

## طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر در شبکه‌های آبیاری

سید نادر شتاب بوشهری<sup>۱</sup> - سید فرهاد موسوی<sup>۲\*</sup> - سید بهزاد شتاب بوشهری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۸۹/۷/۱۱

### چکیده

یکی از مسائل طراحی تأسیسات آبیاری، کنترل رسوب در محل ورود آب به شبکه‌های آبیاری است. شرایط کیفی آب مورد نیاز جهت کشاورزی ایجاب می‌کند که مواد رسوبی و جامد موجود در آب و در محل ورود به آبگیرها و کانال‌های آبیاری کنترل شده و به حد مجاز کاهش یابد. این عمل با ساخت حوضچه رسوبگیر عملی می‌شود. هر چه حوضچه رسوبگیر بزرگتر ساخته شود، عمل رسوبگیری بهتر انجام گرفته ولی هزینه ساخت آن بیشتر می‌شود. در ارتباط با تحلیل حوضچه‌های رسوبگیر، مدل‌های ریاضی مختلفی ارائه شده است. بیشتر این مدل‌ها، ارتباط بین راندمان حوضچه و متغیرها و پارامترهای مؤثر بر آن را به صورت روابط ریاضی نشان می‌دهند. در این پژوهش، یک نرم افزار کامپیوتری برای طراحی حوضچه‌های رسوبگیر ارائه شده که به کمک آن می‌توان متغیرهای طراحی (طول، عرض، ارتفاع، شیب و سرعت جریان آب در حوضچه) را به گونه‌ای تعیین کرد که حوضچه علاوه بر داشتن ویژگی‌های فنی مورد نظر، با کمترین هزینه ممکن ساخته شود. در تهیه این نرم‌افزار از مبحث برنامه ریزی ریاضی و الگوریتم شمارش ضمنی الفبایی استفاده شده است. چگونگی به کارگیری این نرم‌افزار، در مثالی که به ارزیابی هزینه ساخت دو حوضچه رسوبگیر موجود در کنار سد انحرافی نکوآباد (شبکه آبیاری زاینده‌رود اصفهان) پرداخته شده، نشان داد که راندمان این دو حوضچه ۵۰/۶٪ و ۴۶/۵٪ بوده که اگر به گونه‌ای بهینه ساخته می‌شدند، به ترتیب ۱۸٪ و ۶٪ در هزینه ساخت آنها صرفه‌جویی می‌شد.

واژه‌های کلیدی: حوضچه رسوبگیر، برنامه ریزی ریاضی، سد نکوآباد

### مقدمه

ته نشین خواهند شد. مسلماً مواد رسوبی حمل شده در آب زیان‌های متعددی را به بار می‌آورند و می‌توان گفت در اولین مرحله، خسارت از محلی که رسوبات شسته می‌شوند شروع می‌گردد. بدین ترتیب، مواد رسوبی وارد جریان رودخانه شده و در تأسیسات مختلف آبی همچون سدها، ایستگاه‌های پمپاژ، نیروگاه‌های آبی و کانال‌های شبکه‌های آبیاری ته نشین می‌شوند.

مشکلات ناشی از رسوب‌گذاری در شبکه‌های آبیاری شامل مواردی چون کاهش ظرفیت کانال‌ها، فرسایش و خرابی دیواره کانال‌ها، قطع جریان آب برای لایروبی کانال‌ها، افزایش هزینه‌های نگهداری تأسیسات و ایجاد شرایط مناسب جهت رشد علف‌های هرز می‌باشد. لذا در جهت کاهش رسوب در شبکه‌های آبیاری از روش‌های کنترلی متعددی استفاده می‌گردد، که می‌توان به انتخاب مناسب محل آبگیر، ساخت دیواره‌های هدایت کننده، ساخت دیواره‌های جدا کننده، ساخت دهانه آبگیر با آستانه بلند، ساخت تونل‌های رسوبگیر، تعبیه لوله‌های گردابی و ساخت حوضچه‌های رسوبگیر اشاره نمود.

حوضچه رسوبگیر کانال نسبتاً عرضی است که در ابتدا و یا در طول مسیر کانال‌های انتقال آب ساخته می‌شود و اصول طراحی آن بر

رسوب‌گذاری شامل فرایندهای فرسایش، انتقال، و ته نشینی مواد رسوبی می‌باشد. در فرایند فرسایش، ذرات خاک توسط ضربه قطره‌های باران و یا نیروهای به وجود آمده در اثر حرکت آب، از بستر خود جدا می‌شوند. سپس ذرات جدا شده در آستانه حرکت قرار می‌گیرند و در صورتی که نیروهای وارد شده از سوی آب بیشتر از نیروهای مقاوم باشند، ذرات همراه با جریان آب منتقل می‌شوند. شرایط شروع آستانه حرکت ذرات و میزان انتقال آنها، به خصوصیات جریان آب نظیر سرعت، عمق، و نیز به خصوصیات شکل کانال یا رودخانه نظیر شعاع هیدرولیکی، شیب، و غیره بستگی دارد (۵). چنانچه در مسیر انتقال به هر دلیلی نیروهای وارد شده از طرف آب کاهش یابد، ذرات رسوبی

۱- استادیار دانشکده مهندسی صنایع و مرکز برنامه‌ریزی سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

\*- نویسنده مسئول: (Email: mousavi@cc.iut.ac.ir)

۳- کارشناس ارشد شرکت بهره برداری از شبکه‌های آبیاری کرخه و شاور، اهواز

ریاضی متعددی توسط پژوهشگران ارائه شده است که هدف آنها ارزیابی راندمان حوضچه‌های رسوبگیر توسط فرموله کردن چگونگی حرکت ذرات معلق در آب به کمک پارامترهای مؤثر در ته نشینی می‌باشد. از پارامترهای مؤثر در ته نشینی ذرات در آب می‌توان به اندازه، شکل، وزن مخصوص، سرعت سقوط ذرات، عمق جریان، سرعت جریان و دمای آب اشاره نمود (۲).

قدیمی‌ترین مدل ریاضی تعیین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر مربوط به هیزن می‌باشد که در سال ۱۹۰۴ ارائه شده است (۱۱):

$$\eta = 1 - \left[ 1 + m \left( \frac{wA}{Q} \right) \right]^{-1/m} \quad (1)$$

که  $w$  سرعت ته نشینی ذرات،  $A$  سطح حوضچه،  $Q$  دبی جریان ورودی،  $\eta$  راندمان حوضچه و  $m$  پارامتر نشان دهنده کیفیت عملکرد حوضچه رسوبگیر می‌باشد (برای حوضچه با عملکرد خوب،  $m=0$  و برای حوضچه با عملکرد ضعیف،  $m=1$  است).

ولیکانف در سال ۱۹۳۶ مدلی را ارائه نمود که چگونگی ته نشینی رسوبات را بر اساس تئوری احتمالات ارائه می‌داد (۲، ۳ و ۴). ولیکانف با انجام آزمایش‌های تجربی به این نتیجه رسید که مکان ته نشینی یک ذره رسوب در کف حوضچه ثابت نیست و از یک تابع تقریباً نرمال پیروی می‌کند. واریانس این توزیع، بستگی به ابعاد حوضچه، مشخصات ذرات رسوب و جریان آب در حوضچه دارد.

