

بررسی تأثیر زبری موضعی بر ضریب انتشار عرضی آلودگی در یک کانال مستطیلی مستقیم

مجید عزیزپور پیرسرائی^۱ و ابراهیم امیری تکلدانی^{۲*}

چکیده

بررسی فرایندهای اختلاط و انتقال در رودخانه‌ها به دلیل نقش آن‌ها در انتشار و توزیع عرضی و طولی آلودگی‌ها از جمله فعالیت‌های مهم در برنامه‌های مدیریت منابع آب است. در بین فرایندهای اختلاط، پس از پدیده انتشار طولی، فرآیند انتشار عرضی آلودگی تأثیرگذارترین پارامتر محسوب می‌شود. در این پژوهش، نتایج حاصل از یک بررسی آزمایشگاهی درخصوص مقدار تغییرات در ضریب انتشار عرضی آلودگی به واسطه تغییر در زبری موضعی در یک کانال مستطیلی مستقیم ارائه شده است. نتایج آزمایش‌ها مؤید این مطلب است که عامل اصطکاک و عمق جریان، نقش مؤثری در مقدار ضریب انتشار عرضی آلودگی دارند به طوری که با افزایش مقدار عامل اصطکاک، ضریب اختلاط عرضی افزایش و در نتیجه طول اختلاط کامل کاهش یافته و در فاصله کمتری رقیق‌سازی انجام می‌شود. همچنین در بیشتر موارد افزایش مقدار سرعت جریان بر توانایی حمل آلودگی با جریان افزوده و در نتیجه از میزان ضریب اختلاط عرضی آلودگی کاسته شده و طول اختلاط کامل افزایش می‌یابد. براساس نتایج آزمایشگاهی، معادله‌ای برای تعیین ضریب انتشار عرضی ارائه شد. میانگین خطای نسبی به دست آمده برای معادله ارائه شده ۰/۰۵۹ است که نشان دهنده دقت خوب آن است. برای توسعه کاربرد نتایج برای شرایط مختلف، با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده، توانایی نرم‌افزار FLUENT در شبیه‌سازی شرایط مختلف بررسی و مشخص شد این نرم‌افزار دارای دقت خوبی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرآیند اختلاط آلودگی در رودخانه‌ها است

واژه‌های کلیدی: ردیاب، طول اختلاط کامل، سرعت برشی، ضریب پخشیدگی، نرم‌افزار FLUENT.

ارجاع: عزیزپور پیرسرائی م. و امیری تکلدانی ا. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر زبری موضعی بر ضریب انتشار عرضی آلودگی در یک کانال مستطیلی مستقیم. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹: ۵۹-۶۷.

۱- مربی گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فن‌آوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: amiri@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۰۷

مقدمه

محاسبه نرخ پخش مواد و غلظت آن‌ها در کانال‌های روباز به طور معمولاً بر پایه حل معادلات بقاء جرم استوار است. حل‌های تحلیلی موجود نیز فقط برای جریان‌های یکنواخت در کانال‌های مستقیم بوده و در شرایط هندسه پیچیده‌تر کانال یا جریان‌های غیریکنواخت نیاز به روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم است. در ارتباط با کانال‌های مستطیلی مستقیم پژوهش‌گران مختلفی اقدام به اندازه‌گیری ضریب پخش عرضی کرده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فاکتور اصطکاک مقدار این ضریب نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که معادله مشخصی بین دو پارامتر ضریب انتشار عرضی و نسبت عرض به عمق مشاهده نمی‌شود. از آن جمله اوکویه (۱۹۷۰) در مطالعات خود نشان داد که با کاهش نسبت عرض به عمق میزان ضریب انتشار عرضی افزایش می‌یابد و از طرفی افرادی همچون فیشر (۱۹۶۸) معتقدند که معادله مشخصی بین این نسبت و ضریب انتشار عرضی وجود ندارد. فیشر (۱۹۶۹) معادله زیر را برای بیان تأثیر خم رودخانه‌ها بر ضریب پخشیدگی عرضی ارائه داد:

$$\frac{\varepsilon_y}{Hu_*} \propto \left(\frac{u}{u_*}\right)^2 \left(\frac{H}{R_c}\right)^2 \quad (1)$$

در این معادله ε_y ضریب پخشیدگی عرضی، u سرعت متوسط جریان، H عمق آب و u_* سرعت برشی و R_c شعاع انحنا است، همچنین ثابت تناسب برابر ۲۵ می‌باشد. فیشر و همکاران (۱۹۷۹) براساس بررسی‌های آزمایشگاهی در کانال‌های مستقیم (بدون انحنا و خم) و تحت شرایط یکنواخت طولی معادله تجربی زیر را برای تخمین ضریب اختلاط عرضی به دست آوردند:

$$\varepsilon_y = 0.15 H u_* \quad (2)$$

فیشر و همکاران (۱۹۷۹) همچنین گزارش کردند که در صورت افزایش ضریب ۰/۱۵ به ۰/۶ در معادله (۲)، می‌توان از آن برای تخمین ضریب پخش عرضی در رودخانه‌ها بدون توجه به شعاع انحنای رودخانه استفاده نمود.

