

## شبیه‌سازی الگوریتم الگوی حرکت ذرات رسوبی رودخانه سد اکباتان با استفاده از مدل عددی

### فلوئنت

علیرضا ایلدرمی\* - دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲      تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

### چکیده

در سال‌های اخیر ضرورت استفاده از مدل‌های چند فازی عددی جهت تفکیک و شبیه‌سازی رسوبات بستر و بار معلق رودخانه‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این بررسی، شبیه‌سازی الگوریتم حرکت و ته‌نشینی ذرات رسوبی رودخانه یلقان سد اکباتان همدان با استفاده از مدل عددی چند فازی فلوئنت و کانال شیشه‌ای آزمایشگاهی است. لذا در این تحقیق از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم مدل فلوئنت جهت تفکیک بار بستر و معلق، از اعداد تنش رینولدز به منظور تعیین آستانه حرکت و جهت تحلیل الگوی حرکتی و ته‌نشینی ذرات رسوبی در تیوب‌های مختلف جریان در کانال شیشه‌ای آزمایشگاهی، از نرم‌افزارهای فلوئنت و آکوباس استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که قسمت اعظم بار رسوبی شن ریز و سیلت در کانال آزمایشگاهی توسط نیروی بالا برنده ساکن در تیوب دوم جریان حمل می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به دلیل وجود خطوط هم فشار و ایجاد جریان و سرعت ثابت در تیوب دوم جریان، بار رسوبی معلق در بستر رودخانه در طول سال تا مخزن سد حمل می‌شود و حجم عمده مخزن طی این فرآیند توسط رسوبات شن ریز و سیلت پر شده است. بررسی میزان درصد خطای اندازه‌گیری شده بیانگر تطابق بالای مدل فلوئنت با داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد و نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی حرکت ذرات رسوبی با قطرهای مختلف از توانایی و دقت بسیار خوبی برخوردار است. همبستگی نتایج آزمایشگاهی و مدل فلوئنت در مجموع بیش از ۹۷ درصد است و نشان می‌دهد که مدل فلوئنت با دقت بسیار بالا و قابل قبول حمل، انتقال و ترسیب رسوبات با دامنه‌ای از رنج‌های مختلف را به خوبی شبیه‌سازی کرده است.

واژگان کلیدی: بار معلق، سرعت ته‌نشینی، تیوب جریان، ذرات رسوبی، سد اکباتان.

## مقدمه

بررسی و شناخت مکانیسم‌های کنترل کننده فرآیند انتقال رسوب و تحلیل دقیق جریان، ناشی از برهم‌کنش‌های فازهای جامد و مایع در جریان سیالات کار مشکل و پیچیده‌ای است (ایلدرومی و همکاران، ۱۳۹۵). چرا که بیشتر مدل‌ها، تحلیل انتقال ظرفیت رسوب بار بستر و معلق را به صورت جداگانه بررسی نموده و برای پیش‌بینی معمولاً از روش‌های نیمه تجربی استفاده می‌کنند و به دلیل اینکه جزئیات مکانیسم‌های کنترل کننده فرآیند انتقال رسوب را به خوبی نمایش و تحلیل نمی‌کنند، فاقد کاربردهای لازم می‌باشند (اودا<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹). بررسی‌ها نشان می‌دهد که پدیده انتقال رسوب، حاصل یک جریان دو فاز جامد-مایع و اثرات متقابل بین آنهاست که حتی در شرایط عادی روش‌های تک فاز قادر به مدل‌سازی اثرات متقابل بین این دو فاز نبوده و ثابت شده که مدل‌های اولری دو فاز جدید نیز امکان تحلیل و مدل‌سازی کامل اثرات متقابل بین ذره و نوسانات آشفتگی را ندارند (طاهر شمسی، ۱۳۸۸) بنابراین استفاده از مدل‌های چند فاز عددی در تحلیل و شبیه‌سازی انتقال ذرات رسوبی و معلق به صورت یک فاز دوم پیوسته با فاز سیال بر هم‌کنش، جهت ارزیابی نحوه حرکت ذرات رسوبی رودخانه بسیار ضروری به نظر می‌رسد (ایقبال و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹). در حال حاضر جهت شبیه‌سازی و ارزیابی حرکت ذرات رسوبی و نحوه رسوب‌گذاری، روابط ریاضی و مدل‌های فیزیکی مختلفی از جمله HEC-6، HEC-RAS، SSIM، MIKE21، GSTAR، FLUVIAL ارائه شده که بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل اینکه استفاده از مدل‌های فیزیکی نیازمند فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام آزمایشات می‌باشند، اغلب توصیه نمی‌شوند، لذا بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه با مدل‌های ریاضی بررسی می‌شوند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به اهمیت و نقش فرآیند انتقال و رسوب‌گذاری به ویژه در حوضه سدها، امروزه مدل‌های ریاضی شبه دو بعدی به عنوان یک راه حل بهینه و کارآمد، کاربرد گسترده‌ای در مباحث هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه‌ها به ویژه شبیه‌سازی و ارزیابی حرکت ذرات رسوبی پیدا کرده و در حال توسعه اند. چرا که در این مدل‌ها، تغییرات سرعت جریان در عرض رودخانه به کمک حل عددی معادلات دیفرانسیل ناویراستوکس و در شرایط جریان ماندگار و یکنواخت به خوبی مدل‌سازی و با کمترین خطا شبیه‌سازی می‌شود (ظهیری و همکاران، ۱۳۹۷). در این رابطه در سال‌های اخیر کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب از جمله مدل fluent جهت بررسی هیدرولیک جریان و تحلیل الگوی حرکت ذرات رسوبی ضروری و بسیار مورد توجه قرار گرفته است. چرا که می‌تواند بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه همبستگی معنی‌داری برقرار نماید. (بایزیدی، ۱۳۹۶). تاکنون تحقیقات گسترده‌ای با استفاده از مدل‌های مختلف تک، دو و سه بعدی جهت تحلیل جریان رسوب و نحوه رسوب‌گذاری انجام شده است. از جمله نتایج بررسی هیدرودینامیکی الگوی آشفتگی جریان و انتقال رسوب توسط مدل CCHE2D جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی نواحی گردابه‌ای در ناحیه قوس مقعر رودخانه‌ها، نشان داده که مدل آشفتگی k-ε عملکرد بهتری دارد (خسروی، ۱۳۹۷). همچنین بررسی انتقال رسوب و تغییرات بستر رودخانه با استفاده از مدل GSTARS 2.1 بیانگر افزایش میزان رسوب‌گذاری به طرف پایین دست و بالابودن میزان فرسایش و کف کنی در بستر رودخانه در بالا دست می‌باشد (خانجانی زوراب و همکاران، ۱۳۹۹). بررسی مدل‌های سه‌بعدی و معیارهای مهم انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی‌های مختلف جریان رود، بیانگر این است که مدل Flow3D مناسب‌ترین مدل شبیه‌سازی جریان و رسوب به صورت هم‌زمان می‌باشد (محبوب و همکاران، ۱۳۹۷). در بررسی ظرفیت انتقال جریان و رسوب مشخص شده که پارامترهای متعددی مانند اقلیم، ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و مورفولوژیکی در بررسی و شبیه‌سازی ظرفیت انتقال و رسوب موثرند، اما مقایسه و ارزیابی روش‌های برآورد رسوب معلق بیانگر این است که تغییر منطقه اقلیمی بین ایستگاه

<sup>1</sup>. Ouda

<sup>2</sup>. Iqbal et al

های مورد بررسی موجب تغییر مدل‌های بهینه برآورد رسوب معلق انتخابی می‌شود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین مشخص شده که در بررسی پدیده‌های زمانی منحنی سنج رسوب معلق حوضه، مدل سری زمانی تابع انتقال در مقایسه با سایر مدل‌ها از عملکرد بالاتری برخوردار است (رئیس‌ی و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مدل‌سازی رابطه میزان رسوبات معلق و ویژگی‌های هیدرولوژیکی و محیطی حوضه، چهار عامل دبی و متوسط بارندگی سالانه، ضریب هورتون و ارتفاع متوسط حوضه، مهمترین پارامترهای موثر در برآورد رسوبات معلق می‌باشند (هنربخش و همکاران، ۱۳۹۸). در برخی از تحقیقات بهینه‌سازی ضرایب معادله سنج رسوب نشان داده شده که مدل الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به منحنی سنج رسوب دارد (نا صری و همکاران، ۱۳۹۸). بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مدل‌سازی فرسایش خاک و اولویت‌بندی تولید رسوب حوضه با استفاده از مدل‌های SWAT و MUSLE، مناطق بحرانی با مقادیر تولید رسوب زیاد و خیلی زیاد در بالادست حوضه قرار دارند (کرمی و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیقی دیگر جهت بررسی تغییرات زمانی و مکانی منحنی سنج رسوب در رودخانه با استفاده از مدل‌های شبه دو بعدی نشان داده شد که استفاده از شرایط آزمایشگاهی و مقایسه آن با داده‌های محاسباتی می‌تواند به حل معادلات شبیه‌سازی و برآورد دقیق‌تر رسوب کمک نماید (ظهیری و همکاران، ۱۳۹۷).

