

Development of one-dimensional numerical model of sedimentation with non-uniform granulation in settling basins using time-splitting method

Maryam Teymouri Yeganeh¹ | Mohammad Mehdi Heidari^{*2} | Rasool Ghobadian³

1. Ph.D. Student of Water Structures, Dept. of Water Engineering, Razi University. E-mail: m.yeganeh1390@gmail.com

2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Razi University. E-mail: mm.heidari@razi.ac.ir

3. Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Razi University. E-mail: rsghobadian@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 06.16.2021
Revised: 09.09.2021
Accepted: 12.06.2021

Keywords:
Non-uniform sediments,
One-dimensional numerical
model,
Rectangular sedimentation
pond,
Trapping efficiency

ABSTRACT

Background and Objectives: There are various methods to prevent the entry of suspended sediments into the irrigation canals, one of which is the construction of settling basins at the beginning of the irrigation network. Sediment efficiency, which is the ratio of the concentration of outlet sediments to inlet, should be determined before designing the settling basin according to the geometric dimensions of the structure, hydraulic properties and characteristics of inlet sediments to be planned for management and operation. The purpose of this study is to present a one-dimensional model of sedimentation in the sedimentation pond by considering the sedimentation of inlet sediments, which in addition to estimating the trapping efficiency in the pond, also calculates changes in the pond floor, sedimentation of sediment outlet and sediment concentration in each section.

Materials and Methods: In this study, in order to simulate sedimentation in the sedimentation pond, first a numerical model was developed and then the effect of the geometric factors of the pond on the sediment trapping efficiency was investigated. In the developed one-dimensional numerical model, the governing equations of flow and sediment were solved, respectively. To validate the results of the numerical model, El-Baroudi (1969) laboratory data were used, which include a rectangular sedimentation pond with a length of 1.2446 m and a width of 0.4572 m. For different discharges, El-Baroudi deposited 200 mg/l of sediment with a specified diameter into the sedimentation pond and after a certain period the concentration of the effluent from the pond was measured. Also, field data of Nekoabad sediment catchment area of Isfahan (Shetab-Boushehri et al., 2010) were used for validation.

Results: The results of trap efficiency verifications showed that the mean value of the square root of the mean square error of the numerical model for El-Baroudi (1969) experiments was 6.15% and for the left and right sedimentation ponds were 8.13 and 6.77%, respectively. Also, the trapping efficiency was investigated for all sediment particles and for each group of particles in relation to the length of the pond. The results showed that with increasing the distance from the beginning of the pond, the amount of sedimentation efficiency increases so that at the end of the pond the sediments are deposited in the left and right basins, respectively. The floor level of the sedimentation pond also changes due to sedimentation of sediments. The rate of these changes in the floor of sedimentation ponds at the beginning of the structure is higher than the end due to the high

concentration of inlet sediments. The amount of these changes in the bottom of the left and right sedimentation ponds using the numerical model simulation of the present study after three months was about 23.4 and 20 cm, respectively.

Conclusion: After developing and validating the numerical model, the performance of Nekoabad sedimentation ponds and El-Baroudi laboratory model were investigated using the numerical model. The results showed that the average sediment trapping efficiency for the left and right sedimentation ponds was 36.5% and 27.3%. Therefore, a large amount of sediment enters the irrigation network. In order to improve Nekoabad sedimentation ponds and increase sediment trapping efficiency, the length, width or depth of the pond can be increased. For this purpose, by increasing one of the above variables and keeping the other parameters constant, the numerical model was executed and the trapping efficiency was calculated. The results showed that increasing the length of the left sedimentation pond and increasing the width of the right pond of Nekoabad Dam has the greatest effect on the trapping efficiency.

Cite this article: Teymouri Yeganeh, Maryam, Heidari, Mohammad Mehdi, Ghobadian, Rasool. 2022. Development of one-dimensional numerical model of sedimentation with non-uniform granulation in settling basins using time-splitting method. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28 (3), 27-47.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2022.19239.3470

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

توسعه مدل عددی یک‌بعدی رسوب‌گذاری با دانه‌بندی غیریکنواخت در حوضچه‌های ترسیب با استفاده از روش تنصیف زمان

مریم تیموری یگانه^۱ | محمدمهدی حیدری^{۲*} | رسول قبادیان^۳

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، رایانامه: m.yeganeh1390@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، رایانامه: mm.heidari@razi.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، رایانامه: rsghobadian@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: روش‌های مختلفی برای جلوگیری از ورود رسوبات معلق به کانال‌های آبیاری وجود دارد که یکی از این روش‌ها، احداث حوضچه‌های ترسیب در ابتدای شبکه آبیاری است. سرعت آب در این سازه باید آنقدر کم باشد که رسوبات معلق تا قطر مشخصی در حوضچه‌های ترسیب ته‌نشین شود و غلظت رسوبات در جریان خروجی حوضچه کاهش یابد. راندمان ترسیب که نسبت غلظت رسوبات خروجی به ورودی است باید قبل از طراحی حوضچه ترسیب با توجه به ابعاد هندسی سازه، خصوصیات هیدرولیکی و مشخصات رسوبات ورودی تعیین شود تا برای مدیریت و بهره‌برداری از آن برنامه‌ریزی شود. هدف از این پژوهش، ارائه مدل عددی یک‌بعدی رسوب‌گذاری در حوضچه ترسیب با در نظر گرفتن دانه‌بندی رسوبات ورودی است که علاوه بر تخمین راندمان تله‌اندازی در حوضچه، تغییرات کف حوضچه، دانه‌بندی رسوبات خروجی از حوضچه و غلظت رسوب در هر مقطع را نیز محاسبه می‌کند.
تاریخ دریافت: ۰۰/۰۳/۲۶ تاریخ ویرایش: ۰۰/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۹/۱۵	مواد و روش‌ها: در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در حوضچه ترسیب ابتدا یک مدل عددی براساس شمای تنصیف زمان تهیه و سپس به بررسی تأثیر عوامل هندسی حوضچه بر راندمان تله‌اندازی رسوب پرداخته شد. در مدل عددی یک‌بعدی توسعه‌یافته، معادلات حاکم بر جریان و رسوب به ترتیب حل گردید. برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی البارودی (۱۹۶۹) که شامل یک حوضچه ترسیب مستطیلی به طول ۱/۲۴۴۶ متر و عرض ۰/۴۵۷۲ متر می‌باشد استفاده گردید. البارودی برای دبی‌های مختلف مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسوب با قطر مشخص را به درون حوضچه ترسیب وارد و بعد از مدت زمان مشخصی مقدار غلظت خروجی از حوضچه را اندازه‌گیری کرد. هم‌چنین از داده‌های صحرائی حوضچه رسوب‌گیر نکوآباد اصفهان (شتاب بوشهری و همکاران، ۲۰۱۰) به منظور صحت‌سنجی استفاده گردید.
واژه‌های کلیدی: حوضچه ترسیب مستطیلی، راندمان تله‌اندازی، رسوبات غیریکنواخت، مدل عددی یک‌بعدی	

یافته‌ها: نتایج صحت‌سنجی‌های راندمان تله‌اندازی نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا مدل عددی برای آزمایش‌های البارودی (۱۹۶۹) $6/15$ درصد و برای حوضچه ترسیب سمت چپ و راست به ترتیب $8/13$ و $6/77$ درصد است. هم‌چنین راندمان تله‌اندازی برای همه ذرات رسوب و برای هر گروه ذرات نسبت به طول حوضچه موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از ابتدا حوضچه، مقدار راندمان ترسیب افزایش می‌یابد به طوری که در انتهای حوضچه حدود $38/6$ و $29/7$ درصد رسوبات به ترتیب در حوضچه چپ و راست ته‌نشین می‌شود. تراز کف حوضچه ترسیب نیز به دلیل ته‌نشینی رسوبات تغییر می‌یابد. میزان این تغییرات در کف حوضچه‌های ترسیب در ابتدای سازه به دلیل غلظت بالای رسوبات ورودی بیش‌تر از انتها است. میزان این تغییرات در کف حوضچه‌های ترسیب سمت چپ و راست با استفاده از شبیه‌سازی مدل عددی پژوهش حاضر بعد از مدت سه ماه به ترتیب حدود $23/4$ و 20 سانتی‌متر به دست آمد.

نتیجه‌گیری: پس از توسعه و صحت‌سنجی مدل عددی، عملکرد حوضچه‌های ته‌نشینی نکوآباد و مدل آزمایشگاهی البارودی با استفاده از مدل عددی موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که متوسط راندمان تله‌اندازی رسوب برای حوضچه ترسیب سمت چپ و راست $36/5$ و $27/3$ درصد است. بنابراین مقدار زیادی رسوب به داخل شبکه آبیاری وارد می‌شود. به‌منظور اصلاح حوضچه‌های ترسیب نکوآباد و افزایش راندمان تله‌اندازی رسوب می‌توان طول، عرض و یا عمق حوضچه را افزایش داد. بدین منظور با افزایش یکی از متغیرهای فوق و ثابت نگه‌داشتن بقیه پارامترها، مدل عددی اجرا و راندمان تله‌اندازی محاسبه شد. نتایج نشان داد که افزایش طول حوضچه ترسیب سمت چپ و افزایش عرض حوضچه سمت راست سد نکوآباد بیش‌ترین تأثیر را بر راندمان تله‌اندازی دارد.

