

بسمه تعالی

دانشکده

طرح تحقیق پایان نامه

☐

کارشناسی ارشد

☐

دکترا

این قسمت توسط دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه پر می شود

--

--

--

--

عنوان پایان نامه
فارسی : بهینه‌سازی عددی آبگیر رودخانه‌ای با هدف حداقل مقدار ورود رسوب انگلیسی: Numerical Optimization of a River Intake to Minimize Sediment Entry

توجه : این فرم باید با مساعدت و هدایت استاد یا استادان راهنما تکمیل شود

اطلاعات مربوط به پایان نامه	۱
-----------------------------	---

الف - عنوان پایان نامه :

۱- فارسی :	بهینه‌سازی عددی آبگیر رودخانه‌ای با هدف حداقل مقدار ورود رسوب
۲- انگلیسی :	Numerical Optimization of a River Intake to Minimize Sediment Entry

ب - واژگان کلیدی :

۱- فارسی :	آبگیر جانبی، زاویه آبگیری، رسوب‌گذاری، شبیه‌سازی عددی، بهینه‌سازی هیدرولیکی، نرم افزار فلوئنت
۲- لاتین :	Side Intake, Intake Angle, Sediment Control, Numerical Simulation, Hydraulic Optimization, Fluent

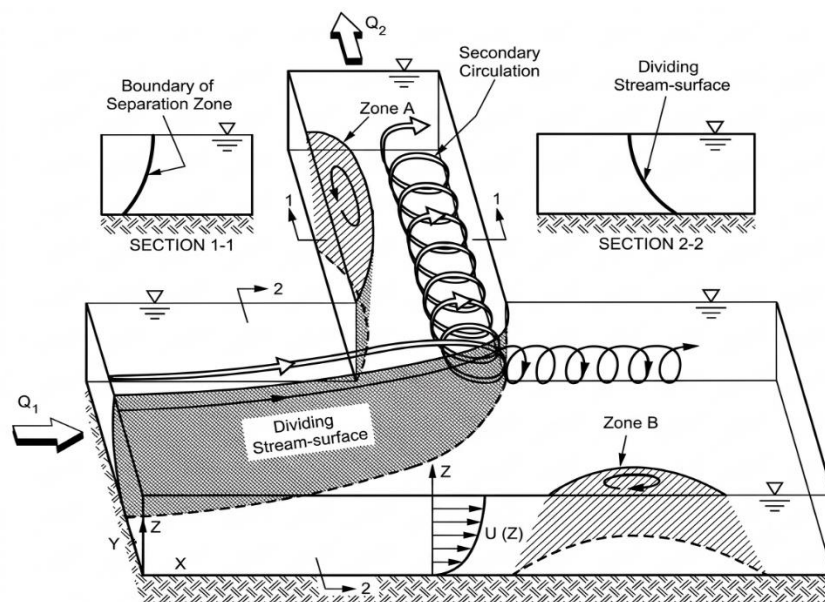
۱-۱	نوع تحقیق :	بنیادی ☐ نظری ☐ کاربردی ☒ توسعه ای ☐
پایان نامه جنبه عملی دارد ☒ ندارد ☐		

۱-۲	تعداد واحد پایان نامه : ۱۸	۳-۴	مدت اجراء : ۲۴ ماه
-----	----------------------------	-----	--------------------

۱-۴	تعریف مسئله و بیان اصلی تحقیق :
در تکمیل این بند به منابع مورد استفاده اشاره شود.	
۱. بیان مسئله آب به‌عنوان حیاتی‌ترین منبع طبیعی در توسعه پایدار هر کشوری نقش محوری ایفا می‌کند. از جمله مهم‌ترین منابع طبیعی و ثروت‌های اصلی یک کشور برای ادامه حیات، آب جاری در رودخانه‌ها و نه‌رهاست. به واسطه نیاز بشر به آب در طول تاریخ، از سیستم‌های مختلف جهت بهره‌برداری از آن استفاده شده است که از جمله روش‌های قدیمی می‌توان به ساخت آبگیرها اشاره کرد. آبگیرهای جانبی و سدهای انحرافی از اصلی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی در شبکه‌های توزیع و انتقال آب کشور به‌شمار می‌روند؛ سازه‌هایی که وظیفه انحراف بخشی از جریان رودخانه به سمت کانال‌های آبیاری، تأسیسات آب‌رسانی، نیروگاه‌های برق‌آبی، شبکه‌های فاضلاب و تأسیسات صنعتی را بر عهده دارند (Bayrami, ۲۰۱۲). آبگیر انحرافی به سازه‌ای اطلاق می‌شود که با ایجاد تغییر در مسیر طبیعی آب، بخشی از جریان رودخانه را به سمت یک کانال یا مخزن دیگر هدایت می‌کند. این سازه معمولاً برای تأمین آب کشاورزی، صنعت یا شرب مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mohammadi, ۲۰۰۷; Samani & Bagheri, ۲۰۱۴). طراحی بهینه آبگیر رودخانه‌ای مستلزم شناخت دقیق سه دسته از فاکتورهای کلیدی است که با یکدیگر در تعامل هستند: اول، مورفولوژی رودخانه و مشخصات رسوبی شامل دانه‌بندی رسوبات، بار بستر و بار معلق رودخانه، شیب بستر، و الگوی جریان در قوس‌های رودخانه؛ دوم، هندسه و اجزای آبگیر شامل زاویه انحراف دهانه، عرض دهانه، ارتفاع آستانه ورودی، شکل لبه هندسی، موقعیت آبگیر در رودخانه، و دبی آبگیری؛ سوم، هیدرولیک جریان شامل سرعت جریان در کانال اصلی و دهانه آبگیر، عمق جریان، عدد فرود، نسبت دبی انحرافی، و عملکرد دریاچه‌های کنترل. جریان اصلی رودخانه (Q_1) در محل انشعاب، به دبی انحرافی (Q_2) و دبی باقیمانده در کانال اصلی (Q_3) تقسیم می‌شود، به‌گونه‌ای که رابطه پیوستگی $Q_1 = Q_2 + Q_3$ برقرار است. نسبت دبی انحرافی (Q_2) به‌عنوان پارامتر کنترل‌کننده اصلی رفتار جریان و	

رسوب در محل آبگیر شناخته می‌شود (Su, ۲۰۲۶; Razvan, ۱۹۸۹; Neary & Odgaard, ۱۹۹۳; Asthana, ۲۰۲۶). با این حال، یکی از اساسی‌ترین چالش‌های پیش روی این سازه‌ها که در تمام مطالعات پیشین مورد تأکید قرار گرفته، پدیده رسوب‌گذاری است. رسوب‌گذاری در دهانه آبگیر پیامدهای منفی زنجیره‌واری به دنبال دارد که عملکرد کل سامانه آبگیری را تهدید می‌کند. کاهش ضریب تخلیه جریان در اثر انباشت رسوب در دهانه و کاهش سطح مقطع مؤثر عبور آب؛ انسداد دهانه آبگیر در صورت تجمع مداوم رسوبات بستر که در موارد حاد به توقف کامل آبگیری منجر می‌شود؛ رسوب‌گذاری در محل تقسیم آب که الگوی توزیع آب بین کانال‌های مختلف را مختل می‌کند؛ و مشکل در عملکرد دریچه‌ها در اثر ورود رسوبات درشت‌دانه که موجب سایش، گیر کردن، و خرابی زود هنگام دریچه‌های کنترل می‌شود. علاوه بر این، رسوبات حمل‌شده در آب منحرف‌شده برای نیروگاه‌های برق‌آبی موجب سایش پره‌های توربین، کاهش راندمان، و خسارت به تجهیزات مکانیکی می‌گردند. ظرفیت انتقال کانال‌های آبگیر کمتر از رودخانه است و به همین سبب تجمع مقدار زیادی رسوب منجر به کاهش عمده در ظرفیت کانال‌ها شده و در بدترین حالت ممکن است کل سیستم آبیاری را غیرقابل استفاده نماید. این پدیده در سال‌های متوالی تکرار می‌شود و نقص سیستم‌های آبیاری خسارات قابل‌توجهی بر محصولات کشاورزی وارد می‌کند (Razvan, ۱۹۸۹; Montaseri et al., ۲۰۰۹; ۲۰۰۴; Abbasi et al., ۲۰۰۲).

از منظر هیدرودینامیکی، جریان در ناحیه انشعاب آبگیر جانبی یکی از پیچیده‌ترین ساختارهای جریان در هیدرولیک کانال‌های باز به‌شمار می‌رود. جریان در این ناحیه ذاتاً سه‌بعدی، آشسته و دارای ساختارهای چرخشی در لایه‌های مختلف عمق است (Graf, ۱۳۸۴). شکل ۱ این ساختار سه‌بعدی را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. از ویژگی‌های مشخص جریان انشعابی می‌توان به ناحیه جدایش در نزدیکی ورودی کانال فرعی، منطقه انقباض جریان در داخل کانال فرعی، گردابه‌های جانبی در امتداد دیواره خارجی ورودی آبگیر و ناحیه ایستایی^۱ در نزدیکی گوشه پایین‌دست محل اتصال اشاره کرد. این جدایش جریان و جریان‌های ثانویه که در محل آبگیر اتفاق می‌افتند، باعث ورود رسوب به کانال فرعی، آبستگي موضعی و رسوب‌گذاری می‌شوند (Neary & Odgaard, ۲۰۲۲; R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۱۹۹۳).



شکل ۱: طرح شماتیک الگوی پیچیده جریان سه‌بعدی، خطوط جریان جداکننده و تشکیل جریان‌های ثانویه چرخشی در دهانه آبگیر جانبی

ابعاد ناحیه جدایش جریان که در مقطع ۱-۱ شکل ۱ قابل مشاهده است، با روابط بی‌بعد زیر توصیف می‌شود (Abbasi et al., ۲۰۰۲):

$$\frac{L_S}{b} = f\left(Q_r, \theta, \frac{b}{B}\right) \quad (1)$$

$$\frac{W_S}{b} = g\left(Q_r, \theta, \frac{b}{B}\right) \quad (2)$$

که در آن L_S و W_S به‌ترتیب طول و عرض ناحیه جدایش، b عرض دهانه آبگیر، B عرض کانال اصلی، Q_r نسبت دبی انحرافی، و θ زاویه انحراف است. نسبت رسوب انحرافی (SDR) به‌عنوان معیار اصلی ارزیابی عملکرد آبگیر نیز با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$SDR = \frac{C_2 \cdot Q_2}{C_1 \cdot Q_1} \quad (3)$$

که در آن C_1 و C_2 به‌ترتیب غلظت رسوب در کانال اصلی و آبگیر جانبی هستند (Tavakoli et al., ۲۰۱۹). هدف بهینه‌سازی در پژوهش حاضر، کمینه‌سازی این

^۱ stagnation

نسبت از طریق بهینه‌سازی پارامترهای هندسی دهانه آبگیر است.

در میان این ویژگی‌های هیدرودینامیکی، نقطه ایستایی^۲ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در گوشه پایین‌دست محل اتصال کانال اصلی و کانال آبگیر، نقطه‌ای شکل می‌گیرد که در آن سرعت جریان به صفر می‌رسد و آغازگاه یک ورتکس زمینی^۳ است که ذرات رسوب بستر را از کانال اصلی به سمت دهانه آبگیر هدایت می‌کند. موقعیت این نقطه ایستایی به زاویه آبگیر، نسبت دبی انحرافی، و هندسه دهانه بستگی دارد (Barkdoll, ۱۹۹۷; Neary & Odgaard, ۱۹۹۳). در کنار نقطه ایستایی، گردابه‌های جانبی^۴ نیز در امتداد دیواره خارجی ورودی آبگیر شکل می‌گیرند که انرژی آن‌ها از اختلاف سرعت بین جریان اصلی و ناحیه آرام مجاور دیواره تغذیه می‌شود و اندازه و شدتشان با افزایش زاویه انحراف به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲; Gandashmin, ۲۰۰۹). جریان‌های ثانویه^۵ و ورتکس‌های عمقی نیز در لایه‌های مختلف عمق جریان، مسیر انتقال رسوبات بستر از کانال اصلی به داخل آبگیر را تعیین می‌کنند؛ به‌طوری که افزایش غلظت رسوب، انرژی گردابه‌های عمقی را تقویت کرده و این گردابه‌ها نیز به نوبه خود رسوب بیشتری را به داخل آبگیر هدایت می‌کنند — یک چرخه بازخوردی مثبت که بدون مداخله در طراحی سازه، خودبه‌خود تشدید می‌شود (Montaseri et al., ۲۰۲۰).

به منظور درک بهتر فیزیک جریان و مکانیزم‌های ترسیب در شرایط واقعی، نمونه‌ای از یک بند انحرافی با محور مورب (زاویه‌دار) در شکل ۲ و محل تشکیل جریان‌های ثانویه چرخشی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصویر مشهود است، هندسه زاویه‌دار بند اگرچه راندمان هیدرولیکی انحراف جریان را افزایش می‌دهد، اما الگوی جریان را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که منجر به شکل‌گیری یک توده رسوبی عریض و بار رسوبی بستر عظیم دقیقاً در مجاورت و بالادست دهانه آبگیر می‌گردد.



شکل ۲: نمای بالادست یک بند انحرافی زاویه‌دار و تجمع بار رسوبی در صلیب دهانه آبگیر جانبی



شکل ۳: محل تشکیل جریان‌های ثانویه چرخشی

ساختار هیدرولیکی دهانه آبگیر و کانال انحراف ذرات در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. مجرای مایل بتنی در ورودی کانال، به عنوان مرز اصلی جدایش جریان عمل کرده و با کاهش موضعی سرعت، شرایط را برای تعلیق و حرکت ذرات به سمت لایه‌های پایینی فراهم می‌سازد. مهار هیدرولیکی ذرات در این کانال (Q_p)، تابع هدف اصلی در شبیه‌سازی فلوئنت خواهد بود.

^۲ Stagnation Point

^۳ bed vortex

^۴ Lateral Eddies

^۵ Secondary Flows



شکل ۴: نمایی از بند انحرافی کریم‌آباد ارومیه از نوع بند موازی؛ الف) نمای کلی بند و موقعیت دهانه انشعاب، ب) نمای نزدیک کانال انحراف آبگیر و دیواره مایل جدایش جریان

جزئیات سازه‌ای دریاچه‌های تنظیم هیدرولیکی و کانال تخلیه در شکل ۵ قابل مشاهده است. جریان آب هنگام عبور از مقطع کنترل دریاچه دچار انقباض شدید شده و مکش ناشی از آن، جریان‌های ثانویه گردابی در بستر کف ایجاد می‌کند. همچنین خروجی سازه آب‌شوی جریان تندآبی را شکل می‌دهد که به دلیل تغییر مقطع ناگهانی، پدیده جدایش جریان و زون‌های پرخشکی موضعی شدید در گوشه‌های دیواره صلب آن رخ می‌دهد.