به دلیل وجود مشکلات موجود در مدل‌های فیزیکی، شبه دو بعدی و سه بعدی، به ویژه اخذ نتایج متفاوت به دلیل تاثیر پارامترهای مختلف در ظرفیت انتقال جریان و رسوب، در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی جهت بررسی ظرفیت انتقال رسوب رودخانه‌ها در ایران و خارج از کشور بسیار مورد توجه قرار گرفته است، که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: صالحی و همکاران (۱۳۹۷) به مدل‌سازی عددی امواج ناشی از شکست سد سنگی - ملاتی در زیر حوضه نوشان آذربایجان غربی با استفاده از مدل Fluent و روش VOF پرداختند. نتایج مقایسه شرایط آزمایشگاهی و مدل Fluent نشان داد که مدل Fluent از دقت بالایی در مدل‌سازی جریان سه بعدی ناشی از شکست سد برخوردار است. کلامی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی روابط هندسی-هیدرولیکی مقطع رودخانه‌ها با استفاده از حل معکوس معادلات سنت-ونانت، پرداختند. نتایج نشان داد روش‌های روندیابی هیدرولیکی-هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی سیل رودخانه از دقت بالایی برخوردار هستند. کین و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) در بررسی مدل‌های پیش‌بینی میزان رسوب در کانال بیان نمودند که پارامترهای کمی بستر جریان جهت پیش‌بینی فرم پایدار کانال و تولید رسوب در مدل‌های دو سه بعدی به شکل هم‌زمان مناسب و لازم می‌باشند. اودا (۲۰۱۹) در مدل‌سازی و بررسی چند فازی انتقال رسوب و فرسایش بستر و تغییرات مورفودینامیک ساحلی رودخانه با استفاده از مدل‌سازی عددی نشان داد که مدل عددی چند فازی عملکرد مطلوبی را در شبیه‌سازی انتقال رسوب و فرسایش ارائه می‌دهد و می‌تواند با استفاده از این مدل محدودیت‌های داده‌های تجربی را برطرف نمود. لای و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) در بررسی ظرفیت انتقال جریان و رسوب با مدل سه بعدی برای کانال‌های روباز سطح آزاد با استفاده از معادلات حاکم بر جریان و رسوب معلق، نشان دادند که مدل تطابق خوبی با داده‌های تجربی ارائه داده است. ایکبال و همکاران (۲۰۱۹) در شبیه‌سازی شستشوی رسوب مخزن سد با استفاده از مدل D2، نوع متوسط گودونف، مدل فیزیکی و یک فلوم آزمایشگاهی نشان دادند که فرسایش جانبی و تغییرات بستر بر اساس مقدار دبی و ویژگی‌های مورفولوژیکی کانال متغیر و با نتایج آزمایشگاهی نیز مطابقت خوبی دارد.

بررسی و مرور منابع نشان می‌دهد که تفکیک و تحلیل ریاضی ظرفیت انتقال رسوب معلق و باریستر به دلیل کاربرد دقیق و مطابق با واقعیت، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این تحقیق از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم مدل فلونت جهت تفکیک بار بستر و معلق، از اعداد تنش رینولدز به منظور تعیین آستانه حرکت و جهت تحلیل الگوی حرکتی و ته‌نشینی ذرات رسوبی در تیوب‌های مختلف جریان در کانال شبیه‌سازی آزمایشگاهی، از نرم‌افزارهای فلونت و آکوباس

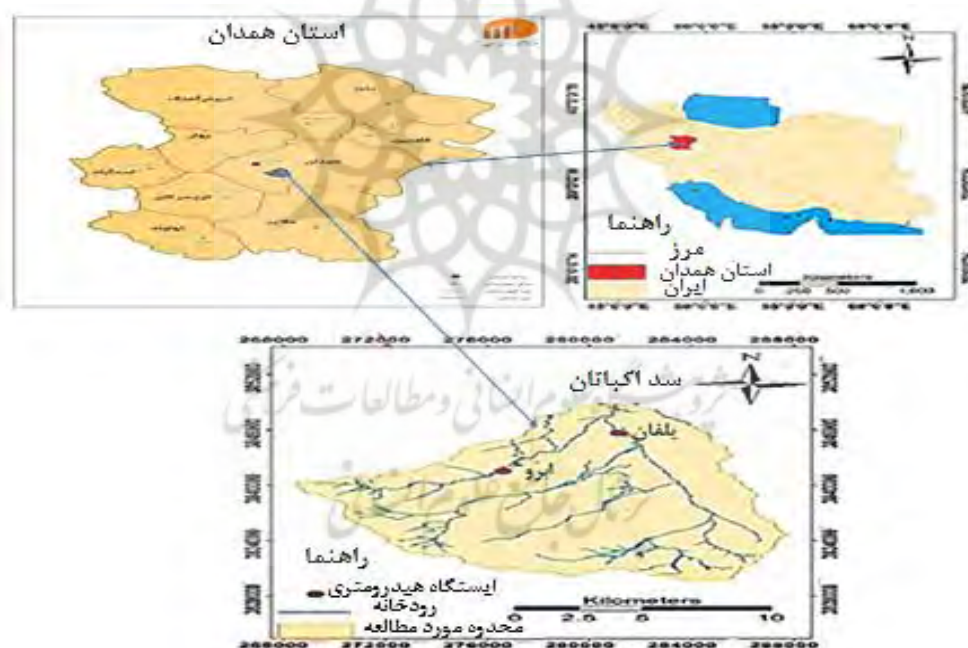
1. Keane et al

2. Lai et al

استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که علیرغم کاهش دبی جریان ورودی تحت تاثیر خشکسالی‌ها و کاهش شدید بارش و انجام عملیات گسترده حفاظت خاک و آبخیزداری در سال‌های اخیر، میزان و نرخ انتقال ذرات رسوبی به مخزن سد اکباتان افزایش یافته است. با توجه به این که یکی از موضوعات اساسی مطرح در مهندسی رسوب مربوط به طبقه‌بندی انواع رسوبات چسبنده و غیر چسبنده، تعیین تنش آستانه حرکت و پارامترهای موثر در ته‌نشینی رسوبات است، لذا در این پژوهش ابتدا ذرات رسوبی بر اساس مصالح پایه تشکیل دهنده رسوبات طبقه‌بندی و در ادامه نحوه حرکت و ته‌نشینی ذرات رسوبی رودخانه یلفان در مخزن سد اکباتان همدان شبیه‌سازی و ارزیابی شده است.

### معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد اکباتان در جنوب شرقی شهرستان همدان بین  $33^{\circ} 34'$  و  $34^{\circ} 45'$  عرض شمالی و  $48^{\circ} 28'$  و  $48^{\circ} 42'$  طول شرقی واقع شده و از زیر حوضه‌های رودخانه قره چای همدان می‌باشد (شکل ۱). دبی متوسط رودخانه سد اکباتان  $5/2$  متر مکعب در ثانیه در سال و متوسط بارندگی سالیانه حوضه  $312/9$  میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه آن  $11/3$  درجه سانتی‌گراد و دارای اقلیم نیمه مرطوب سرد کوهستانی است. از نظر سنگ‌شناسی دارای سنگ‌های نفوذی و دگرگونی از نوع گرانیت، شیست، هورنفلس و به شکل محدود دارای تشکیلات آهکی می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت حوضه آبخیز سد اکباتان همدان

### روش تحقیق

در این تحقیق از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم مدل عددی فلوئنت و جهت بررسی دقیق از حالات مختلف در اعداد رینولدز به منظور ایجاد اغتشاش مصنوعی از کانال شیشه‌ای آزمایشگاهی استفاده شده است. در این بررسی پس از ارزیابی اعداد مختلف رینولدز در آخرین حالت از  $Re=100$  برای حل جریان گذرا با پله زمانی (time step) برابر  $0/2$  و برای کوپلینگ معادلات سرعت - فشار از الگوریتم (SIMPLEC) استفاده شده است. با استفاده از این روش ضریب (under-relaxation) فشار به صورت خودکار برابر فرض و در هنگام استفاده از پیش فرض (SIMPLE) این پارامتر برابر  $0/3$  در نظر گرفته شد. با توجه به حرکت مولکول‌های آب و وجود نیروی کشش سطحی که باعث گردش سیال در هر جهتی می‌شود و اثر این نیرو به ذرات رسوبی که موجب حرکات آنها در هر جهتی می‌گردد و با عنایت به اینکه مدل باید تمامی

