌های ۴۵ درجه در کف حوضچه گردابی استفاده کردند. آن‌ها اثر اندازه روزنه در کارایی صفحات مستغرق انحنادار برای رسوب‌شویی کف حوضچه را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در حوضچه‌ای با قطر ۲/۰۶ متر و قطر روزنه ۰/۰۳۶، ۰/۰۴۶ و ۰/۰۵۹ متر انجام شد. مشخص شد عملکرد صفحات در رسوب‌زدایی از کف، ابتدا تحت تاثیر روزنه و سپس آرایش قرارگیری صفحات می‌باشد. بهترین آرایش قرارگیری صفحات در کف، باعث افزایش ۲۰/۰۳٪ رسوب‌زدایی از کف می‌شود. (Pishgar and Keshavarzi (2017) به بررسی اثر اتصال پیاپی دو حوضچه رسوبگیر گردابی بر راندمان جداسازی رسوبات پرداختند. قطر حوضچه‌ها ۱ متر و قطر روزنه مرکزی آن‌ها، ۰/۰۶ متر بود. برای انجام آزمایش‌ها، دبی‌های ورودی ۱۲، ۱۵ و ۱۸ لیتر بر ثانیه و کسر حجمی ۱۰ و ۱۵٪ تنظیم شد. قطر متوسط ذرات رسوب ۰/۲۰۷ میلی‌متر انتخاب شد. پس از انجام آزمایش‌ها، مشاهده شد که راندمان تله‌اندازی حوضچه‌ها با افزایش کسر حجمی افزایش، و با افزایش دبی ورودی به سیستم کاهش می‌یابد. استفاده از حوضچه‌های پیاپی به جای تک حوضچه، میانگین راندمان تله‌اندازی<sup>۱</sup> را حدود ۱۵٪ افزایش می‌دهد و راندمان رسوبگیری<sup>۲</sup> حوضچه‌ها تا ۱۲٪ افزایش می‌یابد. (S. R. Nikou and Ziaei (2019) در مدلسازی عددی و آزمایشگاهی بر روی حوضچه گردابی نسبت کسر حجمی را برای دبی ۸-۲۲ لیتر در ثانیه در محدوده ۱۲/۶۸-۲۴/۶۸٪ تعیین کردند. (Kiringu and Basson (2019) راندمان تله‌اندازی حوضچه را با شبیه‌سازی جریان در نرم افزار FLUENT تعیین کردند. آنها مشخص کردند اندازه رسوب و غلظت آن نقش مهمی در راندمان تله‌اندازی دارد. (Li *et al.* (2020) اثر دفלקتور در کاهش ته‌نشینی رسوب و کاهش ریسک عدم کارایی VSB در شبکه‌های آبیاری و زهکشی را بررسی کردند. ایشان راندمان تله‌اندازی و نسبت کسر حجمی را در حالت استفاده از دفלקتور در موقعیت‌های مختلف از حوضچه، بررسی کردند.

در پژوهش حاضر، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی بر روی مدل آزمایشگاهی حوضچه گردابی مشابه با هندسه اول (et al., (2002) Athar انجام شد. در این مطالعه اثر پنج فاکتور (دبی ورودی، قطر

<sup>۲</sup> نسبت میزان رسوباتی که از روزنه خارج می‌شود به میزان رسوب ورودی به حوضچه

<sup>۱</sup> نسبت میزان رسوباتی که داخل حوضچه تله‌اندازی شده (شامل رسوبات خارج شده از روزنه و ته‌نشین شده روی کف و دفלקتور) به میزان رسوب ورودی به حوضچه

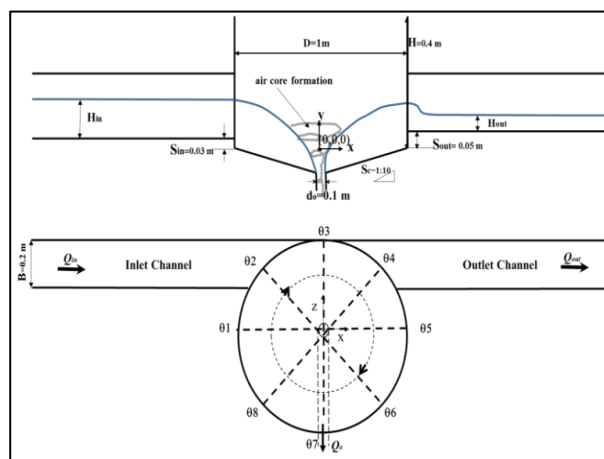
با توجه به مطالعات انجام شده هریک از پارامترهای مورد بررسی در پژوهش‌های قبلی به صورت ترکیبی در این پژوهش در نظر گرفته شده است. به طور کلی اثر پنج عامل دبی ورودی ( $Q_{in}$ )، قطر روزنه ( $d_o$ )، قطر ذرات رسوب ( $d_s$ )، ارتفاع آستانه خروجی ( $S_{out}$ ) و ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی ( $W$ ) بر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری حوضچه گردابی برای بررسی، در نظر گرفته شد. سطوح تغییر عوامل دبی ورودی، قطر روزنه، قطر ذرات رسوب و ارتفاع آستانه خروجی بر مبنای مطالعات پیشین انجام شده (Athar et al., 2002)، (Esmaili et al., 2012)، (Ansar and Athar, 2012) در نظر گرفته شده است. اثر تعبیه سرریز بر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری در پژوهش حاضر بررسی می‌شود که با طراحی آزمایش بصورت ترکیب پنج فاکتور مختلف می‌باشد. در جدول (۱) سطوح تغییر هر عامل ارائه شده است که در مجموع می‌بایست ۷۲ آزمایش ( $3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 = 72$ ) انجام شود.

جمع‌آوری رسوب، در انتهای کانال خروجی و زیر روزنه مرکزی از کسپه‌های نخی با مش ریز استفاده شد.

قبل از شروع هر آزمایش، برای ایجاد شرایط جریان پایدار، جریان به مدت ۱۰ دقیقه در حوضچه برقرار شد. رسوبات مورد استفاده در هر آزمایش، قبل از تزریق به جریان، شسته و خشک شده و در حین انجام آزمایش‌ها به طور یکنواخت به کانال ورودی تزریق گردید. تزریق رسوب در هر آزمایش، به مدت ۳۰ دقیقه بود. پس از قطع کامل جریان آب، رسوبات جمع‌آوری شده در کیسه‌های تعبیه شده در انتهای کانال خروجی و زیر روزنه و همچنین رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه و کانال ورودی و خروجی به طور مجزا برداشت و به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون قرار داده شدند. سپس وزن رسوبات خشک شده، با ترازویی با دقت  $\pm 0.1\%$  گرم اندازه‌گیری شد.