یکی از مدل‌هایی که اغلب برای برآورد راندمان حوضچه‌های رسوبگیر در شبکه‌های آبیاری به کار می‌رود، در سال ۱۹۴۹ توسط دفتر عمران ایالات متحده (*USBR*) ارائه شده است (۹ و ۱۶). شکل ریاضی این مدل به صورت رابطه زیر است:

$$\frac{m}{m_0} = \exp\left(-\frac{wL}{q}\right) \quad (2)$$

که  $m_0$  و  $m$  به ترتیب وزن رسوب در واحد حجم جریان است که وارد حوضچه شده، و از حوضچه خارج می‌شود، و  $q$  دبی در واحد عرض حوضچه رسوبگیر می‌باشد. سپس، راندمان حوضچه رسوبگیر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta = 1 - \frac{m}{m_0} = 1 - \exp\left(-\frac{wL}{q}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{wA}{Q}\right) \quad (3)$$

در واقع، معادله ۳ همان معادله هیزن برای حوضچه‌های رسوبگیر با عملکرد خوب می‌باشد.

کمپ (۶) در سال ۱۹۴۳ مدلی را به منظور برآورد راندمان

مبنای افزایش سطح مقطع کانال و در نتیجه کاهش سرعت جریان آب به منظور ایجاد فرصت کافی جهت ته نشینی ذرات ریز معلق در آب می‌باشد.

واضح است که تقریباً در تمامی شبکه‌های بزرگ آبیاری، یک حوضچه مناسب و کارا مورد نیاز بوده و بدیهی است که لایروبی یک حوضچه رسوبگیر به مراتب از لایروبی ده‌ها و صدها کیلومتر کانال ارزانتر تمام می‌شود. از طرفی می‌توان گفت که هر چه حوضچه رسوبگیر بزرگتر ساخته شود عمل رسوبگیری بهتر صورت می‌گیرد، ولی هزینه ساخت آن بالا می‌رود. بنابراین باید سعی کرد با کاهش هزینه ساخت حوضچه، عمل رسوبگیری مطلوب را انجام داد. لذا اهدافی که در این مطالعه دنبال می‌شوند عبارتند از:

۱- ارزیابی مدل‌های مختلف تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر از جمله مدل هیزن<sup>۱</sup>، ولیکانف<sup>۲</sup>، انشتین<sup>۳</sup>، *USBR*، کمپ<sup>۴</sup>، ساریکایا<sup>۵</sup>، سامر<sup>۶</sup>، گارده و رانگا راجو<sup>۷</sup>. این ارزیابی به کمک اطلاعات جمع آوری شده از حوضچه‌های رسوبگیر سد نکوآباد اصفهان انجام می‌گیرد و هدف از آن، تعیین مدل ریاضی مناسب برای تخمین راندمان این حوضچه‌ها است.

۲- طراحی بهینه حوضچه رسوبگیر در منطقه سد نکوآباد. در این راستا با استفاده از یک نرم افزار کامپیوتری که توسط نویسندگان این مقاله طراحی شده و همچنین به کمک مدل ریاضی تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر که در بند ۱ انتخاب گشته، سعی می‌شود به این سؤال پاسخ داده شود که اگر حوضچه‌های رسوبگیر موجود در سد نکوآباد به گونه‌ای بهینه طراحی می‌شدند، چقدر در هزینه ساخت آنها صرفه‌جویی می‌شد؟

## مروری بر منابع

مطالب ارائه شده در این بخش را می‌توان به دو قسمت تفکیک نمود. قسمت اول مروری دارد بر مدل‌های ریاضی تعیین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر و در قسمت دوم پژوهش‌های انجام شده در طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر معرفی می‌گردند.

(۱) مدل‌های ریاضی تعیین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر در ارتباط با تعیین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر، مدل‌های

- 1- Hazen
- 2- Velikanov
- 3- Einstein
- 4- Camp
- 5- Sarikaya
- 6- Sumer
- 7- Garde and Ranga Raju

محاسبه راندمان حوضچه رسوبگیر، آزمایش‌های متعددی را روی مدل فیزیکی حوضچه رسوبگیر انجام دادند (۱۰). آنها با استفاده از قوانین آنالیز ابعادی و آزمایش‌هایی که روی ذراتی به قطرهای ۰/۰۸۲ و ۰/۱۰۶ میلی‌متر انجام دادند، رابطه جدیدی را برای تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر پیشنهاد نمودند:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{KL}{d}\right)\right) \quad (۷)$$

که  $\eta_0$  راندمان حد برای مقادیر معینی از  $\frac{w}{U_*}$ ، زمانی که  $\frac{L}{d}$  خیلی بزرگ است، و  $K$  ضریب رابطه است. مقادیر  $\eta_0$  و  $K$  با توجه به مقدار  $\frac{w}{U_*}$  از روی نمودارهای ارائه شده توسط این محققین به دست می‌آیند.

سینگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ به تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند (۱۹). نتایج حاصل از کار این پژوهشگران، حاکی از عملکرد بهتر شبکه عصبی در تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر در مقایسه با مدلی بود که توسط رانگا راجو و همکاران در سال ۱۹۹۹ پیشنهاد شده است.

### طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر

تعداد بسیار کمی پژوهش در زمینه طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر انجام شده است. ویتال و راقا (۲۱) و جین و همکاران (۱۳) و (۱۴) اولین کسانی بودند که به طراحی بهینه ابعاد حوضچه‌های رسوبگیر تحت شرایط و معیارهای محدود کننده پرداختند. در سال‌های اخیر، هسو و همکاران (۱۲) از مبحث برنامه ریزی غیر خطی برای طراحی حوضچه‌های رسوبگیر کوچک که هزینه ساخت و به کارگیری آنها حداقل باشد، استفاده کردند. این محققین مدل خود را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کرده و آن را برای طراحی حوضچه‌ای رسوبگیر در تایوان به کار گرفتند.

### مواد و روش‌ها

این بخش از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول، چگونگی تعیین مدلی مناسب برای تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر در منطقه سد نکو آباد توضیح داده می‌شود و در قسمت دوم، ساخت و چگونگی حل مدل ریاضی طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر به طور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد.

حوضچه‌های رسوبگیر ارائه داد که شکل کلی آن عبارت است از:

$$\eta = f\left(\frac{wA}{Q}, \frac{w}{V_0}\right) \quad (۴)$$

که  $V_0$  سرعت برشی است که از رابطه  $V_0 = \sqrt{gRS}$  به دست می‌آید و در آن  $R$  شعاع هیدرولیکی و  $S$  شیب کف حوضچه است. کمپ (۱۰) در سال ۱۹۴۶، مدل دیگری را بر اساس کارهای دوبینز (۸) ارائه نمود. مدل یاد شده بر این فرضیات استوار است که توزیع سرعت در مقطع جریان، سهمی شکل یا یکنواخت بوده و ضریب پخش تلاطم ثابت است. به علت پیچیدگی روابط ریاضی مدل‌های کمپ، حل آنها با استفاده از نمودار انجام می‌گیرد.

انشتین (۱۵) کاهش در غلظت مواد معلق را به صورت تابعی نمایی و کاهشی از زمان فرض کرد و به کمک این فرضیه و همچنین انجام آزمایش‌های عملی، مدلی را به منظور تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر در سال ۱۹۶۵ به صورت زیر پیشنهاد نمود:

$$\eta = 1 - \exp\left(-1.055 \frac{wL}{Vd}\right) \quad (۵)$$

که در آن  $d$  عمق آب است.

ساریکایا در سال ۱۹۷۷ با حل عددی معادله پراکنندگی به روش تفاضل محدود، مدلی را به منظور تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر ارائه نمود (۱۸). مدل ساریکایا شباهت زیادی به مدل کمپ دارد. در این مدل، پروفیل سرعت در حوضچه به صورت لگاریتمی در نظر گرفته شده، و ضریب تلاطم ثابت نبوده و به صورت تابع در نظر گرفته شده است. حل مدل ساریکایا هم به علت پیچیدگی روابط ریاضی آن با استفاده از نمودار انجام می‌گیرد.

