



مطالعه هیدرودینامیکی الگوی جریان در اطراف آبشکن ها در بازه های پیچانرودی با استفاده از مدل عددی سه بعدی و به صورت دو فازی

سعیدرضا صباغ یزدی^۱، عطا جواشی^۲،

۱- دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علوم و تحقیقات

syazdi@kntu.ac.ir

خلاصه

در این تحقیق، الگوی جریان در اطراف آبشکن های یک رودخانه پیچان رودی به صورت سه بعدی و دو فازی با بکار بردن معادلات ناویر استوکس و استفاده از دو نوع مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد و $k - \omega$ مورد بررسی قرار گرفته است. حل معادلات به روش حجم محدود صورت گرفته است. همچنین از روش VOF برای حل جریان دو فازی استفاده شده است. برای صحت سنجی نتایج حاصله، از نتایج مدل آزمایشگاه فلوم متعلق به آزمایشگاه هیدرولوژی کاربردی دانشگاه هوکایدو ژاپن که در سال ۲۰۰۴ توسط پروفیسور Giri و همکارانش انجام شده، استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصله نشان می دهد که هر دو مدل مزبور، الگوی کلی میدان جریان در قوس رودخانه را در حد مناسبی شبیه سازی کرده و انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند.

کلمات کلیدی: مدل عددی، بازه های پیچانرودی، تنش برشی بستر، روش VOF، جریانهای چند فازی

مقدمه

یکی از مواردی که در مدیریت رودخانه ها و مهندسی رودخانه بسیار مهم است، تغییرات اتفاق افتاده در شکل ظاهری رودخانه ها از جمله حرکت عرضی بستر رودخانه بر روی زمین های اطراف می باشد و این به دلیل فرسایش شدید کناره های برخی رودخانه ها است که بیشتر در رودخانه های مئاندر (پیچان رود ها) دیده می شود. این مسئله به ظاهر ساده مسبب بر هم ریختن بسیاری از محاسبات مهندسی و تخریب و نابودی بسیاری از سازه های احداث شده در حریم رودخانه ها می شود. فرسایش کناره رودخانه ها به دلیل شرایط هیدرولیکی خاص جریان آب باعث جابه جایی تدریجی و نچندان محسوس بستر رودخانه به سمت سازه های احداث شده در اطراف رودخانه شده و به مرور باعث خرابی آنها می شود. به غیر از این مشکلاتی که گفته شد، جابجایی بستر برخی از رودخانه های مرزی به نوبه خود باعث به وجود آمدن برخی مشکلات سیاسی برای کشورها و دولتها می شود. حرکت جانبی برخی از رودخانه ها که به عنوان مرزهای سیاسی برای کشور ها شناخته شده اند، در حقیقت باعث کاهش وسعت یک کشور و افزایش وسعت کشور دیگر می شود و این همان موضوعی است که باعث حساسیت شدید دولتهایی می شود که به این مشکل بر خورد می کنند.

کشور عزیزمان ایران از جمله کشورهایی است که بر روی رودخانه ارس با کشور آذربایجان مرز مشترک دارد و با این مشکل مواجه شده است. در تقسیم بندی رودخانه ها از نظر پلان، رودخانه ارس یک رودخانه پیچانرودی می باشد. بررسی نقشه های سالهای ۱۳۳۴، ۱۳۷۸ و ۱۳۸۴ نشان می دهد میزان فرسایش در بازه زمانی ۴۴ سال حداکثر ۱۳۵ متر و بطور متوسط در حدود ۱۰۰ متر می باشد که نرخ فرسایش در حدود ۳ متر در سال بوده است. اما بر اساس نقشه برداری کناره رودخانه در منطقه مورد نظر در سال ۱۳۸۴ و مقایسه آن با نقشه سال ۱۳۷۸ مشاهده شد که در این چند سال اخیر نیز میزان فرسایش در این محدوده زیاد بوده، بطوری که در ۶ سال اخیر میزان فرسایش حداکثر ۱۵ متر و بطور میانگین ۸ متر بوده است که نرخ فرسایش ۱/۳۴ می باشد. [۱]

با این اوصاف می توان دریافت که رودخانه ها همواره در معرض فرسایش هستند و لزوم شناخت و تحقیق بر روی الگوی جریان آنها ضروری به نظر می رسد. در بازه های پیچانرودی که از چندین قوس متوالی به وجود آمده اند، یکی از الگوهای پیچیده جریان رودخانه ای به وجود می آید. با ورود جریان

۱ سعیدرضا صباغ یزدی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی تهران
۲ عطا جواشی، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- آب دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علوم و تحقیقات تهران