رادرفورد (۱۹۹۴) با جمع‌آوری داده میدانی دریافت که مقدار ε_y/Hu_* بین ۰/۱ تا ۰/۲۶ متغیر است. دنگ و همکاران (۲۰۰۱) با بررسی سری داده‌های بی‌بعد جمع‌آوری شده توسط رادرفورد معادله زیر را برای تخمین

ضریب پخشیدگی در کانال‌های بدون انحنا ارائه دادند، که با معادله فیشر هم‌خوانی دارد.

$$\frac{\varepsilon_y}{Hu_*} = 0.145 \quad (3)$$

همچنین دنگ و همکاران (۲۰۰۱) برای محاسبه ضریب پخش عرضی معادله زیر را به دست آوردند:

$$\frac{\varepsilon_y}{Wu_*} = \frac{0.145}{W/H} \quad (4)$$

با توجه به موارد ذکر شده در بالا دیده می‌شود که اندازه کانال و شرایط هیدرولیکی متفاوتی توسط پژوهش‌گران مختلف اختیار شده است. کاشفی پور و فالکونر (۲۰۰۲) معادله جدیدی را توسعه دادند که در آن ضریب انتشار طولی آلاینده (D_L) را با وسیله پارامترهای ابعادی و آنالیز رگرسیون، به پارامترهای هیدرولیکی اصلی رودخانه، از قبیل عمق، عرض، سرعت و سرعت برشی ارتباط دادند. آن‌ها با استفاده از ۸۱ داده صحرایی از ۳۰ رودخانه در ایالات متحده آمریکا مشاهده کردند که:

$$D_L = 10.612 H u \left(\frac{u}{u_*}\right) \quad (5)$$

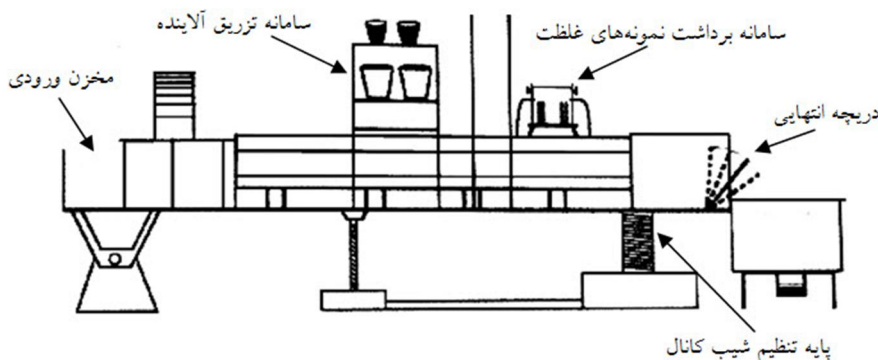
که در این معادله، D_L ضریب انتشار طولی آلاینده بوده و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

چاو (۲۰۰۰) پژوهش‌هایی در ارتباط با ضریب بدون بعد اختلاط عرضی در یک کانال مستطیلی روباز در شرایط مختلف زبری بستر و جریان انجام داد. چئونگ و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی پارامترهای مؤثر بر پدیده انتشار آلاینده در مجاری روباز و رودخانه‌ها پرداختند. آهسان (۲۰۰۸) با انجام آزمایش در یک رودخانه کوچک در دهلی معادلات موجود ضریب‌های انتشار را مورد مقایسه قرارداد و گزارش کرد که معادلات دنگ و همکاران (۲۰۰۱) و کاشفی پور و فالکونر (۲۰۰۲) دارای دقت بهتری نسبت به بقیه روابط ارائه شده هستند. جاعل و موسوی جهرمی (۱۳۸۵) به بررسی ضریب اختلاط عرضی در فلوم‌های آزمایشگاهی و رودخانه‌ها پرداختند. از آنجا که افزایش زبری در بستر و جداره‌های مجاری موجب افزایش آشفستگی و کاهش طول اختلاط کامل می‌شود پورآبادی و همکاران (۱۳۸۶) و همچنین سعادت‌پور و حیدرپور (۱۳۸۸) به بررسی تأثیر زبری موضعی بر ضریب اختلاط عرضی آلودگی در یک کانال مستطیلی پرداختند. زرگر و صالحی نیشابوری (۱۳۸۸) به مقایسه دو مدل برای

مواد و روش‌ها

کانال آزمایشگاهی

در این پژوهش از کانال آزمایشگاهی در آزمایشگاه مرکزی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران استفاده شد. کانال مستطیلی شکل به طول ۷/۳۰ متر و عرض ۰/۶ متر است که روی سکوی فلزی به طول ۱۵/۴۵ متر و عرض ۳/۵۵ متر قرار گرفته است. این سکو دارای یک عدد تکیه‌گاه مفصلی و دو عدد تکیه‌گاه غلتکی است. تکیه‌گاه پایین‌دستی برای تغییر شیب فلوم به یک جک الکترومکانیکی مجهز شده است. نمایی از فلوم مذکور و تجهیزات آن در شکل ۱ آمده است. در این پژوهش از مقدار شیب مثبت ۰/۰۰۱۵ به صورت ثابت استفاده شده است.