این حرکت‌ها را بررسی نماید و انجام این محاسبات به کمک Cfd انجام می‌شود، لذا مدل برای هر خروجی و هر پارامتر حجم بسیار بالایی از داده‌ها را ارائه می‌دهد که کامپیوترهای معمولی قادر به بررسی تمامی این خروجی‌های نیست، بنابراین به منظور تدقیق نتایج و دستیابی به خروجی منسجم‌تر، متمرکز و قابل استناد در این تحقیق ضریب (under-relaxation) مومنتم از ۰/۷ به ۰/۹ تغییر داده شد تا همگرایی مناسب‌تری حاصل شود. برای از بین بردن تقارن جریان و تحریک شروع جریان گردابه ای یک اغتشاش مصنوعی به مدل اضافه شد، تا شرایط طبیعی موجود در رودخانه در کانال شیشه‌ای نیز ایجاد شود. از طرف دیگر باعث شود تا جریان اغتشاشی با اعمال یک سرعت یکنواخت در جهت محور  $x$  برابر  $0.5 \text{ m/s}$  در نیمه بالای میدان سیال و همچنین سرعت صفر متر بر ثانیه در کف جریان ایجاد تا شرایط مرزی استفاده شده دقیقاً بر اساس شرایط محیط طبیعی رودخانه یلفان سد اکباتان در نظر گرفته شود. در این بررسی با استفاده از مدل عددی فلونت و اعداد مختلف رینولدز خطوط جریان و پروفیل فشار در اطراف ذرات رسوبی، فشار منفی پشت ذره رسوبی محاسبه و میزان جابجایی ذرات رسوبی در سائزهای مختلف (قطر ذرات رسوبی سیلت و شن ریز) ارزیابی، طبقه‌بندی و شبیه‌سازی شد، تا بتوان الگو و سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبی را با استفاده از معادله انتقال رسوب بررسی نمود. سپس نتایج حاصله با میزان جابجایی ذرات رسوبی در کانال شیشه‌ای مطابقت داده شد، تا میزان دقت و کارایی مدل مورد واسنجی قرار گیرد. با توجه به اینکه میکروگردابه‌ها در رودخانه‌ها با اعداد رینولدز مشخص تشکیل می‌شوند و در اعداد رینولدز پایین جریان آب آرام، پایدار و حرکت یکنواخت می‌باشد و تشکیل میکروگردابه‌ها بسیار کم و در اعداد رینولدز بالا نیز به دلیل ایجاد جریان اغتشاشی امکان ایجاد هیچ نوع میکروگردابه‌ای وجود ندارد، بلکه در این جریان‌ها، گردابه‌ها فقط در مواقع خاصی از سال و به تعداد کم شکل می‌گیرند. در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار نگرفته‌اند و بیشتر ارزیابی‌ها بر روی مکانیسم جریان میکروگردابه‌ها و نقش آن‌ها در حمل رسوب که در اغلب اوقات سال رخ می‌دهد، پرداخته شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میکروگردابه‌ها عامل اصلی حمل رسوب موجود در جریان و انتقال رسوب به طرفین و مرکز رودخانه می‌باشد. به دلیل اینکه نتایج بررسی‌های مکرر مراحل آزمایشگاهی و متعدد مدل نشان می‌دهد که در عدد رینولدز ۱۰۰ بیشترین تعداد میکروگردابه تشکیل و با توجه به سرعت موجود در رودخانه یلفان شکل می‌گیرند و می‌تواند مقدار حمل رسوب اندازه گیری شده در آزمایشگاه را مشخص نماید، لذا سعی شده تمام شرایط آزمایشگاهی مطابق با شرایط منطقه مورد مطالعه باشد. بنابراین پس از بررسی‌ها و ارزیابی نتایج خروجی مدل مشخص شد که در عدد رینولدز ۱۰۰، گردابه‌های بزرگ مقیاس نسبت به گردابه‌های کوچک مقیاس تأثیر بیشتری بر حرکت جریان دارند، و اما گردابه‌های کوچک مقیاس در جابجایی ذرات رسوبی تأثیر بیشتری دارند. بنابراین در این بررسی از عدد رینولدز ۱۰۰ به دلیل تطابق و همخوانی خوب با رودخانه یلفان استفاده شد. در این تحقیق به لحاظ حساس بودن شبیه‌سازی الگوریتم الگوی حرکت ذرات رسوبی رودخانه سد اکباتان از روش (DSN) که در آن معادلات فیلتر نشده و تمامی مقیاس‌های زمانی و مکانی با هر طیفی لحاظ می‌شوند، استفاده و در نهایت نتایج حاصل از جابجایی ذرات رسوبی در تمامی مراحل کار با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی در کانال شیشه‌ای مطابقت و میزان دقت و کارایی مدل توسط معیارهای ارزیابی (ARE) و (RRMS) مورد بررسی قرار گرفته است.

### معرفی مدل فلونت<sup>۱</sup>

نرم‌افزار فلونت از ۳ قسمت اصلی تشکیل شده است: الف) fluent/standard که یک حلگر چند منظوره مبتنی بر انتگرال گیری غیرصریح می‌باشد و از آن در جهت حل مسال استاتیکی جریان استفاده می‌شود ب) fluent/Explicit این حلگر وظیفه حل معادلات غیرخطی با بر همکنش‌های پیچیده را بر عهده دارد. ج) fluent/CFD این حلگر می‌تواند

تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیشرفته (مثل شبیه‌سازی جریان‌های آب و رسوب) را انجام دهد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، و حل معادلات ناویر-استوکس برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در حالت دو بعدی و پارامترهای فیزیکی و عددی مؤثر بر این پدیده پرداخته شده است (فلوئنت<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶).

### طبقه‌بندی مدل‌های جریان و انتقال رسوب

در اکثر ارزیابی‌ها، مدل‌های بار کل در بررسی رسوب رودخانه‌ای ارجحیت بیشتری دارند. در این بررسی از مدل‌های بار کل استفاده شده که معادله کلی آن به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (u_x c)}{\partial x} + \frac{\partial (u_y c)}{\partial y} + \frac{\partial (u_z c)}{\partial z} - \frac{\partial (w_s c)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

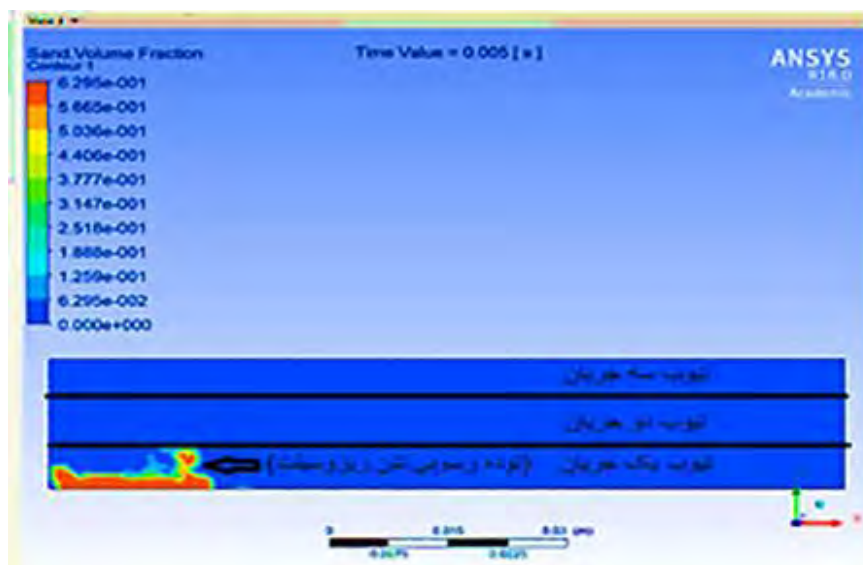
رابطه (۱) خلاصه‌ای از مشتق‌گیری‌های متوالی سرعت نسبت به زمان در جهات مختلف X و Y و Z است  $u_x c$  و  $u_y c$  و  $u_z c$  به ترتیب سرعت جریان آب در جهت محورهای X و Y و Z و  $w_s c$  سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبی است. در معادله فوق سرعت ته‌نشینی ( $w_s$ ) فقط تحت تأثیر نیروهای دراگ و وزن مستغرق در آب راگد در نظر گرفته می‌شود، حال آنکه براساس نتایج بدست آمده در آزمایشگاه و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، ذرات رسوبی تحت تأثیر عوامل موثر و موجود دیگری در جریان سیال آب حرکت می‌کنند که مهم‌ترین آن‌ها نیروی سافمن یا نیروهای بالا برنده سافمن (سافمن<sup>۲</sup>)، است. این نیرو در نزدیکی کف جایی که گرادیان سرعت بالاست اهمیت زیادی داشته و ممکن است باعث کاهش سرعت سقوط ذرات رسوبی گردد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده باید معادله فوق اصلاح و نیروی سافمن در آن لحاظ گردد. که در این بررسی ضمن اصلاح معادله سرعت ته‌نشینی، نیروی سافمن ارزیابی و نقش آن در سرعت ته‌نشینی و طبقه‌بندی ذرات رسوبی جریان بررسی شده است.

### الگوی شبیه‌سازی حرکت ذرات رسوبی شن و سیلت

بر اساس قطر ذرات رسوبی و سرعت جریان متوسط رودخانه یلفان سد اکباتان، ابتدا کانال آزمایشگاهی به فواصل عمودی 0.1m، 0.2m، 0.3m تقسیم‌بندی و نحوه حرکت ذرات رسوبی در این فواصل نسبت به عمق جریان شبیه‌سازی شد. به منظور تحلیل دقیق‌تر میزان و نحوه حرکت ذرات رسوبی در تیوب‌های مختلف جریان از نتایج کانال شیشه‌ای، توسط نرم افزار اکوباس خروجی به شکل انیمیشنی استخراج گردید. جهت رسیدن به این هدف ابتدا هندسه دو بعدی کانال در محیط گمبیت مدل فلوئنت (پیش پردازنده) ترسیم و سپس به حلگر فلوئنت به شکل زیر ارائه شد. شکل (۲).

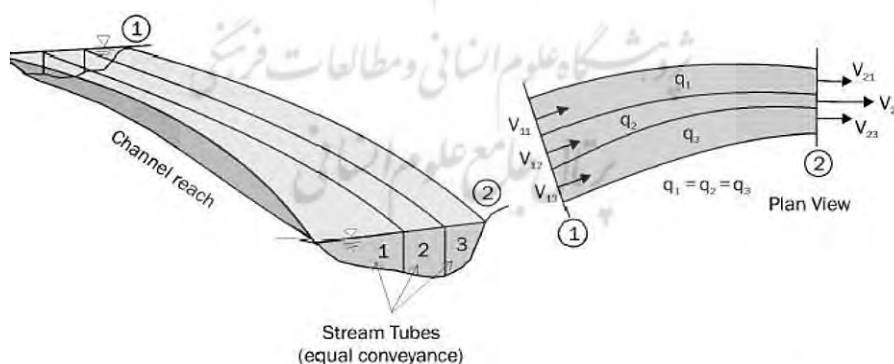
<sup>1</sup>. Fluent

<sup>2</sup>. Saffman



شکل ۲: ارتفاع ۳۰ سانتی متری آب در کانال آزمایشگاهی که به سه ارتفاع ۱۰ سانتی متری از کف کانال تا سطح تقسیم شده است هر ۱۰ سانتی متر یک تیوب جریان می‌باشد.

به منظور ارزیابی نحوه و آستانه حرکت ذرات رسوبی شن ریز و سیلت که اغلب بار رسوبی رودخانه یلفان را تشکیل می‌دهند، ابتدا با استفاده از پردازشگر فلونت نحوه حرکت ذرات رسوبی بررسی و با استفاده از انیمیشن شبیه‌سازی پردازشگر فلونت زمان شروع حرکت ذرات از ۰/۰۰۵ ثانیه تا زمان اتمام حرکت یعنی ثانیه ۱ در سه تیوب جریان بررسی شد. شکل (۳). بنابراین ابتدا جهت شبیه‌سازی نحوه حمل بار رسوبی شن ریز و سیلت در کانال آزمایشگاهی توسط نیروی بالا برنده ساکن در تیوب‌های جریان، خطوط هم فشار بررسی و با ایجاد جریان و سرعت ثابت در تیوب‌های جریان حرکت بار معلق ارزیابی شد.