آب به قوس رودخانه، نیروی گریز از مرکز بر ذرات آب اثر کرده و باعث می شود تا سطح آب در کنار جداره بیرونی بالا رفته و در مقابل، عمق آب در جداره داخلی پایین می آید. در این پدیده اختلاف فشاری بین دو سمت قوس ایجاد می شود که بین اختلاف فشار مزبور، نیروی گریز از مرکز و نیز مقاومت برشی بستر اندرکنشی به وجود می آید. در صورت غلبه اختلاف فشار ایجاد شده بر نیروی گریز از مرکز، جریانی در درون مقطع ایجاد می شود که در نزدیکی سطح آب بسمت جداره خارجی و در نزدیکی بستر به طرف جداره داخلی می باشد و باعث انتقال ذرات از دیواره خارجی به طرف دیواره داخلی می شود. جریان مزبور به جریان ثانویه معروف است که اندرکنش آن با مولفه طولی سرعت باعث ایجاد جریان حلزونی ماندنی در راستای جریان آب می شود که تاثیر فرسایشی شدیدی بر کناره خارجی قوس می گذارد و در عوض باعث رسوب گذاری در کناره داخلی قوس می گردد. [۲]

این فرسایش و رسوب گذاری در امتداد قوس رودخانه به مرور زمان باعث جابه جایی بستر رودخانه به سمت قوس خارجی می گردد و همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، مشکلات فراوانی را از نظر اقتصادی و سیاسی بر کشورها تحمیل می کند و لزوم مطالعه در مورد این گونه جریانها را توجیه می کند.

مروری بر تحقیقات دیگران

محقق بسیاری در مورد الگوی جریان در قوس های مختلف مطالعه کرده اند و نتایج متنوعی در مورد الگوی جریان در قوسهای استاندارد ۹۰ و ۱۸۰ درجه با نسبت R_c/B متفاوت به چاپ رسیده است. گستردگی این مطالعات هم مدل های آزمایشگاهی و هم مدل های عددی را در بر گرفته است. در این قسمت مختصری از تحقیقات انجام شده بیان می شود.

در سال ۱۹۶۶، رزوفسکی [Rosovskii] مابین سالهای ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۱ تحقیقات گسترده ای بر روی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه با نسبت $R_c/B=1$ که در آن شعاع انحناء مرکزی و B عرض کانال بود انجام داد. وی با اعمال تاثیر جریان ثانویه بر معادلات دو بعدی متوسط گیری شده در عمق آب، الگوی جریان در این نوع قوس را، شبیه سازی کرده و به پدیده انتقال حداکثر سرعت به سمت جداره های خارجی و داخلی در طول میدان اشاره کرده است. [۳]

Blanckaert و Graf تحقیقات متعدد آزمایشگاهی و عددی را بر روی الگوی جریان در قوس ۱۲۰ درجه در سال ۲۰۰۱ انجام دادند. در قسمتی از این تحقیقات، مطالعات خود را بر روی الگوی جریان در مقطع عرضی ۶۰ درجه متمرکز کرده و به تشکیل دو سلول چرخشی در این مقطع اشاره کرده اند. دو جریان چرخشی تحت عنوان سلول چرخشی مرکزی و یک جریان چرخشی در خلاف جهت این جریان در نزدیکی قوس بیرونی در مطالعات این دو محقق گزارش شده است.

در ادامه مطالعات Blanckaert در سال ۲۰۰۲ روی خم ۱۲۰ درجه که با بستر متحرک انجام شد، دو چاله را نشان می دهد که چاله عمیقتر، در ناحیه رأس قوس به بعد به وقوع پیوسته است.

Booij در سال ۲۰۰۳، الگوی جریان در یک خم ۱۸۰ درجه بسیار ملایم $R_c/B=10$ را با استفاده از روش گردابه های بزرگ (LES)، مدل سازی کرد. وی معتقد است که جریان ثانویه مزبور باعث می شود که حداکثر سرعت بیشتر از حالت عادی به بستر نزدیک تر شود و همین پدیده باعث آبستنگی و فرسایش موضعی شدید در محل دیواره خارجی به صورت زیر شوئی این دیواره شده و باعث تخریب آن می شود. [۳]

در سال ۲۰۰۴، Giri و همکارانش تحقیقات گسترده ای روی کانال های تشکیل شده از چند خم در دانشگاه هوکایدو انجام دادند که مدل فیزیکی آنها تشابه مناسبی با رودخانه های پیچان رودی واقعی دارد. از آن جمله می توان به رودخانه آیتسو^۱ در هوکایدو ژاپن نام برد. با نگاهی به تحقیقات صورت گرفته در داخل کشور می توان دریافت که بیشتر تحقیقات صورت گرفته بر روی رودخانه های پیچان رودی به صورت آزمایشگاهی بوده است و تحقیقات عددی کمتر مدنظر قرار گرفته است.