سامر در سال ۱۹۷۷، با حل تحلیلی معادله پراکنندگی، مدلی را برای تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر ارائه نمود (۲۰). در مدل سامر، پروفیل سرعت در مقطع جریان به صورت لگاریتمی در نظر گرفته شده و ضریب پخش تلاطم نیز متغیر می‌باشد. مدل پیشنهادی سامر به صورت رابطه زیر است:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\lambda U_* L}{15Ud}\right) \quad (۶)$$

که  $U_*$  سرعت برشی کف حوضچه،  $U$  سرعت جریان آب در حوضچه، و  $\lambda$  پارامتر بدون بعدی است که به کمک نسبت  $\frac{w}{U_*}$ ، از روی یک نمودار به دست می‌آید.

گارده و رانگا راجو در سال ۱۹۸۹، به منظور تعیین مدلی برای

## انتخاب مدل ریاضی مناسب برای تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر در سد نکوآباد اصفهان

رودخانه زاینده رود از قدیم‌الایام تنها منبع تأمین آب سطحی در منطقه اصفهان بوده است و سد نکوآباد در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی شهر اصفهان، اولین سد انحرافی است که جهت کنترل سطح آب زاینده رود و انتقال آب، در مجاورت روستای نکوآباد احداث گردیده است. در طرفین سد نکوآباد، دو کانال اصلی جهت برداشت به ترتیب حداکثر ۱۵ و ۵۰ متر مکعب در ثانیه آب به منظور آبیاری زمین‌هایی به وسعت ۱۳ هزار و ۴۸ هزار هکتار ساخته شده است. طول کانال اصلی سمت راست سد نکوآباد، ۳۵/۲۲ کیلومتر و طول کانال اصلی سمت چپ، ۵۹/۳۵ کیلومتر می‌باشد. به منظور کاهش بار رسوبی، در ابتدای هر دو کانال از حوضچه رسوبگیر استفاده شده است. در حوضچه سمت راست، دبی طرح ۱۵ متر مکعب بر ثانیه، عرض حوضچه ۱۲ متر، طول حوضچه ۴۲/۵ متر و عمق جریان آب در حوضچه ۳ متر است. در حوضچه سمت چپ، دبی طرح ۵۰ متر مکعب بر ثانیه، عرض حوضچه ۴۲ متر، طول حوضچه ۴۲/۵ متر و عمق جریان آب در حوضچه ۳ متر می‌باشد.

به منظور انتخاب یک مدل ریاضی مناسب برای تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر در سد نکوآباد اصفهان، مدل‌های ولیکانف، انشتین، سامر، وتر، گارده و رانگا راجو، هیزن، ساریکایا با فرض پروفیل سرعت جریان لگاریتمی، ساریکایا با فرض پروفیل سرعت جریان سهمی، و مدل کمپ مورد ارزیابی قرار گرفتند. ارزیابی این مدل‌ها با مقایسه نتایج حاصل از آنها و نتایج تجربی به دست آمده از حوضچه‌های رسوبگیر موجود در منطقه سد نکوآباد انجام شد. در این راستا، نمونه برداری‌های متعددی از رسوبات وارد و خارج شده از حوضچه‌های رسوبگیر واقع در منطقه سد نکوآباد صورت گرفت. این عمل برای دبی‌های مختلف انجام شد و راندمان حوضچه‌ها در هر حالت از رابطه زیر تعیین گردید:

$$\eta^{actual} = 1 - \frac{Q_{so}}{Q_{si}} \quad (8)$$

که  $\eta^{actual}$  راندمان واقعی حوضچه رسوبگیر و  $Q_{so}$  و  $Q_{si}$  به ترتیب دبی رسوب ورودی و خروجی حوضچه بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند.

علاوه بر آن، عمق و سرعت جریان آب و دانه بندی رسوبات در نمونه برداری‌های فوق‌الذکر ثبت گردید و همراه با پارامترهای طول و عرض حوضچه‌ها، به عنوان اطلاعات ورودی مدل‌های فوق به کار گرفته شد.

## روش تحقیق در ارتباط با طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر

### ساخت مدل طراحی بهینه حوضچه رسوبگیر

هدف اکثر مدل‌های ریاضی مربوط به حوضچه‌های رسوبگیر، نشان دادن ارتباط بین راندمان حوضچه و پارامترهای مؤثر در آن است:

$$\eta = g(x, \alpha) \quad (9)$$

که  $\eta$  راندمان حوضچه رسوبگیر،  $\alpha$  پارامترهای مربوط به مشخصات رسوب و جریان و  $x$  متغیرهای مربوط به حوضچه (طول، عرض، ارتفاع، شیب، و سرعت جریان آب) می‌باشد.

شکل عمومی مدل برنامه ریزی ریاضی که قادر به طراحی حوضچه رسوبگیری باشد (OBDM) که علاوه بر داشتن راندمان مورد نظر، با کمترین هزینه ساخته شود، به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Min } Z = f(x, \beta) \\ & \text{s.t. } \begin{cases} g(x, \alpha) \geq \bar{\eta} \\ h(x, \theta) \begin{cases} \leq \\ \geq \end{cases} 0 \end{cases} \end{aligned} \quad \text{مدل OBDM}$$

در مدل OBDM،  $f(x, \beta)$  تابع هزینه ساخت حوضچه است که باید مینیمم گردد،  $g(x, \alpha) \geq \bar{\eta}$  محدودیت راندمان حوضچه و  $h(x, \theta) \begin{cases} \leq \\ \geq \end{cases} 0$  مجموعه محدودیت‌های دیگر است که بر مسئله حاکم می‌باشد. همچنین  $x$  مجموعه متغیرهای طراحی و  $\theta$ ،  $\beta$  و  $\alpha$  مجموعه پارامترهای مربوط به مشخصات رسوب و جریان می‌باشند.

در ارتباط با چگونگی فرموله کردن تابع هدف و محدودیت‌های مدل OBDM در زیر توضیحاتی ارائه شده است.

### تابع هدف مدل

تابع هدف مدل OBDM، هزینه ساخت حوضچه رسوبگیر است که باید مینیمم گردد. هزینه‌هایی را که می‌توان در ارتباط با ساخت یک حوضچه رسوبگیر در نظر گرفت عبارتند از هزینه عملیات خاکی، هزینه بتن ریزی و هزینه خرید، نصب، و راه اندازی دریچه‌ها.

### هزینه عملیات خاکی

هزینه عملیات خاکی شامل هزینه‌های بوته کنی و کوبیدن بستر

حجم،  $k_{42}$  هزینه بتن مسلح در واحد حجم،  $k_{43}$  هزینه تهیه و کارگذاری یک کیلوگرم میلگرد،  $d_1$  ضخامت بتن مگر،  $d_2$  ضخامت بتن مسلح،  $M_1$  وزن یک متر میلگرد به کار رفته در بتن مسلح و  $N_1$  و  $N_2$  به ترتیب طول آرماتورهای طولی و عرضی به کار برده شده در کف حوضچه بر حسب متر می‌باشند که از روابط زیر تعیین می‌گردند:

$$N_1 = \left( \text{int} \left( \frac{B}{0/3} \right) + 1 \right) L \quad (14)$$

$$N_2 = \left( \text{int} \left( \frac{B}{0/6} \right) + 1 \right) L \quad (15)$$

هزینه بتن ریزی سطوح شیروانی به طول حوضچه و عمق آب در حوضچه بستگی دارد، بتن به کار رفته در سطوح شیروانی شامل بتن مگر و بتن غیر مسلحی است که روی بتن مگر قرار می‌گیرد. شکل ریاضی هزینه بتن ریزی سطوح شیروانی حوضچه از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$c_5(L, H, Z) = (k_{41}d_3 + k_{52}d_4) (H + Fb2)(2L)\left(\sqrt{1+Z^2}\right) \quad (16)$$

که  $c_5$  هزینه بتن ریزی سطوح شیروانی،  $k_{52}$  هزینه بتن ریزی در بتن غیر مسلح در واحد حجم،  $d_3$  و  $d_4$  به ترتیب ضخامت بتن مگر و بتن غیر مسلح،  $Fb_2$  ارتفاع آزاد بتنی حوضچه و  $Z$  شیب بدنه است.