ب - نمای سه بعدی

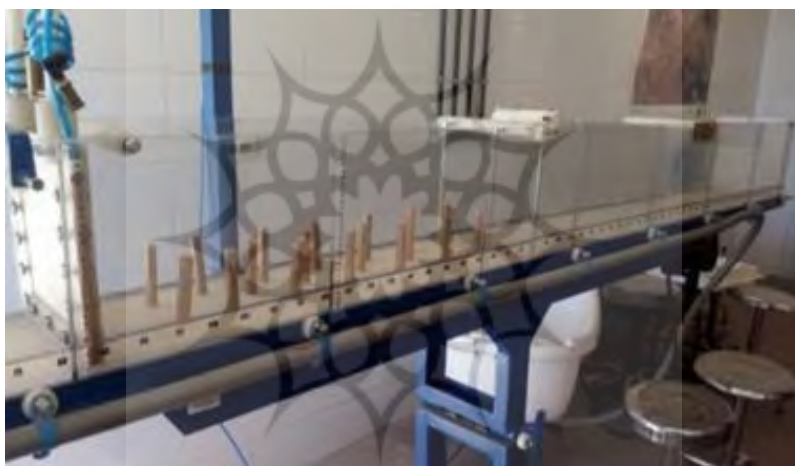
الف - پلان

شکل ۳: نمای شماتیک از مفهوم لوله‌های جریان مورد استفاده در مدل fluent

(الف) پلان (ب) نمای سه بعدی (مولیناس و همکاران، ۱۹۸۶)

جهت شبیه‌سازی الگوی حرکت و ته نشینی ذرات رسوبی در مقطع مورد مطالعه از کانال آزمایشگاهی با طول ۴ متر و ارتفاع ۰/۳ متر و سرعت متوسط ۰/۵ متر بر ثانیه استفاده شد (شکل ۴). ابتدا جهت بررسی دقیق‌تر از دوربین ضبط تصاویر با فریم بالا استفاده و سپس فواصل کانال جهت بررسی تیوب‌های جریان به فواصل ۱۰ سانتی متر در جهت عمودی مدرج گردید. توضیح اینکه فواصل افقی کانال نیز به صورت میلی متری جهت بررسی دقیق‌تر، مدرج و سپس ذرات شن ریز و سیلت در

کانال شیشه‌ای آزمایشگاهی در مسیر جریانی با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه همانند جریانی که در منطقه مورد مطالعه می‌باشد در کانال شیشه‌ای قرار داده شد. در این بررسی ذرات رسوبی در ابتدای کانال در مسیر جریان قرار داده شد و همزمان با حرکت جریان با استفاده از دوربین متصل به کانال و انیمیشن خروجی نرم‌افزار آکوباس میزان جابجایی ذرات رسوبی تا انتهای کانال محاسبه شد. جهت بررسی میزان جابجایی ذرات رسوبی در سه تیوب جریان با بازنگری چند بار از فیلم ضبط شده توسط دوربین متصل به کانال، بیشترین جابجایی در تیوب‌های جریان بررسی شد. جهت دقیق‌سازی ذرات رسوبی با رنگ‌های مختلف رنگ‌بندی شده تا در بازنگری تصویر بتوان با دقت بالا ذرات را شناسایی و رهگیری کرد. نتایج بدست آمده در این مرحله یادداشت و دقیقاً همین شرایط در مدل فلونتت با همان شرایط مرزی شبیه‌سازی شد. سپس نتایج آزمایشگاهی با خروجی مدل مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. بعد از اطمینان از عملکرد بالای مدل اقدام به شبیه‌سازی حرکت رسوب با همان شرایط موجود در رودخانه گردید و عیناً مسیر و شکل رودخانه با همان جریان در نرم‌افزار ترسیم و شبیه‌سازی شد. سپس میزان حرکت ذرات رسوبی اندازه‌گیری و داده‌های شبیه‌سازی شده مدل فلونتت با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مطابقت و میزان درصد خطا اندازه‌گیری شد.



شکل ۴: کانال آزمایشگاهی جهت شبیه‌سازی

در نهایت الگوی ریاضی مناسب میزان جابجایی ذرات مختلف رسوبی بر اساس قطر ذرات و نحوه قرارگیری در مسیر جریان و مسافت طی شده در فلوم آزمایشگاهی مشخص و تعیین گردید. در این رابطه از اعداد مختلف رینولدز در رژیم لایه جریان استفاده و آستانه حرکت ذرات رسوبی استخراج گردید. با توجه به عدد نهایی آستانه حرکت ذرات رسوبی شن و سیلت، میزان جابجایی ذرات رسوبی در رژیم لایه‌ای جریان بررسی و بیشترین ذرات و حجم رسوب‌گذاری مشخص گردید. با توجه به روابط و ارزیابی سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبی در فلوم آزمایشگاهی (محاسباتی و خروجی مدل فلونتت) معادله محاسباتی سرعت ته‌نشینی اصلاح و دقت مدل فلونتت در تحلیل حرکت رسوبات سیلت و شن ریز بر اساس قطر، مسافت طی شده و زمان ارزیابی شد.

#### معیارهای ارزیابی مدل‌ها

جهت کالیبراسیون و واسنجی بخش هیدرودینامیک جریان، از اطلاعات پروفیل سطح آب ایستگاه یلفان در سال ۱۳۹۷ و سپس به منظور تأیید صحت نتایج از معیارهای<sup>۱</sup> (ARE) و<sup>۲</sup> (RRMS) روابط (۳ و ۲) استفاده شده است که عبارتند از:

<sup>۱</sup> Relative Error Absolute

<sup>۲</sup> Root Relative Mean Square Error



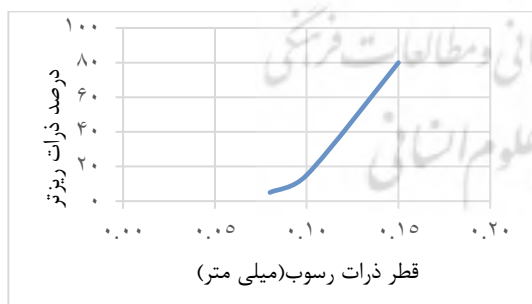
$$\text{RRMS} = \left[ \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - q_i)} \right]^{0.5} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{ARE} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i} \quad \text{رابطه (۳)}$$

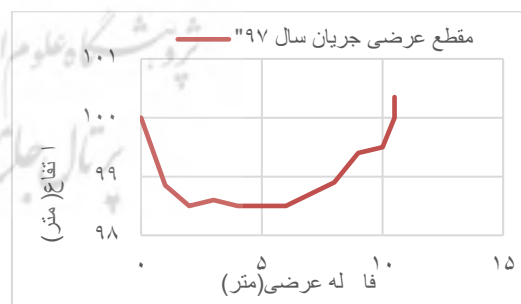
در این رابطه n: تعداد حالات متغییر ویسکوزیته جریان و  $p_i$ : سرعت جریان محاسبه شده توسط فلوننت و  $q_i$ : سرعت جریان مشاهد شده در کانال آزمایشگاهی می‌باشد.

### داده‌های مورد نیاز

در این بررسی از داده‌های مربوط به سرعت در طول دوره آبی ۱۰ ساله (۱۳۸۷-۱۳۹۷) شامل سرعت میانگین آب ۰/۹ متر بر ثانیه، سرعت ماکزیمم ۱/۲۲ و سرعت مینیمم آن ۰/۰۶۴ متر بر ثانیه مربوط به ایستگاه های بالادست (یلفان و ابرو)، استفاده شد. براساس برررسی های بعمل آمده متوسط دبی حداقل با فراوانی بیشتر مربوط به سرعت ۰/۵ متر در ثانیه بود که جهت بررسی دقیق نقش این مقدار در جابجایی و حرکت ذرات رسوبی شن ریز و سیلت در مدل استفاده شد. جهت تحلیل رسوب و شبیه‌سازی از دمای آب نیز به طور میانگین ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد در مدل معرفی استفاده گردید. همچنین با بررسی مقاطع عرضی موجود در سازمان آب منطقه همدان، مقطع عرضی با بیشترین همخوانی در طول پروفیل طولی رودخانه به طول ۱۲ کیلومتر جهت ارائه به مدل انتخاب شد (شکل ۵). بر اساس بررسی قطر دانه بندی ذرات رسوبی در رودخانه یلفان سد اکباتان و با توجه به اینکه اطلاعات منحنی دانه‌بندی مصالح بستر نقش مهمی در شبیه‌سازی جریان و رسوب دارد، منحنی‌های دانه‌بندی طی ۱۰ سال گذشته تجزیه و تحلیل و در نهایت از متوسط آن‌ها در مدل استفاده شد. بررسی این منحنی‌ها و آمار معرفی شده به مدل بیانگر قرار گرفتن ذرات رسوبی در گروه ذرات شن ریز و سیلت بود. در شکل زیر منحنی متوسط دانه‌بندی جهت معرفی به مدل آورده شده است (شکل ۶).