شکل ۵: المان‌های تنظیمی هیدرولیک رسوب؛ الف) شفت و مجرای کنترل دریاچه آبگیر (محل شکل‌گیری جریان ثانویه)، ب) کانال تندآب بتنی خروجی و زون گردابی محلی پایاب

توزیع غلظت رسوب در عمق جریان ورودی، الگوی رسوب‌گذاری در دهانه و نقاط بحرانی تنش برشی بستر، همگی به هندسه دهانه آبگیر، زاویه انشعاب و ارتفاع آستانه وابسته‌اند. (Izadpanah & Neyshaburi, ۲۰۰۳) نشان دادند که قرارگیری آبگیر در موقعیت ۷۵ درجه نسبت به موقعیت‌های ۶۵ و ۷۰ درجه رسوب کمتری وارد می‌کند. عباسی و همکاران (۱۳۸۲) در مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که با کاهش زاویه آبگیری، طول ناحیه گردابی افزایش و عرض آن کاهش می‌یابد. (Jalili et al., ۲۰۱۱) دریافتند که ایجاد قوس بهینه در دیواره کانال آبگیر می‌تواند میزان رسوب ورودی را تا ۵۸ درصد کاهش دهد. (Mahtabi & Hosseinzadeh, ۲۰۱۲) نشان دادند که دیوار منحرف‌کننده با زاویه نصب ۶۳ درجه توانست رسوب ورودی را به‌طور کامل حذف کند و (Moradinejad et al., ۲۰۱۷) نیز اثبات کردند که ترکیب دیوار جداکننده و آبشکن می‌تواند رسوب ورودی را تا ۸۱ درصد کاهش دهد. در زمینه شبیه‌سازی عددی، (Tavakoli et al., ۲۰۱۹) با استفاده از مدل DPM در فلوئنت نشان دادند که مکانیزم ورود رسوب به نسبت دبی انحرافی وابسته است و کمترین رسوب ورودی در موقعیت ۱۲۰ درجه و زاویه انحراف ۵۰ درجه مشاهده شد. (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent و مدل آشفتگی SST k- ω نشان دادند که زاویه انشعاب ۳۰ تا ۴۵ درجه بهترین پیکربندی برای افزایش دبی کانال انشعابی، کاهش غلظت رسوب، و کاهش عمق آبستگي در ناحیه محل اتصال است. (Al-Sabea & Hilo, ۲۰۲۴) نیز در مطالعه اخیر خود دریافتند که مدل با شیب کامل در زاویه ۴۵ درجه موجب افزایش سرعت در مقاطع کانال، کاهش ناحیه جدایش و گردابه‌ها، و در نتیجه کاهش رسوب ورودی می‌شود.

با وجود مطالعات گسترده فوق، بررسی جامع ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که چهار شکاف اساسی در دانش فعلی وجود دارد. نخست، مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی تأثیر یک یا نهایتاً دو پارامتر به‌صورت مجزا پرداخته‌اند (Jalili et al., ۲۰۱۱; Izadpanah & Neyshaburi, ۲۰۰۳; Abbasi et al., ۲۰۰۲) و تأثیر هم‌زمان زاویه انحراف، عرض دهانه، ارتفاع آستانه، شکل لبه ورودی و شرایط هیدرولیکی را در یک فضای طراحی چندبعدی بررسی نکرده است. دوم، تناقض آشکاری در نتایج موجود به چشم می‌خورد؛ برخی مطالعات زوایای حاده (کمتر از ۹۰ درجه) را بهینه می‌دانند (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲)، برخی زوایای

منفرجه (بزرگ‌تر از ۹۰ درجه) را (Esmacili Varaki et al., ۲۰۱۱)، و برخی زوایای بینابین را (Tavakoli et al., ۲۰۱۹) که این تناقض نشان می‌دهد زاویه بهینه یک عدد ثابت نیست، بلکه تابعی پیچیده از هندسه و هیدرولیک جریان است. سوم، خلاء یک روش‌شناسی پارامتریک و سیستماتیک برای استخراج روابط ریاضی و تجربی دقیق بین این زوایای آبگیری و اجزای سازه به شدت احساس می‌شود تا مهندسان طراح بتوانند بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های مجدد، به طراحی بهینه دست یابند. چهارم، فرآیند بهینه‌سازی هم‌زمان این پارامترها تاکنون به شکل جامع و نظام‌مند انجام نشده و فضای پارامتریک پژوهش‌های معدود گذشته بسیار محدود بوده است. (Montaseri & Abadi, ۲۰۲۴)

در پاسخ به این خلأهای پژوهشی، تحقیق حاضر با تعریف یک هندسه پایه پارامتریک برای آبگیر جانبی (شامل اجزای کلیدی مانند زاویه انحراف، عرض دهانه، ارتفاع آستانه ورودی و شکل لبه هندسی)، به تحلیل سیستماتیک این پارامترها در یک فضای طراحی چندبعدی می‌پردازد. این پژوهش با تلفیق شبیه‌سازی‌های عددی سه‌بعدی میدان جریان و رسوب در نرم‌افزار ANSYS Fluent و تحلیل‌های آماری، به دنبال توسعه مدل‌های تحلیلی و استخراج روابط کاربردی بین پارامترهای هندسی و زوایای آبگیری با میزان رسوبات ورودی است. علاوه بر این، به منظور تضمین دقت مدل‌های عددی و اطمینان از کارایی نتایج در شرایط واقعی، اعتبارسنجی خروجی‌ها از طریق انطباق با داده‌های آزمایشگاهی صورت خواهد گرفت. هدف نهایی این ساختار، ارائه راهکارهای طراحی بهینه و معیارهای اجرایی برای مهندسان هیدرولیک است تا بتوان به پیکربندی هندسی دست یافت که راندمان آبگیری را بیشینه و ورود رسوبات به کانال را کمینه سازد.

۱-۵ سابقه و ضرورت انجام تحقیق (به منابع مورد استفاده اشاره شود):

۲. پیشینه پژوهش

۲-۱. زاویه و موقعیت آبگیر

مطالعات آزمایشگاهی متعددی تأثیر زاویه انحراف و موقعیت آبگیر بر الگوی رسوب‌گذاری را بررسی کرده‌اند. (Izadpanah & Neyshaburi, ۲۰۰۳) نشان دادند که قرارگیری آبگیر در موقعیت ۷۵ درجه در قوس ۹۰ درجه نسبت به موقعیت‌های ۶۵ و ۷۰ درجه رسوب کمتری وارد آبگیر می‌کند. (Abbasi et al., ۲۰۰۲) با آزمایش چهار زاویه ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه دریافتند که با کاهش زاویه آبگیری، طول ناحیه گردابی افزایش و عرض آن کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت دبی آبگیری، ابعاد ناحیه جدایش کاهش می‌یابد. (Pirestani et al., ۲۰۰۸) در قوس ۱۸۰ درجه نشان دادند که بیشترین رسوب‌گذاری در موقعیت ۷۵ درجه و کمترین در موقعیت ۱۱۵ درجه رخ می‌دهد و این تغییر با تغییرات قدرت جریان ثانویه و موتمم جریان عرضی در دهانه آبگیر ارتباط مستقیم دارد. (Montaseri et al., ۲۰۰۸) نیز در قوس ۱۸۰ درجه به این نتیجه رسیدند که قرارگیری آبگیر در موقعیت‌های ۱۱۵ تا ۱۳۵ درجه موجب کاهش رسوب ورودی و آبستنگی موضعی می‌شود. (Abolghasemi, ۲۰۱۲) نشان داد که افزایش نسبت انحراف جریان در کانال سینوسی موجب کاهش قدرت جریان ثانویه و افزایش رسوب ورودی می‌شود و زاویه انحراف جریان از پارامترهای کلیدی در طراحی آبگیرهاست. در سطح بین‌المللی (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) با شبیه‌سازی SST k- ω در فلونت نشان دادند که زاویه انشعاب ۳۰ تا ۴۵ درجه بهترین پیکربندی برای افزایش دبی انشعابی و کاهش غلظت رسوب است. در همین راستا، (Varki et al., ۲۰۰۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی به تحلیل الگوهای جریان در آبگیرهای جانبی با زاویه قائم پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که انحراف جریان با زاویه ۹۰ درجه منجر به شکل‌گیری یک ناحیه کم‌فشار و پدیده جداشدگی جریان در گوشه بالادست دهانه آبگیر می‌شود که این امر عرض مؤثر آبگیری را کاهش داده و پتانسیل رسوب‌گذاری را در ورودی سازه به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین (Varaki et al., ۲۰۰۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر رفتار هیدرودینامیکی جریان ورودی به آبگیر جانبی با زاویه قائم در سد انحرافی را بررسی کردند. میدان سرعت هم در بالادست آبگیر در کانال اصلی و هم در مقابل دهانه آبگیر در مجرای تخلیه رسوب، تحت ترکیب‌های مختلف دبی رودخانه، آبگیر و دریچه تخلیه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که هندسه و اجزای سازه آبگیر از جمله آستانه، ناحیه انتقال و سرریز خروجی تأثیر قابل‌توجهی بر میدان جریان و ته‌نشینی رسوبات دارند. در ادامه همین خط تحقیقاتی، (Esmacili Varaki et al., ۲۰۱۱) اثر زاویه انحراف را در محدوده ۹۰ تا ۱۲۰ درجه بر ساختار جریان ورودی به آبگیر جانبی و میزان رسوب ورودی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که زاویه ۱۱۰ درجه کمترین مقدار رسوب ورودی را دارد و باز بودن دریچه تخلیه موجب افزایش گرداب‌های چرخشی و افزایش ورود رسوب می‌شود. (Tavakoli et al., ۲۰۱۹) کمترین رسوب را در موقعیت ۱۲۰ درجه و زاویه انحراف ۵۰ درجه گزارش دادند. (Al-Sabea & Hilo, ۲۰۲۴) نیز دریافتند که مدل با شیب کامل در زاویه ۴۵ درجه موجب افزایش سرعت در مقاطع کانال، کاهش ناحیه جدایش و گردابه‌ها شده و رسوب ورودی را کاهش می‌دهد.

مقایسه نتایج مطالعات فوق تناقض آشکاری را در تعیین زاویه بهینه نشان می‌دهد؛ در حالی که (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) زوایای ۳۰ تا ۴۵ درجه را بهینه معرفی می‌کنند، (Esmacili Varaki et al., ۲۰۱۱) به زاویه ۱۱۰ درجه می‌رسند و (Tavakoli et al., ۲۰۱۹) زاویه ۵۰ درجه را بهتر می‌یابند. این تناقض نشان می‌دهد که زاویه بهینه تابعی از سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی است و بررسی آن به صورت مجزا و بدون در نظر گرفتن اثر هم‌زمان سایر اجزاء نتایج قابل‌تعمیمی به دست نمی‌دهد.

۲-۲. سازه‌های کنترل رسوب

سازه‌های مختلفی برای کنترل رسوب ورودی به آبگیرهای جانبی پیشنهاد و آزمایش شده‌اند. در حوزه به‌کارگیری سازه‌های هادی جریان برای کنترل توپوگرافی بستر و

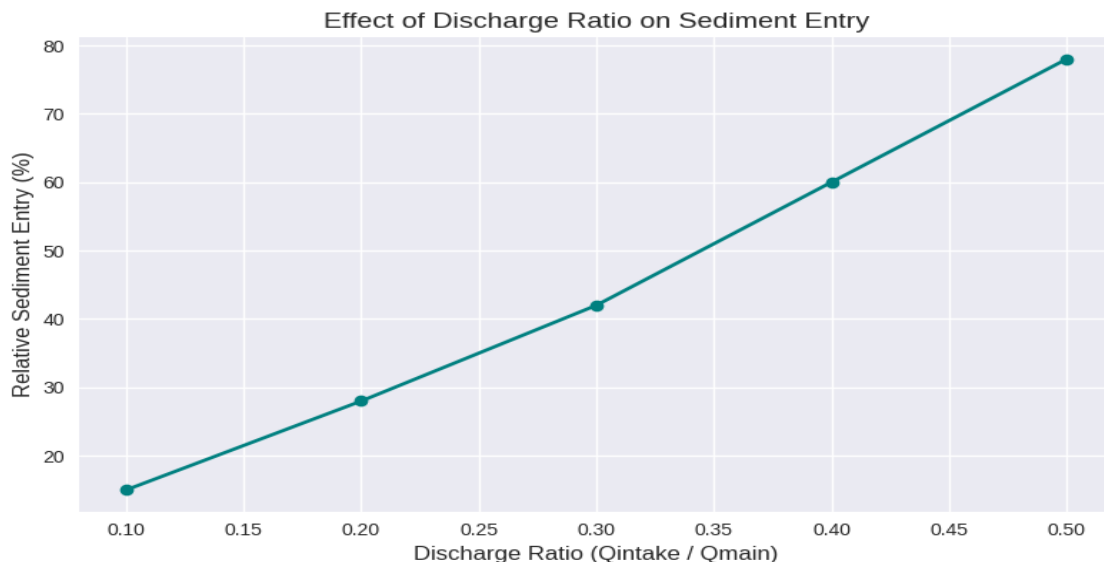
مهار رسوبات، (۲۰۲۴، Ahmadi & Mohammadi) به بررسی عددی تأثیر صفحات مستغرق با زوایای ۹۰ و صفر درجه بر میزان آبشستگی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تنظیم زاویه قرارگیری صفحات مستغرق، پتانسیل بالایی در انحراف خطوط جریان پرسرعت از مجاورت سازه‌های بستر داشته و با کاهش تنش برشی، پایداری هیدرولیکی مقطع و مهار فرسایش را به همراه دارد. در زمینه صفحات مستغرق، (Sajidi et al., ۲۰۰۲) نشان دادند که این صفحات می‌توانند رسوب ورودی را ۲۰ تا ۴۵ درصد کاهش دهند و آرایش منظم نسبت به زیگزاگ کارایی بیشتری دارد. (Sajedi & Habibi, ۲۰۰۴) دریافتند که نصب منظم صفحات موجب کاهش ۵۵ تا ۷۵ درصدی رسوب می‌شود در حالی که آرایش مورب پله‌ای کاهش ۱۵ تا ۴۳ درصدی ایجاد می‌کند. (Davoudi & Mahmoud, ۲۰۱۲) نشان دادند که فاصله طولی ۸ برابر ارتفاع صفحات بهترین عملکرد را داشته و موجب کاهش ۳۱ درصدی رسوب ورودی شد. (Honar & Shahraki, ۲۰۱۴) نیز نشان دادند که صفحات مستغرق علاوه بر کنترل رسوب، راندمان آبیگری را نیز بهبود می‌بخشند. (Mandal et al., ۲۰۲۴) در یک مقاله مروری جامع نشان دادند که صفحات مستغرق به دلیل پایداری سازه‌ای و امکان‌پذیری اقتصادی نسبت به سازه‌های سنتی نظیر آبشکن و گروین مزیت دارند، اما هنوز شکاف‌های تحقیقاتی در بهینه‌سازی پارامترهای هندسی آن‌ها وجود دارد. در زمینه دیوار منحرف‌کننده و آستانه، (Mahtabi & Hosseinzadeh, ۲۰۱۲) نشان دادند که دیوار منحرف‌کننده با زاویه نصب ۶۳ درجه توانست رسوب ورودی را به‌طور کامل حذف کند، اما افزایش ارتفاع آستانه عملکرد آن را کاهش داد. (مرادی-نژاد و همکاران، ۱۳۹۶) با ترکیب دیوار جداکننده و آبشکن توانستند رسوب ورودی را تا ۸۱ درصد کاهش دهند. (Vaghifi & Tabrizi, ۲۰۲۵) نشان دادند که قرارگیری دیوار جداکننده در مقابل آبگیر موجب تغییر الگوی جریان و کاهش رسوب می‌شود. (Attarzadeh et al., ۲۰۱۵) نیز دریافتند که ترکیب آبشکن و آستانه توانست نسبت رسوب انحرافی را بیش از ۹۰ درصد کاهش دهد. (Fatehi-Nobarian et al., ۲۰۲۲) با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی نشان دادند که پارامترهای هیدرولیکی و هندسی دیوار هدایت‌کننده جریان سطحی را می‌توان به‌گونه‌ای بهینه کرد که ورود رسوب به آبگیر جانبی به حداقل برسد. (Fazel Najafabadi & Ayyoubzadeh, ۲۰۲۵) در یک مقاله مروری نشان دادند که صفحات مستغرق در شرایط خاصی از نسبت آبیگری می‌توانند به‌طور کامل از ورود رسوبات جلوگیری کنند اما اثربخشی آن‌ها شدیداً به عدد فرود و نسبت دبی وابسته است.

اگرچه مطالعات نشان می‌دهند که سازه‌های کنترل رسوب می‌توانند به‌طور قابل توجهی رسوب ورودی را کاهش دهند، نتایج در مورد بهترین ترکیب سازه‌ای متناقض است. همچنین اثربخشی این سازه‌ها در غیاب بررسی هم‌زمان با پارامترهای هندسی دهانه آبگیر — به‌خصوص زاویه انحراف و ارتفاع آستانه — به‌شکل جامع مطالعه نشده است.