(ب)



(الف)

شکل ۱- الف) نمای جانبی و ب) پلان حوضچه رسوبگیر گردابی و ب) دستگاه تغذیه رسوب

جدول ۱- سطوح تغییر فاکتورهای بررسی شده در پژوهش

شماره	$Q_{in} (\frac{l}{s})$	$d_s (mm)$	$d_o (m)$	$S_{out} (m)$	$W (m)$
۱	۸	۰/۲۱	۰/۱	۰/۰۵	۰
۲	۱۳/۷۰	۰/۳۶۲۵	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۳
۳	۲۲	-	-	-	۰/۰۵

طراحی و تحلیل آزمایش‌ها امروزه، طراحی آزمایش بر مبنای مدل‌های آماری به دلیل دقت بالای نتایج در علم هیدرولیک رایج شده است (Isa, 2005; Mousavi, & Nazari, 2017; Karimifard & Alavi, 2019; Moghaddam, 2018; Naghedifar et al., 2019). طراحی آزمایش (DOE<sup>۱</sup>) روند سیستماتیک تعیین رابطه میان فاکتورهای موثر در فرایند و خروجی‌ها است که بدون تاثیر قابل ملاحظه بر نتایج، تعداد آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد. هدف اصلی DOE تغییر

طراحی و تحلیل آزمایش‌ها امروزه، طراحی آزمایش بر مبنای مدل‌های آماری به دلیل دقت بالای نتایج در علم هیدرولیک رایج شده است (Isa, 2005; Mousavi, & Nazari, 2017; Karimifard & Alavi, 2019; Moghaddam, 2018; Naghedifar et al., 2019). طراحی آزمایش (DOE<sup>۱</sup>) روند سیستماتیک تعیین رابطه میان فاکتورهای موثر در فرایند و خروجی‌ها است که بدون تاثیر قابل ملاحظه بر نتایج، تعداد آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد. هدف اصلی DOE تغییر

MINITAB بررسی می‌شود. در روش آنالیز واریانس برای هر پارامتر یک مقدار احتمال (P-Value) اختصاص دارد که برای نشان دادن اثرگذار بودن پارامتر می‌باشد. پارامترهایی که دارای P-Value کمتر از ۰/۰۵ باشند، دارای اثر معنی‌دار بوده و ضریب اطمینان بالای ۹۵٪ دارند.

#### راندمان حوضچه گردابی و نسبت کسر حجمی

راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری حوضچه و درصد رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ برای کلیه آزمایش‌ها محاسبه می‌شود.

$$\eta_o = \frac{M_o + M_s}{M_b} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\eta_e = \frac{M_o}{M_b} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$S_d = \eta_o - \eta_e \quad (\text{رابطه ۴})$$

در روابط فوق،  $M_s$  وزن رسوبات ته‌نشین شده در حوضچه،  $M_o$  وزن رسوبات خروجی از روزنه،  $M_b$  وزن کل رسوبات رسیده به حوضچه،  $\eta_o$  راندمان تله‌اندازی،  $\eta_e$  راندمان رسوبگیری و  $S_d$  درصد رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه می‌باشد. در محاسبه راندمان رسوبگیری، رسوبات خروجی از روزنه مرکزی در محاسبه راندمان در نظر گرفته می‌شود ولی در راندمان تله‌اندازی، می‌بایست رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه نیز برداشت و در محاسبه راندمان استفاده شود. در سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب، در صورتی که قطع جریان، ضرر زیادی به شبکه وارد کند، راندمان رسوبگیری در بررسی رسوب برای بررسی راندمان حوضچه در نظر گرفته می‌شود؛ اما اگر امکان قطع جریان برای برداشت رسوب ته‌نشین شده در کف حوضچه وجود داشته باشد، می‌توان از راندمان تله‌اندازی در بررسی عملکرد حوضچه استفاده

$$Y_{\text{کسر}} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad i \neq j$$

نسبت کسر حجمی ( $R_a$ ) عبارت است از درصد دبی عبوری از روزنه مرکزی (دبی شستشو) به دبی ورودی که در این پژوهش، در شرایط آب زلال و قبل از تزریق رسوب تعیین شده است:

$$R_a = \frac{Q_o}{Q_{in}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۵})$$

همزمان در کلیه فاکتورهای مرتبط بر سری آزمایشهای طراحی شده است که در نهایت با استفاده از مدل‌های آماری امکان تحلیل و تفسیر نتایج را میسر می‌سازد (Karimifard & Alavi, 2018; Moghaddam, 2018). از مزایای کاهش تعداد آزمایش‌ها در DOE، کاهش هزینه‌های انجام آزمایش‌ها با صرف زمان کمتر و دستیابی به نتایج با دقت قابل قبول است. روش طراحی آزمایش تاگوچی<sup>۱</sup>، یک روش آماری است که توسط دکتر تاگوچی و کنیشی<sup>۲</sup> برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند و بهبود کیفیت کالاهای تولیدی، ارائه شده است (Rao et al., 2008). این روش تعداد آزمایش‌ها را بدون تاثیر چشم‌گیر در نتایج، کاهش می‌دهد. در این روش از آرایه متعامد<sup>۳</sup> (ماتریس فاکتوریل جزئی) استفاده می‌شود که اثرات متقابل فاکتورها را تضمین می‌کند. در یک مسئله، هنگامی که ورودی‌های زیادی وجود دارد و تاثیر هم‌زمان این ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها حائز اهمیت است، از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش استفاده می‌شود (Casalino et al.; Roy, 2001; Erzurumlu and Ozcelik, 2006 al., 2005). در این پژوهش، از آنالیز واریانس برای تعیین تغییرپذیری متغیرها در هر گروه استفاده شد. برای طراحی بهینه، فاکتورهای مستقل در هر سطح در جدول معرفی شد. به دلیل سطوح تغییر متفاوت فاکتورها، طراحی سطح ترکیبی<sup>۴</sup> برای طراحی آزمایش‌ها در نرم افزار MINITAB نسخه ۱۹ در نظر گرفته شد. پس از طراحی آزمایش‌ها با روش تاگوچی، تعداد آزمایش‌ها به ۳۶ آزمایش کاهش یافت که از این تعداد، ۱۲ آزمایش تکراری است (جدول ۲).