شکل ۱- نمایی شماتیک از کانال آزمایشگاهی

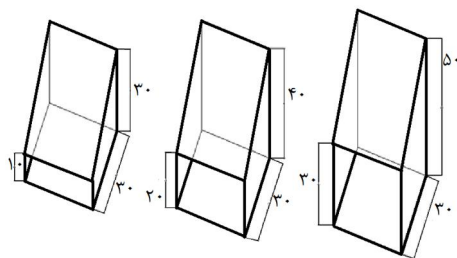
مقطع تمامی بلوک‌ها مربعی و به ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر است. آرایش‌های گوناگون بلوک‌ها، سبب ایجاد یک سری خطوط جریان منحصر به فرد در اطراف بلوک‌ها شده که هر کدام به نوعی در افزایش پدیده اختلاط عرضی مؤثر بودند. براساس شکل قرارگیری بلوک‌ها دو آرایش مورد استفاده شد. آرایش کلی اول (A) و آرایش کلی دوم (B) در شکل ۳ نشان داده شده است. در این پژوهش مقدار دبی جریان و فاصله قرارگیری زبری موضعی از محل تزریق، متغیرهایی بودند که مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور بلوک‌های مذکور در فاصله‌های ۱۳۵ و ۳۶۵ سانتی‌متری از محل تزریق نصب شدند و در هر مورد آزمایش‌های لازم در دبی‌های ۲۰، ۳۰ و ۳۵ لیتر در ثانیه، انجام و ضریب‌های اختلاط عرضی محاسبه شد.

شبیه‌سازی پخش و انتقال غلظت در رودخانه‌ها پرداخته و پورمقدم و کوچک‌زاده (۱۳۸۹) اثر زبری را بر ضریب‌های انتشار و پخشیدگی مواد محلول در مقاطع مرکب بررسی کردند.

پژوهش‌های اشاره شده در بالا به طور عمده در کانال‌های آزمایشگاهی با عرض کم و در شرایط تزریق ردیاب از وسط کانال انجام شده است. پس برای شرایط تزریق ردیاب از جداره کانال و نیز کاهش اثر جداره‌های کانال روی مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب انتشار عرضی، این نیاز احساس می‌شد که آزمایش‌های جدیدی در یک کانال آزمایشگاهی با عرض بیشتر انجام شود. همچنین برای بررسی اثرات زبری بر ضریب پخش عرضی آلاینده و نیز طول اختلاط کامل، زبری‌های مصنوعی در بستر کانال در چیدمان‌های مختلف ایجاد شده و نتایج حاصله مورد مطالعه قرار گرفت.

زبری‌های مورد استفاده

در این پژوهش برای ایجاد زبری بستر در کانال مورد استفاده از یک سری بلوک با مقطع مربع و شیب‌دار در سطح بالایی استفاده شد. شکل ۲ نمایی از بلوک‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از بلوک‌های مورد استفاده در پژوهش (ابعاد به میلی‌متر است)

در معادله (۷) M_L/M_B نسبت خم (نسبت مناندر)، L_S/L تراکم ناهمواری و K_S/H ارتفاع نسبی ناهمواریها و R_e عدد رینولدز جریان است. همچنین ε نماینده ضریب بدون بعد انتشار عرضی است. لازم به ذکر است که بیشتر معادلات ارائه شده، ضریبهای بدون بعد پخش عرضی را تابعی از نسبت عرض به عمق و نسبت سرعت به سرعت برشی می‌دانند به عبارت دیگر:

$$\varepsilon = f_3 \left(\frac{W}{H}, \frac{u}{u_*} \right) \quad (۸)$$

نحوه محاسبه سرعت برشی جریان

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش با تعیین سرعت برشی جریان با استفاده از قانون لگاریتمی سرعت، فاکتور اصطکاک محاسبه شد. توزیع عمومی سرعت برای بسترهای صاف و زبر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{yu_*}{\nu} \right) + B_1 \quad (۹)$$

(برای بستر زبر)

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{y}{K_S} \right) + B_2 \quad (۱۰)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، k ثابت فون کارمن، y عمق مورد نظر، و B_1 و B_2 مقادیر ثابت می‌باشند. برای محاسبه u_* معادلات بالا را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

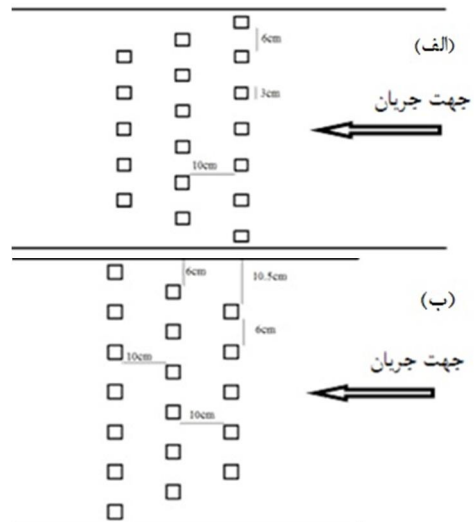
$$u = \frac{u_*}{k} \ln(y) + B_1' \quad (۱۱)$$

$$u = \frac{u_*}{k} \ln(y) + B_2' \quad (۱۲)$$

اگر دو معادله بالا در مقیاس نیمه‌لگاریتمی رسم شوند، خطی به دست می‌آید که شیب آن u_*/k است. حال اگر از آن قسمت از پروفیل سرعت برداشت شده در آزمایشگاه که از توزیع لگاریتمی سرعت ($k_S < y < 0.2h$) پیروی می‌کند خطی برازش داده شود، شیب آن u_*/k خواهد بود. برای مثال در شکل ۴ تغییرات سرعت در مقابل لگاریتم طبیعی (\ln) عمق مربوط به یکی از آزمایش‌ها رسم شده است.