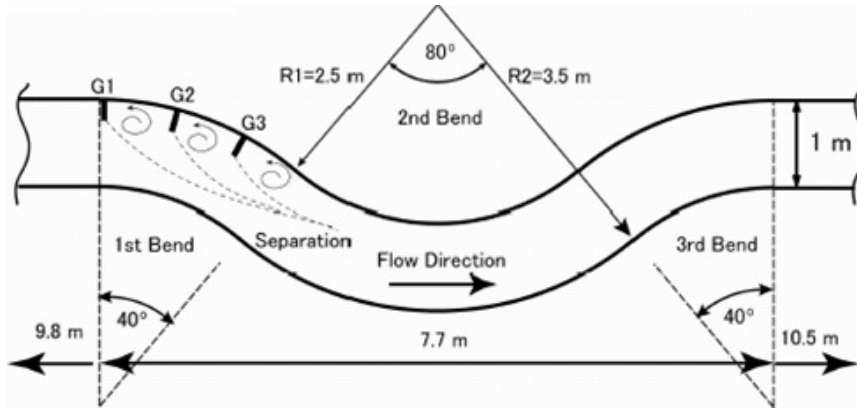
اقبال زاده در سال ۱۳۸۱، به بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه آزمایشگاه هیدرولیک تربیت مدرس (MHL) پرداخته است. نتایج آزمایشهای صورت گرفته توسط این محقق نشان می دهد که در نیمه اول اتفاق خاصی نیفتاده و در نیمه دوم قوس، دو چاله فرسایشی در مقاطع عرضی ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه تشکیل می شود. مقایسه نتایج وی و نتایج گزارش شده توسط اودگارد و سایرین نشان می دهد که با وجود گزارش های متعدد صورت گرفته مبنی بر تشکیل چاله فرسایشی در نیمه اول، این محقق در کار آزمایشگاهی وقوع چاله مزبور را گزارش نکرده است. [۲]

صفر زاده در سال ۱۳۸۳ با استفاده از نتایج پیرستانی الگوی جریان آشفته در قوس ۱۸۰ درجه بدون حضور آبشکن با استفاده از مدل عددی سه بعدی و به صورت تک فازی و با صرفه نظر کردن از تغییرات سطح آب، توسط دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ با استفاده از نرم افزار Fluent مورد بررسی قرار داده است.

مشخصات میدان حل (مدل فیزیکی)

این آزمایش در آزمایشگاه فلوم متعلق به آزمایشگاه هیدرولوژی کاربردی دانشگاه هوکایدو ژاپن در سال ۲۰۰۴ توسط پروفیسور Giri و همکارانش انجام شده است. مشخصات مدل فیزیکی در شکل یک نمایش داده شده است.

¹ Appetsu river



شکل ۱- مشخصات مدل فیزیکی [۶]

شرایط استفاده شده در آزمایش شبیه رودخانه های با شیب ملایم و جریان زیر بحرانی می باشد. جریان در کانال نزدیک به جریان یکنواخت نگه داشته شده است. آزمایشات برای پنج حالت مختلف انجام شده است که در این تحقیق از حالت پنجم که دارای سه آبشکن در زوایای ۱، ۱۵، و ۲۹ درجه روی قوس ۴۰ درجه اول می باشد، برای صحت سنجی مدل عددی استفاده شده است. سرعت ورودی در ابتدای فلوم ۰/۲۱ متر بر ثانیه و عمق تقریبی جریان ۹/۶ سانتیمتر می باشد. آب شکن های غیر مستغرق با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر در همه موارد استفاده شده است. طول آبشکن ها ۲۵ سانتیمتر است که برابر یک چهارم عرض فلوم می باشد. فاصله آبشکن ها از هم حدودا ۷۵ سانتیمتر می باشد. شرایط جریان در تمام موارد یکسان می باشد. عدد رینولدز جریان برای تمام آزمایش ها در حدود ۲۰۰۰۰ است. [۶]

معادلات حاکم بر جریان در روش حل عددی

به طور خلاصه معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم ناپذیر لزج در حالت آشفته را که از معادلات پیوستگی (بقای جرم) و اندازه حرکت (مومنتم) تشکیل شده است، به صورت زیر می توان بیان کرد.
معادله پیوستگی در حالت سه بعدی به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

و معادله اندازه حرکت در جهت X در حالت سه بعدی به صورت

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial (\tau_{ij})}{\partial x_j} \quad (2)$$

بیان می شود که در معادله اندازه حرکت، u_i مؤلفه سرعت در جهت X، P فشار کل، ρ چگالی سیال، g شتاب ثقل در جهت X و τ_{ij} تانسور تنش می باشد که در حالت جریان آشفته به صورت معادله زیر ارائه می شود:

$$\tau_{ij} = \left[\rho (v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \rho (k + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \sigma_{ij} \right] \quad (3)$$

در معادله فوق، V_t و V به ترتیب بیانگر ویسکوزیته سینماتیکی سیال و ویسکوزیته آشفته می باشد. k انرژی جنبشی آشفته بوده و σ_{ij} معرف دلتای کرانکر می باشد. در پارامتر σ_{ij} ، در صورتی که $i = j$ باشد، مقدار σ_{ij} برابر یک و در صورتی که $i \neq j$ باشد، مقدار σ_{ij} برابر صفر می باشد. در این معادله نسبت به معادلات جریان آرام، پارامتر زیر اضافه شده است:

$$-\overline{u_i u_j} = \left[\rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \sigma_{ij} \right] \quad (4)$$

پارامتر $-\overline{u_i u_j}$ که به علت متوسط گیری از



معادلات لحظه ای ناویر استوکس ظاهر شده است و به تانسور تنش رینولدز معروف است. با به وجود آمدن این ترم در معادلات ناویر استوکس، تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات می شود. [۴]

به این علت محققین، معادلات نیمه تجربی جریانهای آشفتنه را برای امکان حل این معادلات ارائه کرده اند و ترم تنش رینولدز را بر اساس یک سری از خواص خود جریان آشفتنه بیان کرده اند. این امر باعث به وجود آمدن مدل‌های مختلف جبری برای مشخص کردن این ترم شده است. معروفترین مدل‌های جبری شناخته شده، مدل‌های $k-\omega$ و $k-\epsilon$ هستند که بر اساس انرژی جنبشی جریان آشفتنه و نرخ هدر رفت آن، ویسکوزیته آشفتگی V_f را مدل می کنند.