#### هزینه خرید، حمل، نصب و راه اندازی دریچه‌ها

دریچه‌های مورد استفاده در ساخت حوضچه رسوبگیر با توجه به دبی طراحی انتخاب می‌گردند. هزینه حمل، نصب و راه اندازی هر دریچه ۳۰ تا ۳۵ درصد قیمت خرید دریچه می‌باشد. هزینه خرید، نصب و راه اندازی دریچه‌ها را با  $c_6(B, H)$  نشان می‌دهیم.

#### محدودیت راندمان حوضچه

عبارت  $g(x, \alpha) \geq \bar{\eta}$  را محدودیت راندمان حوضچه گویند که در آن  $\bar{\eta}$  راندمان مورد نظر برای طراحی می‌باشد. به طور کلی تلاش جهت دفع رسوبات شامل موادی می‌شود که امکان رسوب-گذاری آنها در کانال‌ها وجود دارد. با توجه به اینکه ذرات با قطر کوچکتر از ۶۰ میکرون، بار آبرفتی محسوب می‌شوند، فرض می‌شود که اینگونه مواد در کانال‌ها ته نشین نشده و ته نشین کردن آنها در حوضچه رسوبگیر باعث می‌شود که طول حوضچه بسیار زیاد شده و

ترانشه، هزینه خاکبرداری و هزینه حمل خاک است. شکل ریاضی هزینه‌های بوته کنی و کوبیدن بستر ترانشه به صورت زیر است:

$$c_1(B, L) = k_1(BL) \quad (10)$$

در رابطه بالا،  $c_1$  هزینه کل بوته کنی و کوبیدن بستر ترانشه،  $k_1$  هزینه بوته کنی و کوبیدن بستر ترانشه در واحد سطح  $B$  و  $L$  به ترتیب عرض و طول حوضچه رسوبگیر می‌باشند.

هزینه خاکبرداری متناسب با حجم خاکی است که در حفر کردن حوضچه باید جایجا شود. با توجه به این موضوع که هزینه خاکبرداری اعماق مختلف زمین متفاوت بوده و با افزایش عمق خاکبرداری این هزینه افزایش می‌یابد، اگر هزینه خاکبرداری واحد حجم خاک، در فاصله  $h_i$  تا  $h_{i+1}$  عمق زمین،  $k_{2i}$  ریال از این هزینه در فاصله  $h_{i-1}$  تا  $h_i$  عمق زمین بیشتر باشد، آنگاه می‌توان هزینه خاکبرداری را به صورت رابطه زیر نوشت:

$$c_2(B, L, H) = \sum_{i=0}^n k_{21}BL(H + Fb_1 - h_i) \left[ \frac{\max((H + Fb_1 - h_i), 0)}{(H + Fb_1 - h_i)} \right] \quad (11)$$

که  $c_2$  هزینه خاکبرداری،  $H$  عمق آب در حوضچه و  $Fb_1$  ارتفاع آزاد خاکی حوضچه رسوبگیر می‌باشد.

هزینه حمل خاک متناسب است با حجم خاک انتقال داده شده از حوضچه به مکانی دیگر. شکل ریاضی این هزینه به صورت زیر است:

$$c_3(B, L, H) = k_3(BL(H + Fb_1)) \quad (12)$$

در رابطه بالا،  $c_3$  هزینه حمل خاک و  $k_3$  هزینه حمل واحد حجم خاک است.

#### هزینه بتن ریزی

هزینه بتن ریزی حوضچه شامل هزینه بتن ریزی کف حوضچه و سطوح شیروانی است. بتن به کار رفته در کف حوضچه شامل بتن مگر و بتن مسلح است. شکل ریاضی هزینه بتن ریزی کف حوضچه رسوبگیر به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$c_4(B, L) = k_{41}(BLd_1) + k_{42}(BLd_2) + k_{43}(N_1 + N_2)M_1 \quad (13)$$

که  $c_4$  هزینه بتن ریزی کف حوضچه،  $k_{41}$  هزینه بتن مگر در واحد

و لذا باید متغیرهای طراحی را به گونه‌ای انتخاب نمود که این محدودیت در نظر گرفته شود. بنابراین اگر  $\bar{Q}$  دبی طرح باشد، می‌توان نوشت:

$$VA \geq \bar{Q} \Rightarrow VHB \geq \bar{Q} \Rightarrow VHB - \bar{Q} \geq 0 \quad (17)$$

که  $A$  سطح مقطع،  $V$  میانگین سرعت آب در حوضچه،  $H$  عمق آب و  $B$  عرض حوضچه می‌باشد.

### محدودیت مربوط به سرعت جریان آب در حوضچه

در طراحی حوضچه رسوبگیر، علاوه بر محاسبه کارایی باید وضعیت حمل و آغاز حرکت ذرات رسوبی کنترل شود و حوضچه به گونه‌ای طراحی شود که سرعت جریان آب در آن همیشه کمتر از سرعت بحرانی برای ذرات باشد. در یک کانال که بستر آن از مواد رسوبی تشکیل شده باشد، به سرعت جریانی که در آن سرعت ذرات بستر شروع به حرکت به طرف پایین دست می‌کنند، سرعت بحرانی گویند. در این ارتباط منحنی شیلدز<sup>۱</sup> به علت داشتن اعتبار زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. استراب<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۳، از ترکیب فرمول مانینگ و منحنی شیلدز، فرمول زیر را برای تعیین سرعت بحرانی به دست آورد:

$$V_c = 4/667 \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{0/5} \left( \frac{H}{D_s} \right)^{1/6} (D_s)^{0/5} \quad (18)$$

که  $V_c$  سرعت جریان بحرانی بر حسب متر بر ثانیه،  $\rho_s$  و  $\rho$  به ترتیب جرم مخصوص ذرات و جرم مخصوص آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $H$  عمق جریان آب بر حسب متر و  $D_s$  قطر ذرات بر حسب متر است.

اگر سرعت جریان در حوضچه رسوبگیر با  $V$  نشان داده شود، در طراحی حوضچه باید به گونه‌ای عمل کرد که محدودیت زیر برقرار باشد:

$$V_c \geq V \Rightarrow V_c - V \geq 0 \Rightarrow 4/667 \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{0/5} \left( \frac{H}{D_s} \right)^{1/6} (D_s)^{0/5} - V \geq 0 \quad (19)$$

بنابراین شکل دقیق تر مدل OBDM در این مقاله به صورت زیر است:

هزینه ساخت حوضچه به شدت افزایش پیدا کند. پس به عنوان یک معیار کلی، حوضچه‌های رسوبگیر به نحوی طراحی می‌شوند که ذراتی با قطر بزرگتر از ۶۰ میکرون در آنها رسوب کنند.