استناد: تیموری یگانه، مریم، حیدری، محمدمهدی، قبادیان، رسول (۱۴۰۰). توسعه مدل عددی یک‌بعدی رسوب‌گذاری با دانه‌بندی غیریکنواخت در حوضچه‌های ترسیب با استفاده از روش تنصیف زمان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۸ (۳)، ۴۷-۲۷.

DOI: 10.22069/jwsc.2022.19239.3470



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

رسوبات فراوانی توسط جریان آب در رودخانه‌ها منتقل می‌شود و در صورتی که به آبگیرها و شبکه‌های آبیاری وارد شود، باعث کاهش راندمان انتقال آب و کاهش ظرفیت آب‌گذاری مجرا می‌شود. روش‌های مختلفی برای جلوگیری از ورود رسوبات معلق به کانال‌های آبیاری وجود دارد که یکی از این روش‌ها، احداث حوضچه‌های ترسیب در ابتدای شبکه آبیاری است. راندمان ترسیب باید قبل از طراحی حوضچه ترسیب با توجه به ابعاد هندسی سازه، خصوصیات هیدرولیکی و مشخصات رسوبات ورودی تعیین شود و مدیریت و بهره‌برداری از آن برنامه‌ریزی شود و هم‌چنین در صورت امکان با تغییر مشخصات هندسی مقطع حوضچه ترسیب، راندمان تله‌اندازی رسوب را افزایش داد. محققین با بررسی چگونگی حرکت ذرات معلق در آب به کمک پارامترهای مؤثر در ته‌نشینی، روابط تجربی متعددی را برای راندمان رسوب‌گذاری در حوضچه ترسیب ارائه دادند. از پارامترهای مؤثر در ته‌نشینی ذرات در آب می‌توان به اندازه، شکل، وزن مخصوص، سرعت سقوط ذرات، عمق جریان، سرعت جریان و دمای آب اشاره نمود. کمپ (۱۹۶۴) با فرض یکنواختی توزیع سرعت در مقطع جریان و ثابت بودن ضریب پخشیدگی در طول حوضچه مدلی را برای عملکرد حوضچه ترسیب ارائه داد (۲). به علت پیچیدگی روابط ریاضی مدل کمپ، حل آن‌ها با استفاده از نمودار انجام می‌گیرد. یکی دیگر از مدل‌های تجربی که برای تخمین راندمان رسوب‌گذاری در حوضچه‌های ترسیب استفاده می‌شود، توسط دفتر عمران ایالات متحده در سال ۱۹۴۹ ارائه شده است. در این مدل عملکرد حوضچه بستگی به سرعت سقوط ذرات، سطح مقطع جریان عبوری از حوضچه، طول حوضچه و دبی جریان دارد. یکنواخت بودن جریان، لحاظ نکردن اثرات گردابه‌ها، آب‌شستگی و تعلیق دوباره ذرات، یکنواختی دانه‌بندی ذرات رسوبی و نیز منظور نمودن سرعت سقوط یکسان از فرضیات

استفاده شده در این مدل می‌باشند. ساریکایا (۱۹۷۷) مدلی را با استفاده از حل عددی معادله پخشیدگی به روش تفاضل محدود به منظور تخمین راندمان ترسیب در حوضچه‌های رسوب‌گیر ارائه داد. در این مدل، پروفیل سرعت جریان در حوضچه به صورت لگاریتمی و ضریب آشفتگی نیز متغیر در نظر گرفته شده است (۱۵). گرید و همکاران (۱۹۹۰) روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تمامی روابط ارائه شده برای ذرات درشت‌دانه جواب مناسب و برای ذرات ریزدانه راندمان را بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد (۹). جین و همکاران (۲۰۰۰) مدل یک‌بعدی ریاضی برای مطالعه حوضچه رسوب‌گیر ارائه دادند که برای تعیین مشخصات هیدرولیکی، جریان متغیر تدریجی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین معادله یک‌بعدی انتقال رسوب با انتگرال‌گیری از معادله دو‌بعدی و با فرض ناچیز بودن ضریب پخشیدگی توسعه یافت و برای رسوب‌گذاری در حوضچه ترسیب مورد استفاده قرار گرفت (۱۱). سینک و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به تخمین راندمان ترسیب حوضچه‌های رسوب‌گیر پرداختند. نتایج نشان داد که دقت شبکه عصبی در بررسی عملکرد حوضچه‌های ترسیب نسبت به مدل‌های تجربی بهتر است (۱۸). شتاب بوشهری و همکاران (۲۰۱۱) یک نرم‌افزار کامپیوتری برای طراحی بهینه حوضچه‌های رسوب‌گیر ارائه دادند که به کمک آن طول، عرض، ارتفاع و شیب کف سازه را طوری تعیین می‌کند که حوضچه علاوه بر داشتن ویژگی‌های فنی موردنظر، با کم‌ترین هزینه ممکن ساخته شود. در تهیه این نرم‌افزار از مبحث برنامه‌ریزی ریاضی و الگوریتم شمارش ضمنی الفبایی^۱ استفاده شده است (۱۷). لیو و همکاران (۲۰۱۳) مدلی براساس الگوریتم بهینه‌سازی و یک

مدل روبه‌جلو برای تعیین طراحی بهینه پارامترهای حوضچه ترسیب ارائه دادند. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل‌های تجربی نشان داد که این مدل توانایی بالایی در طراحی بهینه حوضچه ترسیب دارد (۱۲). تارپاگکو و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل عددی اثر فاز رسوب روی میدان جریان را در حوضچه بررسی نمودند. آن‌ها با در نظر گرفتن انتقال مومنتوم بین فاز آب و رسوب، هیدرودینامیک حوضچه را به صورت سه‌بعدی و از حل معادلات ناویر استوکس به دست آوردند و ذرات رسوب را با روش روندیابی در آب دنبال کردند (۱۹). گلریز و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی عددی اثر ابعاد (طول، عرض و ارتفاع) حوضچه رسوب‌گیر مستطیلی بر راندمان رسوب‌گیری پرداختند. ایشان سیزده حوضچه با ابعاد مختلف و با حجم یکسان را با مدل عددی فلونت شبیه‌سازی نمودند. برای حل میدان‌های سرعت و غلظت از مدل عددی دو فاز پیچیده و دقیق به شکل اولری-اولری استفاده نمودند و سپس راندمان حوضچه‌ها را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که به دلیل درشت‌دانه بودن ذرات و همچنین شکل هندسی خاص حوضچه‌ها، عرض حوضچه تأثیر بیشتری در افزایش راندمان تله‌اندازی داشته است (۸). اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی خصوصیات هندسی و هیدرولیکی در حوضچه ترسیب بر راندمان تله‌اندازی رسوب پرداختند نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با طول و تحت زاویه قرارگیری مناسب باعث افزایش راندمان تله‌اندازی می‌گردد (۷). عمادی و همکاران (۲۰۱۴) براساس الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان یک مدل کامپیوتری به منظور بهینه‌سازی حوضچه رسوب‌گیر سد انحرافی گنج افروز با در نظر گرفتن خصوصیات هیدرولیکی، رسوبی و سازه‌ای تهیه نمودند. نتایج مدل آن‌ها مقادیر طول و عرض و ارتفاع بهینه را کم‌تر از شرایط موجود در سه راندمان موردبررسی نشان داد (۶). ان و همکاران (۲۰۱۹) از مدل فیزیکی برای