شکل ۶: منحنی متوسط دانه‌بندی رودخانه یلفان

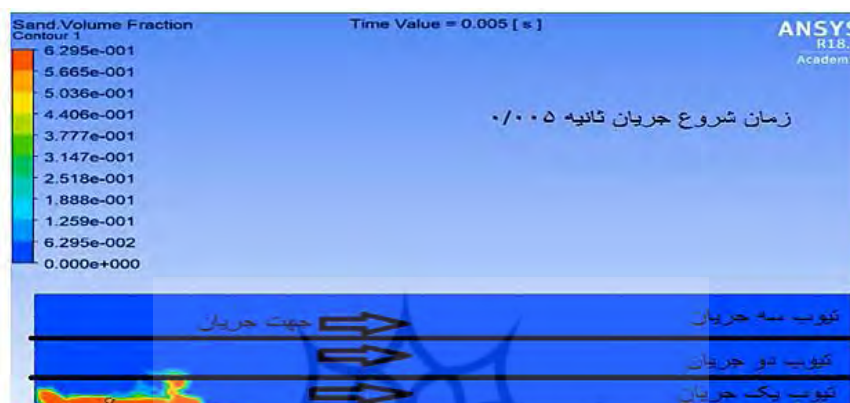


شکل ۵: مقطع عرضی جریان رودخانه یلفان

### بحث و یافته‌ها

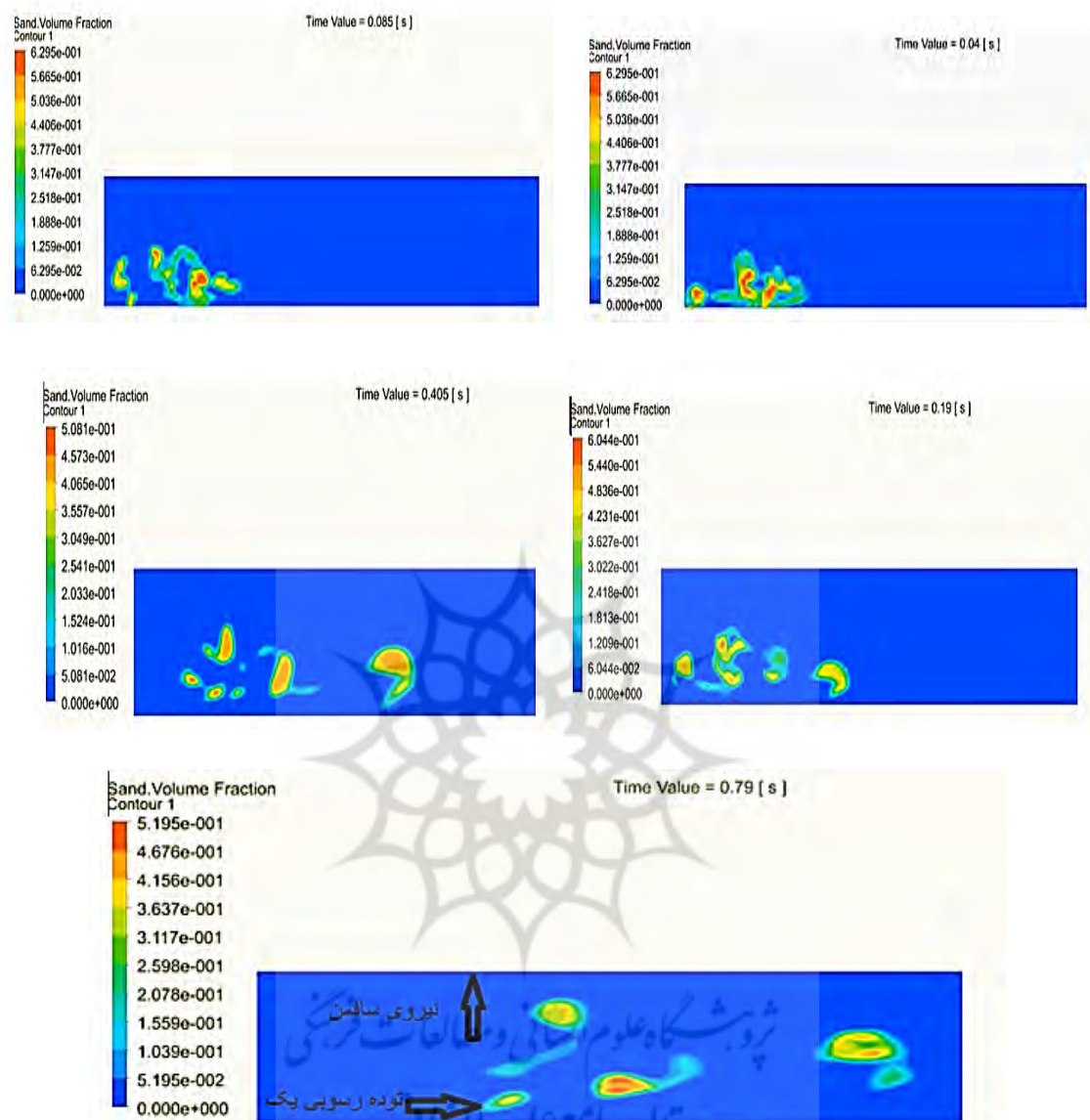
با توجه به اینکه که حرکت ذرات رسوبی در تیوب‌های مختلف جریان به دلیل ریز بودن و همچنین سرعت بالای جریان در طیف قابل مشاهده نیستند، به همین منظور از انیمیشن شبیه‌سازی شده در زمان‌های مختلف جریان با دوربین با فریم و سرعت بالا متصل به کانال شیشه‌ای استفاده و تصویربرداری شد. بررسی تصاویر نشان داد که حرکت ذرات رسوبی در هر سه تیوب جریان در کانال آزمایشگاهی رخ داده است، اما در تیوب ۱ و ۲ جریان بیشتر از تیوب ۳ و ذرات سیلت فقط در تیوب ۳ حرکت می‌کند، که به دلیل کوچک بودن ذرات سیلت و همچنین عملکرد نیروی بالا برنده سافمن این ذرات در تیوب ۳ جریان بیشترین تراکم را دارند. بررسی نیروی بالا برنده سافمن در کانال آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این نیرو

در ابتدای جریان، ذرات سیلت را در تیوب ۳ جریان و در انتهای کانال در تیوب ۲ جریان حفظ نموده و تداوم داده است. در حالی که در تیوب ۱ جریان ذرات بزرگتر شن ریز تحت تاثیر نیروی بالابرنده سافمن قرار گرفته و علی رغم عملکرد نیروی ثقل باز هم مقداری از ذرات شن ریز در تیوب ۲ جریان در کانال آزمایشگاهی حرکت می‌کند. شکل (۷) نحوه عملکرد نیروی سافمن بر ذرات رسوبی را در تیوب های ۱، ۲ و ۳ را در اشکال مختلف نشان می‌دهد و ملاحظه می‌شود که علی‌رغم جریان با سرعت بسیار کم ذرات شن ریز و سیلت در تیوب‌های ۱ و ۲ با مقدار بیشتر در حال حرکت و جابجایی هستند.



شکل ۷: نحوه حرکت ذرات رسوبی در تیوب‌های ۱، ۲ و ۳ جریان

بررسی و شبیه‌سازی الگوی حرکت ذرات رسوبی در کانال شیشه‌ای تحت تاثیر نیروی سافمن در ثانیه‌های (۰/۰۴) الی (۰/۷۹) توسط پردازشگر فلونت نیز نشان می‌دهد که قسمت اعظم بار رسوبی در کانال آزمایشگاهی تحت تاثیر نیروی بالا برنده سافمن قرار گرفته و موجب حمل بار رسوبی بیشتر در تیوب‌های جریان ۲ و ۳ می‌شود (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد که این نیرو در فضای نزدیک به کف جریان یعنی مابین تیوب‌های ۱ و ۲ جایی که هنوز گرادیان سرعت جریان وجود دارد، با همکاری نیروی کشش سطحی آب از سقوط ذرات رسوبی به سمت کف جریان جلوگیری کرده و همین امر باعث می‌شود که ذرات رسوبی مسافت بیشتری را طی و موجب تجمع ذرات رسوبی به دیوارهای سدهای مخزنی شود. این در حالی است که جریان در مسافت دور تری از مخزن سد متوقف شده و قاعدتا ذرات رسوبی باید با توقف جریان، شروع به سقوط کردن نمایند، ولی عملاً این پدیده اتفاق نمی‌افتد و ذرات توسط نیروی سافمن به سمت بالا یعنی تیوب ۲ و ۳ جریان جایگزین هنوز گرادیان جریان به میزان خیلی کم وجود دارد هدایت شده و در نتیجه مسافت بیشتری را در نبود جریان اصلی طی کنند. این امر نشانگر آنست که عملکرد این نیرو در تیوب‌های مختلف جریان بسیار مهم و نقش ویژه‌ای در حمل بار رسوبی در رودخانه یلفان سد اکباتان دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بار رسوبی شن ریز و سیلت حاصل از فرسایش فیزیکی شیمیایی گرانیته‌ها و شیب‌های منطقه، مسافت بسیار بیشتری را در تیوب‌های مختلف جریان طی می‌کنند و مشاهده می‌شود که توده بار رسوبی فقط در تیوب یک جریان که در شکل (۸) مشخص شده، تحت تاثیر نیروی سافمن قرار نگرفته است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که تیوب یک جریان سهم بسیار کمی از بار رسوبی در کانال آزمایشگاهی را تشکیل داده و تحت تاثیر نیروی بالا برنده سافمن قرار نگرفته و مشاهده می‌شود که بیشترین میزان حمل و نقل ذرات رسوبی در تیوب‌های ۲ و ۳ رخ داده که این امر در شکل (۸) کاملاً واضح می‌باشد.



شکل ۸: شبیه‌سازی تصویری حرکت ذرات رسوبی در کانال تحت تاثیر نیروی سافمن در ثانیه‌های (۰/۰۴ الی ۰/۷۹) توسط پردازشگر فلونت

بنابراین چنین استنباط می‌شود که یکی از دلایل افزایش میزان رسوب ورودی به مخزن سد اکباتان با وجود کاهش جریان ورودی (نظیر خشکسالی‌ها و کاهش بارش)، افزایش نرخ جابجایی و انتقال ذرات رسوبی شن ریز و سیلت تحت تاثیر نیروی سافمن در تیوب های ۲ و ۳ جریان است. که برخلاف این تصور که قسمت اعظم بار رسوبی رودخانه یلفان شامل ذرات درشت دانه و قطر رسوبی بیشتر از ذرات شن و سیلت است و موجب انباشت رسوب در بستر و به ویژه مخزن سد اکباتان شده، درست نبوده و سهم عمده حجم مخزن سد توسط رسوبات شن ریز و سیلت پر شده است. نتایج نشان می‌دهد که رودخانه یلفان سد اکباتان در طول سال با حداقل دبی و حتی در دوره های خشکسالی با وجود بارش های محدود، با کمترین سرعت جریان تحت تاثیر نیروی سافمن موجب حرکت ذرات رسوبی شن ریز و سیلت به شکل بار معلق رسوبی شده و حجم عمده انباشت رسوبات در مخزن سد را تشکیل می‌دهد. برررسی دانه‌بندی ذرات رسوبی مخزن سد نیز نشان داد که حجم عمده مخزن سد از این نوع رسوبات انباشته شده است (شکل ۹).



