

## شبیه‌سازی دوبعدی پیش‌بینی روند انتقال رسوب در مخازن سدها با استفاده از تلفیق مدل عددی و GIS (مطالعه موردی مخزن سد آیدوغموش)

حبیب حکیم‌زاده<sup>۱\*</sup>، سولماز حافظی‌زاده<sup>۲</sup>، فرهاد الماس‌پور<sup>۲</sup>، جعفر محمودی‌مقدم<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند  
<sup>۲</sup> کارشناس شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی

### چکیده

مدل‌سازی عددی در مقایسه با به کارگیری مدل‌های فیزیکی روش بهتری جهت شبیه‌سازی پدیده‌ها می‌باشد. پدیده رسوب‌گذاری در مخازن نیز از موضوعات بسیار مهم در صنعت سدسازی و بهره‌برداری از آن می‌باشد و لذا ارزیابی و پیش‌بینی روند انباشت رسوب یکی از ابزارهای بسیار مهم در مدیریت منابع آبی مخازن سدها خواهد بود. روند انباشت رسوب در مخزن به الگو و شدت جریان موجود در دریاچه سد، شکل هندسی مخزن، زمان نگهداری آب در مخزن و اندازه دانه‌های رسوبی بستگی دارد. در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی و تلفیق آن با داده‌های ماهواره‌ای جهت پیش‌بینی روند انباشت رسوب در مخزن سد آیدوغموش پرداخته شده است. آماده‌سازی اطلاعات اولیه در محیط GIS انجام گرفته و برای شبیه‌سازی جریان، از معادلات رینولدز و انتقال مواد رسوبی از معادله انتقال-پخشیدگی انتگرال‌گیری شده در عمق استفاده گردیده است. جهت گسسته‌سازی معادلات حاکم بر دینامیک جریان و انتقال مواد رسوبی از روش تفاضلات محدود و برای حل معادلات تفاضلی متناظر از روش ADI استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل در محیط GIS در قالب نقشه‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مختلف تهیه و نمایش داده شده است. جهت کالیبره نمودن مدل از نتایج روابط و مدل‌های تجربی استفاده شده است. همچنین نتایج حاصل از مدل با تصاویر ماهواره‌ای مقایسه گردیده است. انباشت مواد رسوبی در مخزن با در نظر گرفتن هیدروگراف سالانه جریان و مواد رسوبی معلق وارده به مخزن مورد بررسی قرار گرفته است و بدین ترتیب انباشت سالیانه مواد رسوبی در مخزن سد برآورد گردیده است.

**واژگان کلیدی:** شبیه‌سازی عددی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، داده‌های ماهواره‌ای، معادله انتقال-پخشیدگی، روش تفاضلات محدود، انباشت مواد رسوبی، معادلات انتگرال‌گیری شده در عمق.

### ۱- مقدمه

سد شبیه‌سازی گردیده و نتایج با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

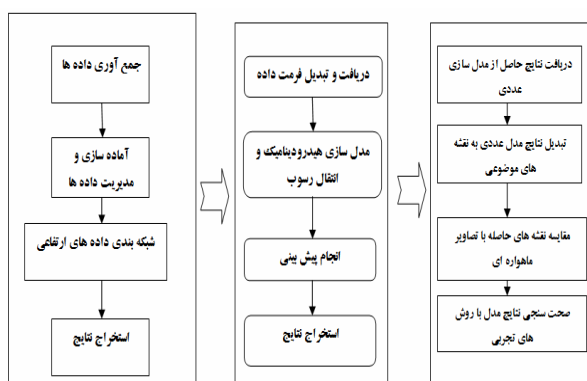
Çelebioğlu [۲] در ابتدا فرایندهای هیدرودینامیک مؤثر بر الگوهای نقل و انتقال رسوب را با شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده در خلیج دلاویر شناسایی کرده و برای این منظور، یک مدل عددی سه‌بعدی را برای قسمتی از خلیج که تحت تأثیر جزر و مد می‌باشد تهیه کرده است. در این مطالعه مدل‌های مختلف توربولانس تکمیلی معادلات برای استفاده در خلیج دلاویر مقایسه شده‌اند.