بنابراین همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود:

$$\frac{u_*}{k} = 0.0080 \rightarrow u_* = 0.0032 \text{ m/s} \quad (۱۳)$$



شکل ۳- نمایی از آرایش‌های کلی نوع A و B بلوک‌ها

آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر بر ضریب پخش را می‌توان در ۳ دسته کلی به صورت زیر بیان کرد:

خصوصیات جریان

در این دسته می‌توان به سرعت متوسط (u)، عمق آبراهه (H)، سرعت برشی (u_*)، شعاع هیدرولیکی (R)، شدت تلاطم جریان و شتاب ثقل اشاره کرد.

پارامترهای مربوط به زبری و شکل هندسی مقطع

این دسته شامل عرض سطح آب (W)، شعاع انحناء (R_C)، ضریب انحناء (S)، زاویه انحناء (θ)، عرض خم (M_B)، طول خم (M_L)، ارتفاع زبری (K_S)، نوع بستر، ناهمواری‌های بستر و فرم بستر.

خصوصیات مربوط به سیال

از این دسته می‌توان به لزجت دینامیکی (μ) و جرم حجمی سیال (ρ) اشاره کرد.

ارتباط بین ضریب انتشار عرضی و پارامترهای ذکر شده در بالا را می‌توان به صورت معادله (۶) بیان نمود:

$$D_z = f(\rho, \mu, g, u, u_*, W, R_c, S, \theta, M_L, M_B, T, H, K_S, L_S, L) \quad (۶)$$

و در نهایت با توجه به تئوری باکینگهام می‌توان ارتباط بین پارامترها را با معادله به شرح زیر نشان داد:

$$\varepsilon = f_2 \left(\frac{W}{H}, \frac{u}{u_*}, \frac{M_L}{M_B}, \frac{L_S}{L}, \frac{R_c}{W}, R_e, \frac{K_S}{H}, S, \theta \right) \quad (۷)$$

رادرفورد (۱۹۹۴) نشان داد که در معادله (۱۴) واریانس توزیع غلظت عرضی از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_z^2(x) = \frac{\int_{z=0}^b (z - \bar{z})^2 s(x, z) dz}{\int_{z=0}^b s(x, z) dz} \quad (15)$$

که در آن \bar{z} به صورت زیر است:

$$\bar{z}(x) = \frac{\int_{z=0}^b zs(x, z) dz}{\int_{z=0}^b s(x, z) dz} \quad (16)$$

در معادلات بالا Z فاصله عرضی محل برداشت نمونه از کناره کانال، \bar{z} فاصله عرضی مرکز ابر آلودگی از جداره کانال، b عرض کانال و $S(x, z)$ غلظت نمونه برداشت شده است. در یک کانال یکنواخت، که ردیاب از جداره‌های آن خارج نمی‌شود، واریانس عرضی غلظت به صورت خطی با زمان افزایش می‌یابد و سرعت تزریق ثابت است. این بدان معنی است که معادله (۱۴) می‌تواند به فرم تفاضل‌های محدود به صورت زیر تخمین زده شود (رادرفورد، ۱۹۹۴):

$$D_z = \frac{1}{2} V_x \frac{\sigma_z^2(x_2) - \sigma_z^2(x_1)}{x_2 - x_1} \quad (17)$$

که در آن V_x سرعت در راستای جریان (سرعت طولی) است و به دلیل اینکه کانال یکنواخت است ثابت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین اگر نمودار واریانس غلظت در برابر x رسم شود شیب خط مربوطه برابر خواهد بود با:

$$\frac{2D_z}{V_x} = \text{شیب خط واریانس غلظت در مقابل فاصله} \quad (18)$$

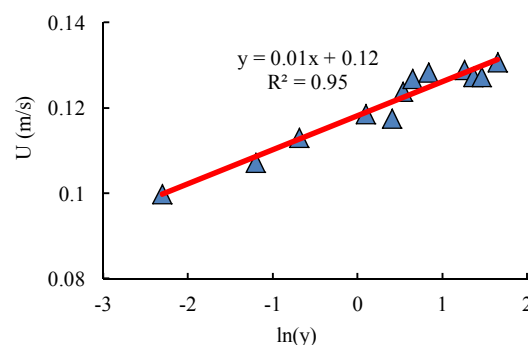
و در نتیجه از روی آن مقدار ضریب انتشار عرضی (D_z) به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از معادله زیر (رادرفورد، ۱۹۹۴) که بیانگر طول اختلاط کامل در حالت تزریق از کناره است، مقدار طول اختلاط کامل آلودگی محاسبه شد.

$$L = 0.536 \frac{uW^2}{D_y} \quad (19)$$

در معادله (۱۹) D_y ضریب انتشار عرضی آلودگی و L طول اختلاط کامل هستند.

شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل FLUENT

در این مرحله از آنجا که به دلیل محدودیت‌های زمانی و نیز مالی، امکان بررسی شرایط مختلف در آزمایشگاه وجود ندارد برای توسعه نتایج حاصل از این پژوهش امکان استفاده از نرم‌افزار FLUENT بررسی شد. نرم‌افزار



شکل ۴- تغییرات سرعت در مقابل عمق در مقیاس لگاریتمی

تزریق آلاینده

با توجه به محدودیت‌های موجود در زمینه ابزار اندازه‌گیری غلظت، از محلول نمک با غلظت تقریبی ۲۷ گرم در لیتر استفاده شد. برای اندازه‌گیری غلظت نمونه‌های برداشت شده از جریان و همچنین غلظت ماده ردیاب داخل مخزن تزریق از دستگاه EC متر استفاده شده است. برای هر آزمایش و در هر بار تزریق، از منبع ردیاب نمونه‌برداری شده و غلظت نمونه‌ها با دستگاه بالا اندازه‌گیری شد. قابل ذکر است که نمونه‌برداری‌ها در دو مقطع در پایین دست محل تزریق به فاصله‌های ۱۳۵ و ۳۶۵ سانتی‌متری از آن انجام شد. برای نمونه‌برداری از یک مقطع، یک شبکه‌بندی تشکیل شد به گونه‌ای که هشت نقطه در عرض و هفت تراز عمقی مختلف در هر مقطع مورد ارزیابی قرار گرفت. بنابراین در هر مقطع ۵۶ نمونه از جریان آب و غلظت آن‌ها به دست آمد. قبل از هر نمونه‌گیری غلظت آب عبوری از کانال مشابه روش مذکور اندازه‌گیری شد و به عنوان غلظت اولیه در نظر گرفته شد. اختلاف غلظت اولیه از غلظت نقطه‌ای به دست آمده، نمایانگر غلظت ماده‌ی ردیاب پخش شده در هر نقطه است.

روش محاسبه ضریب انتشار عرضی

در آزمایش‌هایی که تزریق ماده ردیاب در جریان‌های یکنواخت انجام می‌گیرد، روش کلاسیکی تعیین ضریب اختلاط عرضی، نرخ تغییر مکانی پروفیل ردیاب است که در معادله (۱۴) بیان شده است.

$$D_z = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \quad (14)$$

در معادله بالا D_z ضریب انتشار عرضی، σ^2 واریانس توزیع غلظت و t زمان انتشار آلاینده است.

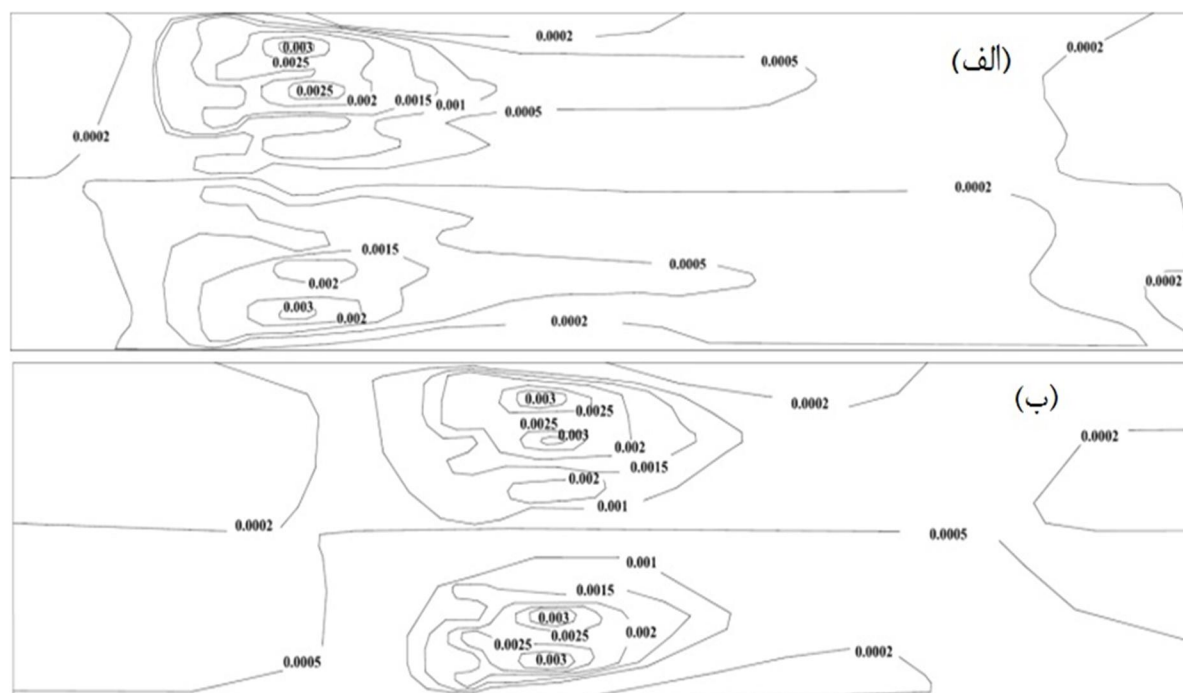
سرعت و فشار، طرح Power Law برای انفصال جملات جابجایی معادلات مومنتم و طرح آپویند مرتبه اول (First Order Upwind) برای انفصال جملات جابجایی معادلات آشفتگی استفاده شد. گام زمانی لازم برای حل معادلات با توجه به روند همگرایی در این شبیه‌سازی ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