شبیه سازی جریان های چند فازی

جریان‌هایی که معمولاً با آنها برخورد می کنیم، فرم‌های پیچیده ای دارند که این امر شبیه سازی آنها را با مشکلاتی روبرو می کند. برای مثال برای حل معادلات ناویر استوکس، باید شرایط مرزی کل محدوده حل داده شود، اما در بعضی از جریانها مانند پرش هیدرولیکی، پروفیل سطح آزاد از ابتدا مشخص نبوده و مجهول مساله است و یا جریانهای حامل رسوب و هوا که به وفور به چشم می خورند، مثل جریانهای گل آلود و پدیده کاویتاسیون. مدل کردن هر کدام از این جریانها تکنیک های ویژه ای را برای حل می طلبند. امروزه روشهای متنوع و بسیار کارآمدی برای مدلسازی انواع جریانها از قبیل جریانهای با سطح آزاد و جریانهای دو فازی با بار رسوبی پیشنهاد شده است. دو روش کلی برای برخورد با جریانهای دو فازی وجود دارد. روشهای اولری- لاگرانژی و روشهای اولری- اولری، که روشهای اولری- اولری خود به سه دسته VOF و Mixture و اولری تقسیم بندی می شود.

از این سه مدل، روش VOF اولین بار توسط Nicholas & Hirt (1975) و Noh & Woodward (1976) ارائه شد و به وسیله Nicholas & Hirt (1981) تکمیل شد. از آن به بعد مدل VOF توجه بسیاری را به خود جلب کرده است و دقت حل آن بسیار بالا رفته است. [۴]

VOF برای شبیه سازی جریانهای لایه لایه می باشد. یعنی جریانهای دو فازی یا چند فازی که در آن فازهای مختلف دارای مرزهای مشخص قابل تشخیص از یکدیگر هستند. به عنوان مثال جریانهای متداول با سطح آزاد یک جریان دو فازی است که فاز هوا به وسیله سطح آزاد از فاز زیرین یعنی آب جدا شده است. فرمول های مدل VOF بر این واقعیت استوار هستند که دو یا چند جریان (یا فاز) با هم مخلوط نشده باشند. برای هر فاز اضافه شده به مدل یک متغیر تعریف می شود که این متغیر در سلولهای محاسباتی بخشی از حجم سلول را به خود اختصاص می دهد. در هر حجم کنترل، مجموع حجم های اختصاص یافته به هر فاز، یک مجموعه واحد را تشکیل می دهند. حجم های اختصاص یافته به هر فاز در داخل حجم کنترل، مقدار حجم های پراکنده شده^۲ هر فاز را در داخل آن حجم کنترل نشان می دهد. به بیان دیگر، اگر حجم پراکنده شده سیال q در سلول محاسباتی با α_q شناخته شود،^۳ حالت زیر را برای آن سیال در سلول محاسباتی خواهیم داشت:

$$(1) \alpha_q = 0 \text{ که در این حالت در سلول محاسباتی سیال } q \text{ وجود ندارد.}$$

$$(2) \alpha_q = 1 \text{ که در این حالت سلول محاسباتی پر از سیال } q \text{ می باشد.}$$

$$(3) 0 < \alpha_q < 1 \text{ که در این حالت سلول محاسباتی شامل سیال } q \text{ و چند سیال دیگر می باشد.}$$

بر پایه ارزش α_q در سلول محاسباتی، مقدار حجم های پراکنده شده و متغیر های سیال در هر حجم کنترل در نواحی مختلف محاسبه شده و بدین طریق فازهای مختلف شبیه سازی می شود. [۷]

شبکه بندی مدل، شرایط مرزی، انفصال معادلات و حل میدان جریان

شبکه بندی مدل در نرم افزار GAMBIT و به صورت سه بعدی انجام شده و برای آن روش SUBMAP استفاده شده است. همچنین برای مش ها شکل های مختلفی وجود دارد که در این مدل مش بندی نوع مکعبی استفاده شده است. در این کانال کوچکترین مش محاسباتی $8/67262010^7 m^3$ و بزرگترین مش محاسباتی $2/40001910^4 m^3$ در نظر گرفته شده است و کل حجم محاسباتی کانال $5/3931000 m^3$ می باشد. کل مش های مکعبی در نظر گرفته شده برای کانال حدود 115704 عدد می باشد. در کانال طراحی شده، برای ابتدای کانال، دو سطح جداگانه در نظر گرفته شده است که در پایین کانال یک سطح ورودی برای آب و در بالای کانال یک سطح ورودی برای هوا در نظر گرفته شده است. نوع شرط مرزی برای آب Velocity inlet در نظر گرفته شده است و سرعت آب هم بر اساس اطلاعات گرفته شده از مدل فیزیکی حدود 0.21 متر بر ثانیه می باشد. برای هوا هم همان شرط مرزی در نظر گرفته شده است و سرعت هوا یک دهم سرعت آب فرض شده است. در این قسمت برای تعریف نوع سیال از ضریبی استفاده می شود که به Volume fraction factor معروف است. با انتخاب یک برای این ضریب نرم افزار سیال را آب و با انتخاب صفر برای ضریب آن را هوا می شناسد. لازم به ذکر است که این ضریب از ویژگی های مدل چند فازی Vof است که قبلاً