۲-۳. عوامل هیدرولیکی و رسوبی

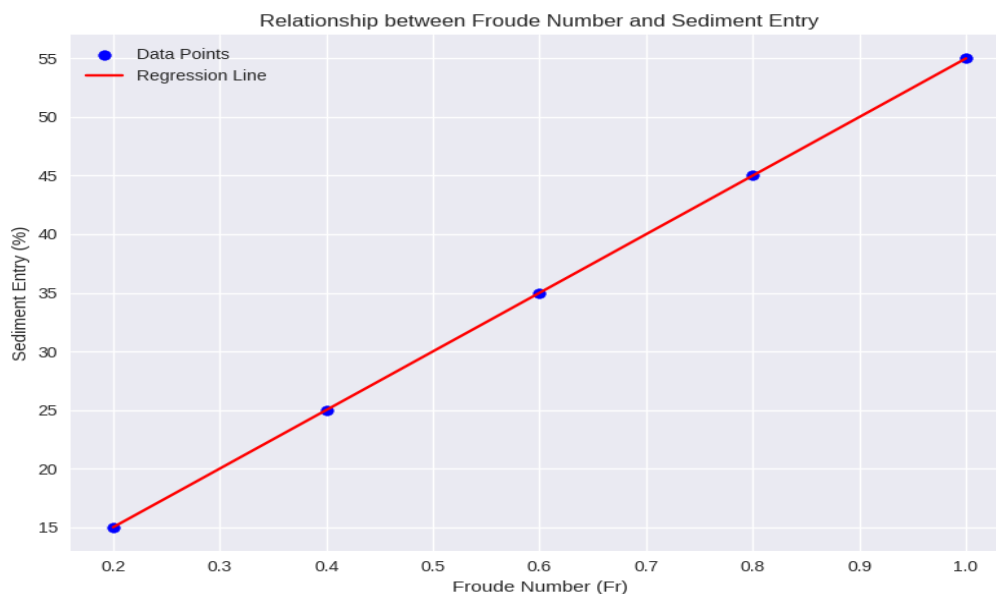
بررسی‌های مختلفی نقش پارامترهای هیدرولیکی در کنترل رسوب ورودی را مورد توجه قرار داده‌اند. در این حوزه، مطالعات متعددی بر روی بهینه‌سازی سازه‌های جانبی و پارامترهای جریان صورت گرفته است. در راستای تحلیل پارامترهای هیدرودینامیکی حاکم بر بازه‌های کانال و رودخانه، (Naqvi et al., ۲۰۲۲) جریان‌های ثانویه را تحت اثر تغییر سینوسیتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های آن‌ها نشان داد که هندسه مسیر اثر مستقیمی بر قدرت جریان‌های عرضی (ثانویه) و جابه‌جایی زون‌های فرسایش و رسوب‌گذاری بستر دارد؛ مکانیزمی که در تحلیل عوامل هیدرولیکی حاکم بر دهانه آبگیرها نقشی کلیدی ایفا می‌کند. (Najafi et al., ۲۰۱۲) با بررسی اثر هندسه صفحات مستغرق و آبشکن در قوس رودخانه نشان دادند که این سازه‌ها ورود رسوبات بستر به دهانه آبگیر را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهند. به یافته‌ی آن‌ها، صفحات مستغرق با ایجاد جریان‌های ثانویه کنترل‌شده، الگوی گرادیان فشار را تغییر داده و رسوب را به سمت مرکز قوس رودخانه هدایت می‌کنند. (Naqvi et al., ۲۰۲۴) به بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان‌های عرضی و ثانویه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که آرایش و چینش سازه‌ها در مسیر جریان، ساختار گرادیان فشار را دستخوش تغییرات اساسی کرده و مستقیماً بر قدرت جریان‌های ثانویه و به تبع آن بر الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری بستر تأثیر می‌گذارد؛ فرآیندی که مکانیزم کلیدی در درک عوامل هیدرولیکی حاکم بر عملکرد آبگیرهای جانبی است. (Keshavarzi & Parsi, ۲۰۰۶) با ترکیب مدل آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفتگی k-ε نشان دادند که افزایش نسبت دبی موجب افزایش جدایش جریان و رسوب‌گذاری می‌شود و این مدل توانست سرعت جریان و ابعاد ناحیه جدایی را با دقت بیشتری تخمین بزند. مکانیزم هیدرولیکی این پدیده و روند صعودی ورود رسوب با افزایش نسبت دبی انحرافی

در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. Q_{intake}/Q_{main}



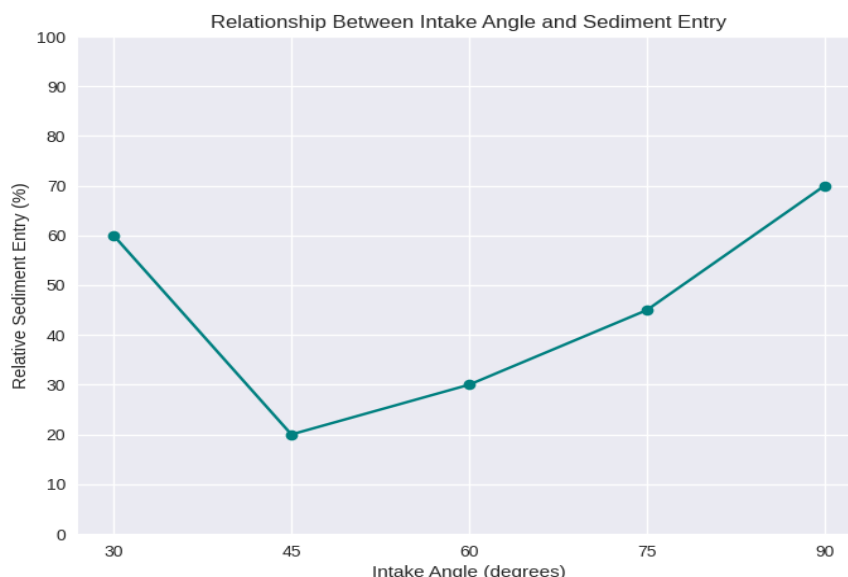
شکل ۶: رابطه بین نسبت دبی آبگیر به جریان اصلی (Q_{intake} / Q_{main}) و میزان ورود رسوبات (Keshavarzi & Parsi, ۲۰۰۶)

(منتصری و همکاران، ۱۳۸۸) نشان دادند که ورود جریان به قوس موجب تشکیل جریان ثانویه اصلی و سلول چرخشی می‌شود، اما با رسیدن به آبگیر این جریان تحت اثر مکش از بین می‌رود. (Saydian, ۲۰۱۰) دریافت که با مایل شدن دیواره، عرض مجرای جریان در سطح نسبت به کف افزایش یافته و رسوب ورودی کاهش می‌یابد و افزایش عدد فرود جریان موجب کاهش قدرت جریان گردابی می‌شود. روند مستقیم و صعودی ورود رسوب نسبی به آبگیر با افزایش عدد فرود جریان (Fr) در شکل ۷ نشان داده شده است. (Abbasi & Leknejad, ۲۰۱۴) نشان دادند که نصب آستانه در ترکیب با صفحات مستغرق موجب تغییر الگوی جریان در ناحیه دهانه آبگیر و کاهش قابل توجه رسوب ورودی می‌شود، به‌ویژه در نسبت‌های آبگیری پایین.



شکل ۷: نمودار خط رگرسیون تغییرات ورود رسوب نسبی به آبگیر جانبی برحسب افزایش عدد فرود جریان (Saydian, ۲۰۱۰)

(Xu et al., ۲۰۲۴) در مطالعه‌ای اخیر با مدل Euler-Euler در فلوئنت نشان دادند که رسوبات در فرآیند تکامل گرداب‌های محوری به گرداب‌های مارپیچی در طول عمق جریان نقش تقویت‌کننده‌ای دارند و افزایش غلظت رسوب، انرژی گرداب‌ها را در عمق بیشتر می‌کند. (Best & Reid, ۱۹۸۴) در مطالعه کلاسیک خود نشان دادند که زاویه آبگیری و نسبت دبی از عوامل کلیدی در کنترل رسوب ورودی هستند و روابط تجربی آن‌ها هنوز مبنای اعتبارسنجی بسیاری از مدل‌های عددی است. به عنوان نمونه، روند عمومی تغییرات غلظت یا میزان ورود رسوب نسبی به آبگیر جانبی تحت تأثیر تغییرات زاویه انحراف دهانه، در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: نمودار روند تغییرات میزان ورود رسوب نسبی به آبگیر جانبی برحسب تغییرات زاویه انحراف دهانه (Best & Reid, ۱۹۸۴)

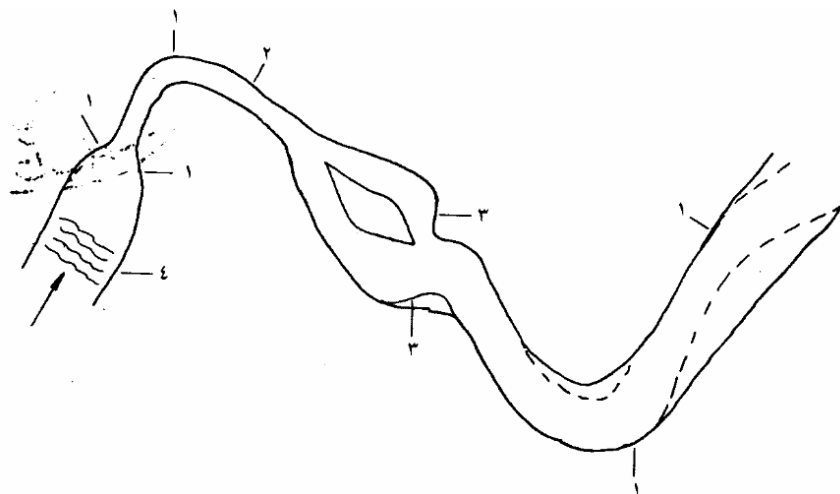
مطالعات این دسته به روشنی نشان می‌دهند که پارامترهای هیدرولیکی نظیر عدد فرود، نسبت دبی انحرافی، و شرایط جریان ثانویه تأثیر مستقیمی بر الگوی رسوب‌گذاری دارند. با این حال، هیچ مطالعه‌ای این پارامترها را به صورت هم‌زمان با پارامترهای هندسی دهانه در یک فضای طراحی چندبعدی بررسی نکرده است.

۴-۲. شبیه‌سازی عددی CFD

در دهه اخیر، شبیه‌سازی عددی به ابزار اصلی مطالعه آبگیرهای جانبی تبدیل شده است. در حوزه توسعه مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تحلیل سازه‌های آبی، مطالعات (محمدی و همکاران، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳) نشان‌دهنده کارایی بالای کدهای عددی در استخراج الگوهای پیچیده آشفتگی است. این تحقیقات اثبات می‌کند که مدل‌سازی‌های سه‌بعدی عددی قادرند با دقت بالایی ساختار گردابه‌های عرضی، توزیع تنش برشی بستر و مکانیزم‌های پدیده آبستگي را در مجاورت سازه‌های هادی جریان و صفحات مستغرق پیش‌بینی نمایند. (Fattahi & Mohammadi, ۲۰۲۲) به مدل‌سازی عددی تأثیر هندسه سازه‌های بستر بر روی تنش برشی پرداختند. یافته‌های آن‌ها اثبات کرد که مدل‌های عددی سه‌بعدی از کارایی بسیار بالایی در استخراج ساختار آشفتگی و توزیع موضعی تنش برشی بستر در مجاورت سازه‌های هادی جریان برخوردار هستند و می‌توان از این کدهای محاسباتی برای تحلیل پایداری بستر در زون‌های حساس هیدرولیکی بهره گرفت. (Neary & Odgaard, ۱۹۹۳) و سپس (Neary et al., ۱۹۹۹) نشان دادند که جریان در انشعاب آبگیر ذاتاً سه‌بعدی است و مدل‌سازی دوبعدی آن را به‌درستی بازتولید نمی‌کند؛ پیچیدگی جریان سه‌بعدی موجب افزایش رسوب‌گذاری و تغییر ریخت‌شناسی بستر می‌شود و مدل‌سازی عددی باید قادر به بازتولید این جریان‌های سه‌بعدی و اثر آن‌ها بر رسوب باشد. (Barkdoll, ۱۹۹۷) نیز نشان داد که جریان‌های گردابی عمودی می‌توانند موجب افزایش رسوب ورودی و تغییر مورفولوژی بستر شوند و طراحی اجزای آبگیر باید به‌گونه‌ای باشد که از تشکیل گرداب‌های عمودی جلوگیری کند. (Ramamurthy et al., ۲۰۰۷) در مطالعه‌ای ترکیبی عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش عمق جریان و تغییر دانه‌بندی رسوب می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر میزان رسوب ورودی اثر بگذارد و علاوه بر زاویه و هندسه، ویژگی‌های جریان و رسوب نیز باید در مدل‌سازی عددی لحاظ شوند. (Varaki et al., ۲۰۰۹) در مطالعه‌ای روی آبگیر با زاویه قائم نشان دادند که ساختار جریان در ناحیه انشعاب دارای ویژگی‌های سه‌بعدی پیچیده‌ای است که تنها با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی قابل بازتولید است. (Haddad et al., ۲۰۱۷) با شبیه‌سازی عددی نرخ رسوب‌گذاری در آبگیرهای جانبی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که مدل‌های عددی می‌توانند با دقت قابل قبولی رفتار رسوب را در دهانه آبگیر پیش‌بینی کنند. (Montaseri et al., ۲۰۲۰) با مقایسه مدل اویلری و DPM در فلونت نشان دادند که مدل اویلری در پیش‌بینی جریان‌های ثانویه دقیق‌تر است در حالی که DPM در شناسایی حرکت ذرات رسوب عملکرد بهتری دارد و نصب آبگیر در موقعیت ۱۲۰ درجه کمترین رسوب ورودی را داشت. (Tavakoli et al., ۲۰۱۹) نیز با استفاده از مدل DPM در فلونت نشان دادند که مکانیزم ورود رسوب به نسبت دبی انحرافی وابسته است؛ در نسبت‌های پایین رسوب فقط از لبه پایین‌دست وارد می‌شود، اما با افزایش دبی، ورود رسوب از هر دو لبه بالا و پایین‌دست رخ می‌دهد و کمترین رسوب ورودی در موقعیت ۱۲۰ درجه و زاویه انحراف ۵۰ درجه مشاهده شد.