شکل ۹: انباشت رسوبات شن ریز و سیلت در سد اکباتان

بررسی نتایج ته‌نشینی ذرات رسوبی در فواصل مختلف کانال آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ذرات رسوبی با قطرهای ۰/۱ الی ۰/۴ میلی‌متر با جریان ۰/۵ متر بر ثانیه در بستر کانال شروع به حرکت و ته‌نشینی می‌کنند. در حالیکه ذرات ریزتر از ۰/۱ میلی‌متر در انتهای کانال ته‌نشین شده و ذرات بزرگتر از ۰/۴ میلی‌متر تقریباً با طی مسافت ۰/۱ متر در کانال شروع به ته‌نشین شدن نموده‌اند ( شکل ۱۰ ).



شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی ته‌نشینی ذرات رسوبی در فواصل مختلف کانال آزمایشگاهی (رنگ آبی مشخص‌کننده ذرات رسوبی با قطرهای ۰/۱ الی ۰/۴ میلی‌متر هستند)

نتایج شبیه‌سازی بیانگر این است که با کاهش میزان سرعت دبی عبوری، میزان رسوبگذاری (قسمت آبی رنگ) بیشتر شده است. بعلاوه بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌توان نقطه شروع رسوبگذاری در رودخانه یلفان را مشخص نمود. به طوری که با توجه به شکل (۱۰) می‌توان دریافت که با گذشت ۰/۲ متر از شروع جریان در کانال فرایند رسوبگذاری آغاز و انباشت رسوبات با ادامه جریان به سمت پایین دست افزایش می‌یابد.

### بررسی نتایج آزمایشگاهی

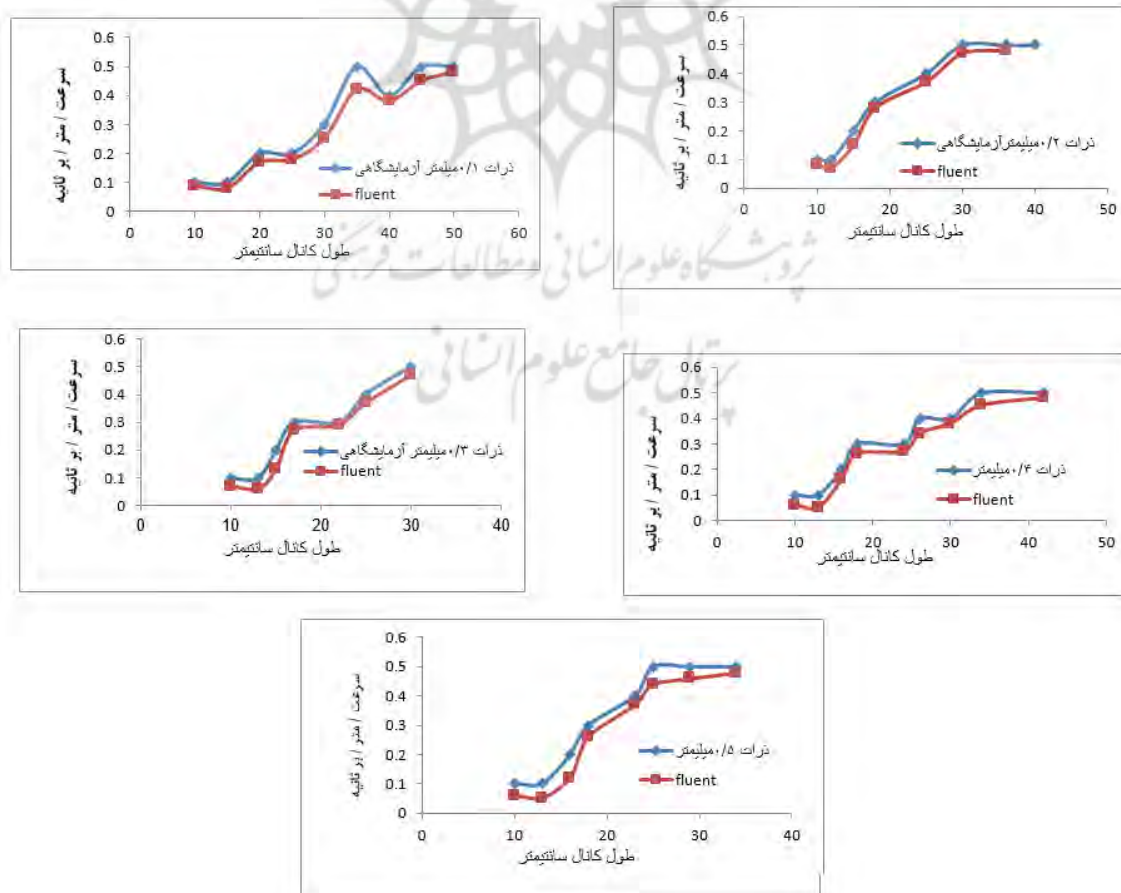
بررسی‌ها نشان می‌دهد که به دلیل وجود خطوط هم فشار و ایجاد جریان و سرعت ثابت در تیوب دوم جریان، بار رسوبی معلق بیشتر حمل شده است (شکل ۱۱). و همین امر باعث حمل و انتقال بیشترین بار رسوبی به بصورت بار معلق در تیوب های مختلف جریان در رودخانه یلفان تا مخزن سداکباتان شده و نشان می‌دهد که حجم عمده مخزن سد طی این فرایند توسط رسوبات شن ریز و سیلت پر شده است. مراحل اندازه‌گیری مسافت طی شده ذرات رسوبی شن ریز و سیلت در کانال

آزمایشگاهی در سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه تحت شرایط حداقلی دبی رودخانه و شرایط کم آبی رودخانه یلفان در شکل (۱۱) قابل مشاهده است. جهت واسنجی مدل، در کانال آزمایشگاهی ذرات شن ریز و سیلت را در مسیر جریانی با سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه قرار داده شد و مسافت طی شده توسط دوربین متصل به کانال اندازه‌گیری شد و سپس نتایج با انیمیشن خروجی مدل مقایسه گردید.



شکل ۱۱: نحوه انتقال ذرات رسوبی شن ریز و سیلت در سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه

ارزیابی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نرم‌افزار فلوئنت با دقت بسیار بالا و قابل قبول الگوی حرکت و ته‌نشینی ذرات رسوبی شن ریز و سیلت را با دامنه‌ای از رنج‌های مختلف به خوبی شبیه‌سازی کرده است. بررسی شکل (۱۲) نشان می‌دهد که بیشترین جایجایی در قطر ذرات  $0.1$  الی  $0.3$  میلی‌متر رخ داده و بیشترین تطابق نیز در همین ذرات رسوبی است.



شکل ۱۲: نتایج واسنجی مدل فلوئنت و کانال آزمایشگاهی بر اساس قطر ذرات با سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه

بررسی میزان درصد خطای اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده بیانگر تطابق بالای مدل فلوتنت با داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد و نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی ذرات رسوبی با قطرهای مختلف از توانایی و دقت بسیار خوبی برخوردار است. همبستگی نتایج آزمایشگاهی و مدل فلوتنت بیش از ۹۷ درصد است که قابل قبول می‌باشد. بررسی جدول (۱) نشان می‌دهد که کمترین خطا مربوط به ذرات ۰/۳mm و بیشترین خطا مربوط به ذرات ۰/۵mm است. بنابراین تلفیق مدل فلوتنت و شرایط آزمایشگاهی می‌تواند ابزار بسیار مفید و دقیقی جهت محاسبه و تعیین نوع بار رسوبی و حتی تعیین مکان رسوبگذاری در بررسی حوضه‌های رودخانه‌ای باشد و این امر می‌تواند کمک شایانی در کنترل فرسایش و رسوب و انتخاب پروژه‌های حفاظت خاک و آبخیزداری نماید.

جدول ۱: درصد خطای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده مدل فلوتنت

نتایج مدل فلوتنت	نتایج آزمایشگاهی	قطر ذرات رسوبی
RMSE	RMSE	ذرات
۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۱
۰/۹۳	۰/۹	۰/۲
۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۳
۰/۹۲	۰/۹	۰/۴
۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۵

### الگوهای ریاضی حد آستانه جابجایی ذرات رسوبی

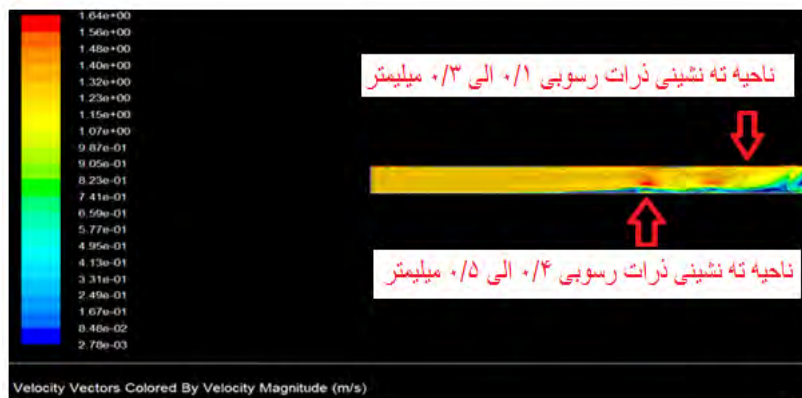
نتایج بررسی شکل و ابعاد ذرات رسوبی و میزان قرارگیری این ذرات در مسیر جریان نشان می‌دهد که رسوبات شن ریز و سیلت به مقدار زیاد و در مسافت قابل توجهی جابجا می‌شود. به طوری که شبیه‌سازی ذرات مختلف رسوبی در فلوام آزمایشگاهی با دقت بسیار خوب و قابل قبول بیانگر وجود یک الگوی ریاضی دقیق جهت محاسبه میزان جابجایی ذرات مختلف رسوبی در رودخانه یلفان است. بنابراین جهت دستیابی به این هدف ابتدا با در نظر گرفتن اعداد رینولدز و تعیین آستانه حرکت ذرات رسوبی در رژیم لایه جریان و تعیین عدد نهایی رینولدز و آستانه حرکت ذرات رسوبی شن و سیلت مشخص شد که نحوه شبیه‌سازی توده رسوبی در فلوام آزمایشگاهی و با عدد رینولدز آستانه حرکت ذرات شن و سیلت در کانال آزمایشگاهی قابل شبیه‌سازی در مدل است.