Sabbagh [۳] جزئیات حل معادلات را بیان کرده و مجموعه‌ای از معادلات جریان را برای حل معادله آب‌های کم عمق که در آن تأثیر تغییرات توپوگرافیکی بستر لحاظ می‌گردد، ارائه نموده است. به لحاظ ریاضی، معادلات عمقی تغییرات انباشت رسوبات را به علت پدیده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری بهتر بیان می‌کنند. در نهایت، قابلیت مدل در رودخانه‌های سفید رود و قزل‌اوزن و انتقال رسوب در سد سفیدرود مورد بررسی

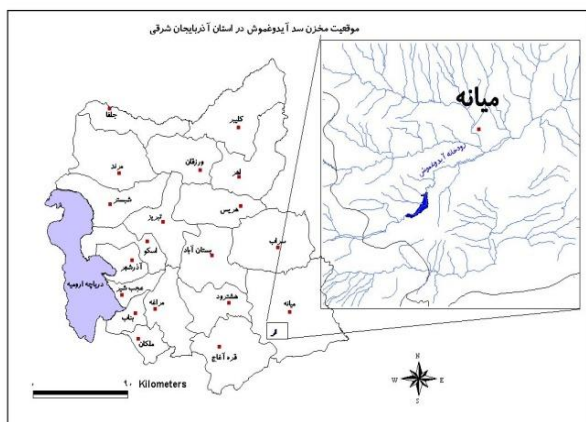
شبیه‌سازی عددی انتقال رسوب و پدیده لای‌نشینی در مخازن سدها در پی پیشرفت قابل توجه سرعت پردازش داده‌ها در رایانه‌ها از چندی پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. پدیده انباشت مواد رسوبی در مخازن سد به عنوان یک عامل گریزناپذیر از مسائل بسیار مهم در طرح، ساخت و بهره‌برداری از سدها است که در آن شرایط آب و هوایی، جنس زمین، پوشش شیب‌های ناحیه‌ای، مدیریت حوضه آبریز، نحوه بهره‌برداری و نظایر آن‌ها به عنوان پارامترهای مؤثر در میزان رسوب انتقالی به مخزن به شمار می‌رود. مدل عددی انتقال رسوب یکی از ابزارهایی است که می‌تواند میزان و نحوه رسوب‌گذاری در دریاچه سدها را پیش‌بینی کند.

Fang [۱] برای مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب از مدل ریاضی سه‌بعدی استفاده نموده ولی کالیبراسیونی روی نتایج عددی انجام نداده است. در این تحقیق، فرایندهای مورفولوژیکی و رسوب‌گذاری در یک دوره ۷۶ ساله (از زمان شروع بهره‌برداری

ترتیب شامل بیان معادلات، نحوه گسسته‌سازی، شیوه حل و ارزیابی نتایج حاصل از این تحقیق بوده است. شکل (۱) روندنمای مراحل مختلف این پژوهش را نشان می‌دهد. مخزن مورد مطالعه در این تحقیق، مخزن سد آیدوغموش در نزدیکی شهر میانه در استان آذربایجان شرقی می‌باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- روندنمای مراحل انجام تحقیق



شکل ۲- منطقه مخزن سد مورد مطالعه

### ۳- معادلات مورد استفاده در مدل عددی

معادلات هیدرودینامیک مورد استفاده در این تحقیق از نوع انتگرال‌گیری شده در عمق بوده که امروزه به طور گسترده در نرم‌افزارها و مدل‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این معادلات به روش تفاضل محدود گسسته‌سازی شده و به شیوه نیمه ضمنی ADI حل گردیده‌اند. جزئیات مدل هیدرودینامیک به جهت رعایت اختصار در این‌جا آورده نشده است. در مورد معادلات انتقال رسوب از فرمول‌بندی ون-راین که دارای کاربرد گسترده‌ای است، جهت محاسبه هر دو مقدار شار مواد معلق و بار بستر در مدل استفاده شده است.

قرار گرفته است. نتایج حاصله در این تحقیق گویای این است که با مدل دو بعدی و عمق متوسط می‌توان انباشت رسوبات را در مخزن سد شبیه‌سازی کرد.

رسوب‌گذاری در مخزن سد برحسب بازده تله‌اندازی اندازه‌گیری می‌شود. این بازده در ابتدا بستگی به مشخصات بار رسوبی، زمان توقف جریان ورودی یا زمان نگهداری مخزن، روش بهره‌برداری مخزن و عمر مخزن دارد. در هنگام رسیدن آب رودخانه به مخزن سد از سرعت و آشفتگی‌های آن به تدریج کاسته شده و مواد رسوبی در آن نهشته می‌شوند؛ با این تفاوت که مواد رسوبی بار بستر و بخشی از مواد رسوبی معلق به دلیل درشتی در همان بخش ابتدایی مخزن نهشته می‌گردند.