با استفاده از مدل‌های آزمایشی از روش سطح پاسخ<sup>۵</sup> ( $RSM^6$ )، برای تحلیل نتایج آزمایش‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش با استفاده از مدل طراحی مرکب مرکزی ( $CCD^8$ )، معادله چند جمله‌ای مرتبه دوم، به فرم معادله ۱ برای راندمان تله‌اندازی، رسوبگیری و کسر حجمی تعیین می‌شود

(رابطه ۱)

در رابطه فوق،  $Y$  متغیر پاسخ،  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای مستقل و  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  به ترتیب مقادیر ثابت هستند (Asadzadeh et al., 2018). در این روش، اهمیت هر پارامتر و تاثیر آن بر راندمان حوضچه، با روش آنالیز واریانس (ANOVA) در نرم افزار

<sup>۵</sup> مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل مورد مطالعه بررسی می‌کند.

<sup>۶</sup> Response Surface Method

<sup>۸</sup> Central Composite Design

<sup>۱</sup> Taguchi's design of experiment

<sup>۲</sup> Konishi

<sup>۳</sup> Orthogonal array

<sup>۴</sup> mixed level design

جدول ۲- طراحی آزمایش‌ها با استفاده از آرایه متعامد  $L_{36}$ 

ارتفاع سرریز (m)	دبی ورودی (l/s)	ارتفاع آستانه خروجی (m)	قطر روزنه مرکزی (m)	قطر ذرات (mm)	قطر روزنه مرکزی (m)	آزمایش‌های مختلف	آزمایش
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲
۳	۳	۱	۱	۱	۱	۳	۳
۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۴
۲	۲	۱	۱	۱	۱	-	۵
۳	۳	۱	۱	۱	۱	-	۶
۱	۱	۲	۱	۱	۱	۴	۷
۲	۲	۲	۱	۱	۱	۵	۸
۳	۳	۲	۱	۱	۱	۶	۹
۱	۱	۱	۲	۱	۲	۷	۱۰
۲	۲	۱	۲	۱	۲	۸	۱۱
۳	۳	۱	۲	۱	۲	۹	۱۲
۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱۰	۱۳
۳	۲	۲	۲	۱	۲	۱۱	۱۴
۱	۳	۲	۲	۱	۲	۱۲	۱۵
۲	۱	۲	۲	۱	۲	-	۱۶
۳	۲	۲	۲	۱	۲	-	۱۷
۱	۳	۲	۲	۱	۲	-	۱۸
۲	۱	۲	۱	۲	۱	۱۳	۱۹
۳	۲	۲	۱	۲	۱	۱۴	۲۰
۱	۳	۲	۱	۲	۱	۱۵	۲۱
۲	۱	۲	۱	۲	۱	-	۲۲
۳	۲	۲	۱	۲	۱	-	۲۳
۱	۳	۲	۱	۲	۱	-	۲۴
۳	۱	۱	۱	۲	۱	۱۶	۲۵
۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱۷	۲۶
۲	۳	۱	۱	۲	۱	۱۸	۲۷
۳	۱	۲	۲	۲	۲	۱۹	۲۸
۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲۰	۲۹
۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲۱	۳۰
۳	۱	۱	۲	۲	۲	۲۲	۳۱
۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲۳	۳۲
۲	۳	۱	۲	۲	۲	۲۴	۳۳
۳	۱	۱	۲	۲	۲	-	۳۴
۱	۲	۱	۲	۲	۲	-	۳۵
۲	۳	۱	۲	۲	۲	-	۳۶

## نتایج و بحث

( $RSM^2$ )، سطح تاثیر و مقادیر احتمال هریک از پارامترها، تعیین شد. همچنین، با استفاده از RSM و مدل چندجمله‌ای مرتبه دو (معادله ۱)، معادلات کسر حجمی، راندمان تله‌اندازی، راندمان رسوبگیری با دقت بالا استخراج شد. نتایج آزمایشگاهی راندمان حوضچه

در این قسمت، نتایج مقادیر کسر حجمی، راندمان تله‌اندازی، راندمان رسوبگیری و درصد رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه از داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شد. سپس بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و کاربرد روش تاگوچی و روش سطح پاسخ<sup>۱</sup>

<sup>۲</sup> Response Surface Method<sup>۱</sup> مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل مورد مطالعه بررسی می‌کند.

مقادیر راندمان تله‌اندازی، راندمان رسوبگیری حوضچه و کسر حجمی برای آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به اینکه ۱۲ آزمایش تکراری می‌باشد، برای آزمایش‌های مشابه، میانگین راندمان‌ها در شکل‌ها ارائه شده است. نتایج مقادیر کسر حجمی داده‌های آزمایشگاهی برای سطوح تغییر جدول (۱)، در محدوده ۸/۴۶ تا ۴۲/۲۷٪ تعیین شد. کمترین مقدار کسر حجمی مربوط به آزمایش ۲۴ با دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۰۷ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۰۵ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر می‌باشد که کمترین میزان اتلاف آب برای شستشوی رسوبات به خارج از روزنه مرکزی را دارد.

راندمان تله‌اندازی در محدوده ۲۹/۳۷ تا ۹۶/۷۳٪ تعیین شد که بیشترین مقدار آن مربوط به آزمایش ۱۳ با دبی ۸ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۱ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۱ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر می‌باشد. میزان اتلاف آب در این آزمایش بسیار بالا است (۴۲/۲۷٪). در واقع، جریان آب بیشتری برای جداسازی و شستشوی رسوبات از کف حوضچه لازم است. راندمان رسوبگیری بدون احتساب رسوبات کف، در محدوده ۲۷/۴۳ تا ۸۴/۰۱٪ تعیین شد که بیشترین مقدار آن مربوط به آزمایش ۱۴ با دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۱ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۱ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۵ متر می‌باشد. کسر حجمی در این آزمایش، ۲۸/۱۱٪ بوده که نسبتاً بالا است. در حوضچه‌های گردابی امکان کنترل کاهش اتلاف جریان آب نسبت به سایر حوضچه‌های کلاسیک وجود دارد. ولی در حالت کلی، در این حوضچه‌ها برای افزایش راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری، میزان اتلاف آب افزایش می‌یابد.