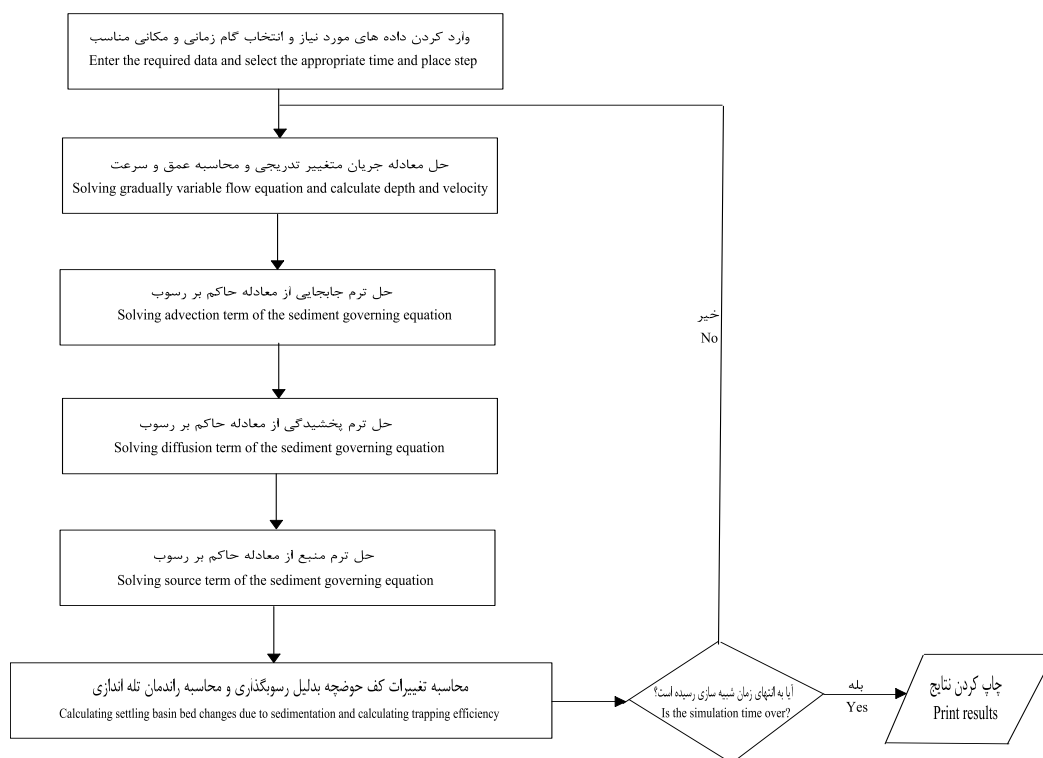
تخمین ناحیه رسوب‌گذاری به وسیله قانون بقای جریان استفاده کردند. آن‌ها همچنین یک مدل دوبعدی برای تخمین میزان انتقال و ته‌نشینی رسوب در محدوده دهانه آبگیر ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های آن‌ها با مدل فیزیکی خطایی در حدود یک درصد را نشان داد (۱). دولل و همکاران (۲۰۲۰) به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان با استفاده از مدل عددی در حوضچه ترسیب پرداختند. آن‌ها با استفاده از دینامیک سیال محاسباتی در سه بعد به بررسی راندمان تله‌اندازی و حرکت و الگوی رسوب در حوضچه ترسیب پرداختند. با توجه به این‌که الگوی رسوبات در مراحل برنامه‌ریزی، طراحی و اجرای پروژه‌های آبی ضروری می‌باشد ذرات رسوب بزرگ‌تر از یک اندازه خاص می‌توانند باعث فرسایش و خوردگی در بخش‌های مختلف سازه‌های آبی بگردند، به این منظور ایشان چهار نوع دانه‌بندی مختلف را موردبررسی قرار داده و راندمان تله‌اندازی ذرات مختلف را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی آن‌ها با مدل فیزیکی مورد مقایسه ۱۳ درصد اختلاف را نشان داد (۴). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پژوهش‌های گسترده‌ای در ارتباط با حوضچه ترسیب به منظور افزایش راندمان تله‌اندازی انجام شده است. علی‌رغم گستردگی این پژوهش‌ها، فرضیاتی از جمله در نظر گرفتن متوسط اندازه ذرات رسوبی به جای اعمال دانه‌بندی ذرات رسوب، در نظر گرفتن جریان یکنواخت در حوضچه و حذف‌ترم پخشیدگی از معادلات انتقال در مدل‌های قبلی وجود داشته است. هدف از این پژوهش، ارائه مدل عددی یک‌بعدی رسوب‌گذاری در حوضچه ترسیب به منظور بررسی تأثیر عوامل هندسی حوضچه بر راندمان تله‌اندازی رسوب با در نظر گرفتن دانه‌بندی رسوبات ورودی است که علاوه بر تخمین راندمان تله‌اندازی در حوضچه، تغییرات کف حوضچه، دانه‌بندی رسوبات خروجی از حوضچه و غلظت رسوب در هر مقطع را نیز محاسبه می‌کند.

مدل روبه‌جلو برای تعیین طراحی بهینه پارامترهای حوضچه ترسیب ارائه دادند. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل‌های تجربی نشان داد که این مدل توانایی بالایی در طراحی بهینه حوضچه ترسیب دارد (۱۲). تارپاگکو و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل عددی اثر فاز رسوب روی میدان جریان را در حوضچه بررسی نمودند. آن‌ها با در نظر گرفتن انتقال مومنتوم بین فاز آب و رسوب، هیدرودینامیک حوضچه را به صورت سه‌بعدی و از حل معادلات ناویر استوکس به دست آوردند و ذرات رسوب را با روش روندیابی در آب دنبال کردند (۱۹). گلریز و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی عددی اثر ابعاد (طول، عرض و ارتفاع) حوضچه رسوب‌گیر مستطیلی بر راندمان رسوب‌گیری پرداختند. ایشان سیزده حوضچه با ابعاد مختلف و با حجم یکسان را با مدل عددی فلونت شبیه‌سازی نمودند. برای حل میدان‌های سرعت و غلظت از مدل عددی دو فاز پیچیده و دقیق به شکل اولری-اولری استفاده نمودند و سپس راندمان حوضچه‌ها را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که به دلیل درشت‌دانه بودن ذرات و همچنین شکل هندسی خاص حوضچه‌ها، عرض حوضچه تأثیر بیشتری در افزایش راندمان تله‌اندازی داشته است (۸). اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی خصوصیات هندسی و هیدرولیکی در حوضچه ترسیب بر راندمان تله‌اندازی رسوب پرداختند نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با طول و تحت زاویه قرارگیری مناسب باعث افزایش راندمان تله‌اندازی می‌گردد (۷). عمادی و همکاران (۲۰۱۴) براساس الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان یک مدل کامپیوتری به منظور بهینه‌سازی حوضچه رسوب‌گیر سد انحرافی گنج افروز با در نظر گرفتن خصوصیات هیدرولیکی، رسوبی و سازه‌ای تهیه نمودند. نتایج مدل آن‌ها مقادیر طول و عرض و ارتفاع بهینه را کم‌تر از شرایط موجود در سه راندمان موردبررسی نشان داد (۶). ان و همکاران (۲۰۱۹) از مدل فیزیکی برای

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در حوضچه ترسیب ابتدا یک مدل عددی توسعه یافت و سپس به بررسی تأثیر عوامل هندسی حوضچه بر راندمان تله‌اندازی رسوب پرداخته شد. در مدل عددی یک‌بعدی توسعه‌یافته، معادلات حاکم بر جریان و رسوب به ترتیب حل می‌شود. با استفاده از داده‌های هندسی حوضچه و همچنین دبی ورودی به سازه،

ابتدا معادلات حاکم بر جریان حل و عمق و سرعت در مقاطع مختلف محاسبه می‌گردد. سپس معادلات حاکم بر رسوب‌گذاری و با داشتن غلظت ورودی رسوبات و همچنین عمق و سرعت در هر مقطع، میزان تغییرات غلظت رسوب، راندمان تله‌اندازی و سایر متغیرهای موردنیاز محاسبه می‌شود. در شکل ۱ فلوجارت ارائه گردیده است.



شکل ۱- فلوجارت مربوط به مراحل شبیه‌سازی رسوب‌گذاری و محاسبه راندمان تله‌اندازی در حوضچه ترسیب.

Figure 1. Flowchart to sedimentation simulation and trapping efficiency in settling basin.

محاسبه شود. معادله جریان متغیر تدریجی در مجاری روباز به صورت رابطه ۱ است (چادری، ۱۹۹۳):

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{u^2}{C^2 R} = 0 \quad (1)$$

در شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در حوضچه ترسیب لازم است مقدار سرعت و عمق در هر مقطع از سازه

حوضچه محاسبه و سپس با داشتن قطر ذرات و رابطه استریکلر ضریب مانینگ محاسبه می‌شود. معادله یک‌بعدی انتقال رسوب با انتگرال‌گیری از معادله دوبعدی به دست می‌آید. معادله دوبعدی انتقال رسوب در شرایط غیرماندگار به صورت رابطه ۲ است (۱۱):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial wC}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2)$$

در انتقال رسوبات دارد و بنابراین از این ترم می‌توان صرف‌نظر کرد. با انتگرال‌گیری از رابطه ۲ در راستای عمق جریان و با لحاظ شرایط مرزی جریان و رسوب برای سطح آب، معادله یک‌بعدی انتقال رسوب مطابق رابطه ۳ ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial AC}{\partial x} + \frac{\partial AuC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + B(E_b - D_b) \quad (3)$$

وارد شده به جریان از بستر و D_b مقدار رسوبات ته‌نشین شده از جریان به روی بستر است. مقدار رسوبات ته‌نشین شده به دلیل نیروی ثقل از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$D_b = \omega_b C_b \quad (4)$$

که مطابق رابطه ۵ بستگی به متوسط غلظت در مقطع (C) دارد:

$$C_b = \alpha C \quad (5)$$

(۱۱). مقدار رسوبات دوباره معلق شده در جریان به دلیل پخشیدگی از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$E_b = -\varepsilon \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{bed} = -\alpha \omega_b C_c \quad (6)$$

که در آن، x متغیر مکان، u متوسط سرعت جریان در هر مقطع، H تراز سطح آب، R شعاع هیدرولیکی، g شتاب ثقل و C ضریب شزی است که برابر با $C = R^{1/6}/n$ و n ضریب زبری مانینگ است. مدل عددی ابتدا قطر متوسط ذرات ترسیب شده در

که در آن، x و z به ترتیب مختصات در جهت جریان و عمق آب، u و w سرعت در جهات x و z ، ε_x و ε_z غلظت رسوبات، ω سرعت سقوط ذرات و ε_x و ε_z ضریب پخشیدگی رسوبات در جهات x و z است. پخشیدگی در جهت عمق یعنی z تأثیر ناچیزی