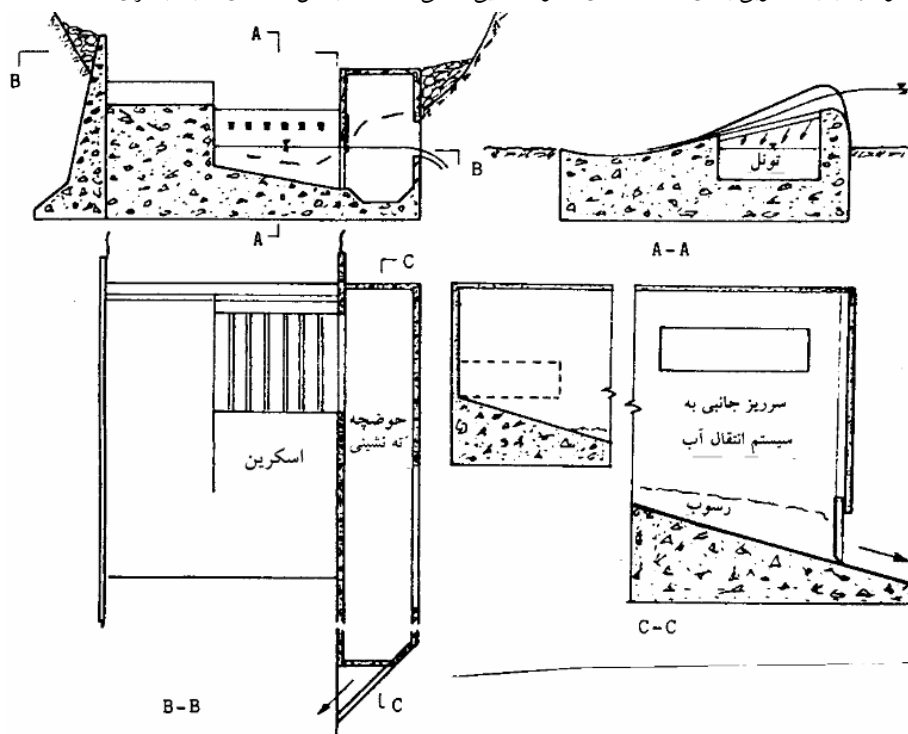
(R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) در دو مطالعه مستقل با نرم‌افزار ANSYS Fluent و مدل آشفتگی SST k- ω هم الگوی جریان و هم رسوب‌گذاری در آبگیر جانبی را بررسی کردند. در مطالعه اول (R. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) الگوی جریان سه‌بعدی و ناحیه جدایش در دهانه آبگیر تحلیل شد و نشان داده شد که مدل SST k- ω در شبیه‌سازی جریان‌های انشعابی با جدایش بهترین عملکرد را دارد. در مطالعه دوم (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) زاویه انشعاب ۳۰ تا ۴۵ درجه به‌عنوان بهترین پیکربندی برای افزایش دبی انشعابی، کاهش غلظت رسوب، و کاهش عمق آبستگي در ناحیه اتصال معرفی شد. (Simionescu et al., ۲۰۲۲) در شبیه‌سازی عددی جریان در آبگیر اکولوژیک رودخانه نشان دادند که مدل CFD می‌تواند ابزار مؤثری برای

احداث کنند که جریان به طور طبیعی بار رسوبی کمتری دارد؛ از جمله در قوس‌های بیرونی برای بهره‌گیری از جریان‌های ثانویه (مقطع ۱)، دره‌های تنگ دارای مقطع پایدار و عمیق (مقطع ۲)، مجاورت توده‌های سنگی پایدار (مقطع ۳) و یا بازه‌های با شیب تند که بار معلق ناچیزی دارند (مقطع ۴). با این حال، در بسیاری از پروژه‌های اجرایی کشور (مانند شبکه انحرافی دز و جیرفت)، به دلیل محدودیت‌های توپوگرافی و ملکیت اراضی، امکان انتخاب ایده‌آل این مقاطع طبیعی وجود ندارد. در نتیجه، سازه‌ها در نقاطی احداث می‌شوند که به شدت در معرض لایروبی‌های مداوم و کاهش راندمان هیدرولیکی قرار می‌گیرند؛ پدیده‌ای که ضرورت بهینه‌سازی ابعادی و هندسی خود سازه آبگیر جانبی را دوچندان می‌سازد.

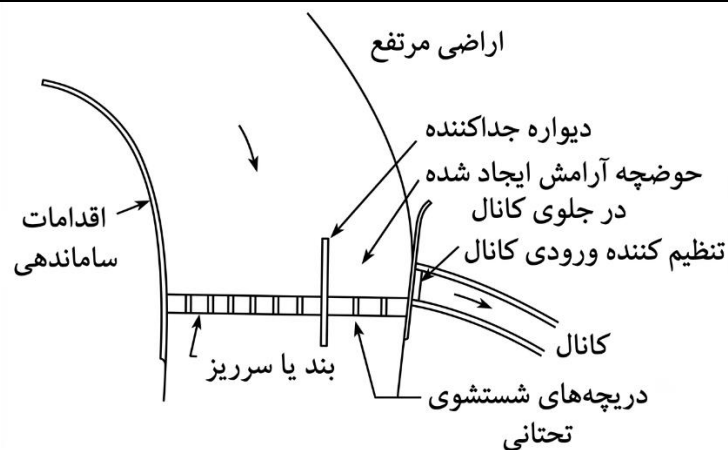


شکل ۹: الگوی جانمایی و گزینه‌های مورفولوژیکی مناسب برای مکان‌یابی طبیعی احداث سازه آبگیر در طول مسیر رودخانه (Energy, ۲۰۰۵)

این مسئله به‌ویژه در مناطق بالادست و کوهستانی که شیب جریان بسیار تند است، طراحی را با چالش‌های جدی‌تری مواجه می‌کند. همان‌طور که در مقاطع شکل ۱۰ (برش‌های A-A تا C-C) مشاهده می‌شود، در مناطق کوهستانی به دلیل انرژی بالای جریان و جابجایی بار بستری درشت‌دانه، ناگزیر از سیستم‌های کف‌سرریزی همراه با حوضچه ته‌نشینی رسوب استفاده می‌شود. با این وجود، تجمع سریع رسوبات در پشت شبکه اسکرین و درون حوضچه، عملاً مقطع انتقال آب را دچار خفگی کرده و کارایی هیدرولیکی سازه را به شدت کاهش می‌دهد؛ مشکلی که شبکه آبرسانی و انحرافی سد‌هایی مثل دز، درودزن و جیرفت نیز به نوعی با معضلات مزمن بهره‌برداری و هزینه‌های کلان لایروبی آن دست‌به‌گریبان هستند. براساس شکل ۱۱، در طراحی‌های کلاسیک تلاش می‌شود با تعبیه یک دیواره جداکننده، یک حوضچه آرامش نسبی در جلوی کانال ایجاد شود تا از طریق باز کردن دریچه‌های شستشوی تحتانی، رسوبات انباشته شده به پایین‌دست منتقل شوند. با این وجود، به دلیل شرایط هیدرولیکی پیچیده آشفته، این مکانیزم‌ها در مواجهه با بار رسوبی بالای رودخانه‌های کشور کارایی کاملی ندارند و بخش عمده‌ای از بار بستری وارد کانال منشعب می‌شود.

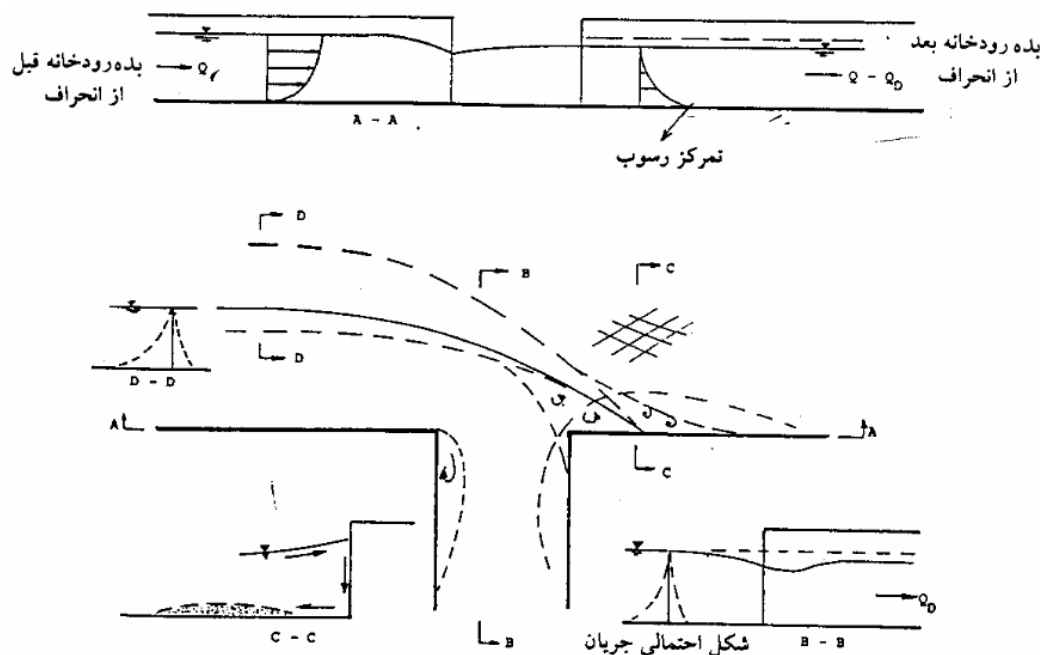


شکل ۱۰: نمونه‌ای از آبگیر رودخانه‌ای کوهستانی (Energy, ۲۰۰۵)



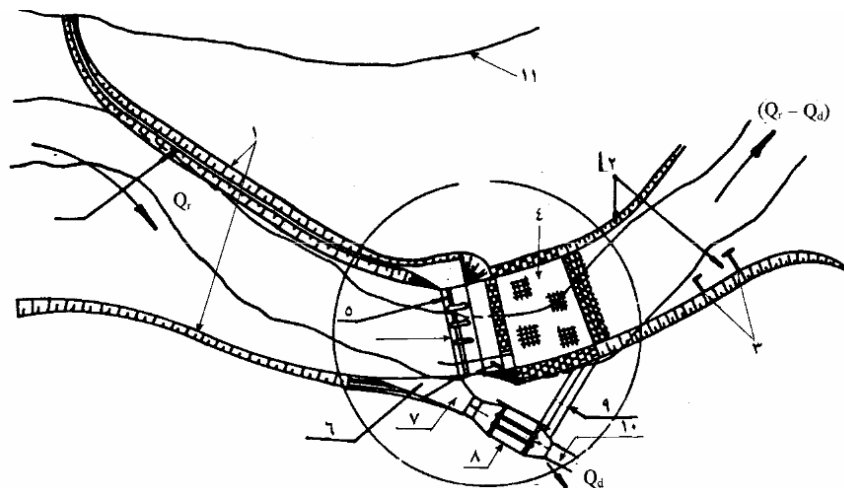
شکل ۱۱: نمونه ای از آبگیر کانال روی رودخانه (Energy, ۲۰۰۵)

پیامدهای رسوب گذاری در آبگیرهای رودخانه ای تنها به کاهش راندمان آبگیری محدود نمی شود؛ رسوبات حمل شده به ویژه بار بستری، پس از انحراف به داخل دهانه آبگیر موجب سایش شدید سازه بتنی دهانه، فرسایش و مستهلک شدن سریع دریچه های کشویی تنظیم آبگیر، و انسداد مجاری آشفال گیر می شوند (عباسی و همکاران، ۱۳۸۲). برای بررسی دقیق تر فیزیک جریان در لحظه انحراف به سمت این سازه ها، مکانیزم حرکت سه بعدی و ته نشینی رسوبات بر اساس هندسه دهانه در شکل ۱۲ تحلیل شده است. همان طور که در مقاطع مختلف شکل ۱۲ (به ویژه مقطع کفی C-C) مشاهده می شود، انحراف ناگهانی و ۹۰ درجه جریان باعث افت شدید گرادیان سرعت شده و بار بستری رودخانه را مستقیماً به کف دهانه آبگیر هدایت می کند. ورود این ذرات رسوبی به کانال های آبیاری پایین دست، ظرفیت انتقال آب کانال را به شدت کاهش داده، مقطع هیدرولیکی را دچار خفگی می کند و سیستم آبرسانی کشاورزی را نیازمند عملیات لایروبی مداوم و پرهزینه می سازد. این پدیده در سال های متوالی تکرار می شود و در غیاب مداخله فنی هدفمند، هزینه های بهره برداری شبکه را به طور فزاینده ای افزایش می دهد (Energy, ۲۰۰۵).



شکل ۱۲: ساختار هیدرولیکی جریان، خطوط جریان جداکننده و تمرکز ته نشینی رسوبات در مقاطع مختلف یک آبگیر جانبی با زاویه انحراف ۹۰ درجه (Energy, ۲۰۰۵)

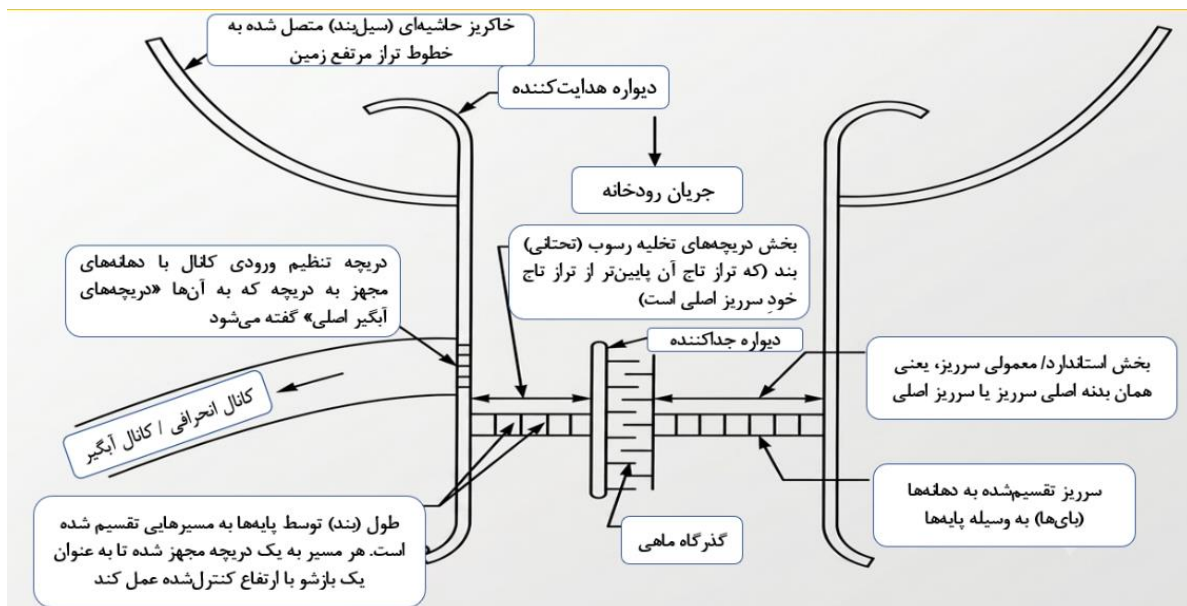
بررسی مکانیسم های هیدرولیکی نشان می دهد که افت شدید گرادیان سرعت جریان در مجاورت سازه ی تنظیم و دهانه ی آبگیر، عامل اصلی سقوط فیزیکی ذرات بار بستری رودخانه و انحراف آن ها به درون کانال است. این پدیده هیدرولیکی مخرب در سال های متوالی تکرار شده و در غیاب یک مداخله فنی هدفمند و اصلاح هندسی سازه، هزینه های بهره برداری و لایروبی شبکه را به طور فزاینده ای افزایش می دهد (Ildarmi & Panahmoghaddam, ۲۰۲۱). در مقایسه با سطح جهانی، اهمیت این مسئله روشن تر می شود. مطالعات بین المللی نشان می دهد که رسوب گذاری یکی از جدی ترین چالش های مهندسی منابع آب در جهان است و هزینه های لایروبی و تعمیر سازه های آبگیری هر ساله میلیارد ها دلار از بودجه کشورها را مصرف می کند. در این میان، کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه خشک — از جمله ایران — به دلیل ماهیت فصلی و سیلابی جریان های رودخانه ای، با غلظت های رسوبی بالاتری نسبت به میانگین جهانی مواجه هستند که طراحی بهینه آبگیرها را از اهمیت ویژه ای برخوردار می سازد (Razvan, ۱۹۸۹). همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، تقسیم دبی رودخانه (Q_r) به دبی انحرافی مورد نیاز (Q_d) وابستگی شدیدی به زاویه بحرانی دهانه و موقعیت قرارگیری آبگیر نسبت به فرسایش کناره ها دارد. در شرایط اقلیمی ایران، تنظیم این نسبت بدون اصلاحات هندسی پیشرفته، ریسک ورود بار



شکل ۱۳: پلان تفکیک هیدرولیکی جریان و پارامترهای دبی انحرافی (Q_d) در یک آبگیر متصل به قوس رودخانه (Energy, ۲۰۰۵)

در این راستا، بهینه‌سازی هندسه آبگیر رودخانه‌ای برای کاهش ورود رسوب از مقرون به صرفه‌ترین و پایدارترین راهکارهای مهندسی است. برخلاف عملیات لایروبی که هزینه‌بر، موقتی و نیازمند تکرار سالانه است، اصلاح طراحی اجزای دهانه آبگیر — شامل زاویه انحراف، عرض دهانه و ارتفاع آستانه — یک راه‌حل دائمی و پیشگیرانه است که مشکل را از همان نقطه ورود جریان مدیریت می‌کند.