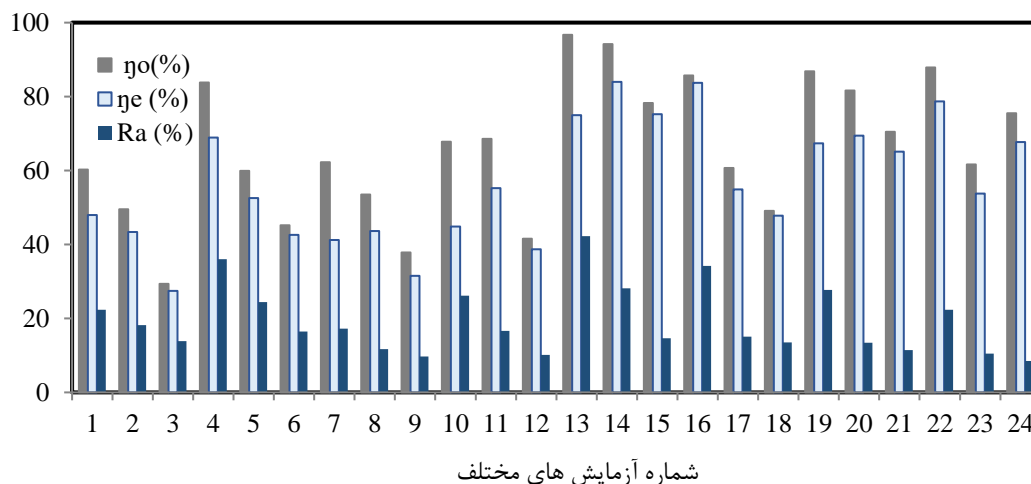
مقادیر درصد رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه و رسوبات خروجی از روزنه برای آزمایش‌های مختلف، در شکل (۳) ارائه شده است. مقدار رسوبات ته‌نشین شده در کف، در محدوده ۱/۲۹ تا ۲۲/۹۶٪ قرار دارد. کمترین مقدار این فاکتور مربوط به آزمایش ۱۸ با دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۱ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۰۵ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر می‌باشد. در این آزمایش، راندمان تله‌اندازی ۴۹/۱۰٪ و راندمان رسوبگیری ۴۷/۸۱٪ است و بخش عمده رسوبات از کانال خروجی، خارج می‌شود. در نتیجه، راندمان حوضچه بسیار پایین است. بیشترین مقدار مقادیر درصد رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه در آزمایش ۱۰ با دبی ۸ لیتر

برثانیه، قطر ذرات ۰/۲۱ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۰۷ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۱ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر می‌باشد. راندمان تله‌اندازی و راندمان رسوبگیری به ترتیب ۶۷/۸۰٪ و ۴۴/۸۴٪ است. در این حالت، بدلیل ته‌نشینی رسوبات در کف حوضچه، راندمان تله‌اندازی نسبتاً بالا می‌باشد. بر طبق نتایج حالت‌های مختلف مورد آزمایش، کاهش دبی، افزایش ارتفاع آستانه و کاهش قطر روزنه، افزایش ته‌نشینی رسوبات در کف حوضچه را به همراه دارد. کاهش دبی باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه افزایش فرصت ته‌نشینی ذرات می‌شود. با افزایش ارتفاع آستانه، ذرات بیشتری با برخورد به آستانه خروجی، گرفتار جریان چرخشی درون حوضچه می‌شوند. همچنین با توجه به آزمایش‌هایی که در شرایط یکسان (دبی ورودی، ارتفاع آستانه و سرریز انتهای کانال خروجی) ولی با قطر روزنه متفاوت (۰/۰۷ و ۰/۱ متر) انجام شده‌اند و راندمان تله‌اندازی نسبتاً مشابهی دارند (مانند آزمایش‌های ۷ و ۱)، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر روزنه به دلیل افزایش قدرت گرداب و سرعت جریان، رسوبات کمتری در کف ته‌نشین می‌شوند و راندمان رسوبگیری افزایش می‌یابد که مشابه نتایج اسماعیلی و همکاران (Esmaili et al., 2012) می‌باشد. در آزمایش ۱۴ و ۱۶ با راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری نسبتاً بالا، رسوب کمتری در کف ته‌نشین شده است. در این آزمایش‌ها، کسر حجمی دارای مقدار بالایی (به ترتیب ۲۸/۱۱ و ۳۴/۲۵٪) می‌باشد. در آزمایش ۱۴ با ماکزیمم مقدار راندمان رسوبگیری (۸۴/۰۱٪)، کسر حجمی دارای مقدار کمتری می‌باشد. با بررسی حالت‌های مختلف نسبت به کسر حجمی، راندمان تله‌اندازی و راندمان رسوبگیری، در مجموع، آزمایش ۲۴ با کمترین اختلاف در راندمان رسوبگیری نسبت به مقدار ماکزیمم آن در آزمایش ۱۴، با مقدار راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری نسبتاً بالا و مقدار نسبتاً کم رسوب ته‌نشین شده در کف، بدلیل کاهش چشم‌گیر اتلاف آب (کمترین مقدار کسر حجمی)، حالت بهینه می‌باشد.

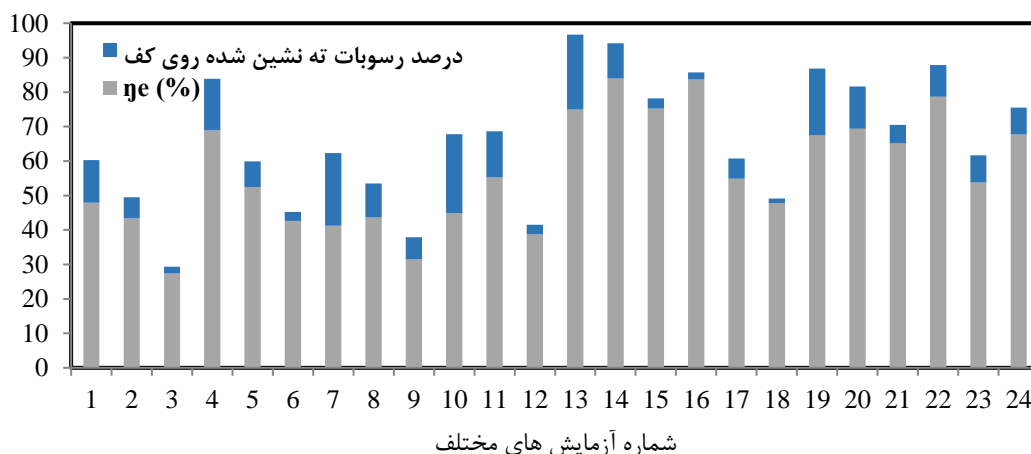
#### نتایج روش تاگوچی و روش RS در بررسی اثر فاکتورهای آزمایش بر راندمان

روش تاگوچی و سطح پاسخ برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از انجام آزمایش‌ها و وارد کردن مقادیر خروجی آزمایش‌ها به نرم‌افزار مینی‌تب، نتایج روش تاگوچی و RS در تعیین اثر فاکتورهای آزمایش بررسی شد.