که در آن، A سطح مقطع جریان، U سرعت متوسط جریان، C متوسط غلظت رسوبات معلق در مقطع و قسمت $B(E_b - D_b)$ از معادله فوق، ترم منبع نامیده می‌شود که B عرض مقطع، E_b مقدار رسوبات

که در آن، ω_b سرعت سقوط رسوبات در نزدیکی کف بستر، C_b غلظت رسوبات در نزدیکی بستر است

در رابطه ۵، α ضریب انطباق رسوب است که مقدار آن برای حوضچه ترسیب ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود

ذرات رسوب دارد. ژانگ (۱۹۶۱) بر اساس بیلان انرژی در جریان حامل رسوب رابطه ۷ را برای محاسبه ظرفیت حمل رسوب در نزدیکی بستر ارائه داد (۲۰):

$$C_c = k \left(\frac{u^3}{gh\omega_b} \right)^m \quad (7)$$

حالت فرسایش و یا رسوب‌گذاری در کف بستر اتفاق نمی‌افتد. بر اساس معادله پیوستگی رسوب که معادله تغییرات کف بستر نیز نامیده می‌شود، تغییرات کف بستر بین دو مقطع در مدت زمان Δt برابر با تفاوت انتقال رسوبات دو مقطع و تفاوت غلظت در حجم آب در گام زمانی موردنظر است. بنابراین معادله پیوستگی رسوب به صورت رابطه ۸ ارائه می‌شود:

$$\gamma' \frac{\partial Z_b}{\partial t} = \alpha \omega (C - C_c) \quad (8)$$

معادله حاکم بر جریان در حوضچه ترسیب با مقطع مستطیلی را می‌توان با استفاده از روش تفاضل محدود به صورت رابطه ۹ جداسازی کرد:

$$H_i = H_{i+1} + \frac{\Delta x n^2 q^2}{2} \left(\frac{1}{h_i^2 R_i^{4/3}} + \frac{1}{h_{i+1}^2 R_{i+1}^{4/3}} \right) + \frac{q^2}{2g} \left(\frac{1}{h_{i+1}^2} - \frac{1}{h_i^2} \right) \quad (9)$$

عددی معادله جریان متغیر تدریجی جداسازی می‌شود. در مدل حاضر، برای حل معادله حاکم بر رسوب از روش تصنیف زمان استفاده شده است. بدین منظور معادله رسوب در سه گام کلی حل می‌شود. در گام اول ترم جابجایی از معادله رسوب جدا شده و به صورت صریح برای کل گره‌های محاسباتی حل می‌گردد و تغییرات غلظت رسوب در هر گره تعیین می‌شود. در گام دوم ترم پخشیدگی جدا و با در نظر گرفتن تغییرات غلظت به دلیل ترم جابجایی، محاسبات

که در آن، C_c ظرفیت حمل رسوب در نزدیکی کف بستر است. ظرفیت حمل رسوب بستگی به فاکتورهای هیدرولیکی مانند سرعت و عمق جریان و فاکتورهای رسوبی مانند اندازه و وزن مخصوص

که در آن، k ضریب منعکس‌کننده ظرفیت رسوب انتقالی توسط جریان بوده و در صورت نبود داده‌های کافی برابر ۰/۰۱ پیشنهاد می‌گردد، هم‌چنین ضریب m مقدار ۰/۹۲ را دارد (۱۰). در شرایط تعادلی مقدار رسوبات وارد شده به جریان از بستر با رسوبات تهنشین شده از جریان به روی بستر برابر است و مقدار ترم منبع در معادله ۳ برابر صفر است. در این

که در آن، γ' بیانگر وزن مخصوص خشک رسوبات و Z_b تراز کف بستر است.

که در آن، q دبی در واحد عرض، i و $i+1$ به ترتیب شماره گره‌ها در بالادست و پایین دست هر مقطع و Δx اندازه گام مکانی بین گره‌ها و h عمق آب می‌باشد. تراز سطح آب در خروجی حوضچه ترسیب به عنوان شرط مرزی پایین دست در نظر گرفته می‌شود و مقدار تراز سطح آب در گره‌های بالادست با استفاده از روش سعی و خطا محاسبه می‌شود. عمق آب در هر گره نیز از تفاضل تراز سطح آب و تراز رسوبات کف تعیین می‌شود. معادله انتقال رسوب بعد از حل

مجزای ترم‌های مختلف معادلات با استفاده از بهترین روش عددی است.

اولین گام جهت حل معادلات انتقال رسوب، حل ترم جابجایی مطابق رابطه ۱۰ است.

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial AuC}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

هر گروه به صورت مجزا حل می‌شود. به منظور منفصل‌سازی ترم جابجایی در تکنیک تصنیف زمان می‌توان از شمای مختلف استفاده نمود. در این پژوهش از شمای فروم مطابق رابطه ۱۱ استفاده شد (۱۴):

$$(AC)_i^{n+1} = (AC)_i^n - 0.5[(AC)_{i-1}^n - (AC)_{i+1}^n]\varepsilon + 0.5[(AC)_{i-1}^n - 2(AC)_i^n + (AC)_{i+1}^n]\varepsilon^2 \quad (11)$$

گام‌های مکانی و زمانی طوری انتخاب شد که عدد کورانت کمتر از یک باشد. لازم به ذکر است روش فروم دارای دقت مرتبه دوم می‌باشد، هرچند استفاده از شمایی با دقت بالاتر در این مرحله امکان‌پذیر است اما با توجه به شمای عددی که برای منفصل‌سازی ترم‌های دیگر به کاررفته است، دقت در نظر گرفته شده مناسب است (۱۳).
بعد از حل ترم جابجایی، ترم پخشیدگی مطابق رابطه ۱۲ از معادله انتقال رسوب جدا می‌شود.

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A \varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) = 0 \quad (12)$$

کرانک نیکلسون مطابق رابطه ۱۳ منفصل‌سازی شد:

$$A_1 C_{i-1,j}^{**} + A_2 C_{i,j}^{**} + A_3 C_{i+1,j}^{**} = A_0 \quad (13)$$

رابطه ۱۴ ارائه می‌شود:

برای این ترم صورت می‌گیرد و در گام سوم نیز ترم‌های منبع جداسازی و حل می‌شود. دقت مدل عددی بستگی زیادی به نحوه جداسازی و حل ترم‌های جابجایی، پخشیدگی و منبع دارد. یکی از مزایای روش تصنیف زمان امکان تفکیک و حل

ذرات رسوب ورودی به حوضچه ترسیب دارای اندازه‌های مختلف و غیریکنواخت است. به منظور شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در حوضچه، ذرات رسوب ورودی به m گروه تقسیم و برای هر گروه یک قطر متوسط در نظر گرفته می‌شود و ترم‌های مختلف برای

که در آن، n نمایانگر گام زمانی فعلی، i نمایانگر گام مکانی، j نشانگر گروه ذرات رسوب، ε عدد کورانت، $C_{i,j}$ غلظت رسوبات مربوط به گروه j و در مکان i که معادل $C_{i,j} = P_{i,j} C_i$ است، $P_{i,j}$ درصد گروه ذره j در رسوبات معلق در مکان i و C_i مجموع غلظت رسوبات معلق همه گروه‌ها در مکان i است، هم‌چنین متغیر $C_{i,j}^*$ مقدار جدید غلظت رسوب مربوط به گروه j و در مکان i می‌باشد. در صورتی که عدد کورانت بیش از یک باشد، مدل عددی واگرا می‌شود. اندازه

ترم پخشیدگی با استفاده از روش نیمه ضمنی

که در آن، C^{**} مقدار جدید غلظت رسوب است و هم‌چنین ضرایب A_0, A_1, A_2 و A_3 به صورت

$$A_1 = A_3 = -\frac{\Delta t \varepsilon_x}{2\Delta x^2} \quad (14)$$

$$A_2 = 1 - A_1 - A_3$$

$$A_0 = \frac{\Delta t \varepsilon_x}{\Delta x^2} C_{i-1}^* + \left(1 - \frac{\Delta t \varepsilon_x}{\Delta x^2}\right) C_i^* + \frac{\Delta t \varepsilon_x}{2\Delta x^2} C_{i+1}^*$$

A_3 برابر صفر است. رابطه فوق، یک دستگاه معادلات سه قطری تشکیل می‌دهد که با استفاده از الگوریتم TDMA¹ حل می‌شود و بدین ترتیب مقادیر C^{**} در تمام گره‌های محاسباتی به دست می‌آید. در گام بعدی لازم است که ترم منبع مطابق رابطه ۱۵ از معادله حاکم بر رسوب جدا و به صورت رابطه ۱۶ مفصل‌سازی شود:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + B\alpha\omega(C - C_c) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{(AC)_{i,j}^{n+1} - (AC)_{i,j}^{**}}{\Delta t} + B_i\alpha\omega_j(C_{i,j}^{n+1} - C_{c,i,j}^{n+1}) = 0 \quad (16)$$

به صورت رابطه ۱۷ در نظر گرفته می‌شود.

$$\omega_j = \frac{1}{18} \frac{g}{\mu} (\rho_d - \rho) d_j^2 \quad (17)$$

$C_{c,i,j}$ ظرفیت حمل رسوب معلق در نزدیکی کف بستر برای مکان i و گروه ذرات j است. با ساده‌سازی رابطه ۱۶، غلظت رسوبات برای ذرات رسوب گروه j برای هر گره محاسباتی از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$C_{i,j}^{n+1} = \frac{A_i C_{i,j}^{**} + (B_i \alpha \omega_j \Delta t) C_{c,i,j}^{n+1}}{A_i + B_i \alpha \omega_j \Delta t} \quad (18)$$

محاسبه کرد:

در مرز بالادست مقدار غلظت ورودی مشخص است بنابراین برای اولین گره محاسباتی ضرایب A_1 و A_3 برابر صفر، ضریب A_2 برابر یک و ضریب A_0 نیز همان مقدار غلظت ورودی در نظر گرفته شد. در مرز پایین دست تغییرات مکانی غلظت برابر صفر در نظر گرفته شده است، بنابراین برای آخرین گره ضرایب A_1 برابر -1 و ضریب A_2 برابر یک و ضرایب A_0 و

که در آن، ω_j ، سرعت سقوط برای هر گروه ذره

که در آن، d_j قطر ذرات رسوب مربوط به هر گروه ذره، ρ جرم مخصوص سیال و ρ_d جرم مخصوص ذرات رسوب می‌باشد.