در این پژوهش مشخصات کلی جریان برای ترازهای مختلف دریاچه سد آیدوغموش مورد بررسی قرار گرفت و به بررسی نتایج حاصل از کاربرد مدل انتقال رسوب برای ترازهای مختلف مخزن پرداخته شده است. به دلیل طبیعت سه‌بعدی جریان و انتقال رسوب در مخازن سدها طبیعی است که نتایج عددی مدل دوبعدی حاضر با تقریب همراه خواهند بود ولی با اعمال ضرایب تصحیح مربوط به عمق متوسط می‌توان تا حدودی نتایج منطقی‌تری توسط مدل‌های عددی انتگرال‌گیری شده در عمق به دست آورد. یکی از اهداف عمده در این پژوهش محاسبه و پیش‌بینی الگوی انباشت مواد رسوبی در درون سد مخزنی آیدوغموش است که این کار به واسطه حل معادلات متناظر انجام می‌پذیرد. از امتیازات دیگر این تحقیق تلفیق مدل عددی با GIS به منظور آماده‌سازی داده‌ها و تبدیل نتایج حاصل از مدل به نقشه‌های مختلف می‌باشد.

در حالت کلی می‌توان چنین بیان نمود که هدف از انجام این تحقیق توانایی در پیش‌بینی کاهش ظرفیت مخزن در بلند مدت می‌باشد که این نیز ابزاری جهت پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت و بهره‌برداری مخزن سد به شمار می‌رود و می‌توان به عملکرد تأسیسات و سیستم‌های هیدرولیکی سد پی برد.

### ۲- روش تحقیق

روش تحقیق حاضر بر اساس الگوریتم ارائه شده در سه مرحله اصلی جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، مدل‌سازی عددی و ارزیابی نتایج و صحت‌سنجی انجام پذیرفته است. در مرحله نخست، جمع‌آوری داده‌ها مشتمل بر داده‌های جریان و مواد رسوبی رودخانه آیدوغموش، و نیز استخراج داده‌های توپوگرافی مخزن سد و شبکه‌بندی میدان محاسباتی است که مدیریت این داده‌ها در محیط GIS انجام پذیرفته است. مراحل دوم و سوم به

معادلات تفاضل محدود متناظر با معادلات حاکم هیدرودینامیک و انتقال رسوب با استفاده از روش ADI بیان گردیده‌اند. این معادلات به طور کامل در زمان و مکان به فرم تفاضل مرکزی تنظیم شده‌اند؛ به گونه‌ای که عبارات مربوط به شتاب‌های انتقالی و پراکنش توربلانس به واسطه تکرار به شکل تفاضل مرکزی در آمدند. شبکه مورد استفاده در مدل طوری انتخاب شده است که مقادیر دبی و تراز آب در مورد هر شبکه در نقاط متفاوتی از شبکه قرار داشته باشند. روش مزبور دارای این مزیت است که برای هر کدام از متغیرهای تابع زمان، عبارتی برای مشتق مکانی به صورت مرکزی وجود خواهد داشت. همچنین عبارات مربوط به شتاب‌های انتقالی در معادله انتقال-پخشیدگی رسوب به روش Ultimate Quickest بیان شده‌اند که این روش نسبت به روش‌های دیگر دارای مزایایی است که به تفصیل در مرجع [۷] بیان شده است.

### ۳-۱- شرایط مرزی مدل انتقال رسوب

در حل معادله حاکم مدل انتقال رسوب، تعیین سه نوع شرط مرزی مورد نیاز است.

الف) شرط مرزی باز:

در مورد مرزهای باز مدل رودخانه، در ورودی بالادست می‌توان از مقادیر اندازه‌گیری شده در ترازهای مختلف آب، پروفیل‌های غلظت معادل متناظر با تنش‌های برشی موضعی بستر و یا پروفیل غلظت ذرات رسوبی یکنواخت در عمق استفاده نمود. در قسمت پایین‌دست خروجی نیز می‌توان با انجام برون‌یابی، پروفیل غلظت ذرات رسوبی را به دست آورد.

ب) شرایط مرزی دیواره‌ها:

بر روی مرزهای دیوار، شار انتقال مواد رسوبی و مشتقات عمودی غلظت برابر صفر قرار داده شدند.

پ) شرط مرزی بستر:

شرط مرزی بستر ذرات رسوبی معمولاً در تراز مبنای "a" بر روی بستر داده می‌شود و غلظت مبنای یا گرادبان غلظت به واسطه مقدار معادل آن در این تراز تعیین می‌گردد. هر دو انتخاب در مدل تهیه شده حاضر لحاظ شدند که در مورد غلظت مبنای داریم:

$$S_a = S_{ae} \quad (۴)$$

که در آن اندیس  $ae$  نشان دهنده مقدار معادل در تراز مبنای "a" است. غلظت مبنای  $S_{ae}$  تابعی از تنش برشی بستر و تنش برشی بحرانی بستر برای شروع حرکت ذرات رسوبی است. اگر

در این قسمت معادله دیفرانسیل انتقال رسوب در مورد پیش‌بینی شار بار مواد رسوبی معلق بر اساس حل معادله انتگرال‌گیری شده در عمق انتقال-پراکنش می‌باشد که به صورت ذیل بازنویسی شده است:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \left[ \frac{\partial SUH}{\partial x} + \frac{\partial SVH}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ HD_{xx} \frac{\partial S}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial S}{\partial y} \right] \quad (۱)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ HD_{yx} \frac{\partial S}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial S}{\partial y} \right] = E$$