مطالعات پیشین تأیید کرده‌اند که اصلاح هندسه دهانه می‌تواند ناحیه جدایش جریان را تا ۹۰ درصد کاهش دهد (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) و ترکیب سازه‌های کنترلی می‌تواند رسوب ورودی را بیش از ۸۰ درصد کاهش دهد (مرادی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶). برای درک ساختار سیستماتیک و جانمایی استاندارد این اجزاء، یک مدل جامع از سازه آبگیر و سد انحرافی در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که در چارچوب تفصیلی شکل ۱۰ مشخص است، سیستم‌های سستی کنترل رسوب بر عملکرد هم‌زمان دیواره جداکننده و دریچه‌های تخلیه رسوب تحتانی متمرکز هستند تا با ایجاد یک حوضچه آرامش موضعی، از ورود بار بستری به کانال انحرافی جلوگیری کنند. با این حال، هنوز یک چارچوب پارامتریک جامع که بتواند اثر هم‌زمان هندسه دهانه آبگیر و نوسانات دبی رودخانه در ابعاد واقعی این اجزاء بهینه‌سازی کند، ارائه نشده است.



شکل ۱۴: اجزاء و الگوی قرارگیری بخش‌های مختلف یک سد انحرافی (Razvan, ۱۹۸۹)

پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب پارامتریک جامع مبتنی بر شبیه‌سازی عددی (CFD) در نرم‌افزار ANSYS Fluent، به این خلأ پاسخ می‌دهد. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان یک دستورالعمل کاربردی مستقیماً در طراحی آبگیرهای رودخانه‌ای جدید و اصلاح ساختار آبگیرهای موجود به کار رود و از هدررفت بودجه‌های کلان عملیاتی و لایروبی جلوگیری نماید.

۴. سوالات و فرضیات تحقیق

۱-۴. سوالات تحقیق

- سوال اول: الگوی رسوب گذاری در دهانه آبگیر جانبی تحت تأثیر هم زمان زاویه انحراف و نسبت دبی انحرافی به چه صورت تغییر می کند و آیا زاویه بهینه برای کاهش رسوب در شرایط هیدرولیکی مختلف ثابت است یا متغیر؟
- سوال دوم: تأثیر هم زمان شکل لبه داخلی دهانه آبگیر (تیز، پخدار، گردگوشه) و زاویه انحراف بر ابعاد ناحیه جدایش جریان و توزیع غلظت رسوب در عمق جریان ورودی به چه صورت است؟
- سوال سوم: غلظت رسوبات بستر در مقاطع مختلف دهانه آبگیر در ترکیب های متفاوت ارتفاع آستانه و زاویه انحراف چه رفتاری دارد و نقطه تعادل بهینه بین کاهش رسوب و حفظ دبی انحرافی کجاست؟
- سوال چهارم: ترکیب بهینه پارامترهای هندسی آبگیر جانبی (زاویه انحراف، عرض دهانه، ارتفاع آستانه و شکل لبه ورودی) که به صورت هم زمان ورود رسوب را حداقل و راندمان دبی انحرافی را حداکثر کند کدام است و روابط بی بعد حاکم بر این بهینه چه هستند؟

۲-۴. فرضیات تحقیق

- در پاسخ به سوالات فوق و بر اساس شواهد هیدرودینامیکی حاصل از مطالعات پیشین، فرضیات پژوهش به شرح زیر تبیین می گردند:
- بررسی های (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) و (Tavakoli et al., ۲۰۱۹) نشان می دهد که ساختار گردابه های بستر و مکانیزم ورود رسوب به شدت به زاویه انحراف وابسته است، اما به دلیل نادیده گرفتن اثر هم زمان دبی انحرافی، همواره تناقضاتی در تعیین این زاویه وجود داشته است. بر این اساس فرضیه اول تبیین می شود:
- فرضیه اول: زاویه بهینه انحراف آبگیر برای حداقل سازی ورود رسوبات یک مقدار ثابت نیست، بلکه ساختار و رتکس های بستر و الگوی رسوب گذاری تابعی متقابل از زاویه انحراف و نسبت دبی انحرافی است.
- طبق یافته های (Ahadiyan et al., ۲۰۲۴)، شکل هندسی لبه ورودی نقش کلیدی در کنترل جریان های ثانویه دارد و تغییر آن می تواند ابعاد ناحیه جدایش جریان را دستخوش تغییر اساسی کند. بر این اساس فرضیه دوم تبیین می شود:
- فرضیه دوم: اصلاح لبه داخلی دهانه آبگیر از حالت تیز به پخدار یا گردگوشه، با کاهش عرض ناحیه جدایش جریان و تضعیف جریان های ثانویه، توزیع غلظت رسوب معلق را در عمق جریان ورودی به طور معنی داری کاهش می دهد.
- بر اساس مطالعات (Esmaeili Varaki et al., ۲۰۱۱)، ارتفاع آستانه ورودی به عنوان یک فیلتر فیزیکی برای بار بستری عمل می کند، اما کارایی آن مستقل از زاویه جریان انحرافی نیست. بر این اساس فرضیه سوم تبیین می شود:
- فرضیه سوم: افزایش ارتفاع آستانه در زوایای مختلف انحراف، مانند یک فیلتر هیدرولیکی مانع از ورود رسوبات دانه درشت بستر می شود، اما نرخ این کاهش و نقطه تعادل آن با دبی انحرافی، به شدت تحت تأثیر زاویه انحراف سازه قرار دارد.
- با توجه به رویکرد نوین (Montaseri & Abadi, ۲۰۲۴) در تلفیق ابزارهای عددی و مدل های تحلیلی، پایش یک فضای طراحی چندبعدی به صورت مجزا امکان پذیر نیست و نیاز به ابزار بهینه سازی پارامتریک دارد. بر این اساس فرضیه چهارم تبیین می شود:
- فرضیه چهارم: ترکیب بهینه پارامترهای هندسی آبگیر جانبی با روش شبیه سازی پارامتریک در ANSYS Fluent قابل شناسایی است و نقاط بهینه پارتو می توانند با اجرای مجدد CFD تأیید فیزیکی شوند.

۱-۷ هدف ها

۵. اهداف تحقیق

۱-۵. هدف کلی:

بهینه سازی عددی آبگیر رودخانه ای به منظور حداقل سازی ورود رسوب، با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی (CFD) در نرم افزار ANSYS Fluent برای تحقق این هدف کلی، اهداف فرعی زیر تعریف شده اند.

۲-۵. اهداف فرعی

- پارامتریک سازی هندسه آبگیر: تعریف و تدوین یک مدل هندسی پایه برای آبگیر جانبی با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل شامل زاویه انحراف (θ)، عرض دهانه (b)، ارتفاع آستانه (h) و شکل لبه هندسی ورودی.

- تولید پایگاه داده هیدرودینامیکی: شبیه سازی سه بعدی جریان و رسوب در نرم افزار ANSYS Fluent برای استخراج الگوهای جریان، ابعاد ناحیه جدایش، گردابه های بستر و نسبت رسوب ورودی در سناریوهای مختلف
- اعتبارسنجی: صحت سنجی و اعتبارسنجی مدل عددی فلوئنت با استفاده از داده های آزمایشگاهی معتبر پیشین جهت تضمین دقت پایگاه داده تولید شده (به ویژه مقالات کلیدی).
- توسعه مدل جایگزین سریع^۷: ساخت مدل پیش بین بر پایه داده های CFD با استفاده از روش های آماری و تحلیلی برای پیش بینی رفتار رسوبات در فضای چندبعدی طراحی بدون نیاز به شبیه سازی های مکرر.
- بهینه سازی چندهدفه: یافتن نقاط بهینه پارتو جهت برقراری تعادل میان دو هدف متضاد «حداقل سازی ورود رسوب» و «حداکثرسازی راندمان دبی انحرافی».
- تایید نهایی اپتیمم - Re-run: اجرای مجدد شبیه سازی CFD در فلوئنت برای نقاط اپتیمم یافت شده جهت تایید فیزیکی نتایج هوش مصنوعی.
- دستورالعمل طراحی: ارائه راهنمای کاربردی برای انتخاب هندسه بهینه آبیگر در شرایط هیدرولیکی مختلف، بر اساس نتایج بهینه سازی

۱-۸ چه کاربردهایی از انجام این تحقیق متصور است

۶. چه کاربردهایی از این تحقیق متصور است ؟

نتایج، دستورالعمل های هیدرولیکی و مدل هوشمند توسعه یافته در این پژوهش، می تواند قابلیت کاربرد مستمر در فازهای مختلف مهندسی آب، مدیریت رودخانه ها و سازه های هیدرولیکی کشور را داشته باشد. این کاربردها را می توان در سه محور اصلی دسته بندی نمود:

۱-۶. حوزه طراحی، بهسازی و مهندسی سازه های هیدرولیکی

- تدوین دستورالعمل طراحی آبیگرها و سدهای انحرافی جدید: راهنمای کاربردی برای انتخاب هندسه بهینه آبیگر در شرایط هیدرولیکی مختلف، بر اساس نتایج بهینه سازی استخراج شده از این پژوهش می توانند مستقیماً در فاز مطالعاتی و طراحی سدهای انحرافی جدید در کشور به کار روند و مهندسان مشاور را در انتخاب هندسه بهینه (زاویه انحراف، ارتفاع آستانه، عرض دهانه و مشخصات بند) یاری دهند.
- بهسازی و اصلاح هیدرولیکی آبیگرهای موجود: نتایج این تحقیق می تواند به عنوان مبنایی برای اصلاح هندسی سازه های آبیگر دایره ای در شبکه های آبیاری کشور که در حال حاضر با بحران لای گرفتگی مواجه هستند، بدون نیاز به تخریب و بازسازی کامل سازه (به کمک روش های اصلاح موضعی لبه ها یا دیواره ها) استفاده شود.
- ارتقای راندمان ایستگاه های پمپاژ و آبیگرهای نیروگاهی: بهینه سازی هندسه دهانه آبیگر ایستگاه های پمپاژ و تونل های آبرسانی نیروگاه های برق آبی روی رودخانه های پرسوب، مانع از ورود بار بستری به درون سیستم شده و مستقیماً از سایش پره های توربین، پمپ ها، شیرآلات و دریچه های کنترل جلوگیری می کند (Xu et al., ۲۰۲۴).
- شبکه های آبیاری و زهکشی مدرن: یافته های این پژوهش می تواند به عنوان راهنمای اولیه برای طراحی یا بهبود سازه های آبیگر فرعی مشابه در شبکه های آبیاری کشور، با هدف کاهش ورود رسوب دانه ریز و حفظ راندمان هیدرولیکی، مورد استفاده قرار گیرد؛ هر چند تعمیم قطعی نتایج به شرایط هیدرولیکی و رسوب شناسی متفاوت، مستلزم انجام مطالعات تکمیلی و صحت سنجی میدانی است.

۲-۶. حوزه اقتصادی، مدیریت بهره برداری و محیط زیست

- کاهش چشمگیر هزینه های لایروبی و نگهداری شبکه: با کنترل ذاتی رسوب در نقطه ورود (دهانه آبیگر)، نرخ نهشت رسوب در کانال های انتقال پایین دست کاهش یافته و بالتبع هزینه های نجومی و دوره ای لایروبی مکانیکی و نگهداری زیرساخت ها تعدیل می شود.
- سازگاری زیست محیطی و حفظ مورفولوژی رودخانه: بهینه سازی هندسه آبیگر از منظر طرد رسوب، علاوه بر حفظ راندمان شبکه، به عبور طبیعی بار رسوبی از روی بند انحرافی و حفظ رژیم مورفولوژیکی و اکوسیستم پایین دست رودخانه کمک شایانی می کند.
- مدیریت منابع آب در شرایط بحران خشکسالی: با توجه به تنش آبی جاری در کشور، بهره گیری از نتایج این تحقیق با جلوگیری از انسداد های رسوبی دهانه ها، از هدررفت آب جلوگیری کرده و پایداری تأمین آب شرب و کشاورزی را در شرایط بحرانی افزایش می دهد.

^۷ Surrogate Model

۳-۶. حوزه توسعه دانش فنی بومی و هوش مصنوعی

➤ بومی‌سازی ابزارهای پیش‌بین سریع: چارچوب پارامتریک و مدل متاساز داده‌محور توسعه‌یافته در این تحقیق، پلتفرم و الگوریتم پایه مناسبی را برای بهینه‌سازی هوشمند سایر سازه‌های هیدرولیکی پیچیده (نظیر سرریزها، شوت‌ها، حوضچه‌های آرامش و مجاری تخلیه‌کننده تحت فشار) در مطالعات آبی مهندسی آب کشور فراهم می‌سازد.

۱-۹ استفاده کنندگان از نتیجه پایان نامه (اعم از مؤسسات آموزشی ، پژوهشی ، دستگاههای اجرایی و غیره)

۷. استفاده کنندگان از نتایج پایان نامه

خروجی‌های کاربردی، روابط بی‌بعد طراحی و مدل هوشمند پیش‌بین توسعه‌یافته در این پژوهش، می‌تواند توسط ارگان‌ها، نهادها و بخش‌های مختلف علمی و اجرایی کشور در سطوح زیر مورد بهره‌برداری قرار گیرد:

۱-۷. نهادهای حاکمیتی، اجرایی و دولتی

- وزارت نیرو و شرکت مدیریت منابع آب ایران: جهت به‌کارگیری دستورالعمل‌های نوین طراحی در اسناد بالادستی و ضوابط فنی سازه‌های آبی کشور.
- شرکت‌های آب منطقه‌ای سراسر کشور و سازمان‌های آب و برق استانی (نظیر خوزستان، مازندران، تهران و...): به عنوان کارفرمایان اصلی، جهت بهسازی آبگیرهای دایر و کاهش بودجه‌های عملیاتی لایروبی مخازن و بندهای انحرافی.
- وزارت جهاد کشاورزی و شرکت‌های بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی: جهت حفظ راندمان انتقال آب در کانال‌های درجه ۱ و ۲ و تأمین پایدار آب اراضی کشاورزی.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران: در راستای بهینه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی جانبی در کلان‌پروژه‌های سدسازی و انتقال آب کشور.

۲-۷. بخش خصوصی و مهندسان مشاور

- شرکت‌های مهندسی مشاور در حوزه سدسازی، هیدرولیک و مهندسی رودخانه: جهت استفاده مستقیم از منحنی‌های طراحی استخراج‌شده در فاز مطالعاتی و طراحی هندسی دهانه آبگیرها بدون نیاز به صرف هزینه‌های سنگین شبیه‌سازی مجدد.
- پیمانکاران اجرایی و سازندگان سازه‌های آبی: جهت درک بهتر پدیده‌های رسوبی در کارگاه‌های عمرانی و اصلاحات هندسی موضعی در سازه‌های در دست احداث.

۳-۷. مؤسسات پژوهشی، علمی و دانشگاهی

- مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و پژوهشکده‌های وابسته: جهت ارتقای بانک داده‌های هیدرولیکی کشور در زمینه جریانات انشعابی سه‌بعدی و مدل‌های هوشمند متاساز.
- دانشگاه‌ها و مراکز آموزش عالی کشور: (به‌ویژه دانشگاه‌های پیشرو در این فیلد نظیر دانشگاه تهران، تربیت مدرس، شهید چمران اهواز، صنعتی اصفهان، ارومیه و...) به عنوان پایه‌ای علمی برای توسعه تحقیقات آبی در حوزه تلفیق الگوریتم‌های هوش مصنوعی با مکانیک سیالات محاسباتی (CFD).

۴-۷. سازمان‌های حمایتی، نظارتی و فرابخشی

- سازمان حفاظت محیط زیست کشور: جهت ارزیابی رژیم رسوب رودخانه‌ها در پایاب بندهای انحرافی و تضمین طراحی‌های سازگار با اکوسیستم رودخانه‌ای.
- مدیریت نیروگاه‌های برق آبی کشور: در راستای کاهش استهلاک مکانیکی، جلوگیری از سایش پره‌های توربین و افزایش عمر مفید تجهیزات الکترومکانیکال تحت جریانات غلیظ رسوبی.