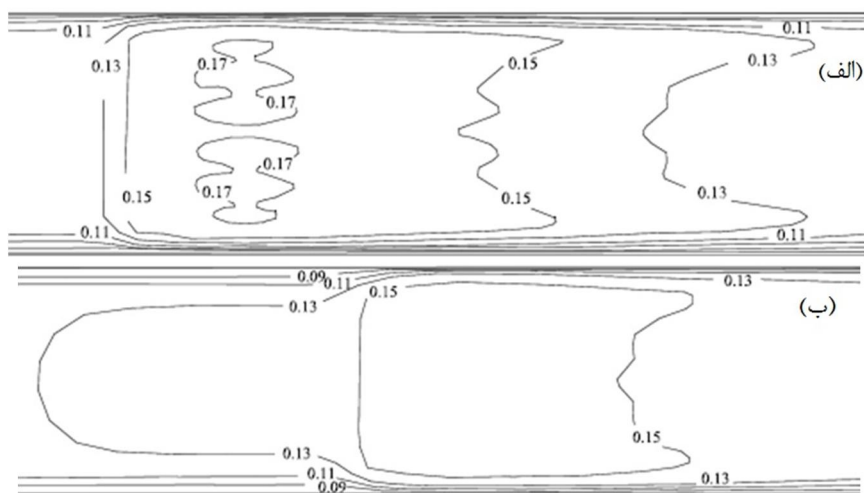
نتایج شبیه‌سازی عددی جریان

در شکل ۵ و ۶ به ترتیب، پربندهای سرعت عرضی و طولی ایجاد شده در عمق ۱۰ سانتی‌متری از جریان و در محدوده‌ی قرارگیری بلوک‌های کف ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اطراف بلوک‌ها یک سری آشفتگی‌های موضعی در جریان ایجاد می‌شود. این آشفتگی می‌تواند به‌عنوان عاملی برای انتشار بهتر آلاینده مدنظر قرار گرفته و با توجه به آن محل مناسب برای تزریق آلاینده تعیین شود. می‌توان در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب سطحی این فاصله را به گونه‌ای تعیین کرد که از زبری موضعی و آشفتگی ایجاد شده با آن برای کاهش طول مورد نیاز اختلاط کامل بهره گرفته شود.

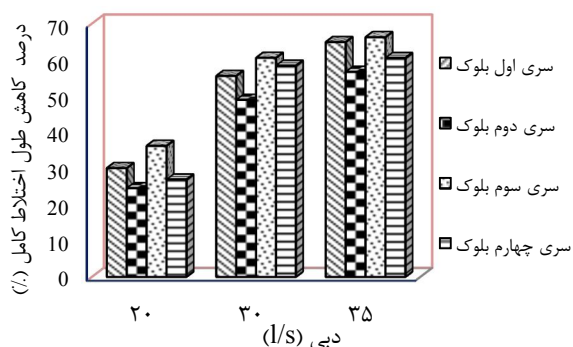
FLUENT مبتنی بر اصول اساسی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مانند بقای جرم، مومنتم و انرژی بوده و دارای قابلیت بالایی برای تحلیل عددی جریان سیال در هندسه‌های پیچیده است. این نرم‌افزار از معادلات ناویر-استوکس در تحلیل جریان و در صورتی که جریان آشفته باشد، از معادلات تنش رینولدز در حل معادلات ناویر-استوکس استفاده می‌کند. برای انفصال‌سازی این معادلات از روش حجم محدود بهره می‌برد. برای ساخت هندسه مدل، نرم‌افزار GAMBIT، به کار گرفته شد. برای کاربرد نرم افزار مورد نظر، هندسه مدل به طور کامل شبیه مدل آزمایشگاهی ساخته شد با این تفاوت که ارتفاع کانال ۰/۶ متر (۰/۲ متر بیشتر از ارتفاع کانال آزمایشگاهی) برای حل کامل میدان جریان در داخل هندسه مدل در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی مدل الگوی Quad-Map به کار گرفته شد که حاصل المان‌های مربعی و مستطیلی است. در این شبیه‌سازی برای تحلیل جریان از مدل چند فازی VOF و با فعال کردن گزینه جریان در کانال روباز استفاده شد. برای تعیین پارامتر تنش رینولدز از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ (Standard) و برای تکمیل فرایند آماده‌سازی مدل عددی، از طرح PRESTO برای گسسته‌سازی فشار، الگوریتم PISO برای جفت کردن