شکل ۲- مقادیر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری و کسر حجمی در آزمایش‌های مختلف



شکل ۳- راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری و درصد رسوبات ته‌نشین شده در کف حوضچه در آزمایش‌های مختلف

### نتایج روش ناگوچی

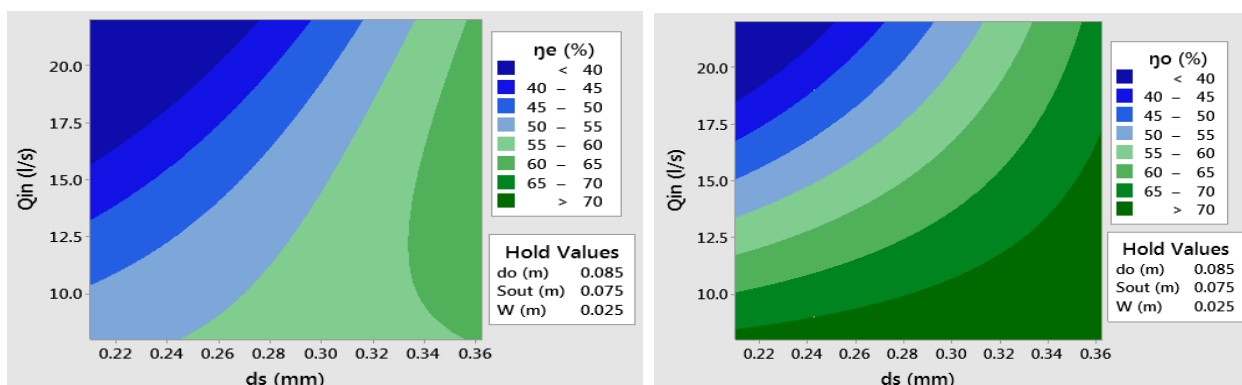
در جدول (۳) درصد تاثیر هریک از پارامترها بر مبنای سطح تاثیر بر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری و کسر حجمی از خروجی نرم افزار MINTAB 19 ارائه شده است. برای راندمان تله‌اندازی، دبی ورودی با ۴۰٪ تاثیر، موثرترین و قطر روزنه با تاثیر ناچیز ۰/۴٪، کم‌تاثیرترین فاکتور بر مقدار  $\eta_o$  است. افزایش دبی منجر به خروج بیشتر جریان آب و سیال از کانال خروجی بدون چرخش در حوضچه می‌گردد. بنابراین دبی مهمترین فاکتور در تله‌اندازی ذرات در حوضچه محسوب می‌گردد. تاثیر قطر ذرات، ارتفاع آستانه خروجی و ارتفاع سرریز بر مقدار  $\eta_o$  به ترتیب ۳۶، ۲۱ و ۲/۶٪ می‌باشد. قطر ذره رتبه دوم تاثیر بر راندمان تله‌اندازی را دارد. به دلیل آن‌که ذرات ریزتر بصورت معلق همراه جریان آب از حوضچه خارج می‌گردند. نتایج سطح تغییرات فاکتورها، نشان می‌دهد دبی ۸ لیتر بر ثانیه، قطر ذره ۰/۳۶ میلی‌متر، اندازه روزنه ۰/۰۷ متر، ارتفاع آستانه ۰/۱ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۵ متر، بهترین حالت برای رسیدن به راندمان تله‌اندازی بالا می‌باشد.

برخلاف راندمان تله‌اندازی، قطر ذرات با ۴۳٪ تاثیر، موثرترین و ارتفاع سرریز با تاثیر ۶/۹۰٪، کم‌تاثیرترین فاکتور در راندمان رسوبگیری می‌باشد. از طرفی دبی ورودی، ارتفاع آستانه خروجی و قطر روزنه بر مقدار  $\eta_e$  به ترتیب ۱۰/۲۵، ۱۸ و ۷٪ است. در محدوده دانه‌بندی پژوهش حاضر، ذرات درشت امکان ته‌نشینی بیشتری دارند و در نتیجه منجر به افزایش راندمان رسوبگیری و تله‌اندازی می‌شوند. از طرفی، دبی بالا منجر به خروج بخشی از جریان بدون ورود به حوضچه شده و دبی پایین منجر به ته‌نشینی ذرات در کف حوضچه می‌گردد. بنابراین علی-رغم اهمیت دبی با رتبه دوم در رسوبگیری، قطر ذره مهمترین فاکتور در دستیابی به راندمان بالای رسوبگیری است. با توجه به سطوح تاثیر پارامترها، در راندمان رسوبگیری دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه، قطر ذره ۰/۳۶ میلی‌متر، اندازه روزنه ۰/۱ متر، ارتفاع آستانه ۰/۱ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۵ متر، بهترین حالت برای رسیدن به راندمان رسوبگیری بالا می‌باشد. در پارامتر کسر حجمی، با توجه به اینکه آزمایش‌ها در حالت آب زلال انجام



جدول ۴- مقدار احتمال (P-Value) برای هر یک از عوامل موثر بر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری

عامل	مربوط به $\eta_o$	مربوط به $\eta_e$	مربوط به $R_a$
$d_s$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-
$d_o$	۰/۹۱۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
$S_{out}$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
$Q_{in}$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
$W$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
$Q_{in} \times Q_{in}$	۰/۱۸۴۱	۰/۱۰۴	۰/۰۰۰
$W \times W$	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۸۶۱
$d_s \times d_o$	۰/۶۷۲	۰/۱۲۵	-
$d_s \times S_{out}$	۰/۲۷۰	۰/۵۲۵	-
$d_s \times Q_{in}$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-
$d_s \times W$	۰/۸۸۲	۰/۸۰۸	-
$d_o \times S_{out}$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
$d_o \times Q_{in}$	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
$d_o \times W$	۰/۸۵۱	۰/۸۱۳	۰/۰۰۰
$S_{out} \times Q_{in}$	۰/۸۸۵	۰/۰۲۵	۰/۰۰۰
$S_{out} \times W$	۰/۰۶۷	۰/۰۰۰	۰/۳۳۵
$Q_{in} \times W$	۰/۲۱۷	۰/۰۵۹	۰/۰۰۰



(الف) (ب)