تابع راندمان  $g(x, \alpha)$  را می‌توان به کمک هر یک از مدل‌های ریاضی آورده شده در قسمت قبل ایجاد نمود. ورودی این تابع، متغیرهای طراحی  $x$  (طول، عرض، ارتفاع، شیب و سرعت جریان آب در حوضچه) و پارامترهای محیطی  $\alpha$  (درصد وزنی ذرات رسوب ورودی به حوضچه با قطرهای مختلف و سرعت سقوط آنها) بوده و خروجی آن، راندمان حوضچه را می‌دهد. الگوریتم تعیین مقدار تابع راندمان "g" به کمک هر کدام از مدل‌های تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر که در بخش دوم ارائه گردیدند، به صورت زیر است:

۱- با در نظر گرفتن ذرات بزرگتر از ۶۰ میکرون، منحنی توزیع دانه بندی آب ورودی به حوضچه را به چند قسمت ( $n$ ) تقسیم و درصد مربوط به قسمت  $i$  را  $p_i$  بنامید.

۲- سرعت سقوط کوچکترین و بزرگترین ذره در قسمت ( $i = 1, \dots, n$ )، را برترتیب  $s_i$  و  $b_i$  نامیده و سرعت سقوط ذره در قسمت  $i$  را از رابطه  $w_i = \frac{s_i + b_i}{2}$  محاسبه نمایید.

۳- متوسط سرعت جریان آب در حوضچه را از رابطه  $V = \frac{Q}{A}$  محاسبه کنید.

۴- با استفاده از مقادیر بدست آمده از بندهای ۲ و ۳ در بالا و به کمک مدل راندمان مورد نظر، راندمان حوضچه را برای ذرات واقع در هر قسمت ( $i = 1, \dots, n$ ) محاسبه نموده و آن را  $\eta_i$  بنامید.

۵- راندمان حوضچه رسوبگیر ( $\eta$ ) را از رابطه  $\eta = \sum_{i=1}^n p_i \eta_i$  به دست آورید.

### سایر محدودیت‌ها

علاوه بر محدودیت راندمان، مجموعه‌ای از محدودیت‌های دیگر را باید در طراحی یک حوضچه رسوبگیر در نظر گرفت. این محدودیت‌ها که در قالب روابط  $h(x, \theta) \begin{cases} \leq \\ \geq \end{cases} 0$  توضیح داده می‌شوند.

**محدودیت مربوط به میزان دبی جریان عبوری از حوضچه**  
یکی از پارامترهای مهم در طراحی یک حوضچه رسوبگیر، میزان دبی جریان است. این پارامتر به صورت ورودی بر مسئله اعمال گشته

1- Shields  
2- Straub

ویژگی دوم مدل OBDM یکنواختی<sup>۱</sup> تابع هدف و محدودیت‌ها نسبت به متغیرهای تصمیم می‌باشد. اگر دقت شود، مشاهده می‌گردد که تابع هدف مدل بر حسب متغیرهای تصمیم طول، عرض و ارتفاع آب در حوضچه، صعودی می‌باشد. تابع راندمان  $g(x, \alpha)$ ، بر حسب متغیر تصمیم طول حوضچه صعودی و بر حسب متغیرهای ارتفاع و سرعت جریان آب در حوضچه نزولی است. تابع مربوط به محدودیت دبی جریان عبوری بر حسب متغیرهای ارتفاع، عرض و سرعت جریان صعودی می‌باشد. تابع مربوط به محدودیت سرعت جریان آب در حوضچه بر حسب متغیر ارتفاع آب صعودی و بر حسب سرعت آب نزولی است. تابع مربوط به محدودیت ارتباط طول و عرض حوضچه، بر حسب طول حوضچه صعودی و بر حسب عرض حوضچه نزولی است.

با توجه به ویژگی دوم مدل OBDM، یک روش پیشنهادی مناسب برای حل آن روش شمارش ضمنی است. در این مقاله برای حل مدل OBDM، از روش شمارش ضمنی به ترتیب الفبایی که توسط صباغ در سال ۱۹۸۴ ارائه گردیده است (۱۷)، استفاده شده است.

### تهیه برنامه‌های کامپیوتری مورد نیاز

برای محاسبات مدل‌های ارائه شده در این مطالعه، از نرم‌افزار کامپیوتری گاوس<sup>۲</sup> استفاده گردید. دلیل استفاده از این نرم‌افزار، سادگی برنامه نویسی، سرعت محاسباتی بالا، و وجود توابع و زیربرنامه‌های آماده فراوان در آن می‌باشد. به کمک نرم افزار گاوس، بسته‌ای نرم‌افزاری برای طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر تهیه گردید. شمای کلی بسته نرم افزاری تهیه شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، این بسته نرم‌افزاری حاوی سه برنامه کامپیوتری است:

#### الف) برنامه کامپیوتری *Examp*

مشخصات ذرات ورودی به حوضچه رسوبگیر (سرعت سقوط ذرات و درصد آنها) و اطلاعات اقلام هزینه به عنوان پارامترهای ورودی طراحی در این برنامه گنجانده شده است. با اجرای این برنامه در محیط گاوس، مشخصات ذرات ورودی به حوضچه رسوبگیر مورد طراحی، و همچنین اطلاعات مربوط به تابع هدف مدل OBDM وارد حافظه فعال کامپیوتر می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= c_1(B, L) + c_2(B, L, H) + c_3(B, L, H) \\ &+ c_4(B, L) + c_5(L, H, Z) + c_6(B, H) \quad (20) \\ \text{s.t. } &\begin{cases} g(B, L, H, V, Z, \alpha) \geq \bar{\eta} \\ \text{Eqs. (17) - (19)} \end{cases} \end{aligned}$$

#### ب) حل مدل OBDM

در بخش الف، مدل ریاضی طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر (OBDM) معرفی گردید. در آنجا مشخص شد که شکل ریاضی بعضی توابع مربوط به مدل یاد شده، غیر خطی و در بعضی موارد بسیار پیچیده می‌باشد (مانند محدودیت  $g(x, \alpha) \geq \bar{\eta}$  هنگامی که از مدل تخمین راندمان ولیکانف، سامر، ساریکایا، و ... استفاده می‌شود). لذا مدل OBDM از نوع مسائل برنامه‌ریزی غیر خطی می‌باشد. اگرچه روش‌های مختلفی برای حل مسائل برنامه‌ریزی غیر خطی وجود دارد، ولی هر کدام از آنها توانایی حل نمونه‌های خاصی از مسائل را دارند و در حل نمونه‌های دیگر غیر کارا عمل می‌کنند. در سال‌های اخیر، نرم‌افزارهای مختلفی (نظیر *Gams*, *Lindo*, *Gino*) در ارتباط با حل مسائل بهینه سازی و از جمله مسائل برنامه‌ریزی غیر خطی توسعه یافته است. اما مسئله عمده زیر، مانع از به کارگیری این نرم‌افزارها در حل مدل OBDM می‌شود.

در OBDM، نیاز به استفاده از توابع مختلفی از جمله تابع انتگرال (در مدل ولیکانف)، و توابع درون‌یاب و برون‌یاب (در مدل‌های کمپ، ساریکایا، سامر و گارده) می‌باشد. در هیچ‌کدام از نرم‌افزارهای *Gams*, *Lindo*, *Gino* چنین تمهیداتی تعریف نشده و لذا استفاده از آنها در حل مسئله OBDM مشکل و در بعضی مواقع امکان ناپذیر است.

با نگاهی به مدل OBDM، می‌توان دریافت که این مدل دارای دو ویژگی است.