¹ Volume of Fluid

² Volume fraction factor



توضیح داده شده است. همچنین از آنجا که در این تحلیل از مدل آشفتگی $k-\omega$ و $k-\epsilon$ استفاده شده است، مقادیر این پارامترها از فرمول های تجربی زیر محاسبه شده و در تنظیمات نرم افزار وارد شده است. پارامترهای مدل های آشفتگی از فرمول های تجربی زیر محاسبه می شود: [۲]

$$I \equiv \frac{\sqrt{u'^2}}{u_{ave}} = 0.16(\text{Re})^{-\frac{1}{8}} \quad (5)$$

$$k = \frac{3}{2}(u_{ave} I)^2 \quad (6)$$

$$l = 0.07L \quad (7)$$

$$\epsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^2}{l} \quad (8)$$

که در این فرمولها I شدت آشفتگی، k انرژی جنبشی آشفتگی، ϵ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی، l مقیاس طول آشفتگی و L قطر هیدرولیکی و C_{μ} برابر ۰/۰۹ می باشد. برای محاسبه ω هم از فرمول زیر استفاده می شود:

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (9)$$

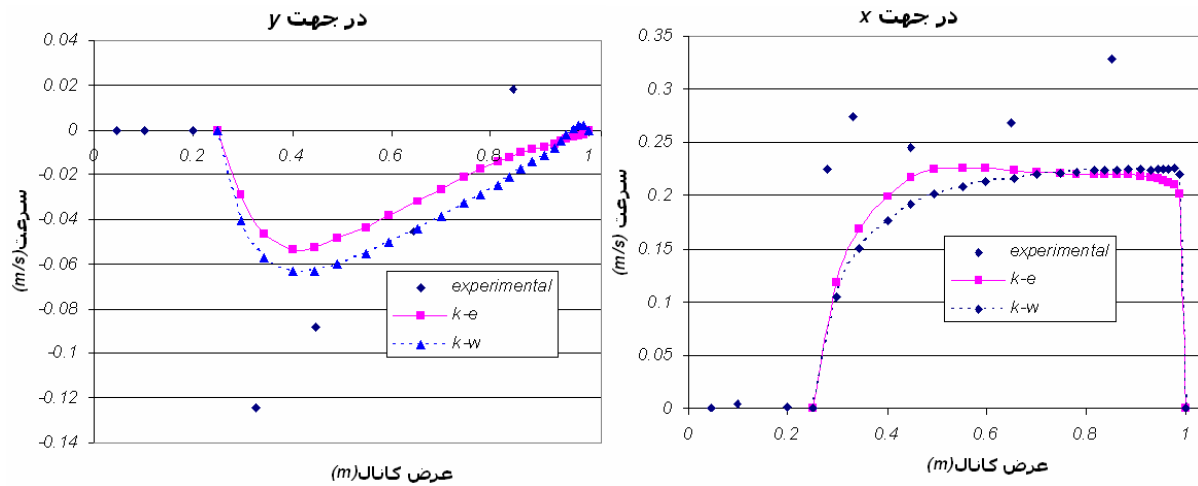
همچنین u_{ave} سرعت متوسط جریان در ورودی است که برابر ۰/۲۱ متر بر ثانیه می باشد و Re عدد رینولدز جریان است که حدود ۱۶۸۲۴ به دست می آید که نشان دهنده آشفتگی بودن جریان است. در انتهای کانال هم مانند ابتدای کانال از دو سطح خروجی استفاده شده است و شرط مرزی Outflow برای هر دو سطح در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی با بررسی مراجع مختلف بر شرط مرزی فشار صفر ترجیح داده شده است. [۸] مقدار ضریب Flow rate weighting برای هر دو سطح برابر یک در نظر گرفته شده است. انتخاب عدد یک به این معنی است که برای هر دو سیال آب و هوا اجازه داده می شود، با تمام دبی موجود از تمام سطح خروجی به راحتی خارج شوند. کاهش این ضریب به این معنی است که تمام دبی آب و هوا نمی توانند از سطح خروجی تعریف شده خارج شوند و تنها یک نسبت خاص که همان ضریب در نظر گرفته شده است، می تواند از سطح خروجی خارج شود. برای بالاترین سطح کانال هم شرط مرزی تقارن Symmetry در نظر گرفته شده است، که این امر باعث می شود گرادینان سرعت عمود بر این سطح صفر در نظر گرفته شود و سرعت های مماسی بر روی سطح هم بدون هیچ اصطکاک بر روی سطح بلغزند. برای دیوارها هم در دو متر ابتدایی کانال شرط مرزی Symmetry و در بقیه کانال برای دیوارها شرط مرزی Wall در نظر گرفته شده است. در دیوارها شرط مرزی عدم لغزش No slip در نظر گرفته شده است و بر اساس اطلاعات به دست آمده از مدل فیزیکی ارتفاع زبری صفر در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن شرط عدم لغزش در دیوار، از حرکت المان سرعت در روی سطح دیوار جلوگیری شده و سرعت آن صفر می شود.