شکل ۵- پربندهای سرعت عرضی برای صفحه واقع در عمق ۱۰ سانتی‌متری در اطراف بلوک‌ها

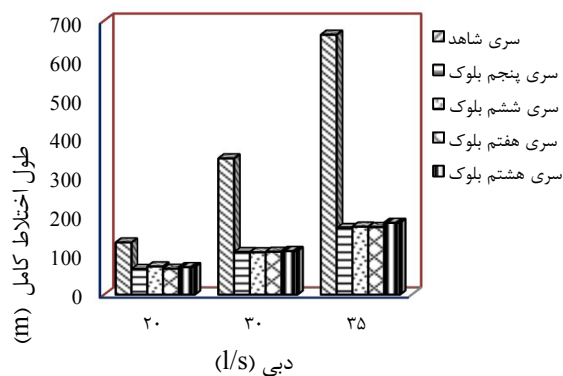


شکل ۶- پربندهای سرعت طولی برای صفحه در عمق ۱۰ سانتی متری در اطراف بلوک‌ها



شکل ۸- مقادیر درصد کاهش طول اختلاط کامل برای آزمایش‌های محل اول قرارگیری بلوک

همچنین در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب، مقادیر اندازه‌گیری شده طول اختلاط کامل و مقادیر درصد کاهش طول اختلاط کامل در دو حالت شاهد و محل دوم قرارگیری بلوک ارائه شده است.

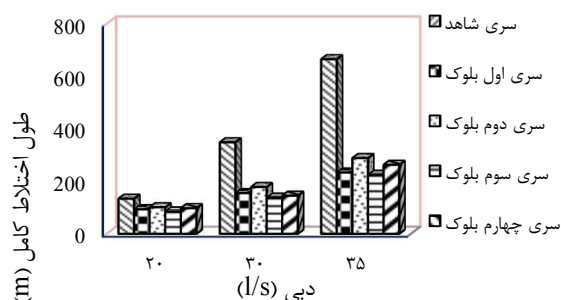


شکل ۹- مقادیر طول اختلاط کامل برای آزمایش‌های شاهد و آرایش نوع B

نتایج آزمایش‌های تزریق آلاینده

بعد از عبور جریان از بلوک‌ها چرخش‌های پراکنده‌ای به وجود می‌آید. در اثر این جابجایی و حرکت، جریان‌های چرخشی در اطراف بلوک‌ها شکل می‌گیرد که دامنه آن به پایین دست نیز منتقل می‌شود. اگر آلاینده در هنگام پراکندگی در طول کانال به این میدان چرخشی برسد، آنگاه ضریب پخش آشفته به صورت موضعی و به دنبال آن در کل کانال افزایش می‌یابد؛ پس انتخاب محل قرارگیری بلوک‌ها نسبت به منبع تزریق آلاینده، مهم است. نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش (Fluent)، نیز یک سری جریان‌های چرخشی در اطراف زبری‌های موضعی را به دست می‌دهد. در شکل ۷ و ۸ به ترتیب، مقادیر طول اختلاط کامل مقادیر درصد کاهش طول اختلاط کامل در دو حالت شاهد (بدون بلوک) و محل اول قرارگیری بلوک ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که کاربرد زبری موضعی تأثیر زیادی در کاهش طول اختلاط کامل داشته است.



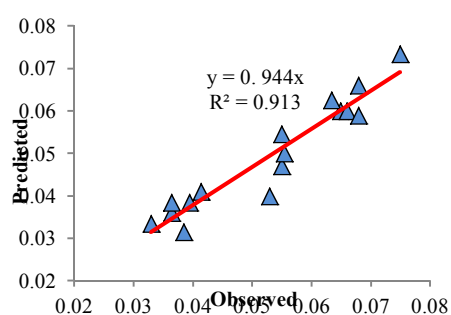
شکل ۷- مقادیر طول اختلاط کامل برای آزمایش‌های شاهد و آرایش نوع A

این نسبت و ضریب انتشار عرضی وجود ندارد. با استفاده از بخشی از داده‌های برداشت شده در این پژوهش در آزمایشگاه، یک معادله کلی بین ضریب انتشار عرضی بدون بعد با دو نسبت بدون بعد نسبت عرض به عمق جریان و فاکتور اصطکاک ارائه شده است:

$$\frac{D_z}{Hu_*} = 0.05 \left(\frac{W}{H} \right)^{1.186} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0.296} \quad (20)$$

در شکل ۱۲ مقایسه‌ای بین مقادیر ضریب انتشار عرضی بدون بعد محاسبه شده از معادله (۲۱) و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی (بخش باقیمانده که در تعیین معادله نقش نداشته‌اند) این ضریب انجام شده است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که معادله (۲۱) توانایی پیش‌بینی ضریب انتشار عرضی را دارد.

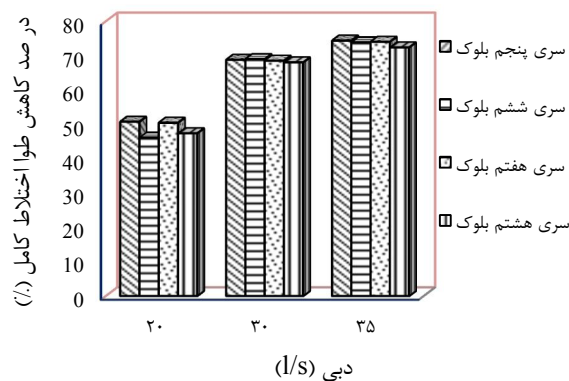
همچنین میانگین خطای نسبی معادله بالا نسبت به مشاهدات آزمایشگاهی حدود ۰/۰۵۹ محاسبه شده که این نشان دهنده دقت خوب معادله (۲۱) است.