مقدار غلظت رسوب کل ذرات معلق در مقطع i ام برای گام زمانی $n+1$ را می‌توان از رابطه ۱۹

$$C_i^{n+1} = \sum_{j=1}^m C_{i,j}^{n+1} \quad (19)$$

مقطع i را می‌توان با جداسازی معادله پیوستگی رسوب مطابق رابطه ۲۰ محاسبه کرد:

$$\gamma' \frac{\Delta z_{b,i,j}^{n+1}}{\Delta t} = \alpha \omega_j (C_{i,j}^{n+1} - C_{c,i,j}^{n+1}) \quad (20)$$

تراز کف حوضچه ترسیب در زمان $n+1$ و در مقطع i را می‌توان از رابطه ۲۱ محاسبه کرد:

$$z_{b,i}^{n+1} = z_{b,i}^n + \sum_{j=1}^{j=m} \Delta z_{b,i,j}^{n+1} \quad (21)$$

i را بعد از تعیین غلظت هر گروه رسوبی و هم‌چنین غلظت کل رسوب معلق می‌توان با استفاده از رابطه ۲۲ محاسبه کرد:

$$P_{i,j}(\%) = 100 \frac{C_{i,j}}{C_i} \quad (22)$$

RE، می‌باشد. با استفاده از رابطه ۲۳ می‌توان راندمان تله‌اندازی در مقطع i را محاسبه کرد:

$$RE_i = 100 \left(C_1 - \sum_{j=1}^{j=m} C_{i,j}^{n+1} \right) / C_1 \quad (23)$$

ترسیب مستطیلی به طول ۱/۲۴۴۶ متر و عرض ۰/۴۵۷۲ متر می‌باشد که برای دبی‌های مختلف مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسوب با قطر مشخص را به درون حوضچه ترسیب وارد کرد و بعد از مدت زمان مشخصی مقدار غلظت خروجی از حوضچه را اندازه‌گیری کرد. در جدول ۱ مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها مربوط به البارودی (۱۹۶۹) آورده شده است (۵).

ته‌نشینی رسوبات در کف حوضچه باعث بالا آمدن رقوم کف سازه می‌شود. افزایش تراز کف حوضچه ترسیب توسط ذرات رسوب گروه j در

که در آن، $\Delta z_{b,i,j}$ تغییرات کف حوضچه در مقطع i به دلیل ترسیب رسوبات مربوط به گروه j می‌باشد.

دانه‌بندی رسوبات معلق در مقاطع مختلف حوضچه ترسیب به دلیل ته‌نشینی ذرات تغییر می‌کند. درصد ذرات رسوب در گروه‌های مختلف و در مقطع

از فاکتورهای مهم و اساسی در ارزیابی عملکرد حوضچه ترسیب تخمین راندمان تله‌اندازی رسوب،

برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی نیاز به داده‌های آزمایشگاهی و میدانی است. از داده‌های آزمایشگاهی البارودی (۱۹۶۹) و داده‌های میدانی شتاب بوشهری و همکاران (۲۰۱۰) که مربوط به حوضچه رسوبگیر سد نکوآباد اصفهان است، برای صحت‌سنجی مدل عددی و راندمان تله‌اندازی رسوب استفاده گردید (۵ و ۱۶). مدل آزمایشگاهی البارودی (۱۹۶۹) شامل یک حوضچه

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی داده آزمایشگاهی مربوط به البارودی (۱۹۶۹).

Table 1. Hydraulic characteristics of laboratory data related to El-Baroudi (1969).

شماره Run	دبی Discharge (l/s)	عمق Depth (m)	زمان Time (min)
1-7	0.221	0.205	8.8
2-3	0.126	0.333	25
2-4	0.158	0.366	22
2-8	0.3	0.366	11.6

برداشت به ترتیب ۱۵ و ۵۰ مترمکعب بر ثانیه ساخته شده است. در ابتدای هر دو کانال از حوضچه رسوب‌گیر با مقطع دوزنقه و شیب جداره ۱ به ۱/۵ استفاده شده است. مشخصات طراحی و هندسی حوضچه‌های رسوب‌گیر در جدول ۲ آورده شده است (۱۶).

داده‌های میدانی مورد استفاده در این پژوهش مربوط به حوضچه رسوب‌گیر نکوآباد اصفهان می‌باشد. رودخانه زاینده‌رود تنها منبع تامین آب سطحی در منطقه اصفهان می‌باشد و سد نکوآباد در ۴۵ کیلومتری جنوب‌غربی شهر اصفهان به منظور کنترل سطح آب زاینده‌رود و انتقال آب احداث شده است. دو کانال اصلی در طرفین سد نکوآباد برای

جدول ۲- مشخصات هندسی حوضچه‌های رسوب‌گیر نکوآباد.

Table 2. Geometry characteristics of Nekoabad settling basin.

حوضچه Basin	دبی Discharge (m ³ /s)	عمق Depth (m)	عرض Width (m)	طول length (m)
L	50	3	42	42.5
R	15	3	12	42.5

شده است. در جدول ۳ غلظت ورودی و خروجی به حوضچه‌های ترسیب نکوآباد و در جدول ۴ دانه‌بندی ذرات رسوبی در هر آزمایش آورده شده است.

به‌منظور بررسی راندمان تله‌اندازی رسوب در حوضچه ترسیب نکوآباد، مشخصات هیدرولیکی جریان و رسوب ورودی به حوضچه ترسیب برداشت

جدول ۳- غلظت ورودی و خروجی رسوب به حوضچه‌های ترسیب نکوآباد در هر آزمایش.

Table 3. Inlet and outlet Sediment concentrations to Nekoabad settling basin in each experiment.

شماره آزمایش No.	حوضچه Basin	دبی Discharge (m ³ /s)	غلظت ورودی Inflow sediments (mg/10lit)	غلظت خروجی Outflow sediments (mg/10lit)
1	R	12.5	44	34
2	R	11.5	53	42
3	R	10.5	47	32
4	R	10	34	24
5	R	9.5	31	26
6	R	8	26	17
7	L	26	34	26
8	L	25.5	41	22
9	L	25	40	23
10	L	24.5	35	16
11	L	24	44	23
12	L	23.5	43	25

جدول ۴- درصد ذرات رسوب ورودی به حوضچه‌های نکوآباد.

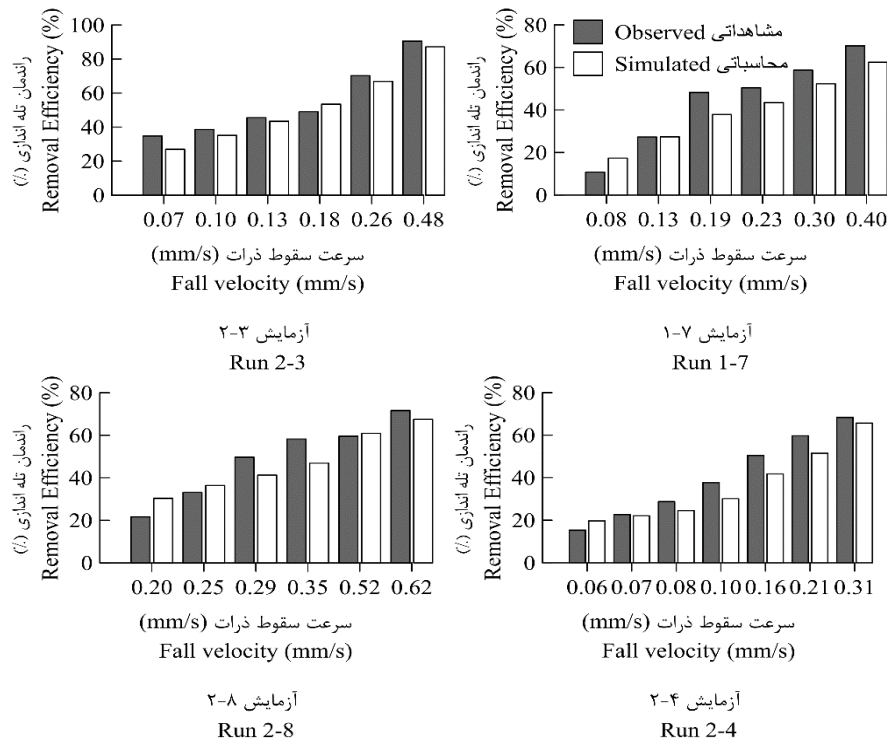
Table 4. Specifications of inlet partial size to Nekoabad settling basin.