همانطور که ذکر شده است، از مدل Vof برای شبیه سازی مدل چند فازی جریان استفاده شده است که در آن از هوا به عنوان فاز اول و از آب به عنوان فاز دوم استفاده می شود. ضریب Volume fraction factor که نشان دهنده پر یا خالی بودن سلول محاسباتی است برای آب یک و برای هوا صفر در نظر گرفته شده است. چگالی هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و چگالی آب ۹۹۸/۲ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. همچنین لزجت دینامیکی برای هوا $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ و برای آب 0.001003 kg/ms در محاسبات وارد شده است. برای مدل آشفتگی از مدل دو معادله ای $k-\omega$ و $k-\epsilon$ استفاده شده است و در مدل $k-\epsilon$ از قوانین استاندارد دیوار بهره گرفته شده است. در این تحقیق از قابلیت های نرم افزار Fluent استفاده شده و برای حل معادلات میدان جریان از روش احجام محدود بهره گرفته شده است. برای انفعال بخش انتقالی معادلات حاکم از روش آپویند مرتبه دوم SOU^1 استفاده شده و جهت کوپل کردن ترمهای سرعت و فشار، از الگوریتم Simple استفاده شده است و برای انفعال پارامتر فشار روش PRESTO! به کار گرفته شده است و حل میدان جریان به صورت سه بعدی تا رسیدن باقیمانده ها به مقدار 10^3 ادامه داده شده است. [۵]

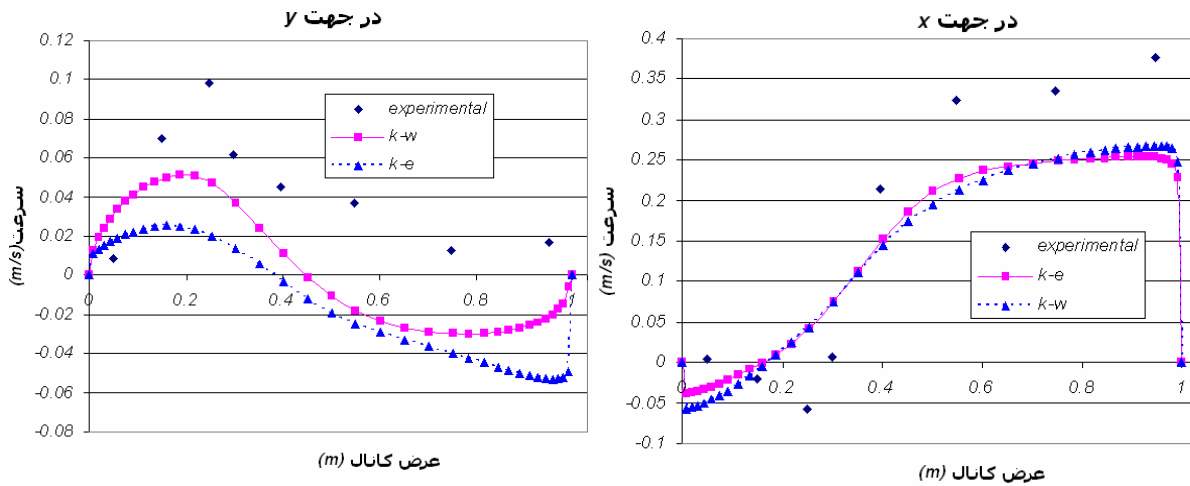
ارائه نتایج مدل عددی

برای نمونه نتایج مدل عددی بر روی سه مقطع یک، ۱۲/۵ درجه و ۴۰ درجه بر روی قوس ۴۰ درجه اول با مدل فیزیکی مقایسه می شود. مقادیر پارامتر سرعت در جهت X و Y برای مدل های عددی و فیزیکی بر اساس شکل های ۳، ۲ و ۴ ارائه شده است.