با توجه به روابط و ارزیابی سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبی در فلوام آزمایشگاهی (محاسباتی و خروجی مدل فلوتنت) معادله محاسباتی سرعت ته‌نشینی اصلاح و دقت مدل فلوتنت در تحلیل حرکت رسوبات سیلت و شن بر اساس قطر، مسافت طی شده و زمان براساس عدد رینولدز ارزیابی و به شکل زیر تصحیح و ارائه شد.

رابطه (۴)

$$RE = 999 * 0.05 * \frac{(20 * 10^{-3})}{9 * 10^{-4}} = 1100$$

نتایج حاصله از شبیه‌سازی الگوی حرکت و ته‌نشینی ذرات رسوبی در مدل فلوتنت نشان می‌دهد که ابتدا در ناحیه میانی ذرات رسوبی ۰/۱ تا ۰/۳ با مقدار کم و در قسمت میانی ذرات رسوبی با قطر ۰/۴ تا ۰/۵ میلی‌متر در حال ته‌نشینی هستند و بیانگر این است که ذرات رسوبی با قطرهای مورد بررسی مسافت طولانی را با سرعت کم جریان طی می‌کنند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: شبیه سازی حرکت و ته نشینی ذرات رسوبی در مدل فلوئنت

بنابراین بررسی‌ها نشان می‌دهد که ذرات شن با قطر ۰/۱ میلی‌متر در دبی ۰/۵ متر بر ثانیه مسافت ۰/۵۵ متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند و با توجه به رابطه فیزیکی طی مسافت در زمان  $x=vt$  می‌توان گفت که ذرات شن با قطر متوسط ۰/۱ میلی‌متر در مدت زمان ۹ ثانیه مسافت ۰/۵۵ متر را در فلوم آزمایشگاهی طی کرده که این مسافت طی شده بیانگر سرعت زیاد حرکت ذره رسوبی با این قطر است. در حالیکه ذرات شن با قطر ۰/۲ میلی‌متر در دبی ۰/۵ متر بر ثانیه مسافت ۰/۴۵ متر را در فلوم آزمایشگاهی طی و با توجه به رابطه فیزیکی طی مسافت در زمان  $x=vt$  می‌توان گفت ذرات شن با قطر متوسط ۰/۲ میلی‌متر در مدت زمان ۱۱ ثانیه مسافت ۰/۴۵ متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند. بعلاوه ذرات شن با قطر ۰/۳ میلی‌متر در دبی ۰/۵ متر بر ثانیه مسافت ۰/۳ میلی‌متر در دبی ۰/۵ متر بر ثانیه مسافت ۰/۳ میلی‌متر در مدت زمان ۱۱ ثانیه مسافت ۰/۴۵ متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند که با توجه به رابطه فیزیکی طی مسافت در زمان  $x=vt$  می‌توان گفت ذرات شن با قطر متوسط ۰/۳ میلی‌متر در مدت زمان ۱۷ ثانیه مسافت ۰/۳ میلی‌متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند. در حالیکه ذرات شن با قطر ۰/۴ میلی‌متر در دبی ۰/۵ متر بر ثانیه مسافت ۰/۴ میلی‌متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند و با توجه به رابطه فیزیکی طی مسافت در زمان  $x=vt$  می‌توان گفت ذرات شن با قطر متوسط ۰/۴ میلی‌متر در مدت زمان ۱۲ ثانیه مسافت ۰/۴ میلی‌متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند و در نهایت ذرات شن با قطر ۰/۵ میلی‌متر در دبی ۰/۵ متر بر ثانیه مسافت ۰/۴ میلی‌متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند که با توجه به رابطه فیزیکی طی مسافت در زمان  $x=vt$  می‌توان گفت ذرات شن با قطر متوسط ۰/۵ میلی‌متر در مدت زمان ۱۴ ثانیه مسافت ۰/۳۵ میلی‌متر را در فلوم آزمایشگاهی طی می‌کنند (جدول ۲). بررسی اعداد جدول (۲) نشان می‌دهد که سرعت جابجایی ذرات رسوبی با این قطرها با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه بسیار زیاد بوده و نشان‌دهنده جابجایی حجم عظیمی از این ذرات در مسیر رودخانه یلفان سد اکباتان است. نکته مهم و حائز اهمیت اینست که در رینولدز ۱۱۰۰ این ذرات در آستانه حرکت قرار می‌گیرند و برای ذرات کوچکتر مثل سیلت قطعا این مقدار عدد رینولدز کمتر خواهد بود و چنین استنباط می‌شود که میزان جابجایی ذرات با قطر ۰/۴ میلی‌متر تقریبا مشابه با ذرات کوچکتر از ۰/۴ میلی‌متر است و نشان می‌دهد که این امر به دلیل قرارگیری سطوح بیشتر ذرات رسوبی در مسیر جریان می‌باشد. بنابراین قطعا سرعت و مسافت جابجایی ذرات سیلت به مراتب بیشتر از ذرات شن ریز است و در نهایت با توجه به رابطه (۵) سرعت ته‌نشینی ذرات رسوبی در فلوم آزمایشگاهی محاسبه و در خروجی مدل به شکل زیر نشان داده شده است.

$$\omega_s = 1.72 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d}$$

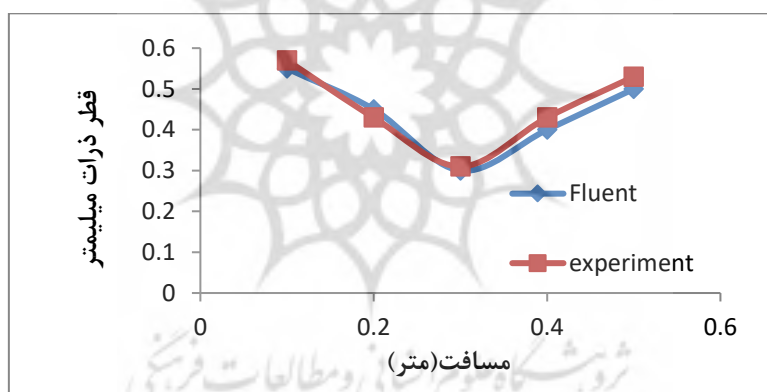
رابطه (۵)

در این رابطه  $\omega_s$  سرعت ته نشینی ذرات،  $\rho_s$  چگالی ذرات رسوبی  $\rho$  چگالی آب  $d$  مسافت طی شده ذرات می‌باشد (مسافت طی شده ذرات رسوبی در نیروی گرانش (۹/۸)

جدول ۲: نحوه، مدت و مسافت محاسباتی حرکت ذرات رسوبی در مدل فلونتت با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه

مسافت / متر	مدت زمان / ثانیه	قطر ذرات رسوبی / میلی‌متر
۰/۵۵	۹	۰/۱
۰/۴۵	۱۱	۰/۲
۰/۳	۱۷	۰/۳
۰/۴	۱۲	۰/۴
۰/۳۵	۱۴	۰/۵

نتایج مقایسه داده‌های سنجش شده در فلوم آزمایشگاهی با خروجی مدل فلونتت نشان می‌دهد که مدل با دقت بسیار بالا و قابل قبول پردازش و تحلیل رسوب معلق دانه ریزی مثل شن ریز و سیلت را به خوبی انجام داده است. با توجه به اینکه در اکثر بررسی‌ها به دلیل ریز دانه بودن این ذرات رسوبی، مطالعه بر روی آن مشکل و یا امکان پذیر نمی‌باشد، بنابراین می‌توان از مدل فلونتت در تحلیل رسوبات ریز دانه به ویژه در نحوه انباشت این رسوبات در مخازن سدها که محیط مناسبی جهت ترسیب آنها می‌باشد به خوبی استفاده نمود. نتایج مقدار همبستگی ۹۳ درصد در قطر ذرات رسوبی ۰/۳mm مدل با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده گویای این واقعیت می‌باشد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: نتایج مقایسه داده‌های سنجش در فلوم آزمایشگاهی با خروجی مدل فلونتت.