که در آن  $U$  و  $V$  مؤلفه‌های سرعت عمق متوسط در جهات  $x$  و  $y$ ،  $S$  غلظت متوسط در عمق مواد رسوبی معلق،  $H$  عمق کلی آب،  $E$  مقدار انباشت یا فرسایش مواد رسوبی و  $D_{xx}$ ،  $D_{xy}$ ،  $D_{yx}$ ،  $D_{yy}$  ضرایب عمق متوسط پخش و پراکنش طولی توربلانس در جهات  $x$  و  $y$  هستند [۴].

در مدل‌سازی مواد رسوبی چسبیده، عبارت فرسایش یا انباشت مواد رسوبی  $E$  در سمت راست معادله دیفرانسیل انتقال-پخش به شکل زیر بازنویسی می‌شود [۵]:

$$E = \frac{dm}{dt} \quad (۲)$$

که در آن  $m$  جرم مواد رسوبی در واحد سطح است. عبارت جایگزین در معادله بالا برای تعیین فرسایش یا انباشت بر اساس معیار زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\frac{dm}{dt} = W_f S \left[ \frac{\tau_b}{\tau_d} - 1 \right] \quad \text{when } \tau_b \leq \tau_d \quad \text{انباشت}$$

$$\frac{dm}{dt} = M \left[ \frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right] \quad \text{when } \tau_b \geq \tau_e \quad \text{فرسایش} \quad (۳)$$

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad \text{when } \tau_d < \tau_b < \tau_e \quad \text{هیچکدام}$$

که در آن  $W_f$  سرعت ته‌نشین ذرات رسوبی،  $\tau_b$  تنش برشی بستر،  $\tau_d$  تنش برشی بحرانی برای انباشت،  $\tau_e$  تنش برشی بحرانی برای فرسایش و  $M$  ضریب تجربی فرسایش است. در این پژوهش مقادیر تنش‌های برشی بحرانی برای انباشت و فرسایش به ترتیب برابر  $0.08$  و  $0.2$  و مقدار ضریب تجربی فرسایش برابر  $0.15$  در نظر گرفته شده‌اند [۶].

استخراج گردید. این مقادیر متناظر با حداکثر مقادیر دبی جریان ماه‌های مذکور سال آبی ۸۱-۸۲ در نظر گرفته شده‌اند. بنابر این مدل انتقال رسوب با در نظر گرفتن معادله تغییرات بستر برای چهار ماه متوالی مزبور و برای ترازهای مختلف مخزن (۱۳۴۱/۵ و ۱۳۳۲/۵ و ۱۳۲۶/۵) اجرا گردید.

#### ۵- نتایج مدل انتقال رسوب

نتایج به دست آمده از مدل عددی برای انباشت مواد رسوبی در طول چهار ماه پرآبی اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد سال آبی ۸۱-۸۲ به صورت گرافیکی در شکل (۳) برای ترازهای مختلف نشان داده شده‌اند. از بررسی عمومی این شکل مشاهده می‌شود که انباشت مواد رسوبی غالباً در ابتدای مخزن به وجود آمده و اندکی به درون آن کشیده شده است که مشاهدات محلی و تصاویر ماهواره‌ای نیز مؤید این مطلب هستند.