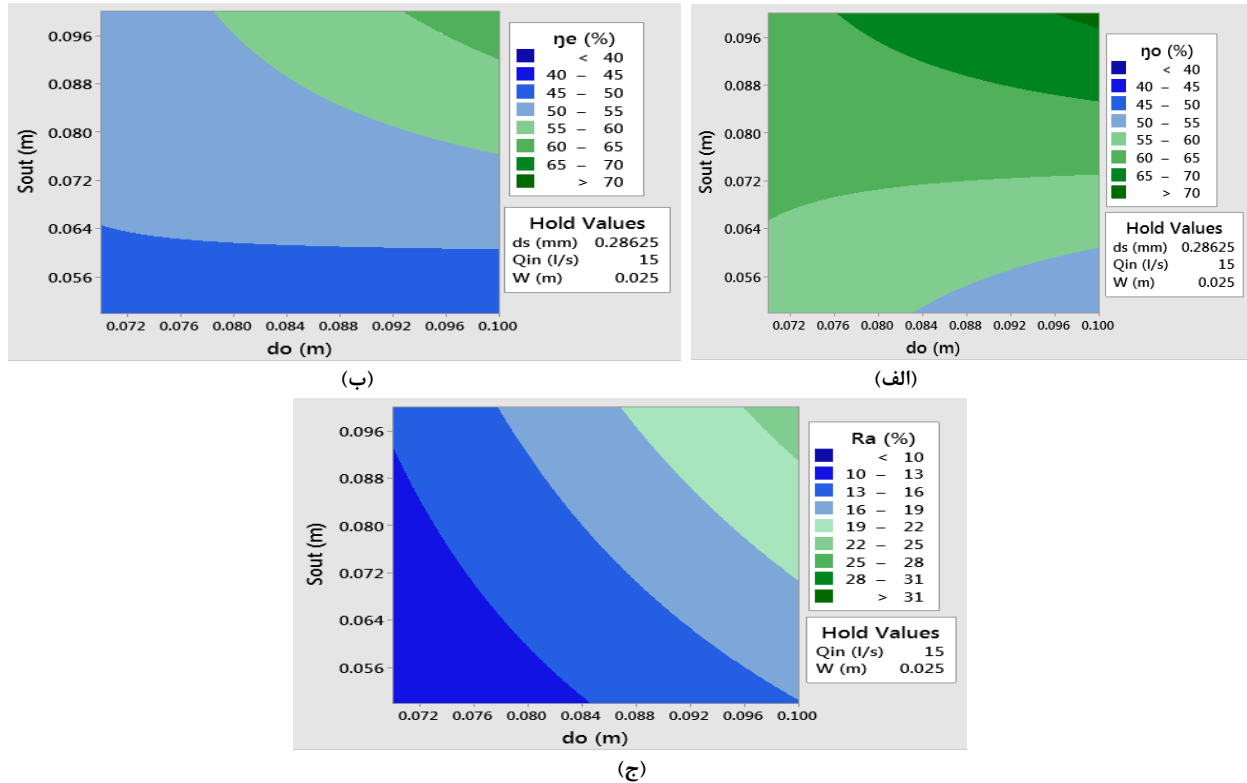
شکل ۴- تاثیر دبی و قطر ذرات بر الف) راندمان تله‌اندازی و ب) راندمان رسوبگیری.

راندمان‌ها کاهش می‌یابند. هم‌چنین افزایش قطر روزنه و کاهش دبی،  $R_a$  را افزایش می‌دهد. در قطر روزنه‌های با اندازه حدودی ۰/۰۷ تا ۰/۰۷۴ متر و دبی‌های بالا (۱۷/۵ تا ۲۲ لیتر بر ثانیه)،  $R_a$  به کمتر از ۰/۱۰ می‌رسد. با استفاده از روش سطح پاسخ روابط چندجمله‌ای از مرتبه دو بفرم معادله ۱، برای راندمان تله‌اندازی رسوب، راندمان رسوبگیری و نسبت کسر حجمی تعریف شده است. توجه به نتایج روش سطح پاسخ برای  $\eta_o$ ،  $\eta_e$  و  $R_a$  (روابط ۶-۸)، مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب تعیین تعدیل شده ( $R_{adj}^2$ )، ضریب تعیین پیش‌بینی شده ( $R_{pred}^2$ ) از نتایج نرم افزار MINITAB و مقادیر

تاثیر هردو پارامتر قطر روزنه و دبی ورودی در شکل (۶) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود روند تغییرات در راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری نسبتاً متفاوت است. در دبی‌های کمتر از ۱۵ لیتر بر ثانیه، برای دبی معین، با افزایش اندازه روزنه، راندمان تله‌اندازی نسبتاً ثابت می‌باشد ولی راندمان رسوبگیری افزایش می‌یابد. در دبی‌های بیشتر از ۱۵ لیتر بر ثانیه، برای دبی معین، با افزایش اندازه روزنه، راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری به ترتیب کمتر از ۶۰٪ و ۵۵٪ کاهش می‌یابند. از طرفی، برای قطر روزنه ثابت، با افزایش دبی ورودی، راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری کاهش می‌یابند. با افزایش مقادیر هردو پارامتر بصورت همزمان،

آماری، همبستگی بالایی میان نتایج آزمایشگاهی و مقادیر پیش-بینی شده ملاحظه شد.

جذر میانگین مربعات خطا (RMSE<sup>۱</sup>) و میانگین مطلق درصد خطا (MAPE<sup>۲</sup>) بر مبنای محاسبه نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی جدول (۵) ارائه است. بر مبنای محاسبات پارامترهای



شکل ۵- تاثیر قطر روزنه و ارتفاع آستانه خروجی بر الف) راندمان تله‌اندازی، ب) راندمان رسوبگیری و ج) کسر حجمی.

$$\eta_o = 92.4 - (86.8 \times d_s) - (42 \times d_o) - (650 \times S_{out}) - (2.06 \times Q_{in}) + (296 \times W) + (0.009 \times Q_{in} \times Q_{in}) + (9978 \times W \times W) - (320 \times d_s \times d_o) + (469 \times d_s \times S_{out}) + (14.81 \times d_s \times Q_{in}) - (118 \times d_s \times W) + (10378 \times d_o \times S_{out}) - (44.4 \times d_o \times Q_{in}) + (618 \times d_o \times W) - (1.04 \times S_{out} \times Q_{in}) - (3874 \times S_{out} \times W) - (17.9 \times Q_{in} \times W) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\eta_e = 16.9 + (14.2 \times d_s) + (419 \times d_o) - (518 \times S_{out}) + (0.13 \times Q_{in}) + (371 \times W) - (0.058 \times Q_{in} \times Q_{in}) + (12776 \times W \times W) - (870 \times d_s \times d_o) - (195 \times d_s \times S_{out}) + (14.50 \times d_s \times Q_{in}) + (140 \times d_s \times W) + (8689 \times d_o \times S_{out}) - (46.82 \times d_o \times Q_{in}) + (565 \times d_o \times W) + (12.58 \times S_{out} \times Q_{in}) - (6659 \times S_{out} \times W) - (20.4 \times Q_{in} \times W) \quad (\text{رابطه ۷})$$