شماره آزمایش No.	حوضچه Basin	اندازه ذرات رسوبی Size (mm)			
		0.062-0.074	0.074-0.088	0.088-0.1	0.1-0.25
1	R	38.64	20.45	9.09	31.82
2	R	37.74	26.42	15.09	20.75
3	R	29.79	31.91	19.15	19.15
4	R	44.12	14.7	20.59	20.59
5	R	51.61	29.03	19.35	0
6	R	50	30.77	19.23	0
7	L	55.88	23.58	20.59	0
8	L	34.15	19.51	29.27	17.07
9	L	52.5	20	15	12.5
10	L	34.29	22.86	25.71	17.14
11	L	36.36	15.91	29.55	18.18
12	L	30.23	30.23	20.93	18.61

و خروجی رسوبات در حوضچه ترسیب می‌توان درصد تله‌اندازی رسوب را محاسبه کرد. در شکل ۲ برای سرعت سقوط ذرات مختلف راندمان تله‌اندازی مشاهداتی و محاسباتی آورده شده است.

نتایج و بحث

اولین صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی البارودی (۱۹۶۹) انجام شد. راندمان تله‌اندازی رسوب بستگی به قطر ذرات رسوبی و یا سرعت سقوط ذرات دارد. با استفاده از غلظت ورودی



شکل ۲- راندمان تله‌اندازی رسوب محاسباتی و مشاهداتی برای آزمایش‌ها البارودی (۱۹۶۹).

Figure 2. Simulation and observational removal efficiency El-Baroudi (1969).

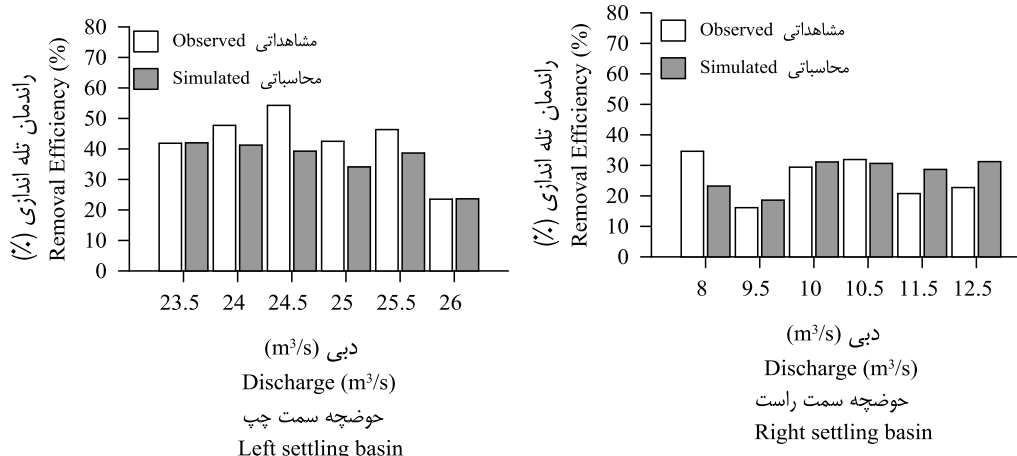
شد.

به‌منظور بررسی صحت‌سنجی مدل عددی، جذر میانگین مربعات خطا مطابق رابطه ۲۴ محاسبه

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n}} \quad (24)$$

این موضوع آورده نشده است، مدل عددی برای ذرات بسیار ریز دقت کم‌تری دارد. صحت‌سنجی مدل عددی برای داده‌های صحرائی مربوط به حوضچه‌های ترسیب سد انحرافی نکوآباد نیز صورت گرفت. در شکل ۳ برای دبی‌های مختلف مقدار راندمان تله‌اندازی مشاهداتی و محاسباتی برای حوضچه‌های ترسیب سمت چپ و راست سد نکوآباد آورده شده است.

در رابطه ۲۴، $RMSE$ ، مقدار راندمان تله‌اندازی اندازه‌گیری شده، s_i مقدار راندمان تله‌اندازی محاسبه‌شده توسط مدل عددی و n تعداد آزمایش‌ها است. مقدار متوسط ریشه دوم میانگین مربع خطا مدل عددی در شبیه‌سازی راندمان تله‌اندازی برای آزمایش‌های فوق ۶/۱۵ درصد است. لازم به ذکر است مقدار خطا برای ذرات ریز با سرعت سقوط کم، بیش‌تر است. با توجه به این‌که ذرات ریز رس دارای چسبندگی است و در روابط حاکم بر انتقال رسوب



شکل ۳- راندمان تله‌اندازی رسوب محاسباتی و مشاهداتی برای حوضچه‌های ترسیب سد انحرافی نکوآباد.

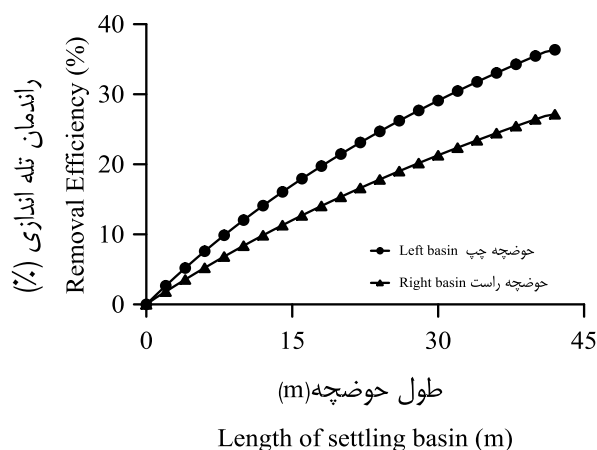
Figure 3. Computational and observational removal efficiency for Nekoabad settling basin.

تله‌اندازی برای همه ذرات رسوب و برای هر گروه ذرات نسبت به طول حوضچه در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. با افزایش فاصله از ابتدا حوضچه، مقدار راندمان ترسیب افزایش می‌یابد به طوری که در انتهای حوضچه حدود ۳۸/۶ و ۲۹/۷ درصد رسوبات به ترتیب در حوضچه چپ و راست ته‌نشین می‌شود.

مقدار متوسط جذر میانگین مربع خطا مدل عددی در شبیه‌سازی راندمان تله‌اندازی برای حوضچه ترسیب سمت چپ و راست به ترتیب ۸/۱۳ و ۶/۷۷ درصد است. لازم به ذکر است متوسط راندمان تله‌اندازی رسوب برای حوضچه ترسیب سمت چپ و راست ۳۶/۵ و ۲۷/۳ درصد است. راندمان

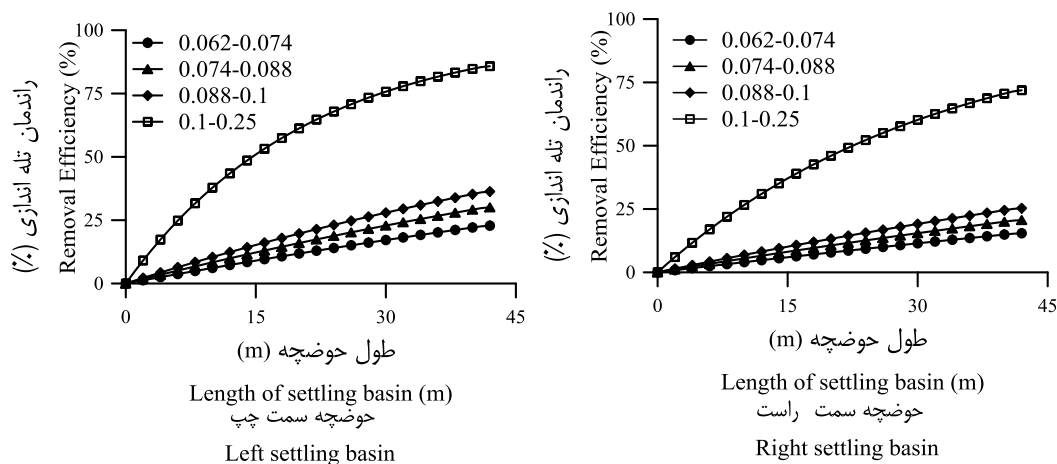
اندازه ذرات بزرگ‌تر و سرعت سقوط زیاد، بیش‌ترین راندمان تله‌اندازی را داشته و بیش از ۸۰ درصد این ذرات در حوضچه‌ها ترسیب می‌شوند.

راندمان تله‌اندازی برای هر گروه ذرات با توجه به متفاوت بودن قطر ذرات رسوب در هر گروه متفاوت است. ذرات با قطر بین ۰/۲۵-۰/۱ میلی‌متر به دلیل



شکل ۴- راندمان تله‌اندازی رسوبات در طول حوضچه‌های ترسیب نکوآباد.

Figure 4. Removal efficiency along Nekoabad settling basin.