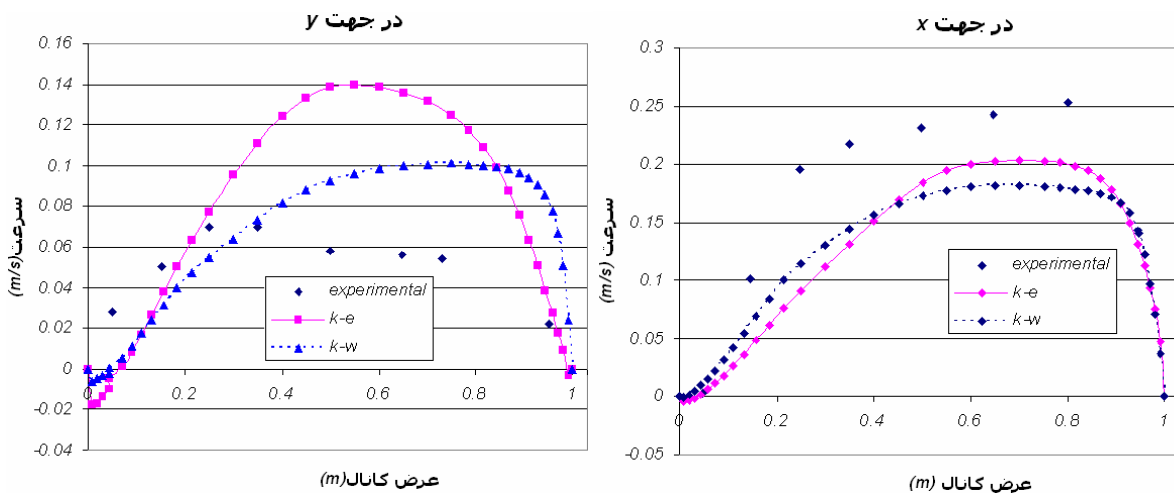
¹ Second order upwind



شکل ۲- نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی بر روی زاویه یک درجه در جهت x و y .



شکل ۳- نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی بر روی زاویه 12.5 درجه در جهت x و y .



شکل ۴- نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی بر روی زاویه 12.5 درجه در جهت x و y .

برای مقایسه بین نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی جدولهای ۱ و ۲ به شرح زیر ارائه شده است.

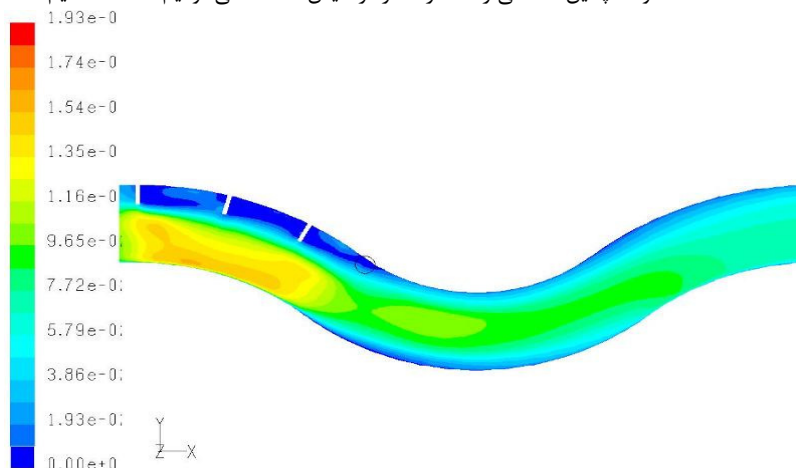
جدول ۱ - مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای پارامتر سرعت در جهت x

مقطع(درجه)	درصد خطا برای مدل k-e	درصد خطا برای مدل k-w	بیشترین اختلاف در مدل عددی k-e	بیشترین اختلاف در مدل عددی k-w
یک	6/79	7/59	0/1086	0/1239
12/5	1/86	1/87	0/1248	0/1110
40	۵/۸۹	5/65	0/1042	0/0816

جدول ۲ - مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای پارامتر سرعت در جهت y

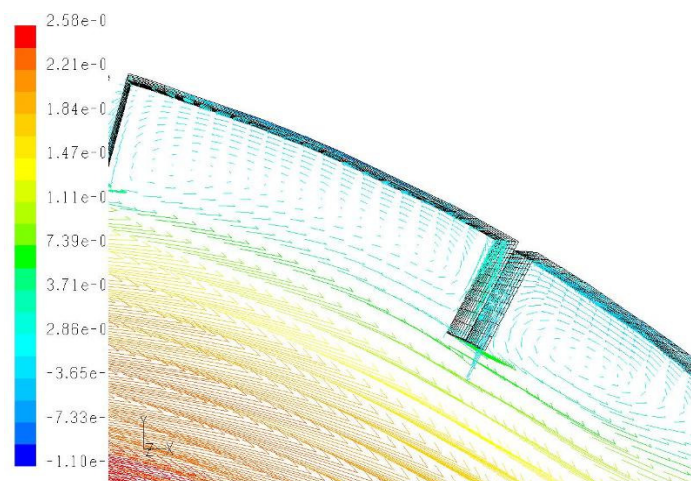
مقطع(درجه)	درصد خطا برای مدل k-e	درصد خطا برای مدل k-w	بیشترین اختلاف در مدل عددی k-e	بیشترین اختلاف در مدل عددی k-w
یک	3/40	2/60	0/0774	0/0672
12/5	8/00	21/010	0/162	0/1519
40	9/33	12/310	0/1283	0/1532

از مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، این دو مقطع می توان دریافت که نتایج مدل عددی مطابقت قابل قبولی با مدل آزمایشگاهی داشته و تغییرات سرعت در مقاطع مختلف کانال به طور مناسبی مدل شده است [۵]. همچنین با بررسی تنش های برشی بستر کانال، مناطقی از کانال را که دیوار های آبشکن توانسته اند محافظت کنند و همچنین مناطقی را که در خطر فرسایش هستند می توانیم مشاهده کنیم.