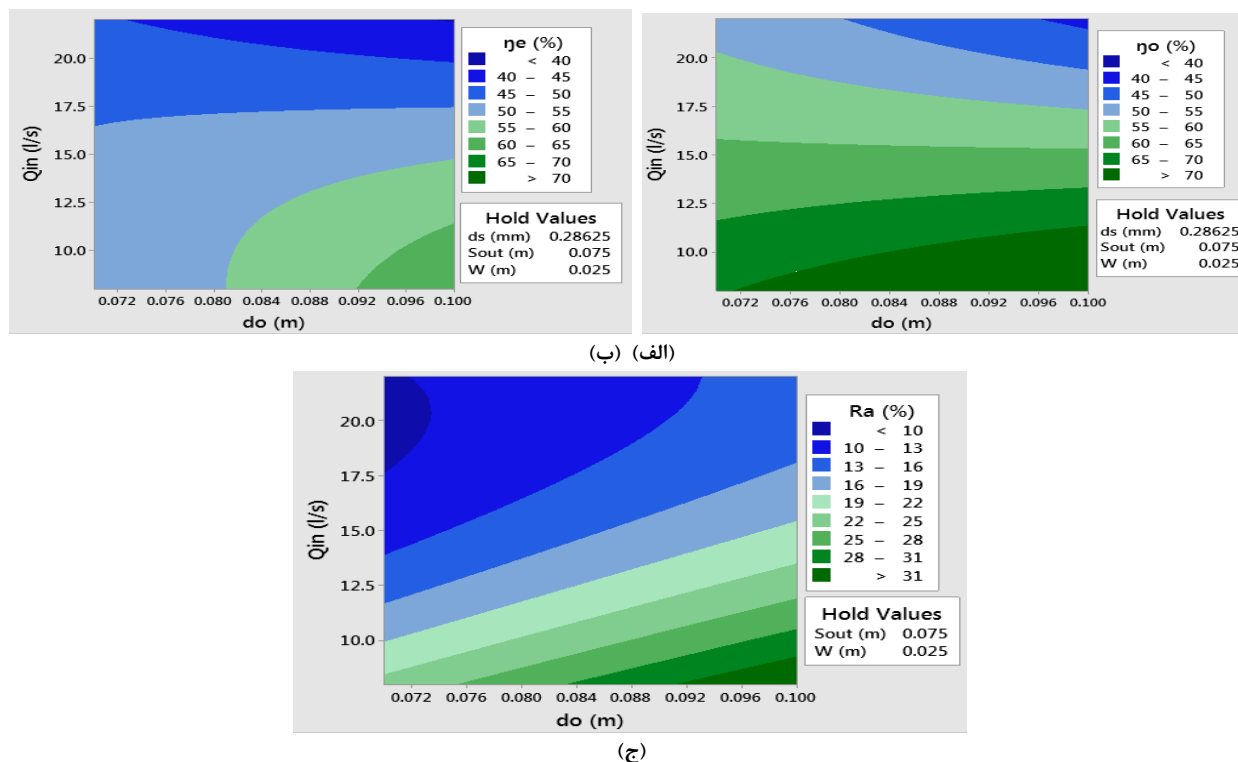
$$R_a = 8.84 + (229.4 \times d_o) + (35.2 \times S_{out}) - (1.513 \times Q_{in}) + (9 \times W) + (0.092 \times Q_{in} \times Q_{in}) - (136 \times W \times W) + (2814 \times d_o \times S_{out}) - (17.01 \times d_o \times Q_{in}) + (3007 \times d_o \times W) - (10.42 \times S_{out} \times Q_{in}) - (474 \times S_{out} \times W) - (9.51 \times Q_{in} \times W) \quad (\text{رابطه ۸})$$

جدول ۵- مقادیر برازش مناسب برای  $R_a$ ،  $\eta_e$ ،  $\eta_o$

رابطه	$R^2$ (%)	$R_{adj}^2$ (%)	$R_{pred}^2$ (%)	RMSE (%)	MAE (%)
۶	۹۷/۴۹	۹۵/۱۳	۸۲/۴۵	۰/۰۳۲	۴/۲۷
۷	۹۸/۳۹	۹۶/۶۸	۸۸/۵۵	۰/۰۲۴	۳/۴۸
۸	۹۸/۹۷	۹۸/۴۳	۹۷/۴۲	۰/۰۰۹۶	۴/۸۱

<sup>۲</sup> Mean Absolute Percentage Error

<sup>۱</sup> Root Mean Square Error



شکل ۶- تاثیر قطر روزنه و دبی ورودی بر الف) راندمان تله‌اندازی، ب) راندمان رسوبگیری و ج) کسر حجمی

### نتیجه‌گیری

سرریز انتهای کانال خروجی کم‌تاثیرترین پارامتر بر راندمان رسوبگیری و کسر حجمی بوده است. با افزایش قطر ذرات راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری افزایش می‌یابد. افزایش قطر روزنه باعث افزایش راندمان‌ها و کسر حجمی می‌شود. با افزایش ارتفاع آستانه خروجی علی‌رغم افزایش راندمان‌ها، کسر حجمی نیز افزایش می‌یابد و تنها در صورت استفاده از قطر روزنه‌های کم‌تر از ۰/۰۸ متر، کسر حجمی دارای مقدار نسبتاً کم می‌باشد. افزایش دبی ورودی باعث کاهش راندمان‌ها شده که میزان این کاهش در راندمان رسوبگیری بیشتر می‌باشد. در نتیجه در محدوده پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، افزایش قطر ذرات، کاهش قطر روزنه، کاهش ارتفاع آستانه و افزایش دبی ورودی، باعث می‌شود که حوضچه گردابی دارای عملکرد مناسبی باشد و دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۰۷ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۰۵ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر برای عملکرد حوضچه در شرایط بهینه مناسب می‌باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