### نتیجه‌گیری

پدیده انتقال رسوب، حاصل یک جریان دوفازی جامد-مایع و اثرات متقابل بین آنهاست که حتی در شرایط عادی روش‌های تک فازی قادر به مدل‌سازی اثرات متقابل بین این دو فاز نبوده، و ثابت شده که مدل‌های دو فازی امکان تحلیل و مدل‌سازی کامل اثرات متقابل بین ذره و نوسانات آشفتگی را ندارند. بنابراین استفاده از مدل‌های چند فازی در تحلیل و شبیه‌سازی انتقال ذرات رسوبی و معلق به صورت یک فاز دوم پیوسته جهت ارزیابی حرکت ذرات رسوبی رودخانه بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در این بررسی، طبقه‌بندی و الگوی حرکت، سرعت، مسافت و ته‌نشینی ذرات رسوبی ریزدانه به ویژه ذرات شن ریز و سیلت در رودخانه یلفان سد اکباتان با استفاده از مدل عددی چند دوفازی فلونتت و کانال شیشه‌ای آزمایشگاهی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که ذرات رسوبی به واسطه نیروی جاذبه ابتدا در کف تیوب ۱ جریان شروع به حرکت نموده و ذرات سنگین‌تر در کف بصورت غلظتی به شرط وجود جریانی با سرعت بیشتر در تیوب ۱ به حرکت خود ادامه می‌دهند و معمولاً مسافت زیادی را طی نکرده و از لحاظ رسوبگذاری هم نقش مهمی ندارند. نتایج مراحل آزمایشگاهی نشان داد که ذرات رسوبی موجود در تیوب ۲ جریان مسافت بسیار بیشتری را طی کرده و به صورت تجمعی در انتهای کانال انباشته می‌شوند. این درحالی است که ذرات رسوبی موجود در تیوب ۱ جریان در همان ابتدای کانال به صورت تدریجی در طی مسیر، انباشته می‌شوند. نتایج بیانگر این است که حرکت ذرات رسوبی سیلت و شن ریز در تیوب‌های ۲ و ۳ جریان بیشتر



از تیوب ۱ اتفاق افتاده و همین امر باعث شده که این ذرات بتوانند مسافت خیلی زیادی را در جریان‌هایی با سرعت خیلی کم حرکت کنند. نتایج نشان داد که با وجود کاهش جریان و به دلیل اینکه نیروی بالابرنده ساغمن از سقوط ذرات جلوگیری می‌کند، باعث می‌شود ذرات در تیوب‌های جریان ۱ و ۲ تا مسافت بیشتری به حرکت خود ادامه دهند.

نتایج شبیه‌سازی پردازشگر فلونت نیز نشان داد که قسمت اعظم بار رسوبی در کانال آزمایشگاهی توسط نیروی بالا برنده ساغمن حمل می‌شود و عملکرد این نیرو باعث حمل و انتقال بیشترین بار رسوبی به صورت بار معلق در رودخانه یلفان شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که قسمت اعظم بار رسوبی رودخانه یلفان بیشتر از ذرات شن و سیلت است و سهم عمده حجم مخزن سد توسط رسوبات شن ریز و سیلت پر شده است. نتایج شبیه‌سازی نتایج نشان داد که با گذشت ۰/۲ متر از شروع جریان در کانال فرایند رسوب گذاری آغاز و انباشت رسوبات با ادامه جریان به سمت پایین دست و در نزدیکی مخزن سد افزایش می‌یابد. ارزیابی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نرم‌افزار فلونت با دقت بسیار بالا و قابل قبول حمل، انتقال و ترسیب رسوبات با دامنه‌ای از رنج‌های مختلف را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. بررسی میزان درصد خطای اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده بیانگر تطابق بالای مدل فلونت با داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد و مشاهده می‌شود که مدل در شبیه‌سازی ذرات رسوبی با قطرهای مختلف از توانایی و دقت بسیار خوبی برخوردار است. همبستگی نتایج آزمایشگاهی و مدل فلونت در مجموع بیش از ۹۷ درصد است که قابل قبول می‌باشد. بنابراین تلفیق مدل فلونت و شرایط آزمایشگاهی می‌تواند ابزار بسیار مفید و دقیقی جهت محاسبه و تعیین نوع بار رسوبی و حتی تعیین مکان رسوبگذاری در بررسی حوضه‌های رودخانه‌ای باشد و این امر می‌تواند کمک شایانی در کنترل فرسایش و رسوب و انتخاب پروژه‌های حفاظت خاک و آبخیزداری نماید.

## منابع

- ایلدرمی، ع. ر.، و شیخی پور، آ.، ۱۳۹۵. بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و نقش آن در فرسایش و رسوبگذاری با استفاده از مدل *HEC-RAS* (مطالعه موردی: رودخانه خرم آباد-دوآب و یسان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، جلد ۵، شماره ۳، صص ۱۴۶-۱۶۳.
- بایزیدی، م.، و کرمی، نادر، ۱۳۹۶. پیش‌بینی روند رسوبگذاری در رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل *GSTARS* 3، مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۳، شماره ۱، صص ۶۶-۸۰.
- طاهر شمسی، ا.، فیضی خانکندی، ا.، و خمسه‌ای، س. ر.، ۱۳۸۸. مدل سازی سه بعدی تأثیرات هندسه مخزن سد بر روی دبی پیک هیدروگراف خروجی ناشی از شکست سد، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران در سال ۱۳۸۸، شناسه (*COI*) مقاله: *ICCE08\_075*
- حیدری، م.، ۱۳۸۱. شبیه‌سازی جریان روی سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار *FLUENT*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، صص ۱۱۶.
- خانجانی زوراب، م.، ایلدرمی، ع. ر.، و نوری، ح.، ۱۳۹۹. بررسی انتقال رسوب و تغییرات بستر رودخانه یلفان سداکباتان همدان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال نهم، شماره ۳، صص ۵۰-۶۹.
- خسروی، غ.، ۱۳۹۷. بررسی هیدرودینامیکی الگوی آشفته جریان و انتقال رسوب توسط مدل *CCHE2D* (مطالعه موردی: پیچانرود پایین دست سد میناب) نشریه مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دوره ۱۲، شماره ۴۰، صص ۳۹-۲۳.
- رئیس، م.، نجفی نژاد، ع.، و عظیم محسنی، م.، ۱۳۹۸. بررسی پدیده‌های زمانی منحنی سنج رسوب و مقایسه آن با چند روش آماری برای برآورد بار رسوب معلق (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گاماسیاب)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۱۰، شماره ۲۰، صص ۸۳-۹۶.

- صالحی، م.، فرهادی، ع.ر.، تملیه، ذ.، و احمدپور، ظ.، ۱۳۹۷. مدل‌سازی عددی امواج ناشی از شکست سد سنگی - ملاتی در زیر حوضه نوشان آذربایجان غربی، مجله محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۴، شماره ۲، صص ۹۰-۱۰۰.
- ظهیری، ع.، قلی نژاد، ج.، دهقانی، ا.، ۱۳۹۷. محاسبه توزیع عرضی رسوب رودها با استفاده از مدل ریاضی شبه دوبعدی (مطالعه نمونه‌ای: رود قره سو)، مجله مهندسی منابع آب، سال ۱۱، شماره ۳۸، صص ۸۳-۹۳.
- غلامی، ل.، هادی قورقی، ج.، عبدالهی، ز.، و خالدی درویشان، ع.، ۱۳۹۶. مقایسه و ارزیابی روش‌های برآورد رسوب معلق با استفاده از دسته بندی داده‌ها (مطالعه موردی: ایستگاه‌های دوآب مرک، شیرگاه و کریکلا)، تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۳، شماره ۳، صص ۱۸۷-۱۹۳.
- عبقری، ه.، فرهادی ع. ر.، ۱۳۹۱. بررسی مشخصات موج ناشی از شکست سد و مدلسازی عددی دوبعدی آن در محیط فلوتنت، -پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، صص ۱۳۵.
- عزیززی، ش.، ایلدرمی، ع.، و نوری، ح.، ۱۳۹۸. تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رودخانه آبهینه همدان، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۸، شماره ۲، صص ۲۰۹-۱۸۹.
- کلامی، س.، مظاهری، م.، و محمولی سامانی، ج.، ۱۳۹۸. تشخیص روابط هندسی - هیدرولیکی سطح مقطع رودخانه‌ها با استفاده از حل معکوس معادلات سنت - ونانت و کاربرد آن، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲، شماره ۴/۲، صص ۳۳-۴۲.
- کرمی، ف.، و بیاتی خطیبی، م.، ۲۰۱۹. مدلسازی فرسایش خاک و اولویت‌بندی تولید رسوب در حوضه ی سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های MUSLE و SWAT، مجله هیدروژئومورفولوژی، دوره ۶، شماره ۱۸ - شماره پیاپی ۱۸، صص ۱۱۵-۱۳۷.
- هنربخش، ا.، نیازی، آ.، سلطانی، ا.، و طهماسبی، ص.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی رابطه میزان رسوبات معلق و ویژگی‌های هیدرولوژیکی و محیطی حوضه (مطالعه موردی: حوضه سد دز)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۸ شماره ۱، صص ۱۰۵-۱۱۷.
- محجوب، ا.، کیلانه‌ئی، ف.، منصورزاده، م.، ۱۳۹۷. مقایسه مدل‌های سه‌بعدی شبیه‌سازی جریان و رسوب. فصلنامه علمی ترویجی جاده. دوره ۲۶، شماره ۹۵، صص ۳۵-۴۶.
- ناصری، ف.، آذری، م.، و دستارانی، م. ت. ۲۰۱۸. بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه رسوب با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: ایستگاه‌های قزاقلی و باغ عباسی)، مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۹، شماره ۳۵، صص ۸۲-۹۷.
- *FLUENT Inc. (2006). FLUENT 6.3. User's and Tutorial Guide Manual, Lebanon, USA.*
- *Francesco, S., Manciola, P. (2009). CFD Modelling Approach for Dam Break Flow Studies, Journal of Hydrology and Earth System Sciences, 6, 6759-6793.*
- *Iqbal, M., Ghumman, A. R., Haider, S., Hashmi, H. N., & Khan, M. A. (2019). Application of Godunov type 2D model for simulating sediment flushing in a reservoir. Arabian Journal for Science and Engineering, 44(5), 4289-4307.*
- *Keane, T. D., Sass, C.K. (2017). Channel Evolution Models as Predictors of Sediment Yield, Journal of the American Water Resources Association, 53(6), 1513-1529.*
- *Lai, Y. G., & Wu, K. (2019). A Three-Dimensional Flow and Sediment Transport Model for Free-Surface Open Channel Flows on Unstructured Flexible Meshes. Fluids, 4(1), 18.*
- *Ouda, M. (2019). Multiphase Modelling of Sediment Transport and Bed Erosion for the Study of Coastal Morphodynamics. (KU Leuven, Technology Campus Brugge, Belgium) October 2019.*