شکل ۵- تنش های برشی بستر کانال در نواحی مختلف

با مروری بر تنش های بستر کانال به راحتی می توان تاثیرات مثبت احداث دیوارهای آبشکن را مشاهده کرد. همانطور که از شکل هم بر می آید، تنش های برشی بستر در اطراف دیوارهای آبشکن بسیار کم و در حد صفر می باشد، که باعث عدم فرسایش کانال در این نواحی می شود. همچنین به دلیل انحراف آب کانال به قوس روبه روی آبشکن ها و کاهش مقطع عبوری جریان، تنش های برشی در آن ناحیه افزایش یافته و در نتیجه احتمال فرسایش و ایجاد چاله فرسایشی بالا رفته است. البته بعد از اولین قوس، در نزدیکی دیواره کانال تنش برشی بالایی دیده نمی شود و بیشترین تنش برشی در مرکز کانال و به صورت یکنواخت دیده می شود که در این صورت احتمال فرسایش دیواره کانال کاهش یافته و پایداری آنها حفظ می شود. در مجموع تاثیر احداث دیوار های آبشکن، حتی در انتهای کانال پیچانرودی نمایان است و این کارایی بالای این سیستم را در مقابل فرسایش نشان می دهد. رسوبگذاری نیز یکی دیگر از تاثیرات احداث آبشکن ها می باشند. با ورود جریان به داخل میدان آبشکنها، گردابهایی ایجاد می شود که باعث کاهش سرعت جریان در این نواحی شده و در نتیجه باعث رسوب ذرات معلق در آب می گردد. این رسوب گذاری باعث احیاء دیوارهای فرسایش یافته کانال می گردد و عاملی برای پایداری بیشتر آنها می شود. [۵] در شکل ۶ بردارهای سرعت ایجاد شده در میدان آبشکنها نشان داده شده است که چگونگی تشکیل گردابها را نمایش می دهند.



شکل ۶- بردارهای سرعت ایجاد شده در میدان آبشکنها

نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از مدل ها می توان در خصوص نتایج زیر بحث نمود:

- ۱- انطباق نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی در داخل کانال تقریباً خوب بوده و مدل عددی تهیه شده توانسته است تغییرات پارامترهای سرعت را در مقاطع مختلف کانال پیش بینی کند.
- ۲- در قوس ۴۰ درجه اول که محل احداث آبشکن ها بوده است، تنش برشی بستر در میدان آبشکنها به شدت کاهش یافته است که باعث رسوب گذاری در میدان آبشکنها شده و محافظت از دیواره آبشکنها می گردد.
- ۳- به دلیل احداث آبشکنها در ابتدای قوس ۴۰ درجه اول، جریان آب به دیواره داخلی قوس متمایل شده است که باعث فرسایش احتمالی این دیواره خواهد شد و به دلیل افزایش تنش برشی بستر احتمال ایجاد چاله فرسایشی پیش بینی می شود. این انحراف در جریان آب و فرسایش، برای باز گرداندن رودخانه به بستر اصلی خودش در مناطقی که رودخانه ها به عنوان مرزهای بین المللی کشورها به شمار می آیند و به دلیل فرسایش قوس خارجی، بستر رودخانه جابه جا شده است، مفید می باشد.
- ۴- احداث آبشکنها در ابتدای قوس ۴۰ درجه اول باعث کاهش فرسایش دیوارهای پایین دست شده و تنش برشی بستر را به طور یکنواخت در وسط مقطع کانال توزیع کرده است. این عامل باعث کاهش تغییرات عرضی بستر کانال می گردد.

مراجع

- ۱- مهندسین مشاور لار. گزارش مطالعات مرحله ۲ طرح ساماندهی رودخانه ارس غربی. مهرماه ۱۳۸۴.
- ۲- صفرزاده، ۱۳۸۳. شبیه سازی عددی الگوی جریان در آبگیری جانبی از در قوس ۱۸۰ درجه. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- ابوالقاسمی، م. مکان یابی آبگیرها در پیچان رودها و تاثیر انحراف جریان بر روی موقعیت آن. مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس سراسری دانشجویان مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران - آبان ۱۳۸۴
- ۴- خادمی، م. امید، م. هورفر، ع. معرفی نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی، Fluent. کارگاه آموزشی مدلسازی در آبیاری و زهکشی ۲۴ آذرماه ۱۳۸۴
- ۵- جواشی، ع. ۱۳۸۶. شبیه سازی الگوی جریان در اطراف آبشکن ها در رودخانه های پیچانرودی با استفاده از نرم افزار Fluent، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه علوم و تحقیقات

6- S.Giri, Y. Shimizu, B. Surajate, 2004. Laboratory Measurement and Numerical Simulation of Flow and Turbulence in a Meandering-Like Flume With Spurs. Flow Measurement and Instrumentation 15(2004) 301-309. 2004 Elsevier Ltd

7- Fluent 6.2 User's Guide. January 2005

8 -Tarek M, Salaheldin, Jasim Imran, M Hanif, 2004. Numerical Modeling of Three-Dimensional Flow Field Around Circular Piers. Journal of Hydraulic Engineering ASCE