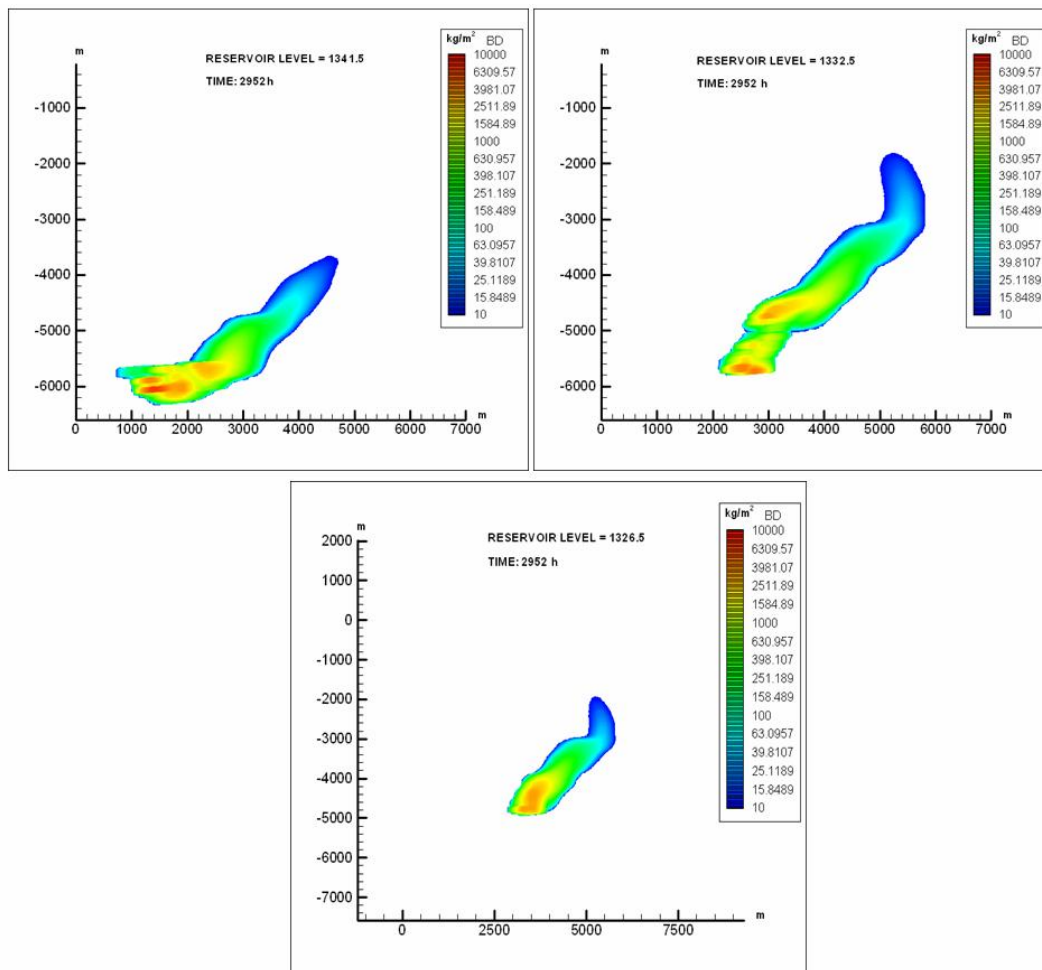
تنش برشی بستر از تنش بحرانی بیشتر باشد، در آن صورت ذرات ته‌نشین شده در بستر به درون جریان به حالت تعلیق دوباره در می‌آیند و  $S_{ae}$  مثبت می‌شود و اگر تنش برشی کمتر از تنش برشی بحرانی باشد، فرسایش روی نداده و  $S_{ae}$  صفر می‌گردد.

#### ۴- کالیبراسیون مدل عددی

تعداد سه نمونه از مواد رسوبی چسبنده از محل مخزن سد آیدوغموش نمونه‌برداری شده و آزمایشات دانه‌بندی هیدرومتری بر روی نمونه‌های مزبور در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی سهند به انجام رسیده است. از روی منحنی‌های مزبور قطر  $d_{50}$  درصد مصالح رد شده به ترتیب زیر به دست آمد:

$$d_{50} = 0.020 \text{ mm}$$

در این قسمت غلظت مواد رسوبی معلق رودخانه برای چهار ماه پرآبی اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد سال آبی ۸۱-۸۲



شکل ۳- توزیع انباشت مواد رسوبی در درون مخزن به ترتیب در ترازهای ۱۳۴۱/۵ و ۱۳۳۲/۵، ۱۳۲۶/۵