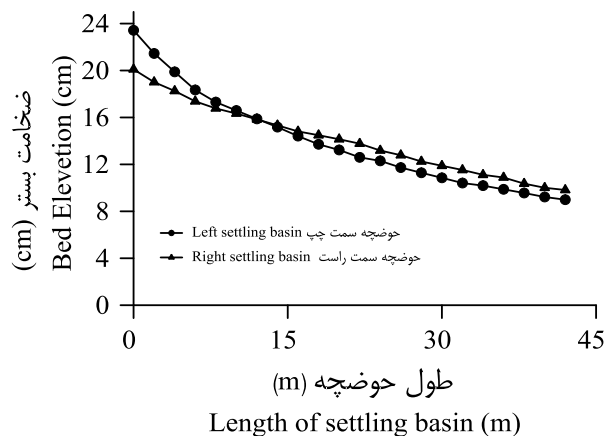


شکل ۵- راندمان تله‌اندازی گروه‌های مختلف رسوبات در طول حوضچه‌های ترسیب نکوآباد.

Figure 5. Removal efficiency of different sediment groups along Nekoabad settling basin.

چپ و راست سد نکوآباد با مدل عددی شبیه‌سازی و در شکل ۶ آورده شده است. لازم به ذکر است متوسط داده‌های میدانی مربوط به جدول‌های ۳ و ۴ به‌عنوان داده‌های ورودی موردنیاز مدل عددی در طول مدت شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

تراز کف حوضچه ترسیب به دلیل ته‌نشینی رسوبات تغییر می‌کند. بنابراین باید مقدار ضخامت گل‌ولای جمع شده در طول حوضچه ترسیب، در بازه‌های زمانی مختلف را محاسبه و در صورت نیاز حوضچه را لایروبی کرد. در این پژوهش برای بازه زمانی سه ماه تغییرات کف حوضچه ترسیب سمت

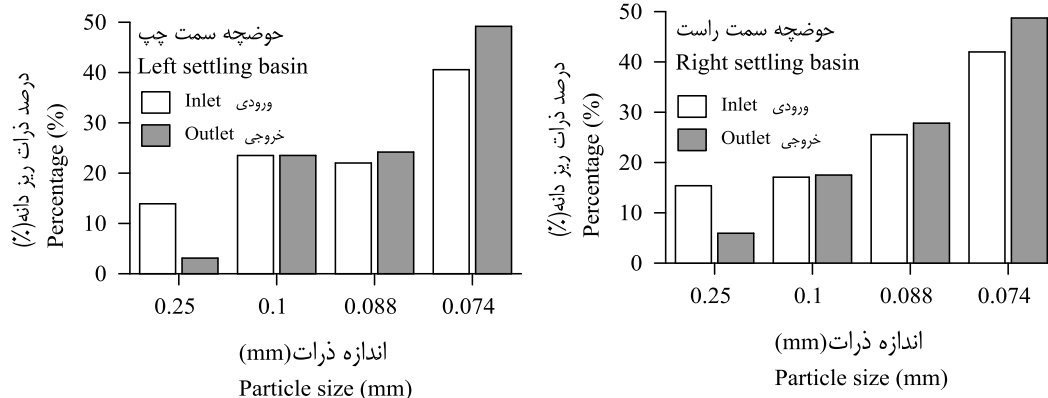


شکل ۶- شبیه سازی تغییرات تراز کف حوضچه های ترسیب نکوآباد با استفاده از مدل عددی.

Figure 6. Simulation of bed changes in Nekoabad settling basin using numerical model.

درشت دانه در حوضچه ترسیب بیش تر از ذرات ریزدانه ته نشین می شوند، بنابراین درصد ذرات ریزدانه در انتهای حوضچه ترسیب نسبت به ابتدا بیش تر می شود. در شکل ۷ دانه بندی رسوبات شبیه سازی شده در انتهای حوضچه های ترسیب برای دبی متوسط آورده شده است.

همان طور که ملاحظه می شود، تغییرات کف حوضچه های ترسیب در ابتدای سازه به دلیل غلظت بالای رسوبات ورودی بیش تر از انتها است. تراز کف حوضچه های ترسیب سمت چپ و راست بعد از مدت سه ماه به ترتیب حدود $23/4$ و 20 سانتی متر بالا می آیند. دانه بندی رسوبات در طول حوضچه ترسیب به دلیل ته نشینی ذرات تغییر می کند، ذرات

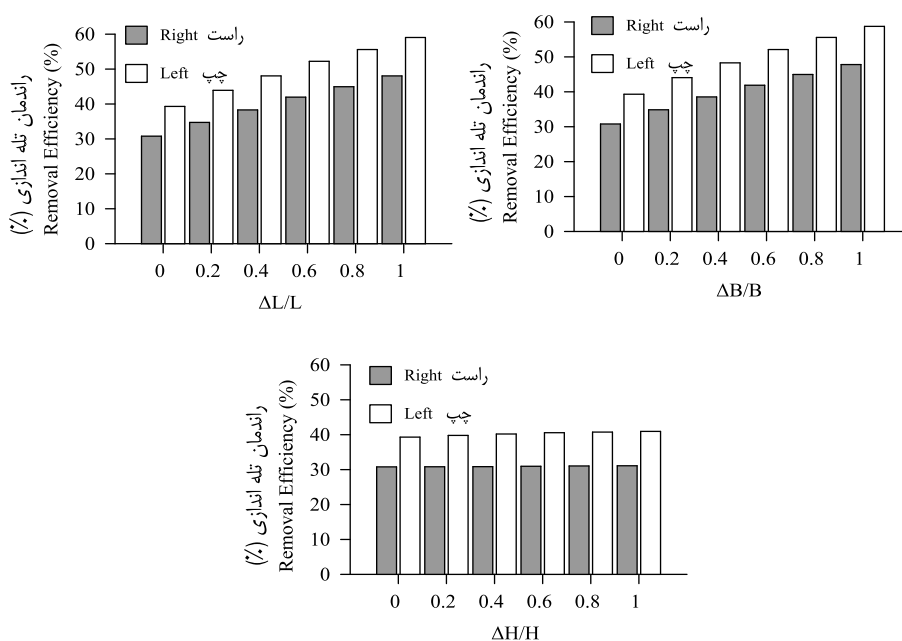


شکل ۷- شبیه سازی دانه بندی رسوبات در انتهای حوضچه های ترسیب نکوآباد با استفاده از مدل عددی.

Figure 7. Particle size simulation at the end of Nekoabad settling basin using numerical model.

بقیه پارامترها، مدل عددی اجرا و راندمان تله اندازی محاسبه شد. در شکل ۸ تأثیر افزایش طول، عرض و عمق حوضچه بر راندمان تله اندازی رسوب آورده شده است.

به منظور اصلاح حوضچه های ترسیب نکوآباد و افزایش راندمان تله اندازی رسوب می توان طول، عرض و یا عمق حوضچه را افزایش داد. بدین منظور با افزایش یکی از متغیرهای فوق و ثابت نگاه داشتن

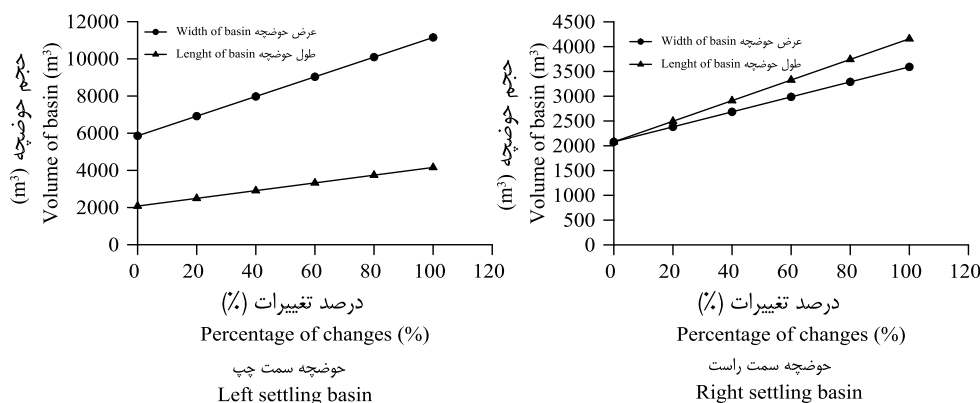


شکل ۸- تأثیر افزایش طول، عرض و عمق حوضچه‌های ترسیب نکوآباد بر راندمان تله‌اندازی رسوب.

Figure 8. The effect of increasing the length, width and depth of Nekoabad settling basin on removal efficiency.

بتن‌ریزی دارد، بنابراین باید تأثیر پارامترهای مزبور بر حجم حوضچه محاسبه شوند. در شکل ۹ تأثیر افزایش طول و عرض بر حجم حوضچه‌های ترسیب نکوآباد آورده شده است. افزایش طول نسبت به عرض در حوضچه سمت چپ تأثیر کم‌تری بر حجم حوضچه ترسیب دارد، بنابراین بهتر است طول حوضچه برای اصلاح این سازه افزایش یابد. هم‌چنین در حوضچه ترسیب سمت راست نیز باید عرض حوضچه به‌منظور افزایش راندمان تله‌اندازی زیاد شود.