ویژگی اول مدل OBDM کوچک بودن ابعاد و کم بودن تعداد متغیرهای تصمیم در آن است (۵ متغیر طراحی). اگر می‌شد متغیرهای تصمیم مربوط به این مدل را متغیرهایی منفصل و صحیح در نظر گرفت، آنگاه به دلیل کم بودن تعداد متغیرهای تصمیم، مدل OBDM به یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح کوچک تبدیل می‌شد. سئوالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که آیا می‌توان متغیرهای تصمیم در مدل OBDM را متغیرهایی منفصل در نظر گرفت؟ پاسخ به این سؤال مثبت خواهد بود اگر نقاط منفصل مورد ارزیابی، در مقیاس مسئله مورد مطالعه، چنان نزدیک به هم در نظر گرفته شوند که خدشه‌ای در اتصال متغیرهای تصمیم ایجاد نشود. با توجه به ویژگی فوق، یک روش پیشنهادی مناسب برای حل مدل OBDM روش شمارشی خواهد بود.

1- Monotonic  
2- Gauss

## ب) برنامه کامپیوتری Pro

با اجرای این برنامه در محیط گاوس، زیر برنامه‌هایی جهت تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر با استفاده از مدل‌های مختلف، در محیط گاوس ایجاد می‌شوند. این زیر برنامه‌ها عبارتند از:

- ۱- زیربرنامه (*Veli*): مربوط به مدل ولیکانف، ۲-
- زیربرنامه (*Eins*): مربوط به مدل انشتین، ۳- زیربرنامه (*Sume*):
- مربوط به مدل سامر، ۴- زیربرنامه (*Vete*): مربوط به مدل وتر، ۵-
- زیربرنامه (*Gard*): مربوط به مدل گارده و رانگا راجو، ۶-
- زیربرنامه (*Haze*): مربوط به مدل هیزن، ۷- زیربرنامه (*Sarl*):
- مربوط به مدل ساریکایا با فرض پروفیل سرعت جریان لگاریتمی، ۸-
- زیربرنامه (*Sarp*): مربوط به مدل ساریکایا با فرض پروفیل سرعت جریان سهمی، و ۹- زیربرنامه (*Camp*): مربوط به مدل کمپ.

به کمک زیربرنامه‌های بالا و با داشتن مشخصات یک حوضچه رسوبگیر، به راحتی می‌توان راندمان آن حوضچه را به دست آورد. به عنوان مثال، اگر طول یک حوضچه  $L_1$  سانتی‌متر، عرض آن  $B_1$  سانتی‌متر، عمق آب در آن  $H_1$  سانتی‌متر، سرعت آب در حوضچه  $V_1$  سانتی‌متر بر ثانیه، و هدف تعیین راندمان حوضچه با استفاده از مدل انشتین باشد، پس از اجرای برنامه کامپیوتری Pro، با اجرای دستور  $Eins(L_1, B_1, H_1, V_1)$ ، مقدار راندمان حوضچه مذکور روی صفحه کامپیوتر ظاهر خواهد شد.

## برنامه کامپیوتری optimum

این برنامه بعد از برنامه‌های کامپیوتری Pro و Examp اجرا می‌شود. با اجرای این برنامه، کامپیوتر شروع به تعیین مقادیر بهینه متغیرهای طراحی با استفاده از روش شمارش ضمنی به ترتیب الفبایی

می‌کند و پس از اجرای برنامه، مقادیر بهینه طراحی روی صفحه کامپیوتر نشان داده خواهد شد.

## نتایج و بحث

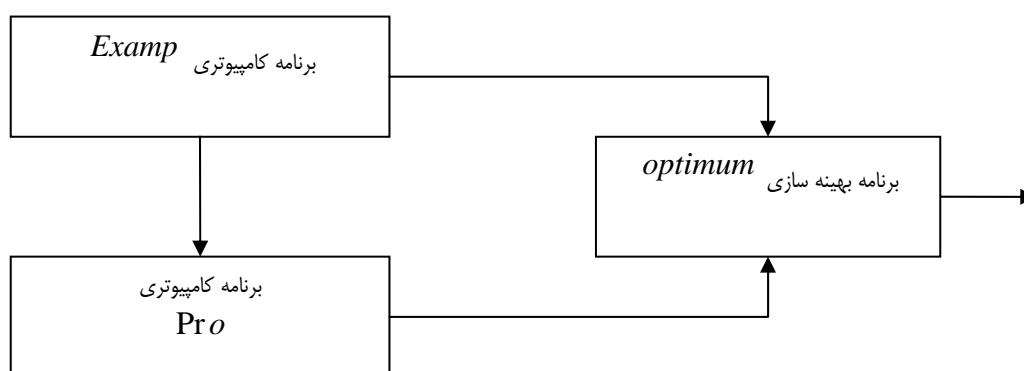
در این بخش، ابتدا نتایج نمونه برداری از رسوبات وارد و خارج شده از حوضچه‌های سد نکوآباد ارائه خواهد شد. سپس ارزیابی مدل‌های ریاضی تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر آورده می‌شود و سرانجام به حل این مسئله پرداخته می‌شود که اگر طراحی حوضچه‌های رسوبگیر موجود در منطقه سد نکوآباد به گونه‌ای بهینه (با استفاده از مدل OBDM) انجام می‌گرفت، چقدر در هزینه ساخت آنها صرفه‌جویی می‌شد.

### نتایج نمونه برداری از رسوبات وارد و خارج شده از حوضچه‌های رسوبگیر سد نکوآباد

برای تعیین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر سد نکوآباد، ۲۰ بار در دبی‌های مختلف، از آنها نمونه برداری شد. خلاصه نتایج حاصل از این نمونه برداری‌ها در جدول ۱ آمده است. با استفاده از این نتایج، راندمان حوضچه‌ها در شرایط مختلف تعیین گردید.

### نتایج حاصل از مدل‌های ریاضی تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر

به منظور تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر توسط هر کدام از مدل‌های ریاضی یاد شده، باید مشخصاتی از حوضچه به عنوان ورودی به این مدل‌ها داده شود.



شکل ۱- شمای کلی بسته نرم‌افزاری تهیه شده در این مطالعه



جدول ۱- غلظت ذرات بزرگتر از ۶۰ میکرون در دبی‌های مورد آزمایش در ورودی و خروجی حوضچه‌ها

حوضچه <sup>۱</sup>	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱			
دبی (m <sup>3</sup> /s)	۱۱/۵	۲۴	۱۰/۵	۱۲/۵	۲۵/۵	۲۳/۵	۱۰	۱۳	۱۲	۲۴/۵	۱۱	۲۵	۹/۵	۱۳/۵	۸/۵	۱۱	۸	۹	۲۲	۲۶
غلظت ورودی (mg/10 L)	۵۳	۴۴	۴۷	۴۴	۴۱	۴۳	۳۴	۳۸	۳۷	۳۵	۳۱	۴۰	۳۱	۳۳	۲۶	۲۴	۲۶	۲۹	۲۱	۳۴
غلظت خروجی (mg/10 L)	۴۲	۲۳	۳۲	۳۴	۲۲	۲۵	۲۴	۲۴	۳۱	۱۶	۲۰	۲۳	۲۶	۳۰	۱۵	۱۵	۱۷	۱۷	۱۱	۲۶

۱- منظور از حوضچه شماره ۱، حوضچه سمت راست و منظور از حوضچه شماره ۲، حوضچه سمت چپ است.

متغیر در نظر گرفته شده و این فرضیات با شکل واقعی جریان تطابق بیشتری دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که نتایج به دست آمده از مدل فوق به واقعیت نزدیکتر است. مدل ولیکانف نیز بیشترین خطا را داشت. لذا در این مطالعه، مدل ریاضی "ساریکایا" برای استفاده در مدل طراحی بهینه حوضچه رسوبگیر در منطقه سد نکوآباد اصفهان انتخاب می‌گردد.