۱-۱۰ جنبه جدید بودن و نوآوری طرح در چیست ؟ *

پژوهش حاضر با تمرکز بر بهینه‌سازی پارامتریک هندسه سازه آبگیر جانبی با هدف مهار و کاهش ورود رسوبات، نوآوری‌هایی چندلایه در حوزه مدل‌سازی عددی جریان، تلفیق هوش مصنوعی و هیدرولیک رسوب ارائه می‌دهد. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به بررسی تأثیر یک یا دو پارامتر محدود به صورت مجزا پرداخته‌اند (Mahtabi & Hosseinzadeh, ۲۰۱۲; R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲; Abbasi et al., ۲۰۰۲). این تحقیق با رویکردی ماتریسی، مجموعه‌ای از پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر ورود رسوبات را به صورت هم‌زمان تحلیل و مدل‌سازی می‌کند. نوآوری‌های کلیدی و متمایزکننده این پژوهش عبارتند از:

۸-۱. بررسی پارامتریک هم‌زمان اجزای متعدد هندسی در فضای طراحی چندبعدی

در این تحقیق، اثرات متقابل و هم‌زمان پنج پارامتر مستقل هندسی شامل زاویه انحراف (θ)، پخش‌دگی و گردش‌دگی لبه دهانه آبگیر، ارتفاع آستانه هیدرولیکی (h)، عرض دهانه آبگیر (b) و مشخصات هندسی بند انحرافی برای دستیابی به پیکربندی بهینه با حداقل ورود رسوب بررسی می‌شود. مطالعات پیشین حداکثر دو پارامتر را به صورت هم‌زمان کالبره کرده‌اند (Tavakoli et al., ۲۰۱۹; Montaseri & Abadi, ۲۰۲۴). بنابراین، بررسی هم‌زمان این پنج پارامتر در یک فضای طراحی چندبعدی در حوزه هیدرولیک آبگیرهای جانبی بی‌سابقه است.

۸-۲. حل تناقضات هیدرولیکی پیشینه از طریق واکاوی ماتریسی جریان

یکی از مهم‌ترین خلأهای موجود در ادبیات تحقیق، تناقض آشکار در یافته‌های مطالعات مختلف درباره تعیین «زاویه بهینه انحراف دهانه» است؛ به طوری که (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲) زاویه ۳۰ تا ۴۵ درجه، (Esmacili Varaki et al., ۲۰۱۱) زاویه ۱۱۰ درجه و (Tavakoli et al., ۲۰۱۹) زاویه ۵۰ درجه را بهینه معرفی کرده‌اند. پژوهش حاضر با بررسی هم‌زمان زاویه انحراف در ترکیب با سایر پارامترهای هندسی و جریان، این تناقضات را در یک چارچوب یکپارچه تبیین کرده و اثبات می‌نماید که زاویه بهینه یک عدد ثابت نبوده، بلکه تابعی غیرخطی از سایر متغیرهای مرزی سیستم است.

۸-۳. ارتقای تفکیک ساختارهای چرخشی سه‌بعدی در فضای پارامتریک گسترده

با به کارگیری مدل آشفتگی پیشرفته $k - \omega SST$ در بستر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در نرم‌افزار ANSYS Fluent، این تحقیق به شبیه‌سازی ریزساختارهای هیدرولیکی، ناحیه جدایش جریان^۸، تنش برشی بستر، جریانات ثانویه و مسیر حرکت سه‌بعدی ذرات رسوب می‌پردازد. این مدل آشفتگی در مطالعات اخیر، بالاترین دقت را در تفکیک جریان‌های انشعابی توأم با جدایش شدید نشان داده است (Ahadiyan et al., ۲۰۲۴; R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲).

۸-۴. توسعه مدل جایگزین سریع در فضای پنج‌بعدی آبگیر

به عنوان یکی از اصلی‌ترین نوآوری‌های این تحقیق، یک مدل پیش‌بین داده‌محور (متاساز) بر پایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های گسترده CFD و با استفاده از روش‌های آماری و تحلیلی پیشرفته توسعه می‌یابد. این مدل ریاضی قادر خواهد بود رفتار دینامیکی رسوبات را در هر نقطه‌ای از فضای پنج‌بعدی طراحی — بدون نیاز به اجرای مجدد شبیه‌سازی‌های سنگین و پرهزینه — CFD با سرعت و دقت بالا پیش‌بینی کند. این رویکرد تلفیقی با چنین وسعت پارامتریکی در حوزه مهندسی آبگیرها سابقه ندارد (Fatehi-Nobarian et al., ۲۰۲۲; Montaseri & Abadi, ۲۰۲۴).

۸-۵. ارائه راهنمای کاربردی برای انتخاب هندسه بهینه آبگیر در شرایط هیدرولیکی مختلف، بر اساس نتایج بهینه‌سازی برای ابعاد واقعی سازه

یکی از جنبه‌های کلیدی و کاربردی نوآوری در پژوهش حاضر، فراتر رفتن از تحلیل‌های محدود آزمایشگاهی و ارائه یک راهنمای جامع و کاربردی طراحی برای مهندسان مشاور و طراحان سازه‌های هیدرولیکی است. بیشتر مطالعات گذشته در مقیاس‌های کوچک آزمایشگاهی یا شرایط هیدرولیکی بسیار ساده و محدود انجام شده‌اند که تعمیم نتایج آن‌ها به ابعاد واقعی پروژه‌های اجرایی همواره با خطای مقیاس و چالش‌های جدی همراه بوده است. در این تحقیق، با تکیه بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های جامع و پارامتریک در محیط انسیس فلونت و تحلیل فضای چندبعدی حاکم بر جریان و رسوب، مجموعه‌ای از الگوهای پیکربندی بهینه استخراج خواهد شد. این دستاورد به عنوان یک خروجی کاربردی، به طراحان این امکان را می‌دهد که با توجه به شرایط هیدرولیکی متفاوت رودخانه (نظیر تغییرات دبی و سرعت جریان)، هندسه، زاویه انحراف، و ابعاد بهینه دهانه آبگیر را به گونه‌ای انتخاب کنند که ورود رسوبات به مجرای انحرافی به حداقل برسد.

^۸ Separation Zone

۹. روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع کاربردی- توسعه‌ای بوده که با رویکرد مدل‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و تحلیل هوشمند کمی انجام می‌شود. چارچوب کلی این پژوهش شامل هشت مرحله اصلی و پیوسته است که الگوریتم اجرایی آن در ادامه به تفصیل تشریح می‌گردد.



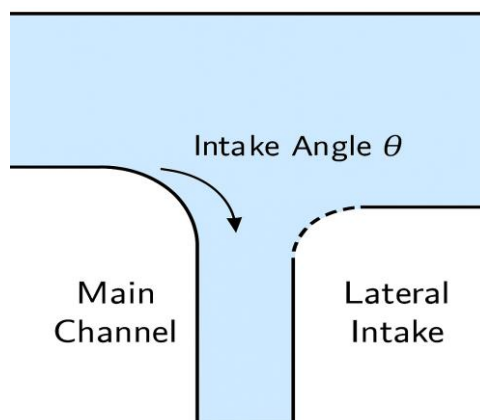
شکل ۱۵: مراحل مدل‌سازی با مدل عددی در تحقیق حاضر

۱-۹. طراحی هندسه پایه و پارامتریک‌سازی فضای طراحی

در این مرحله با استفاده از محیط ANSYS Design Modeler، هندسه مرجع و سه‌بعدی آبگیر جانبی شامل کانال اصلی، کانال انحرافی، دهانه ورودی، آستانه هیدرولیکی و سازه بند انحرافی تعریف می‌شود. شکل ۱۶ هندسه پایه آبگیر جانبی و زاویه انحراف (θ) را در اتصال به کانال اصلی نشان می‌دهد. سپس متغیرهای هندسی به صورت پارامترهای مستقل پایه‌ریزی می‌شوند تا امکان تغییر سیستماتیک آن‌ها فراهم گردد. پارامترهای هدف و سطوح آن‌ها عبارتند از:

- زاویه انحراف دهانه (θ): در بازه ۱۰-۱۱۰ درجه
- نسبت عرض آبگیر به کانال اصلی (b/B): در محدوده متغیر ۰.۱ تا ۰.۳
- ارتفاع نسبی آستانه هیدرولیکی (h/y): در محدوده بدون بُعد ۰.۲ تا ۰.۴

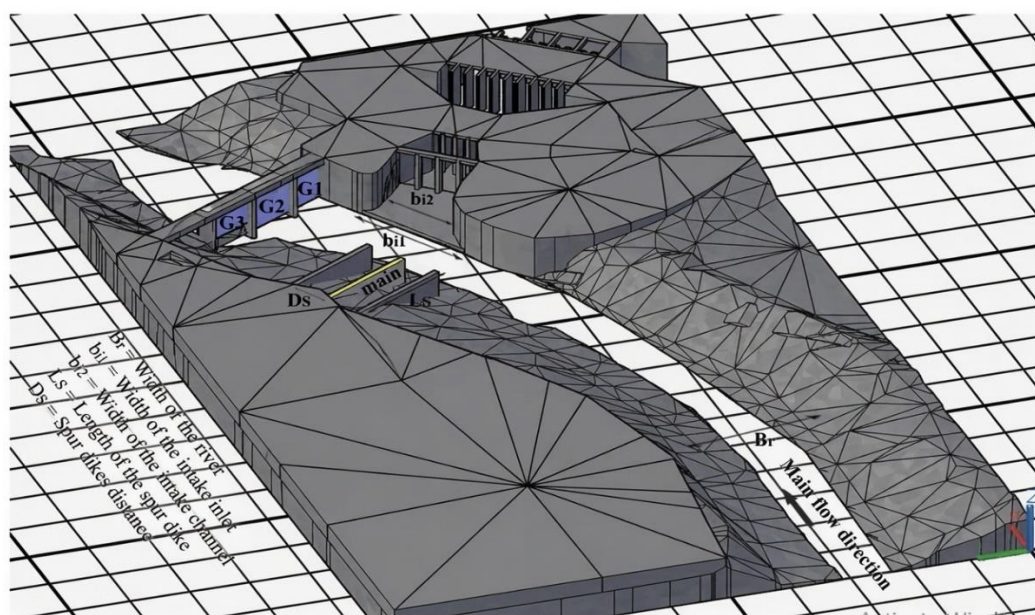
• هندسه لبه داخلی دهانه ورودی : در چهار تیپ لبه تیز^۹، پخدار ۳۰ درجه، پخدار ۴۵ درجه و قوسدار^{۱۰} به منظور پوشش بهینه فضای طراحی چندبعدی و کاهش تعداد سناریوهای عددی، از متدولوژی طراحی آزمایش‌ها (DOE) مبتنی بر طرح باکس-بنکن^{۱۱} استفاده می‌شود. این روش امکان واکاوی اثرات متقابل و غیرخطی پارامترها را با حداقل تعداد اجرا فراهم می‌سازد (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲; Ahadiyan et al., ۲۰۲۲).



شکل ۱۶: هندسه پایه آبگیر جانبی و تعریف زاویه انحراف (θ) در محل اتصال به کانال اصلی

۲-۹. تولید شبکه عددی و آزمون استقلال از مش

شبکه محاسباتی با استفاده از ماژول ANSYS Meshing و با ساختار هیبریدی تولید می‌شود؛ بدین صورت که مش منظم^{۱۲} در کانال اصلی جهت پایداری حل عددی و مش سازمان‌نیافته^{۱۳} در زون انشعاب به دلیل پیچیدگی هندسی اعمال می‌گردد. نمونه‌ای از هندسه و پیکربندی مش مدل سه‌بعدی آبگیر رودخانه‌ای شامل گیت‌های ورودی G^1 تا G^3 ، دایک‌های جانبی و کانال اصلی در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. در نواحی واجد گرادیان‌های شدید سرعت و فشار (مانند لبه دهانه، مجاورت آستانه و زون جدایش جریان)، شبکه به صورت موضعی ریز^{۱۴} می‌شود. جهت تضمین استقلال نتایج از اندازه شبکه، آزمون استقلال از مش^{۱۵} در سه تراز شبکه درشت، متوسط و ریز صورت می‌گیرد. معیارهای کیفی مش شامل چولگی^{۱۶} کمتر از ۰.۸۵ و کیفیت متعامد^{۱۷} بیش از ۰.۱۵ تنظیم می‌شود. همچنین برای ارضای الزامات لایه مرزی در مدل $k - \omega SST$ ، مقدار تراز شبکه‌ای y^+ در محدوده ۱ تا ۵ کالبره می‌گردد (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲; Montaseri et al., ۲۰۲۰).



شکل ۱۷: هندسه و پیکربندی مش مدل سه‌بعدی آبگیر رودخانه‌ای (شامل گیت‌های ورودی G^1 تا G^3 ، دایک‌های جانبی و کانال اصلی) در نرم‌افزار FLOW-۳D (Chenari et al., ۲۰۲۴)

^۹ Sharp

^{۱۰} Rounded

^{۱۱} Box-Behnken Design

^{۱۲} Structured

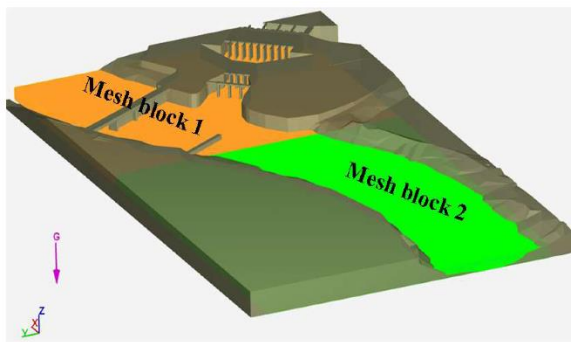
^{۱۳} Unstructured

^{۱۴} Refine

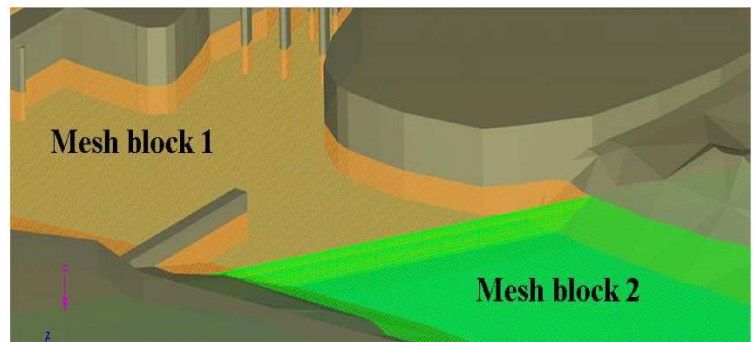
^{۱۵} Grid Independence Study

^{۱۶} Skewness

^{۱۷} Orthogonal Quality



(a)



(b)

شکل ۱۸: مش‌بندی اطراف سازه آبگیر و دایک؛ (الف) نمای کلی از دو بلوک مش‌بندی، (ب) نمای نزدیک دو بلوک مش‌بندی اطراف دهانه ورودی آبگیر و دایک (Chenari et al., ۲۰۲۴)

۳-۹. تنظیمات شرایط مرزی، مدل آشفتگی و هیدرولیک رسوب

- **شرایط مرزی جریان:** مرز ورودی کانال به صورت سرعت ورودی^{۱۸} با پروفیل سرعت لگاریتمی توسعه‌یافته، مرزهای خروجی کانال اصلی و آبگیر به صورت فشار خروجی^{۱۹} با فشار گنج صفر (معادل فشار اتمسفر یا خروجی آزاد)، و دیواره‌ها به صورت شرط عدم لغزش^{۲۰} تعریف می‌شوند. همچنین تراز سطح آزاد جریان با الگوریتم حجم سیال (VOF) ردیابی می‌گردد.
- **مدل سازی آشفتگی:** مدل انتقال تنش برشی $k - \omega SST$ به عنوان فرمولاسیون اصلی آشفتگی انتخاب شده است. این مدل با تلفیق ویژگی‌های مدل $K - \epsilon$ در جریان آزاد و مدل $k - \omega$ در مجاورت دیواره‌ها، دقیق‌ترین بازتولید را از جریان‌های انشعابی توام با جدایش و گردابه‌های سه‌بعدی ارائه می‌دهد (Ahmed et al., ۲۰۲۵; R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲).
- **مدل سازی انتقال رسوب:** فاز رسوب با تلفیق دو متدولوژی شبیه‌سازی می‌شود: مدل فازگسسته (DPM) جهت ردیابی دینامیکی مسیر حرکت ذرات بار بستری و تعیین راندمان طرد رسوب، و مدل دوفازی اوپلری^{۲۱} برای ارزیابی رسوبات معلق و تغییرات مورفولوژیکی بستر^{۲۲} (Montaseri et al., ۲۰۲۰). ذرات رسوب با توزیع سایز روزین-رملر^{۲۳} در محدوده قطر میانه $d_{50} = 0.3 - 3 \text{ mm}$ به سیستم تزریق می‌شوند.