در پژوهش حاضر راندمان تله‌اندازی و رسوبگیری و کسر حجمی حوضچه رسوبگیر گردابی تحت تاثیر فاکتورهای مختلف بررسی گردید. راندمان تله‌اندازی در آزمایشی با دبی ۸ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۱ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۱ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر، در حالت بیشینه قرار داشت. در راندمان رسوبگیری دبی ۱۳/۷ لیتر بر ثانیه، قطر ذره ۰/۳۶ میلی‌متر، اندازه روزنه ۰/۱ متر، ارتفاع آستانه ۰/۱ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۵ متر، بهترین حالت برای دستیابی راندمان رسوبگیری بالا بود. همچنین کمترین مقدار کسر حجمی مربوط به آزمایشی با دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه، قطر ذرات ۰/۳۶ میلی‌متر، قطر روزنه ۰/۰۷ متر، ارتفاع آستانه خروجی ۰/۰۵ متر و ارتفاع سرریز ۰/۰۳ متر می‌باشد. برای راندمان تله‌اندازی دبی ورودی موثرترین پارامتر می‌باشد؛ در حالی که برای راندمان رسوبگیری، اندازه ذره موثرترین پارامتر بود. اندازه روزنه و ارتفاع سرریز تاثیر بسیار ناچیزی بر راندمان‌ها دارد. همچنین دبی ورودی به طور مشترک، موثرترین پارامتر بر کسر حجمی و راندمان تله‌اندازی بوده و ارتفاع

### REFERENCES

Ansari, M.A., and Athar, M. (2012). Design parameters of vortex settling basin. *Water Management*, 166 Issue WM5, 262–271.

Asadzadeh, F., Maleki-Kaklar, M., Soiltanalinejad, N., and Shabani, F. (2018). Central Composite Design

Optimization of Zinc Removal from Contaminated Soil, Using Citric Acid as Biodegradable Chelant, *Sci Rep* 8, 2633 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20942-9>.

Athar, M., Kothyari, U.C., and Garde, R.J. (2002).

- Sediment removal efficiency of vortex chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic engineering*, 128, 1051-1059.
- Athar, M., Kothiyari, U.C., Garde, R.J. (2003). Distribution of sediment concentration in the vortex chamber type sediment extractor. *Journal of Hydraulic Research*, 41: 427-438.
- Casalino, G., Curcio, F., Minutolo, F.M.C. (2005). Investigation on Ti6Al4V laser welding using statistical and Taguchi approaches, *J. Mater Process Technol* 167, 422-428.
- Cecen, K., and Bayazit, M. (1975). Some laboratory studies of sediment controlling structures. In: *Proceedings of 9th Congress of ICID, Moscow, Soviet Union*, 107-111.
- Cecen, K. (1977). Hydraulic criteria of settling basins for water treatment, hydropower and irrigation. *Proceedings of 17th Congress of IAHR. Baden-Boden, Germany*: 275-294.
- Chapokpour, J., Farhoudi, J. (2011). Sediment Extraction and Flow Structure of Vortex Settling Basin. *World Applied Sciences Journal*, 14(5), 782-793.
- Curi, K.V., Esen, I.I., and Velioglu, S.G. (1975). Vortex type solid liquid separator. *Progress in Water Technology*, 7(2), 183-190.
- Esmaili, K. Saneie, M. and Asefi, M. (2012). Experimental investigation of orifice diameter effect on hydraulic and trapping efficiency of vortex settling basin. In: *Proceedings of 9th International civil engineering congress*, Isfahan University of Technology. (In Farsi)
- Haji Ahmadi, A, Saneie, M, and Azhdari moghdam, M. (2014). Laboratory investigation of the effect of the diameter size of orifice on the performance of curvature submerged vanes with 45° radial section in efficiency of vortex settling basins. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 103, 74-82. (In Farsi)
- Isa, M.H. (2005). Simulated textile dye wastewater treatment by electrochemical oxidation: application of response surface methodology (RSM). *Desalin. Water Treat.* 53: 2260-2265. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.863165>.
- Karimifard, S., and Alavi Moghaddam, M. R. (2018). Application of response surface methodology in physicochemical removal of dyes from wastewater: A critical review. *J. Science of the Total Environment* 640-641: 772-797.
- Keshavarzi, A.R. and Gheisi, A.R. (2006). Trap efficiency of vortex settling basin for exclusion of fine suspended particles in irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 55(4), 419-434.
- Kiringu, K. and Basson, G. (2019). Removal of fine non-cohesive sediment by Swirl/Vortex Settling Basin at small river abstraction works. *19th Int. Conf. on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Cape Town, South Africa*.
- Li, L., Wang, P., Ma, Y., and Wu, Y. (2020). Reducing Sediment Deposition on Deflector in Vortex Settling Basins. *J. Irrig. Drain Eng.*, 146(10): 06020009.
- Mashauri, D. A. (1986). *Modeling of a vortex settling basin for primary clarification of water*. PhD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- Mousavi, S.A., Nazari, S. (2017). Applying response surface methodology to optimize the Fenton oxidation process in the removal of reactive red 2. *Pol. J. Environ. Stud.* 26: 765-772. <https://doi.org/10.15244/pjoes/65365>.
- Mulligan, S., Casserly, J., and Sherlock, R. (2018). Effects of Geometry on Strong Free-Surface Vortices in Subcritical Approach Flows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 142(11), 1-12.
- Naghedifar, S. M., Ziaei, A. N., and Naghedifar, S. A. (2019). Optimization of Quadrilateral Infiltration Trench Using Numerical Modeling and Taguchi Approach, *J. Hydrol. Eng.*, 2019, 24(3): 1-12.
- Ozcelik, B., Erzurumlu, T. (2006). Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm, *J. Mater Process Technol*, 171, 437-445.
- Paul, T. C., Sayal, S. K., Sakhanja, V. S. and Dhillon, G. S. (1991). Vortex settling basin design considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117, 172-189.
- Pishgar, R. and Keshavarzi, A.R. (2018). Investigation of the Effect of two Series Connected Vortex Settling Basins (VSBs) on the Efficiency of Sediment xtraction. *Journal of Iran-Watershed Management Science & Engineering*, Vol. 11, No. 37. (In Farsi)
- Rao, R.S., Kumar, C.G., Prakasham, R. S., and Hobbs, P. J. (2008). The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: a critical appraisal, *Biotechnol. J.* , 3:510-523.
- Rehman, A., Athar, M. and Mansoor, T. (2017). Mechanism of vortex motion. *ISH Journal of Hydraulic Engineering, Journal ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(2), 135-143.
- Roy, R.K. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*, Wiley, Hoboken.