#### ارزیابی ساخت حوضچه‌های رسوبگیر موجود در منطقه سد نکوآباد از دیدگاه اقتصادی

در این قسمت، ابتدا راندمان دو حوضچه رسوبگیر واقع در منطقه سد نکوآباد محاسبه می‌گردد. سپس هزینه ساخت این دو حوضچه محاسبه گشته و سرانجام به کمک برنامه بهینه سازی *optimum*، ابعاد و هزینه ساخت حوضچه‌هایی بهینه که دبی و راندمانی همانند حوضچه‌های رسوبگیر موجود را داشته باشند، به دست می‌آید.

#### محاسبه راندمان حوضچه رسوبگیر موجود در منطقه سد نکوآباد

محاسبه راندمان این دو حوضچه به کمک مدل ساریکایا (*sarl*) و با استفاده از اطلاعات مربوط به مشخصات حوضچه‌ها (جدول ۳) و همچنین اطلاعات مربوط به دانه بندی ذرات معلق که در محل ایستگاه پل زمانخان (ایستگاهی نزدیک به حوضچه های مورد نظر)، برای یک ماه سیلابی برداشت شده است (جدول ۴)، انجام گرفت. بر طبق این محاسبات، راندمان حوضچه سمت راست ۵۰/۶ درصد و راندمان حوضچه سمت چپ ۴۶/۵ درصد برآورد گردید.

#### محاسبه هزینه ساخت حوضچه‌های رسوبگیر موجود در منطقه سد نکوآباد

هزینه ساخت دو حوضچه رسوبگیر واقع در منطقه سد نکو آباد با استفاده از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$Cost = c_1(B, L) + c_2(B, L, H) + c_3(B, L, H) + c_4(B, L) + c_5(L, H, Z) + c_6(B, H)$$

این مشخصات عبارتند از: طول، عرض، عمق آب، سرعت جریان آب در حوضچه، توزیع دانه بندی ذرات ورودی به حوضچه (ذرات با قطر بیشتر از ۶۰ میکرون) و سرعت سقوط ذرات. در این مطالعه، برای تعیین سرعت سقوط ذرات رسوب از رابطه ۲۱ استفاده شد:

$$w = \left( \frac{4}{3} \times \frac{gd}{C_D} \times \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{1/2} \quad (21)$$

در این رابطه،  $w$  سرعت سقوط ذره،  $g$  شتاب ثقل،  $d$  قطر ذره،  $\gamma_s$  وزن مخصوص ذره،  $\gamma$  وزن مخصوص آب، و  $C_D$  ضریب کشیدگی<sup>۱</sup> (ضریب بدون بعدی که به شکل ذره و عدد رینولدز بستگی دارد) می‌باشند.

به منظور ارزیابی مدل‌های ریاضی طراحی حوضچه‌های رسوبگیر، از معیار جذر متوسط مربعات خطا (*RMS*)<sup>۲</sup> استفاده شد. این معیار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMS^k = \left( \frac{\sum_{i=1}^{20} (\eta_i^k - \eta_i^{actual})^2}{20} \right)^{1/2} \quad (22)$$

که  $RMS^k$  جذر متوسط مربعات خطا برای مدل ریاضی  $k$ ،  $\eta_i^k$  راندمان حوضچه که از مدل ریاضی  $k$  برای آزمایش  $i$  ام به دست آمده، و  $\eta_i^{actual}$  راندمان واقعی حوضچه برای آزمایش  $i$  ام است. بدیهی است که مقدار *RMS* برای هر کدام از مدل‌ها کمتر باشد، این مدل بهتر می‌تواند واقعیت را برآورد کند. جدول ۲، مقدار *RMS* را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. کمترین مقدار *RMS* برای مدل ریاضی "ساریکایا" بوده است. چون در این مدل، پروفیل سرعت در مقطع عمود بر جریان به صورت لگاریتمی و ضریب پخش تلاطم

1- Drag Coefficient  
2- Root Mean Square

با استفاده از فرمول بالا و اطلاعات مربوط به مشخصات حوضچه‌ها (جدول ۳)، و همچنین قیمت‌های معیار استخراج شده از فهرست بهای واحد کارهای ساختمانی، هزینه ساخت حوضچه سمت راست ۱۰۶۴۲۳۸۶۵۵ ریال و هزینه ساخت حوضچه سمت چپ ۲۰۰۹۸۳۲۴۱۲ ریال برآورد گردید.

### ابعاد و هزینه ساخت حوضچه‌های بهینه

برای طراحی بهینه دو حوضچه رسوبگیر که دبی طرح و راندمانی

همانند دو حوضچه رسوبگیر موجود در منطقه سد نکوآباد داشته باشند، از برنامه بهینه سازی *optimum* استفاده شد. همان طور که قبلاً بیان گردید این برنامه، طراحی حوضچه را بر مبنای مینیمم کردن هزینه ساخت آن انجام می‌دهد.

خروجی برنامه بهینه سازی *optimum* شامل طول، عرض، عمق آب، سرعت جریان آب و شیب کف و هزینه ساخت برای دو حوضچه طراحی شده می‌باشد. نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر *RMS* برای مدل‌های مختلف طراحی حوضچه رسوبگیر

نام مدل	<i>RMS</i>
انشتین	۹/۵۸۹
ولیکانف	۲۶/۷۰۵
سامر	۱۵/۱۱۵
وتر	۹/۶۶۲
گارده و رانگا راجو	۲۶/۰۹۶
هیزن	۱۱/۳۷۹
سارل <sup>۱</sup>	۹/۳۷۸
سارپ <sup>۲</sup>	۹/۶۵۶
کمپ	۱۰/۶۴۵

۱- مدل ساریکایا با پروفیل سرعت لگاریتمی در مقطع عمود بر جریان

۲- مدل ساریکایا با پروفیل سرعت سهمی در مقطع عمود بر جریان

جدول ۳- مشخصات حوضچه‌های رسوبگیر سد نکوآباد

دبی طرح ( $m^3/s$ )	طول حوضچه (m)	عرض حوضچه (m)	عمق آب (m)	سرعت جریان آب (m/s)	
۱۵	۴۲/۵	۱۲	۳	۰/۳۰۳	حوضچه سمت راست
۵۰	۴۲/۵	۴۲	۳	۰/۳۵۸	حوضچه سمت چپ

جدول ۴- اندازه و درصد ذرات بالای ۶۰ میکرون (به دست آمده از ایستگاه پل زمانخان)

اندازه ذرات (mm)	۰/۵-۱/۰	۰/۳-۰/۵	۰/۱-۰/۳	۰/۰۸-۰/۱	۰/۰۶-۰/۰۸
درصد وزنی ذرات	۱۱/۲۸	۱۵/۰۴	۲۸/۵۷	۴/۵۱	۴۰/۶۰

جدول ۵- تعیین متغیرهای طراحی بهینه برای حوضچه‌های رسوبگیر، با استفاده از برنامه *optimum*

حوضچه بهینه	شماره ۱	شماره ۲
دبی طرح ( $m^3/s$ )	۱۵	۵۰
راندمان (درصد)	۵۰/۶٪	۴۶/۵٪
طول حوضچه (m)	۳۲/۶۳	۴۰/۰۴
عرض حوضچه (m)	۲۱/۴۲	۳۹/۹۲
عمق آب در حوضچه (m)	۲/۲۶	۴/۶۴
سرعت جریان آب (m/s)	۰/۳۱	۰/۲۷
شیب کف (m/m)	$۲ \times 10^{-۴}$	$۵ \times 10^{-۶}$
هزینه ساخت (ریال)	۸۷۷۸۲۲۵۰۷	۱۸۹۳۳۳۳۱۸۲

شاخه‌ای از تحقیق در عملیات است، حوضچه‌های رسوبگیر بهینه طراحی نمود؛ حوضچه‌هایی که ضمن داشتن کارایی لازم، با کمترین هزینه ممکن ساخته شوند. در همین راستا، نرم افزاری کامپیوتری که توسط نویسندگان این مقاله ایجاد شده و در طراحی بهینه حوضچه‌های رسوبگیر مورد استفاده قرار گرفت، توضیح داده شد. از آنجا که در به کارگیری مدل فوق‌الذکر در یک منطقه، نیاز به یک مدل ریاضی مناسب جهت تخمین راندمان حوضچه‌های رسوبگیر در آن منطقه می‌باشد، مدل‌های مختلف تخمین راندمان بررسی و عملکرد آنها برای حوضچه‌های رسوبگیر موجود در منطقه سد نکوآباد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل ساریکایا با کمترین میزان خطا مدلی مناسب جهت تخمین راندمان حوضچه رسوبگیر در منطقه یاد شده است.