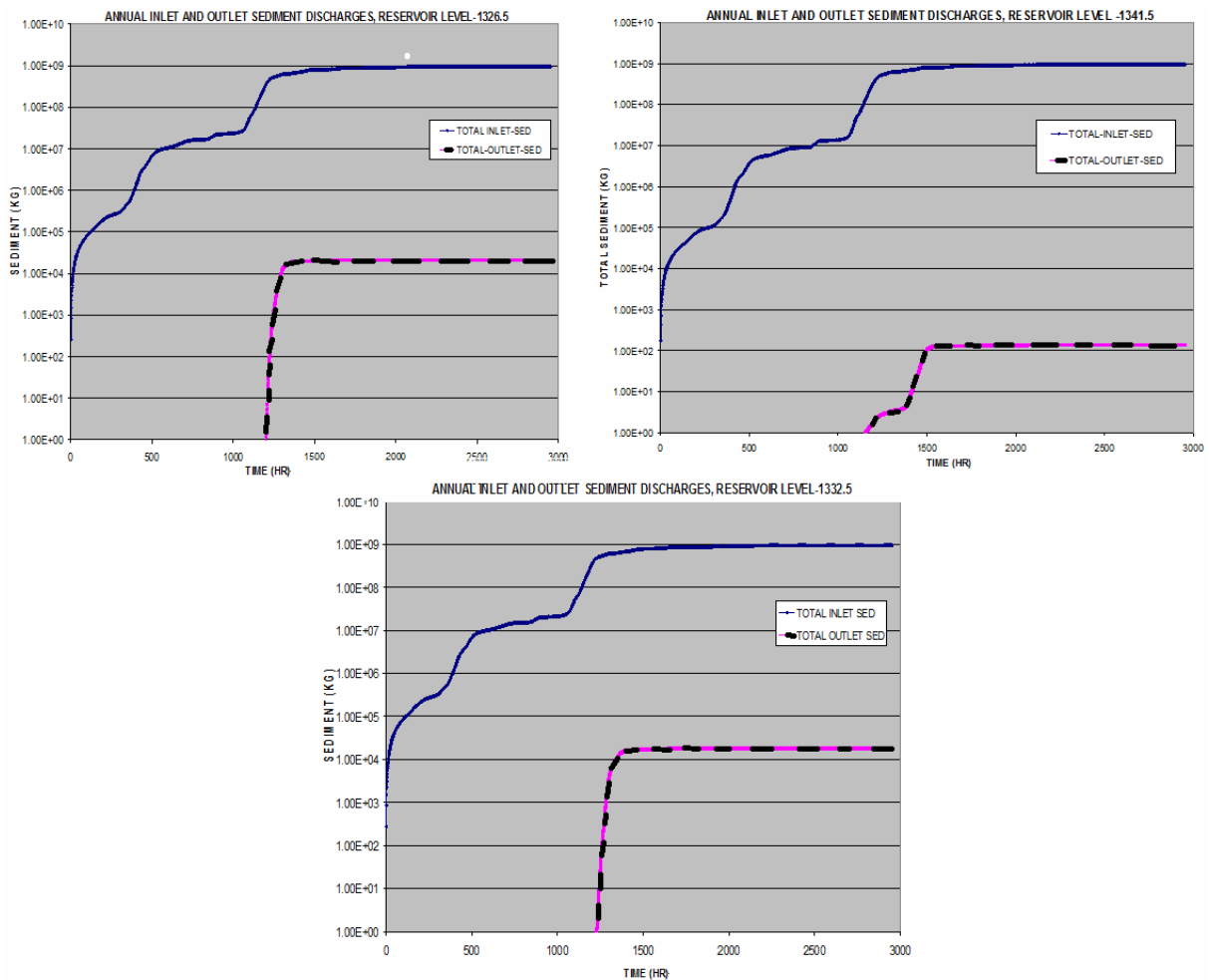
مشاور، میزان جرم مواد رسوبی معلق وارده به مخزن در حدود ۱/۲۵ میلیون تن بوده است [۸].

همچنین در ادامه، نتایج عددی جهت مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای به صورت گرافیکی به محیط GIS انتقال یافته و بر روی تصویر ماهواره‌ای پیاده شده است که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.

#### ۶- صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی مدل با استفاده از دو روش گرافیکی و نتایج حاصل از روش‌های تجربی انجام پذیرفته است. در روش گرافیکی، نتایج حاصل از مدل عددی در محیط GIS با داده‌های ماهواره‌ای موجود از منطقه مقایسه گردیده و در روش تجربی ارقام به دست آمده از مدل با مقادیر به دست آمده از روابط تجربی روش براون، چرچیل و برون مقایسه شده‌اند.

در ادامه، جرم کل مواد رسوبی وارد شده به مخزن و خارج شده از آن در طی دوره چهار ماهه شبیه‌سازی شده فوق در نمودارهای شکل (۴) برای ترازهای مختلف مخزن نشان داده شده‌اند. از بررسی کلی این نمودارها به سادگی می‌توان مشاهده نمود که جرم کل مواد رسوبی معلق وارد شده به مخزن در مدت چهار ماه مزبور برای ترازهای آبی مختلف مخزن در حدود یک میلیون تن بوده ولی جرم کلی مواد رسوبی خارج شده از مخزن به تراز آب مخزن و یا به عبارت دیگر به حجم مخزن بستگی داشته است. بنابر این جرم کلی مواد رسوبی خارج شده از مخزن برای تراز آب ۱۳۴۱/۵ متر در حدود ۱۴۰ کیلوگرم، برای تراز آب ۱۳۳۲/۵ متر در حدود ۱۸ متر در حدود ۱۸ تن و برای تراز آب ۱۳۲۶/۵ متر در حدود ۲۱ تن بوده است. در واقع با کاهش حجم مخزن مقدار مواد رسوبی خارج شده از آن افزایش می‌یابد. از بررسی این ارقام مشاهده می‌شود که در هر حالت بیش از ۹۹ درصد مواد رسوبی وارد شده به مخزن در آن تله‌اندازی می‌شوند. اما بر اساس برآورد