۴-۹. اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی

جهت تضمین قابلیت اتکای کدهای عددی، شبیه‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی مراجع معتبر سنجیده می‌شوند:

- **صحت‌سنجی هیدرولیک جریان:** مقایسه پروفیل‌های سرعت و ابعاد ناحیه جدایش جریان با داده‌های آزمایشگاهی (Abbasi et al., ۲۰۰۲)
 - **صحت‌سنجی الگوی رسوب:** مقایسه نسبت رسوب ورودی به دهانه با دیتای (Esmacili Varaki et al., ۲۰۱۱)
- ارزیابی خطا با شاخص‌های آماری ضریب تبیین R^2 ، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق میانگین (MAE) صورت می‌گیرد؛ به‌طوری‌که هدف، دستیابی به RMSE کمتر از ۵٪ در پروفیل‌های سرعت و کمتر از ۱۰٪ در جابجایی بار رسوبی است (R. A. Al-Zubaidy & A. N. Hilo, ۲۰۲۲).

۵-۹. اجرای ماتریس شبیه‌سازی‌های پارامتریک

پس از تایید صلاحیت مدل عددی، کدهای محاسباتی بر اساس سناریوهای طرح DOE^{۲۳} به صورت پایدار^{۲۴} اجرا می‌شوند. معیار همگرایی، کاهش باقیمانده‌های محاسباتی^{۲۵} به کمتر از 10^{-5} برای تمامی معادلات حاکم است. در هر شبیه‌سازی، پارامترهای خروجی شامل الگوی خطوط جریان سه‌بعدی، ابعاد ناحیه جدایش^{۲۶}، کانتور تنش برشی بستر، غلظت رسوبات معلق و نسبت بار رسوب انحرافی^{۲۷} استخراج می‌گردند.

۶-۹. توسعه مدل جایگزین سریع و بهینه‌سازی چندهدفه

^{۱۸} Velocity-Inlet

^{۱۹} Pressure-Outlet

^{۲۰} No-Slip Wall

^{۲۱} Eulerian Multiphase

^{۲۲} Rosin-Rammler

^{۲۳} Design of Experiments

^{۲۴} Steady-State

^{۲۵} Residuals

^{۲۶} Separation Zone

^{۲۷} Sediment Diversion Ratio

- **گام اول— توسعه مدل جایگزین:** با استفاده از پایگاه داده عددی حاصل از مرحله قبل و به کمک متدولوژی سطح پاسخ (RSM) یا الگوریتم‌های رگرسیون پیشرفته آماری، یک مدل تحلیلی داده‌محور توسعه می‌یابد. این مدل ریاضی قادر است خروجی‌های هیدرولیکی سیستم را در هر نقطه جدید از فضای طراحی پنج‌بعدی، بدون نیاز به حل محاسباتی مجدد CFD، در کسری از ثانیه پیش‌بینی کند.
- **گام دوم— بهینه‌سازی تکاملی:** با قرار دادن مدل جایگزین به عنوان تابع هدف^{۲۸}، فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه با هدف «کمینه‌سازی نسبت رسوب ورودی» و «بیشینه‌سازی دبی انحرافی آبگیر» اجرا شده و جبهه بهینه پارتو^{۲۹} استخراج می‌گردد.

۷-۹. راستی‌آزمایی فیزیکی نقاط بهینه

به منظور اطمینان از عدم انحراف مدل جایگزین در زون‌های بهینه پارتو، مختصات هندسی نقاط بهینه استخراج شده مجدداً به طور کامل در نرم‌افزار ANSYS Fluent شبیه‌سازی عددی می‌شوند. این گام کنترلی حاکم بر روش تحقیق، صحت فیزیکی نتایج بهینه‌سازی ریاضی را به طور قطعی راستی‌آزمایی می‌کند.

۸-۹. استخراج روابط بی‌بعد و ارائه دستورالعمل طراحی

در گام نهایی، با تحلیل رگرسیون چندمتغیره بر روی نتایج، روابط ریاضی بی‌بعد حاکم بر هندسه آبگیر و نرخ ورود رسوب فرموله‌سازی می‌شوند. این روابط در قالب نمودارهای کاربردی طراحی مدون گشته تا تعمیم یافته‌ها به مقیاس‌های واقعی سدهای انحرافی برای مهندسان طراح میسر شود؛ همچنین تحلیل حساسیت^{۳۰} جهت تعیین وزن و میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای هندسی پنج‌گانه بر راندمان طرد رسوب انجام خواهد گرفت.

۱-۱۲. روش و ابزار گردآوری اطلاعات :

۱۰. روش و ابزار گردآوری اطلاعات

گردآوری اطلاعات، داده‌ها و ابزارهای مورد نیاز در این پژوهش، با توجه به ماهیت کاربردی-توسعه‌ای و رویکرد مدل‌سازی عددی آن، طی دو فاز اصلی دسته‌بندی و پیاده‌سازی می‌شود:

۱-۱۰. ابزارها و روش‌های گردآوری داده‌های اولیه

- **روش کتابخانه‌ای و جستجوی دیجیتال:** به منظور تدوین ادبیات تحقیق و بررسی مبانی نظری جریانات انشعابی سه‌بعدی، از پایگاه‌های داده علمی معتبر بین‌المللی و داخلی نظیر *Scopus*, *Springer ScienceDirect*, *Google Scholar*, *Civilica* و مجلات علمی- پژوهشی نشریات هیدرولیک استفاده می‌شود.
- **برداشت داده‌های آزمایشگاهی (مستندات مرجع):** برای فاز اعتبارسنجی مدل عددی، ابزار گردآوری شامل استخراج ارقام، پروفیل‌های سرعت، هندسه خطوط جریان و نرخ رسوب ورودی از جداول و نمودارهای آزمایشگاهی کارهای معتبر گذشته (شامل داده‌های آزمایشگاهی (Abbasi et al., ۲۰۰۲)؛ (Esmaeili Varaki et al., ۲۰۱۱)) است که به کمک نرم‌افزارهای دیجیتالیزر نمودار (مانند *DigitizeIt* یا *WebPlotDigitizer*) با دقت بالا بازیافت می‌شوند.

۲-۱۰. ابزارهای تولید، استخراج و پردازش داده‌های ثانویه

- در این پژوهش، کلیه فرآیندهای شبیه‌سازی، تولید داده و بهینه‌سازی صرفاً در محیط یکپارچه نرم‌افزار ANSYS Fluent و زیرماژول‌های داخلی آن انجام می‌گیرد:
- **پیش‌پردازش هندسه و شبکه محاسباتی:** استفاده از گردش کار Watertight Geometry در محیط Fluent Meshing جهت تعریف هندسه پارامتریک آبگیر رودخانه‌ای و تولید مش‌های پیشرفته Poly-Hexcore با لایه مرزی مناسب (y^+).
 - **حل عددی و تولید دیتابیس هیدرولیکی:** حل گر اصلی ANSYS Fluent مبتنی بر روش حجم محدود برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم مدل آشفتگی ($k - \omega SST$) و انتقال رسوب با استفاده از مدل (DPM)^{۳۱}.
 - **تنظیم هوشمند مدل آشفتگی:** بهره‌گیری از مدل $k - \omega SST$ با قابلیت GEKO^{۳۲} برای تنظیم خودکار ضرایب مدل متناسب با جریان‌های ثانویه و گردابه‌های ناحیه آبگیر.

^{۲۸} Objective Function

^{۲۹} Pareto Front

^{۳۰} Sensitivity Analysis

^{۳۱} Discrete Phase Model

^{۳۲} Generative Evolutionary Knowledge-based Optimizer

- بهینه‌سازی پارامتریک: انجام مطالعات پارامتریک، تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی شکل هندسی آبگیر و دایک‌ها با ابزارهای داخلی Design Exploration و Parametric Study موجود در ANSYS Workbench/Fluent

پس‌پردازش^{۳۳}: استفاده از محیط Results (CFD-Post) در Fluent جهت استخراج کانتورها، خطوط جریان سه‌بعدی، کانتورهای تنش برشی بستر و هیدروگراف جرمی ذرات رسوب ورودی.

- فرآیند شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی هیدرولیکی مسئله به‌طور کامل در محیط ANSYS Fluent و به صورت گام‌به‌گام بر اساس متدولوژی زیر انجام می‌پذیرد:
- گام اول؛ حل فاز پیوسته (سیال آب): جریان هیدرولیکی کانال اصلی و آبگیر جانبی به صورت جریان دوفازی (آب و هوا) با در نظر گرفتن سطح آزاد جریان شبیه‌سازی می‌شود. بدین منظور از مدل حجم سیال (VOF)^{۳۴} با قابلیت گام زمانی ضمنی (Implicit Time Stepping) جهت تضمین ثبات حل استفاده خواهد شد.
 - گام دوم؛ مدل‌سازی ساختار آشفتگی و جریان‌های ثانویه: با توجه به انحراف جریان و شکل‌گیری گردابه‌های شدید در دهانه آبگیر، از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST بهره گرفته می‌شود. ضرایب این مدل با استفاده از قابلیت تنظیم هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین ماژول GEKO (تعیین‌شده در Fluent) تنظیم می‌گردند تا ساختار جریان‌های ثانویه و توزیع تنش برشی بستر با دقت بالا پیش‌بینی شود.
 - گام سوم؛ ردیابی و بارگذاری فاز گسسته (ذرات رسوب): پس از تثبیت فاز پیوسته، ذرات رسوب بر اساس قطر میانه و مشخصات فیزیکی بستر، از طریق مدل فاز گسسته (DPM) به جریان تزریق می‌شوند. شرط مرزی دهانه آبگیر بر روی حالت Escape تنظیم می‌گردد تا امکان ردیابی مسیر ذرات و محاسبه دقیق نرخ جرمی رسوبات ورودی فراهم شود.
 - گام چهارم؛ بهینه‌سازی پارامتریک: نرخ جریان جرمی ذرات رسوب در دهانه آبگیر (DPM Mass Flow Rate) به عنوان تابع هدف اصلی جهت کمینه‌سازی رسوب تعریف می‌شود. سپس با استفاده از ابزارهای داخلی Parametric Study و Design Exploration در محیط Fluent/Workbench، تحلیل حساسیت انجام شده و متغیرهای هندسی (مانند زاویه دهانه آبگیر و ابعاد دایک‌ها) بهینه‌سازی می‌گردند.
 - گام پنجم؛ اعتبارسنجی و تحلیل نتایج: پس از دستیابی به هندسه بهینه، شبیه‌سازی نهایی اجرا شده و نتایج هیدرولیکی و رسوبی با استفاده از ابزارهای پس‌پردازش (Results / CFD-Post) در Fluent استخراج و تحلیل می‌گردند.

۱-۱۳ روش آماری اجرای پایان نامه (در صورت لازم)

جامعه آماری، تعداد نمونه، روش نمونه‌گیری و روش تجزیه تحلیل اطلاعات تشریح گردد.

۱-۱۴ جدول زمانبندی مراحل انجام تحقیق (از زمان تصویب تا دفاع نهایی)

ردیف	مراحل اجرا	زمان
۱	مرور ادبیات	۶ ماه
۲	مدل سازی اولیه	۳ ماه
۳	کدینگ و شبیه سازی	۴ ماه

^{۳۳} Post-Processing
^{۳۴} Volume of Fluid

تحلیل داده ها و نگارش پایان نامه	۴
۶ ماه	

۱-۱۵	فهرست منابع مورد استفاده در نگارش این پیشنهادیه: (فارسی، عربی، لاتین به شرح زیر) طبق استاندارد منبع نویسی مجلات پژوهشی معتبر نوشته شود.
------	--

منابع (References)

- Abbasi, A. A., Ghodsian, M., Habibi, M., & Neyshaburi, S. A. A. S. (۲۰۰۲). Experimental Investigation of the Dimensions of the Vortex Region at the Entrance of Lateral Intakes [بررسی آزمایشگاهی ابعاد ناحیه گردابی در ابتدای آبگیرهای جانبی].
- Abbasi, A. A., Ghodsian, M., Habibi, M., & Neyshaburi, S. A. A. S. (۲۰۰۴). Laboratory Study of the Vortex Zone Dimensions at the Entrance of Lateral Intakes [بررسی آزمایشگاهی ابعاد ناحیه گردابی در ابتدای آبگیرهای جانبی].
- Abbasi, A. A., & Leknejad, M. (۲۰۱۴). The impact of sill and submerged vanes on sediment laden flow at lateral intake. *Irrigation and Water Engineering*, 4(۴), ۱۰۴-۱۱۶.
- Abolghasemi, M. (۲۰۱۲). Effect of Flow Deflection on Sediment Inflow to a ۹۰-Degree Intake in a Sinusoidal River [اثر انحراف (رسوب ورودی به آبگیر با زاویه انحراف ۹۰ درجه در رودخانه سینوسی جریان بر
- Ahadiyan, J., Chenari, S. A., Nadian, H. A., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. (۲۰۲۴). Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(۴), ۶۲۹-۶۴۲.
- Ahmadi, P., & Mohammadi, M. (۲۰۲۴). Numerical Investigation of the Effect of Submerged Plates with 0° and 90° Angles on Scour around a Cylindrical Bridge Pier [بررسی عددی تأثیر صفحه مستغرق با زوایای ۰ و ۹۰ و صفر درجه بر میزان آبستگي پایه پل استوانه ای] The ۲۳rd Iranian Hydraulic Conference, <https://civilica.com/doc/۲۳۱۶۵۸۴>
- Ahmed, K. O., Majeed, H. Q., Amini, A., & Shafaei, H. (۲۰۲۵). Scour prediction at culvert outlets using ansys fluent: influence of inlet blockage, flow rate, and sediment size. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 31(۳), ۵۵۴-۵۷۰.
- Al-Sabea, S. Z., & Hilo, A. N. (۲۰۲۴). The effect of lateral intake slope on sedimentation transport. *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 12(۳), ۱۵۲-۱۶۳.
- Al-Zubaidy, R., & Hilo, A. N. (۲۰۲۲). Numerical Study of Sedimentation and Flow Pattern at the Open Channel Intake. *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 10(۳), ۱۰۵-۱۲۲.
- Al-Zubaidy, R. A., & Hilo, A. N. (۲۰۲۲). Numerical investigation of flow behavior at the lateral intake using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Materials Today: Proceedings*, 56, ۱۹۱۴-۱۹۲۶.
- Ali, J. A., & Khanjani, J. (۲۰۰۶). Optimization of Submerged Vanes for Sediment Control at River Intakes [بهینه‌سازی سیستم صفحات مستغرق جهت کنترل رسوب در دهانه‌های آبگیر رودخانه‌ها]. *Food industry engineering research*, 7(۱), ۱۴۳-۱۵۸.
- Asthana, B. (۲۰۲۶). Intake Structure. In *Planning and Design of Small Hydro Power Projects* (pp. ۲۲۷-۲۴۴). Springer.
- Attarzadeh, A., Ghodsian, M., Ayubzadeh, S. A., & Neyshaburi, S. A. A. S. (۲۰۱۵). Experimental Investigation of the Dimensions of the Vortex Region at the Entrance of Lateral Intakes [مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سازه‌های کنترل رسوب بر
- International Civil Engineering Congress, Tabriz, Iran.
- Barkdoll, B. D. (۱۹۹۷). *Sediment control at lateral diversions*. The University of Iowa.
- Bayrami, M. K. (۲۰۱۲). *Water Transfer Structures* [سازه‌های انتقال آب]. Isfahan University of Technology, Publications Office.
- Best, J. L., & Reid, I. (۱۹۸۴). Separation zone at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(۱۱), ۱۵۸۸-۱۵۹۴.
- Bor, A., Szabo-Meszaros, M., Vereide, K., & Lia, L. (۲۰۲۴). Application of three-dimensional CFD model to determination of the capacity of existing Tyrolean intake. *Water* ۱۶(۵), ۷۳۷ (۲۰۲۴). In.
- Chenari, S. A., Nadian, H. A., Ahadiyan, J., Valipour, M., Oliveto, G., & Sajjadi, S. M. (۲۰۲۴). Enhancing hydraulic efficiency of side intakes using spur dikes: a case study of hemmat water intake, Iran. *Water*, 16(۱۶), ۲۲۵۴.
- Davoudi, L., & Mahmoud Shafaei, B. (۲۰۱۲). Application of Submerged Vanes for Controlling Bed-Load Sediment at Branch Intakes from Trapezoidal Irrigation Canals [کاربرد صفحات مستغرق در کنترل رسوب بار بستر آبگیرهای منشعب از کانال‌های آبیاری [نوزنقه‌ای شکل
- Water and irrigation management*, 1(۲), ۵۹-۷۱.
- Energy, M. o. (۲۰۰۵). *Guide to Sediment Removal Methods in Water Intakes* [راهنمای روش‌های رسوبگیری در آبگیرها]. I. R. o. I. Ministry of Energy.
- Esmacili Varaki, M., Farhoudi, J., & Walker, D. (۲۰۱۱). Study of flow structure and sediment entry to a lateral intake. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*,
- Fatehi-Nobarian, B., Farshidnia, S., & Saneie, M. (۲۰۲۲). Effect of hydraulic and geometrical parameters of skimming wall on controlling sediment entering lateral intakes using harmony search algorithm. *Advance Researches in Civil Engineering*, 4(۴), ۵۵-۷۰.
- Fattahi, H., & Mohammadi, M. (۲۰۲۲). Numerical Modeling of the Effect of Bridge Pier Shape on Bed Shear Stress [مدل سازی [عددی تأثیر شکل پایه‌های پل بر روی تنش برشی بستر
- Fazel Najafabadi, E., & Ayyoubzadeh, S. A. (۲۰۲۵). Effectiveness of Submerged Vanes in Sediment Control to the Intake Channels: A Review and Future Directions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 151(۲), ۰۳۱۲۴۰۰۲.
- Gandashmin, A. S. (۲۰۰۹). Investigation of Turbulent Flow Structure and the Sediment Inflow Mechanism to a Lateral Intake [مطالعه ساختار جریان آشفته و بررسی کیفی مکانیسم ورود رسوب