سیس به کمک مثالی، کارایی این نرم افزار در طراحی بهینه حوضچه رسوبگیر در منطقه سد نکوآباد اصفهان تشریح گردید. در این مثال ساده نشان داده شد که استفاده از این نرم افزار در طراحی مجدد حوضچه‌های رسوبگیر موجود در منطقه نکوآباد می‌توانست باعث کاهش قابل قبولی در هزینه ساخت آنها شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۵ مشاهده می‌گردد حوضچه‌های رسوبگیر شماره ۱ و ۲ که توسط برنامه بهینه سازی *optimum* طراحی شده‌اند، به ترتیب عملکردی یکسان با حوضچه‌های رسوبگیر سمت راست و سمت چپ موجود در منطقه سد نکوآباد دارند (دبی طرح یکسان و راندمان یکسان). ولی هزینه ساخت حوضچه رسوبگیر شماره ۱ نسبت به هزینه ساخت حوضچه رسوبگیر سمت راست موجود در منطقه نکوآباد حدود ۱۸ درصد، و هزینه ساخت حوضچه رسوبگیر شماره ۲ نسبت به هزینه ساخت حوضچه رسوبگیر سمت چپ موجود در منطقه نکوآباد حدود ۶ درصد کاهش یافته است.

### جمع بندی

اگرچه پیشرفت فناوری اهمیت زیادی در کاهش هزینه‌های تولید و خدمات دارد، ولی مدیریت و به کارگیری درست منابع هم می‌تواند نقش مهمی را در کاهش هزینه‌ها ایفا نماید. تحقیق در عملیات رشته‌ای است علمی که می‌تواند در زمینه‌های مختلف علمی و فنی به کار گرفته شود و باعث افزایش کارایی منابع گردد. در این پژوهش نشان داده شد که چگونه می‌توان به کمک برنامه‌ریزی ریاضی، که

### منابع

- ۱- بیرامی م.ک. ۱۳۶۲. سیستم‌های انتقال آب. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۲- پرهامی ف. ۱۳۵۴. تئوری و آزمایش مدل‌های هیدرولیکی. انتشارات وزارت نیرو.
- ۳- جعفرزاده ا. ۱۳۶۹. طراحی حوضچه‌های رسوبگیر و بررسی کارایی حوضچه‌های رسوبگیر مغان و سنگر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه تبریز.
- ۴- جعفرزاده ا. ۱۳۷۱. روش‌های کنترل رسوب در شبکه‌های آبیاری و آبرسانی. ترجمه، انتشارات فرهنگ جامع، تهران.
- ۵- شفاعی بجستان م. ۱۳۷۳. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- 6- Camp T.R. 1943. The effect of turbulence on retarding settling. Proc. 2<sup>nd</sup> Hydraulics Conference, University of Iowa, Studies in Engineering, Bulletin 27: 307-317.
- 7- Camp T.R. 1946. Sedimentation and the design of settling tanks. Trans. ASCE, 111: 895-936.
- 8- Dobbins W.E. 1944. Effect of turbulence on sedimentation. Trans. ASCE, 109: 629-656.
- 9- Garde R.J., and Ranga Raju K.G. 1977. Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems. Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- 10- Garde R.J., and Ranga Raju K.G. 1990. Design of settling basins. J. of Hydraulic Research, 28(1): 81-91.
- 11- Hazen A. 1904. On sedimentation. Trans. ASCE, 53: 45-88.
- 12- Hsu N.S., Kuo J.T., and Chiu S.K. 2008. Optimal design of a settling basin for a small-scale drainage area. J. Irrig. Drain. Eng., 134(3): 372-379.
- 13- Jin Y.S., Guo Q.C., and Viraraghavan T. 2000. Modelling of class-I settling tanks. J. Environ. Eng., 126(8): 754-760.
- 14- Jin Y.S., Lu F., and Badruzzaman M.D. 2005. Simplified model for the class-I settling tanks design. J. Environ. Eng., 131(12):1755-1759.
- 15- Pemberton E.L., and Lara J.M. 1971. A Procedure to Determine Sediment Deposition in a Settling Basin. Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior.
- 16- Rouse H. 1949. Engineering Hydraulics. John Wiley, New York.
- 17- Sabbagh M.S. 1984 A generalized lexicographic partial enumeration algorithm for the solution of integer nonlinear programming problems. D. Sc. Dissertation, George Washington University, Washington, D.C.

- 18- Sarikaya H.Z. 1977. Numerical model for discrete settling. J. of Hydraulics Div., ASCE, 103: 865-876.
- 19- 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.
- 20- Sumer M.S. 1977. Settlement of solid particles in open- channel flow. J. of Hydraulics Div. ASCE, 103: 1323-1337.
- 21- Vittal N., and Raghav M.S. 1997. Design of single-chamber settling basins. J. Hydrol. Eng., 123(5): 469-471.

## Optimum Design of Sedimentation Basins in Irrigation Networks

S.N. Shetab Boushehri<sup>1</sup> - S.F. Mousavi<sup>2\*</sup> - S.B. Shetab Boushehri<sup>3</sup>

Received: 6-9-2010

Accepted: 3-10-2010

### Abstract

One of the problems in design of irrigation structures is sedimentation control in the inlet to the irrigation networks. Water quality for agriculture requires that the sediments be controlled and reduced to the permissible limit at their entrance point to the turnouts and irrigation networks. This is possible by constructing a sedimentation basin. The bigger the basin, the best the retardation of the sediments, but the expenses are higher too. Different mathematical models are developed for sedimentation basins. Most of these models show the relationship between efficiency and effective parameters by mathematical formulas. In this research, a computer software for design of settling basins was designed in which design parameters (length, width, depth, slope and water velocity in the basin) are determined such that the basin has the specified technical characteristics and it is built with minimum cost. In this respect, operations research and a lexicographic enumeration algorithm is used. Application of this software for evaluation of construction costs of sedimentation basins in Nekouabad diversion dam Zayandehrud irrigation networks at Isfahan) showed that efficiency of these basins is 50.6% and 46.5%. If these basins were built under optimum design, about 18% and 6% would have been saved in their construction costs, respectively.

**Keywords:** Sedimentation basin, Lexicographic programming, Nekouabad dam

---

1-Assistant Professor, College of Industrial Engineering and Center of Systems Planning, Isfahan University of Technology, Isfahan

2-Professor, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

(\*-Corresponding Author Email: mousavi@cc.iut.ac.ir)

3-MSc Operation Company of Karkheh and Shavoor Irrigation Networks, Ahvaz