شکل ۴- جرم کل مواد رسوبی ورودی به مخزن و خارج شده از آن به ترتیب در ترازهای ۱۳۲۶/۵، ۱۳۳۲/۵ و ۱۳۴۱/۵

الف) روش براون:

در این روش  $T_e$  شاخص رسوب‌گذاری با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_e = 100[1 - (1/(1 + 0.1C/w))] \quad (5)$$

که در آن  $C$  ظرفیت مخزن برحسب acre-ft و  $w$  سطح حوضه آبریز بر حسب مایل مربع می‌باشد. که مقدار  $C$  برای تراز مورد نظر مخزن  $C=118146$  ایکر-فوت و  $w=700.43$  مایل مربع است و بنابراین  $T_e = 94.4$  به دست می‌آید. یعنی ۵/۶٪ مواد رسوبی ورودی از مخزن خارج می‌شوند.

ب) روش چرچیل:

در این روش شاخص رسوب‌گذاری  $I_s$  با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_s = C^2 / lQ^2 \quad (6)$$

که در آن  $Q$  مقدار دبی متوسط روزانه می‌باشد که برای اردیبهشت ماه ۸۲-۸۱ مقدار  $34/7$  متر مکعب در ثانیه در نظر گرفته شده است و  $l$  طول مخزن می‌باشد.

مقدار  $I_s$  در رابطه اخیر برای طول  $3280/8$  فوت مخزن سد آیدوغموش برابر  $5.3 \times 10^9$  به دست می‌آید که از روی منحنی چرچیل مقدار درصد مواد رسوبی گذرنده از مخزن برای مقدار  $I_s$  محاسبه شده بسیار نزدیک به صفر است.

ج) روش برون:

در این روش  $T_e$  شاخص رسوب‌گذاری، با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_e = 100[1 - (1/(1 + 100C/D))]^{1.5} \quad (7)$$

در این رابطه  $I$  ورودی سالیانه بارش را نشان می‌دهد. برای مخزن سد آیدوغموش مقدار  $T_e$  برابر با ۹۸ درصد به دست می‌آید. به عبارت دیگر تنها ۲ درصد مواد رسوبی ورودی به مخزن از آن خارج می‌شوند.

روابط تجربی ذکر شده در این قسمت با وجود اختلاف اندک در نتیجه، بیانگر این مهم هستند که مواد رسوبی بسیار کمی از مخزن خارج می‌شود و تقریباً همه مواد رسوبی وارد شده تله‌اندازی می‌شوند. این نتایج تجربی نیز مؤید نتایج عددی به دست آمده در بخش قبلی است.

## ۶-۱- صحت‌سنجی مدل با استفاده از روش گرافیکی

برای ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های میدانی موجود در منطقه و همچنین ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با یکدیگر، این نتایج در قالب یک لایه اطلاعاتی GIS در آمده و به محیط GIS منتقل گردید. برای انجام این کار مراحل زیر به انجام رسیده است:

- (۱) انتخاب آخرین تصاویر ماهواره‌ای موجود از منطقه،
- (۲) پردازش‌های اولیه بر روی تصویر مورد نظر،
- (۳) انتخاب لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز،
- (۴) دریافت، آماده‌سازی و ورود نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به محیط GIS و ایجاد لایه‌های اطلاعاتی بر اساس آن‌ها.



شکل ۵- تصویر ماهواره‌ای مخزن سد آیدوغموش در تیرماه ۱۳۸۴

تصویر ماهواره‌ای انتخاب شده (شکل (۵)) تراز ۱۳۲۰ مخزن را نشان می‌دهد و در این تصویر رسوب انباشته شده از لحاظ مکانی مشخص می‌باشد، بنابراین جهت ارزیابی مدل، نتایج مدل عددی برای ترازهای بالای ۱۳۲۰ به صورت گرافیکی بر روی مخزن سد، آورده شده‌اند. با هم‌پوشانی نقشه پهنه‌های حاصل از مدل عددی، مساحت مناطق رسوب‌گذاری استخراجی از تصاویر با سطوح استخراجی از مدل عددی به میزان تطابق  $92/3$  درصدی هم‌پوشی و انطباق دارد. لذا مدل عددی، مکان‌های انباشت مواد رسوبی را با دقت خوب و قابل قبولی پیش‌بینی نموده است.

## ۶-۲- صحت‌سنجی مدل با استفاده از نتایج روابط تجربی

همان‌گونه که پیش از این بیان گردید از روی نتایج مشخص گردید که مدل عددی میزان نسبت مواد رسوبی گذرنده از مخزن به رسوب ورودی مخزن را حداکثر برابر  $2.1 \times 10^{-3}$  درصد پیش‌بینی نموده است که عددی نزدیک به صفر است. در این بخش این نسبت را با سه روش براون، چرچیل و برون مقایسه می‌کنیم [۹].

## ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۹- مراجع

- بررسی عمومی نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که انباشت مواد رسوبی غالباً در ابتدای مخزن روی داده و بخشی نیز به درون آن کشیده شده است. مشاهدات محلی و تصاویر ماهواره‌ای نیز مؤید این مطلب بوده است. همچنین بررسی نمودارهای مربوط به جرم کلی مواد رسوبی وارد شده به مخزن و خارج شده از آن در طی دوره چهار ماهه شبه‌سازی شده فوق نشان می‌دهند که جرم کلی مواد رسوبی خارج شده از مخزن به تراز آب مخزن (به عبارت دیگر به حجم مخزن) بستگی داشته است؛ به گونه‌ای که کمترین مقدار جرم مواد رسوبی خارج شده از مخزن برای تراز آب ۱۳۴۱/۵ متر بوده است. بنابر این مشاهده می‌شود که با کاهش حجم مخزن سد مقدار جرم مواد رسوبی خارج شده از آن افزایش می‌یابد و این امر منطقی است. از بررسی ارقام مشاهده می‌شود که در هر حالت بیش از ۹۹ درصد مواد رسوبی وارد شده به مخزن در آن تله‌اندازی می‌شوند و فرمول‌های تجربی نیز این موضوع را تأیید نمودند. همچنین در ادامه نتایج عددی جهت مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای به صورت گرافیکی به محیط GIS انتقال یافته‌اند و مشاهدات ماهواره‌ای نیز توزیع انباشت مواد رسوبی پیش‌بینی شده توسط مدل انتقال رسوب را تأیید نمودند.
- در خاتمه با توجه به نتایج کلی به دست آمده از طرح پژوهشی حاضر ابتدا پیشنهاد می‌شود با توجه به بالا بودن حجم سالانه مواد رسوبی معلق وارد شده به مخزن که در حدود ۰/۳ درصد ظرفیت ناخالص مخزن می‌باشد، مطالعات بیشتری در رابطه با رسوب‌گذاری در مخزن سد انجام گیرد. دوم این که تا حد ممکن بهره‌برداری از مخزن سد در ترازهای پایین سطح آب انجام گیرد؛ زیرا این امر به کاهش انباشت مواد رسوبی کمک بسیاری خواهد نمود و سرانجام این که با توجه به آمار بسیار کم اندازه‌گیری رسوب در رودخانه منتهی به مخزن، پیشنهاد می‌شود که در صورت امکان از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری رسوب در مخزن سد مانند هیدروگرافی مخزن به صورت دوره‌ای بهره گرفته شود.
- ۸- تشکر و قدردانی
- مقاله حاضر نتیجه بخشی از یک پروژه تحقیقاتی است که توسط شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی تأمین اعتبار شده است. بدین‌وسیله مؤلفین از کمیته تحقیقات و حمایت مالی شرکت مذکور تشکر و قدردانی می‌نمایند.
- [1] Fang, H. W., "Three - Dimensional Calculations of Flow and Suspended Sediment Transport in the Neighborhood of the Dam for the Three Gorges Project (TGP) Reservoirs in the Yangtze River", *Journal of Hydraulic Research*, 2003, 41 (4), 379-394.
- [2] Çelebioğlu, T. K., "Simulation of Hydrodynamics and Sediment Transport Patterns in Delaware Bay", PhD Thesis, Drexel University, Philadelphia, USA, 2006.
- [3] Sabbagh, S. R., "Simulation of Suspended Sediment Transport in Dam Reservoir Using a Cell Center Finite Volume Solver", *The 5<sup>th</sup> IASME International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics*, Athens, Greece, 2007, pp 24-33.
- [4] Van Rijn, L. C., "Sediment Transport Part I: Suspended Load Transport", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, (11), 1613-1641.
- [5] Falconer, R. A., Chen, Y., "Modeling Sediment Transport and Water Quality Processes on Tidal Floodplains", *Floodplain Processes*, Editors: Malcolm G. Anderson, Des E. Walling and Paul D. Bates, John Wiley & Sons Ltd., 1996, pp 361-397.
- [6] Whitehouse, R., Soulsby, R., Roberts, W., Mitchener, H., "Dynamics of Estuarine Muds", HR Wallingford and Thomas Telford Limited, 2000, pp 1-210.
- [7] Lin, B., Falconer, R. A., "Tidal Flow and Sediment Transport Modeling Using the Ultimate Quickest Scheme", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123, (4), 303-314.
- [۸] گزارش مرحله اول آبیگری سد آیدوغموش، شرکت مشاور بند آب، ۱۳۸۴.
- [۹] حسن‌زاده، ی.، "بررسی عوامل مؤثر در ضریب رسوب‌گیری مخازن سدهای ذخیره‌ای"، چهارمین سمینار مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۷۵.