با افزایش عرض و طول مقدار راندمان تله‌اندازی به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد اما افزایش عمق تأثیر چندانی برای افزایش راندمان تله‌اندازی ندارد. در صورتی‌که طول یا عرض و یا عمق دو برابر شود مقدار راندمان ترسیب به‌طور متوسط ۵۳/۵، ۵۲ و ۳ درصد در هر دو حوضچه افزایش می‌یابد. بنابراین در صورت اصلاح حوضچه‌ها به‌منظور افزایش عملکرد باید طول و یا عرض حوضچه‌ها افزایش یابد. افزایش طول و یا عرض به‌منظور اصلاح حوضچه‌ها نیاز به خاک‌برداری و



شکل ۹- تأثیر افزایش طول، عرض و عمق سازه رسوب‌گیر بر حجم حوضچه.

Figure 9. The effect of increasing the length, width and depth on the volume of the pond.

استفاده شد. نتایج نشان داد که متوسط جذر میانگین مربع خطا مدل عددی در شبیه سازی راندمان تله اندازی برای داده های آزمایشگاهی $6/15$ درصد و برای داده های صحرایی مربوط به حوضچه ترسیب سمت چپ و راست نکوآباد به ترتیب $8/13$ و $6/77$ درصد است که دقت مناسبی برای پیش بینی راندمان تله اندازی توسط مدل عددی است. پس از توسعه و صحت سنجی مدل عددی، عملکرد حوضچه های ته نشینی نکوآباد با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که متوسط راندمان تله اندازی رسوب برای حوضچه ترسیب سمت چپ و راست $36/5$ و $27/3$ درصد است بنابراین مقدار زیادی رسوب به داخل شبکه آبیاری وارد می شود. به منظور اصلاح حوضچه های ترسیب نکوآباد و افزایش راندمان تله اندازی رسوب می توان طول، عرض و یا عمق حوضچه را افزایش داد. بدین منظور با افزایش یکی از متغیرهای فوق و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها، مدل عددی اجرا و راندمان تله اندازی محاسبه شد. نتایج نشان می دهد که افزایش طول حوضچه ترسیب سمت چپ و افزایش عرض حوضچه سمت راست سد نکوآباد بیشترین تأثیر را بر راندمان تله اندازی دارد.

داده ها و اطلاعات

توسعه مدل عددی در این مقاله، براساس رساله مقطع دکتری نویسنده اول است که در سال جاری، در گروه مهندسی آب در دانشگاه رازی، در حال انجام است. همچنین از داده های آزمایشگاهی البارودی (۱۹۶۹) و داده های میدانی شتاب بوشهری و همکاران (۲۰۱۰) برای صحت سنجی مدل عددی و راندمان تله اندازی رسوب استفاده شده است.

تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

لازم به ذکر است علاوه بر افزایش طول و یا عرض حوضچه ترسیب برای افزایش راندمان تله اندازی می توان از صفحات هادی نیز استفاده کرد. تیغه های هادی باعث افزایش طول پیمایش جریان در حوضچه می شود و همین امر سبب ترسیب بیش تر رسوبات می شود. به منظور امکان سنجی هر یک از گزینه ها علاوه بر ملاحظات هیدرولیکی باید از لحاظ اقتصادی نیز اصلاح حوضچه بررسی شوند. به عبارت دیگر می توان براساس روش های بهینه سازی با در نظر گرفتن حداقل هزینه اجرا و حداکثر کردن راندمان تله اندازی، حوضچه ترسیب را اصلاح کرد.

نتیجه گیری کلی

در این پژوهش مدل عددی رسوب گذاری با شبیه سازی رسوب گذاری ذرات با دانه بندی غیریکنواخت در حوضچه ترسیب توسعه یافت. در این مدل، پروفیل سطح آب و خصوصیات هیدرولیکی با حل عددی معادله جریان متغیر تدریجی و در نظر گرفتن شرط مرزی در پایین دست محاسبه شد و سپس معادله یک بعدی انتقال رسوب با در نظر گرفتن ترم منبع با استفاده از روش تصنیف زمان جداسازی و حل گشت. در هر گام زمانی مقدار تغییرات تراز کف حوضچه ترسیب، دانه بندی رسوبات در هر مقطع و راندمان تله اندازی محاسبه شد. ذرات رسوب ورودی به حوضچه های ترسیب در اغلب موارد دارای اندازه های مختلف و غیریکنواخت است. به منظور شبیه سازی آن ها در مدل عددی، ذرات رسوب ورودی به حوضچه ترسیب به تعدادی گروه تقسیم و برای هر گروه یک قطر متوسط در نظر گرفته شد. سپس معادلات حاکم بر رسوبات به صورت جداگانه برای هر گروه حل و غلظت هر گروه رسوبی محاسبه گردید. به منظور صحت سنجی مدل عددی از داده های آزمایشگاهی البارودی (۱۹۶۹) و داده های میدانی مربوط به حوضچه ترسیب سد نکوآباد اصفهان

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

مقاله حاضر، حاصل بخشی از رساله مقطع دکتری نویسنده اول است که ذیل حمایت دانشگاه رازی در حال انجام است.

مشارکت نویسندگان

در مقاله حاضر، نویسنده اول در مدل‌سازی نتایج، انجام محاسبات ترسیم نمودارها و تحلیل و تفسیر نتایج و نگارش نسخه اولیه مشارکت داشته و نویسنده دوم در مدل‌سازی نتایج، تحلیل و تفسیر نتایج، ویرایش متن و نظارت و راهنمایی بر مدل‌سازی مشارکت و مسئولیت داشته است. همچنین نویسنده سوم در انجام و تهیه کار و ویرایش متن با سایر نویسندگان مشورت نموده‌اند.

منابع

- An, H., Kim, M., Lee, G., Kim, Y., and Lim, H. 2019. Estimation of the area of sediment deposition by debris flow using a physical-based modeling approach. *Quaternary International*, 503 (A): 59-69.
- Camp, T.R. 1964. Sedimentation and design of settling tanks. *Trans. ASCE*, 111: 895-958.
- Chaudhry, M.H. 1993. *Open-channel flow*. Prentice Hall, Englewood.
- Dulal, S., Ghimire, B., Bhattarai, S., and Regmi, R. 2020. Numerical simulation of flow through settling basin: a case study of budhi-ganga hydropower project (BHP). *International Journal of Engineering Research & Technology*. 9 (07): 992-998.
- El-Baroudi, H.M. 1969. Characterization of settling tanks by eddy diffusion. *J. Sanit. Eng. Div.* 95(SA1): 117-145.
- Emadi, A.R., and Kakouei, S. 2014. Determination of optimal dimensions of settling basin using ACS algorithm considering hydraulic, sediment and structural attributes. *J. of Water and Soil Conservation*, 21: 2. (In Persian)
- Esmaili, K., Seifi, S., and Salari, H. 2019. Application conduction plates in sediment traps to increase trapping efficiency. *Water and Soil Sciences*, 22: 3. 311-324.
- Golriz, F., and Salehi Neyshabouri, A.A. 2015. Numerical study of the effect of urban sediment pond dimensions on sedimentation efficiency. *Iranian Journal of Water Research*. 18: 1-10. (In Persian)
- Grade, R.J., Ranga Raju, K.G., and Sujudi, A.W.R. 1990. Design of settling basins. *J. Hydraul. Eng.* 28: 1. 81-91.
- Han, Q. 1980. A study on the non-equilibrium transport of suspended sediment. *Proc., 1st Int. Symp. on River Sedimentation*, Beijing, China.
- Jin, Y.C., Guo, Q.C., and Viraraghavan, T. 2000. Modeling of Class I Settling Tanks. *J. Hydraul. Eng.* 126: 8. 754-760.
- Liu, X., Xue, H., Hua, Z., Yao, Q., and Hu, J. 2013. Inverse calculation model for optimal design of rectangular sedimentation tanks. *J. Environ. Eng.* 139: 3. 455-459.
- Montazeri Namin, M. 2005. Modelling suspended sediment transport using an integrated numerical and ANNs model. *J. Hydraul. Res.* 43: 3. 302-310.
- Patankar, S.V. 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. MC Graw-Hill, New York.
- Sarikaya, H.Z. 1977. Numerical model for discrete settling. *J. Hydraul. Div.* 103: 865-876.
- Shetab-Boushehri, S.N., Mousavi, S.F., and Shetab-Boushehri, S.B. 2010. Design of settling basins in irrigation network using simulation and mathematical programming. *J. Irrig. Drain. Eng.* 136: 2. 99-106.
- Shetab-Boushehri, S.N., Mousavi, S.F. and Shetab-Boushehri, S.B. 2011. Optimal design of sediment ponds in irrigation networks. *Journal of Water and Soil*. 24: 6. 1049-1061. (In Persian)

18. Singh, K.K., Pal, M., Ojha, C.S.P., and Singh, V.P. 2008. Estimation of removal efficiency for settling basins using neural networks and support vector machines. *J. Hydrol. Eng.* 13: 3. 146-155.
19. Tarpagkou, R., and Pantokratoras, A. 2013. CFD methodology for sedimentation tanks: the effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations. *Appl. Math. Modell.* 37: 5. 3478-3494.
20. Zhang, R.J. 1961. *River Mechanics*, China Industry Press, Beijing, China.