- [به آبگیر جانبی واقع در قوس رودخانه با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی].
- م. محمدی) هیدرولیک جریان در کانال‌ها و رودخانه‌ها: جریان و فرایندهای حمل در کانال‌ها با شکل هندسی ساده. (۱۳۸۴). Graf, W. H. A., M.S. (۱۳۸۴). *Trans.* دانشگاه ارومیه.
- Haddad, H., Ahmad, E., & Azizi, K. (۲۰۱۷). Numerical simulation of the inlet sedimentation rate to lateral intakes and comparison with experimental results. *Journal of Research in Ecology*, 5(۱), ۴۶۴-۴۷۲.
- Hashid, M., & Eldho, T. (۲۰۲۳). Numerical simulation of air-core surface vortex at critical submergence for dual horizontal intakes. *Journal of Fluids Engineering*, 145(۷), ۰۷۱۲۰۳.
- Honar, T., & Shahraki, S. M. (۲۰۱۴). Effect of Submerged Vanes on Water Diversion Rate in Lateral Intakes [تأثیر صفحات تأثیر سازی تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه سیمینه رود]. *Soil and water knowledge*, 21(۲۴), ۲۰۵-۲۱۴.
- Ildarmi, M., & Panahmoghaddam, M. (۲۰۲۱). Numerical Simulation of the Effect of Morphological Changes at the Confluence of a Drainage Network on the Erosion and Sedimentation Patterns of the Simineh River in Hamadan Using the Fluent Model [شبه سازی تأثیر تغییر مورفولوژی محل تلاقی شبکه زهکشی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه سیمینه رود]. *Quantitative geomorphology research*, 9(۴), ۱۱۲-۱۲۹.
- Izadpanah, Z., & Neyshaburi, S. A. A. S. (۲۰۰۳). Investigation of Sediment Transport in Lateral Intakes at River Bends [بررسی اثر دیوار منحرف کننده جریان با آستانه در کنترل رسوب ورودی به آبگیر جانبی مطالعه آزمایشگاهی]. *Irrigation Science and Engineering*, 35(۳), ۶۹-۸۱.
- Jalili, H., Dalir, A. H., & Zadeh, D. F. (۲۰۱۱). Effect of Intake Entrance Geometry on the Amount and Pattern of Sedimentation in a Lateral Intake [تأثیر هندسه دهانه آبگیر بر مقدار و الگوی رسوب گذاری در آبگیر جانبی]. *Water and Soil Sciences (Isfahan University of Technology)*, 10(۱), ۱۵-۲۸.
- Keshavarzi, A., & Parsi, M. J. K. (۲۰۰۶). Experimental Study of Turbulent Flow Structure and Separation Region, and Comparison with Turbulence Models in a 45° Intake with a Closed End [مطالعه آزمایشگاهی ساختار جریان متلاطم و ناحیه [جداشدگی و مقایسه با مدل‌های تلاطمی در دهانه آبگیر 45° درجه با انتهای مسدود]. *Water and Soil Sciences (Isfahan University of Technology)*, 10(۱), ۱۵-۲۸.
- Mahtabi, G., & Hosseinzadeh, D. (۲۰۱۲). Laboratory Study of the Effect of a Flow-Deflecting Wall with a Sill on Sediment Control at a Lateral Intake [اثر دیوار منحرف کننده جریان با آستانه در کنترل رسوب ورودی به آبگیر جانبی مطالعه آزمایشگاهی]. *Irrigation Science and Engineering*, 35(۳), ۶۹-۸۱.
- Mandal, A., Gautam, H., & Ahmad, Z. (۲۰۲۴). Sediment control and flow redistribution with submerged vanes: a review. *Water Practice & Technology*, 19(۵), ۲۱۹۷-۲۲۱۲.
- Mohammadi, M. (۲۰۰۷). *Applied hydraulics* [هیدرولیک کاربردی]. Mehr parseh.
- Montaseri, & Abadi, J. (۲۰۲۴). Determining the Location and Deflection Angle of Lateral Intakes in U-Shaped Curved Channels [شکل U تعیین موقعیت و زاویه انحراف آبگیرهای جانبی در آبراهه های قوسی]. *Civil Engineering Modares*, 24(۲), ۱۱۱-۱۲۳.
- Montaseri, H., Ghodsian, M., & Dehghani, A. A. (۲۰۰۹). Experimental Study of the Flow Field around Submerged Vanes in Front of a Lateral Intake in a U-Shaped Channel [مطالعه آزمایشگاهی میدان جریان اطراف صفحات مستغرق مقابل دهانه آبگیر جانبی [شکل U در کانال]]. *Agricultural Sciences and Natural Resources*.
- Montaseri, H., Ghodsian, M., Shafieifer, M., Neyshabouri, S. A. A. S., & Dehghani, A. A. (۲۰۰۸). Laboratory Study of the Flow Field and Scour in a 180° Bend with a Lateral Intake [مطالعه آزمایشگاهی میدان جریان و آبستنگی در قوس 180° درجه با [حضور آبگیر جانبی]].
- Montaseri, H., Tavakoli, K., Evangelista, S., & Omidvar, P. (۲۰۲۰). Sediment transport and bed evolution in a 180° curved channel with lateral intake: Numerical simulations using Eulerian and Discrete Phase models. *International Journal of Modern Physics C*, 31(۰۸), ۲۰۵۰۱۱۳.
- Moradinejad, A., Abi, A. H. H., Sanei, S. M., & Younesi, H. (۲۰۱۷). Investigation of the Effect of a Skimming Wall and Spur Dike on Flow Velocity Patterns and Sediment at a Lateral Intake [بررسی اثر دیوار جداکننده و آبشکن بر الگوی سرعت جریان و [رسوب در دهانه آبگیر جانبی]].
- Najafi, M., Manafpour, M., & Mohammadi, M. (۲۰۱۲). Numerical Study of the Effect of the Deflection Angle of Turbulent Flow Deflectors on Flow Reattachment Length [مطالعه ی عددی تأثیر زاویه انحراف دهنده های جریان آشفته، بر روی طول اتصال]. *Iranian Hydraulic Conference*, <https://civilica.com/doc/۱۸۳۲۶۲> [۱۱].
- Naqvi, M., Mohammadi, M. A., & Mahtabi, G. (۲۰۲۲). Investigation of Secondary Flows in Flood Rivers under the Effect of Sinuosity Changes [بررسی جریان های ثانویه در رودخانه های سیلابی تحت اثر تغییر سینوسیته]. *st National Iranian Hydraulic Conference*, <https://civilica.com/doc/۱۶۹۴۹۶۱> [۲۱].
- Naqvi, M., Mohammadi, M. A., & Mahtabi, G. (۲۰۲۴). Study of Transverse Flows and Secondary Currents in Compound Meandering Channel under the Effect of Building Arrangements.
- Neary, V. S., & Odgaard, A. J. (۱۹۹۳). Three-dimensional flow structure at open-channel diversions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(۱), ۱۲۲۳-۱۲۳۰.
- Neary, V. S., Sotiropoulos, F., & Odgaard, A. (۱۹۹۹). Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(۲), ۱۲۶-۱۴۰.
- Oliveira, L. C. S. d., & Lima, I. E. (۲۰۲۵). The impacts of the water intake operation on the hydraulic transients, sediment resuspension and water quality of the largest multi-use reservoir in Latin America. *RBRH*, 30, e۶.
- Pirestani, M., Tabatabaei, M. M., & Barkhordari, N. (۲۰۰۸). Flow Analysis over Lateral Intakes in Curved Channels Using a Physical Model [تحلیل جریان بر روی آبگیر جانبی در آبراهه قوسی با استفاده از مدل فیزیکی].
- Politano, M., Martin, J. E., Lyons, T., & Dober, K. (۲۰۲۰). Numerical modelling of the hydrodynamics and sediment transport near the water intake of the Cardinal power plant. *Journal of hydraulic research*, 58(۵), ۸۵۹-۸۶۶.
- Ramamurthy, A., Qu, J., & Vo, D. (۲۰۰۷). Numerical and experimental study of dividing open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(۱۰), ۱۱۳۵-۱۱۴۴.
- Razvan, E. (۱۹۸۹). River intakes and diversion dams. *Developments in civil engineering*, 25.
- Sajedi, F. M., & Habibi, M. (۲۰۰۴). Experimental Investigation of the Combined Use of Submerged Vanes and Spur Dikes to Improve Water Intake Efficiency [بررسی آزمایشگاهی کاربرد صفحات مستغرق و آبشکن در افزایش راندمان آبگیری]. *The ۵th Iranian*

- Hydraulic Conference, Kerman, Shahid Bahonar University.
- Sajidi, F. M., Omid, M. H., & Younesi, H. (۲۰۰۲). Effect of the Longitudinal Arrangement of Submerged Vanes on Riverbed Morphological Changes Near Gravity Intakes [تأثیر آرایش طولی صفحات مستغرق بر تغییر مورفولوژی بستر رودخانه در مجاورت [آبگیرهای ثقلی]].
- Samani, A. K., & Bagheri, S. (۲۰۱۴). *Design of channels and water transfer structures*. Arkan danesh.
- Saydian, S. M. (۲۰۱۰). *Experimental Investigation of the Effect of Riverbank Slope on Sediment Inflow to Lateral Intakes* [بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب ساحل رودخانه بر رسوب ورودی به آبگیرهای جانبی] Faculty of Water Science and Engineering, Shahid Chamran University]. Ahvaz.
- Simionescu, Ş.-M., Gogoşă, D.-E., Cîrciumaru, G., & Chihaia, R.-A. (۲۰۲۲). Numerical Simulation of Water Flow through an Ecological River Intake. *Hidraulica*(۲), ۴۵-۵۴.
- Su, K. (۲۰۲۶). Water Intakes and Diversion Structures. In *Hydropower Station: Concepts, Theories, and Design Principles* (pp. ۲۴۱-۲۷۱). Springer.
- Tavakoli, K., Montaseri, H., Omidvar, P., & Evangelista, S. (۲۰۱۹). Numerical simulation of sediment transport in a U-shaped channel with lateral intake: Effects of intake position and diversion angle. *International Journal of Modern Physics C*, 30(۰۹), ۱۹۵۰۰۷۱.
- Vaghifi, M., & Tabrizi, H. H. (۲۰۲۵). Effect of Flow Froude Number on Flow Pattern and Scour around Series Spur Dikes in a Straight Reach under Submerged and Emergent Conditions [تأثیر عدد فرود جریان بر الگوی جریان و آبستنگی اطراف آبشکن‌های [سری در مسیر مستقیم در حالت مستغرق و غیرمستغرق]]. *Civil Engineering Modares*, 14(۳), ۷۱-۸۲.
- Varaki, M. E., Farhoudi, J., & Walker, D. (۲۰۰۹). Investigation of flow at a right-angled lateral intake. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,
- Varki, M. E., Farhoudi, J., & Omid, M. H. (۲۰۰۹). Laboratory Study of the Flow Pattern Structure near a ۹۰° Lateral Intake and the Sediment Inflow to It in Diversion Weirs [مطالعه آزمایشگاهی ساختار الگوی جریان انحرافی به دهانه آبگیر جانبی با زاویه ۹۰° در بندهای انحراف آب]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, ۴۹-۶۸.
- Xu, C., Tian, J., Liu, Z., Wang, R., & Wang, G. (۲۰۲۳). Three-dimensional reverse modeling and hydraulic analysis of the intake structure of pumping stations on sediment-laden rivers. *Water resources management*, 37(۱), ۵۳۷-۵۵۵.
- Xu, C., Tian, J., Wang, G., Lian, H., Wang, R., & Hu, X. (۲۰۲۴). Numerical Analysis of Water-Sediment Flow Fields within the Intake Structure of Pumping Station under Different Hydraulic Conditions. *Water*, 16(۵), ۷۷۹.

۲	هزینه های پایان نامه
---	----------------------

الف - آیا این طرح از سازمانهای دیگر تأمین اعتبار شده است؟ ☐ بلی ☐ خیر

در صورت مثبت بودن ، تاریخ تصویب ، میزان اعتبار و نام سازمان را مشخص نمایید.

هزینه های مواد و وسایل (وسایلی که صرفاً" از محل اعتبار طرح تحقیق باید خریداری شوند):								۲-۱
ردیف	نام مواد یا وسایل	مقدار یا تعداد مورد نیاز	مصرفی	غیر مصرفی	ساخت داخل یا خارج	شرکت سازنده	قیمت واحد (ریال)	قیمت کل (ریال)
۱								
۲								
۳								
۴								
						جمع به ریال		

هزینه های خدماتی (برای مواردی که در حوزه تخصص و مهارت و رشته دانشجو قرار ندارد)				۲-۲
نوع مسئولیت	تعداد پرسنل	کل ساعت کار	حق الزحمه در ساعت	جمع به ریال
			جمع به ریال	

				هزینه های مسافرت	۲-۳
مقصد	تعداد سفر	نوع وسیله نقلیه	هزینه های هر سفر	جمع کل به ریال	
جمع موارد کل به ریال					

۲-۴ جمع کل هزینه ها	
ردیف	نوع هزینه
۱	مواد و وسایل
	مبلغ (ریال)

	پرسنل	۲
	مسافرت	۳
	متفرقه (تايپ ، تكتير و تهيه كتاب)	۴
	جمع كل	۵