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر ضریب انتشار عرضی بدون بعد به دست آمده از معادله (۲۱) و مقادیر اندازه‌گیری شده

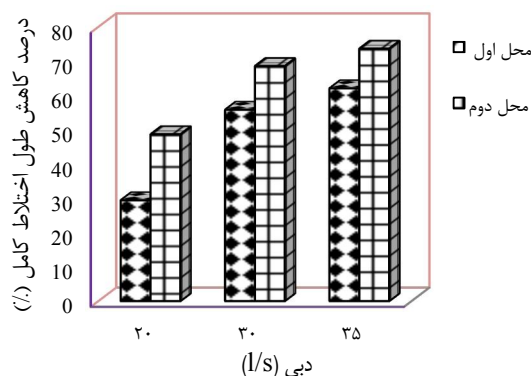
نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت بررسی فرآیندهای اختلاط و انتقال در رودخانه‌ها، در این پژوهش اثر ایجاد زبری‌های موضعی در مقدار ضریب انتشار عرضی آلودگی و نیز کاهش طول اختلاط، به صورت آزمایشگاهی بررسی قرار شد. مشاهدات نشان داد که در صورت ایجاد زبری موضعی، در کلیه آرایش‌های ایجاد شده در نحوه قرارگیری بلوک‌ها، اختلاط کامل در طول کمتری نسبت به حالت بدون زبری ایجاد می‌شود. در این پژوهش همچنین با استفاده از بخشی از نتایج آزمایشگاهی، معادله‌ای برای محاسبه ضریب انتشار عرضی ارائه شد. نتایج حاصل از معادله جدید با بخش باقیمانده از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و متوسط خطای نسبی آن ۰/۰۵۹ به دست آمده که



شکل ۱۰- درصد کاهش طول اختلاط کامل برای و آرایش نوع B

در شکل ۱۱ مقادیر متوسط درصد کاهش ضریب اختلاط طولی برای دبی‌های ۲۰، ۳۰ و ۳۵ لیتر در ثانیه ارائه شده است. مشاهده می‌شود که قرارگیری بلوک در محل دوم توانسته است به میزان بیشتری، از طول اختلاط کامل کم کند



شکل ۱۱- مقادیر متوسط درصد کاهش طول اختلاط کامل برای آرایش‌های نوع A و B

نتایج آنالیز ابعادی تأییدکننده این مطلب است که ضریب انتشار عرضی به دو پارامتر بدون بعد نسبت عرض به عمق (W/H) و ضریب اصطکاک (U/U^*) وابسته است. این وابستگی در این پژوهش به گونه‌ای است که با افزایش فاکتور اصطکاک مقدار این ضریب نیز مشابه آنچه که پورآبادهای (۱۳۸۶) گزارش کرده است افزایش می‌یابد. در ارتباط با نسبت عرض به عمق، در این پژوهش به طور کلی معادله مشخصی بین دو پارامتر مذکور مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که افرادی همچون اوکویه (۱۹۷۰) نشان داده‌اند که با کاهش این نسبت میزان ضریب انتشار عرضی افزایش می‌یابد و از طرفی افرادی همچون فیشر (۱۹۶۸) معتقدند که معادله مشخصی بین

10. Fischer H. B. 1968. Dispersion prediction in natural streams. Journal Sanitary Engineering Division, ASCE. 94 (SA5): 927-943.
11. Fisher H. B. 1969. Longitudinal Dispersion in Laboratory and Natural Stream. Report No. KH-R-12, California Institute of Technology, W. M. Keck Laboratory, Pasadena, California. 250 p.
12. Fischer H. B. List E.G. Koh R. C. Y. Imberger J. and Brooks N. H. 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, New York. 484 p.
13. Kashefipour S. M. and Falconer R. A. 2002. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. Elsevier Water Research. 36(6):1596-1608.
14. Okoye J. K. 1970. Characteristics of Transverse Mixing in Open channel Flows. Rep. No. KH-R-23, W. M. Keck Laboratory, Pasadena, California. 225 p.
15. Rutherford J. C. 1994. River Mixing. New York, John Wiley Publication. 347 p.

نشان دهنده دقت خوب معادله جدید است. در پایان نیز مشخص شد که نرم افزار FLUENT دارای دقت خوبی در شبیه سازی و پیش بینی فرآیند اختلاط آلودگی در رودخانه ها است.

منابع

۱. پورآبادی م. امیری تکلدانی ا. و لیاقت ع. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر پارامترهای جریان بر ضریب پخش عرضی آلودگی در یک کانال مستطیلی. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد.
۲. پورمقدم م. و کوچک زاده ص. ۱۳۸۹. مطالعه اثر زبری بر ضرایب انتشار و پخشیدگی مواد محلول در مقاطع مرکب. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
۳. جاعل آ. و موسوی جهرمی س. ح. ۱۳۸۵. تخمین ضریب پخش عرضی در فلوم های آزمایشگاهی و رودخانه ها. مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴. زرگر م. و صالحی نیشابوری ع. ا. ۱۳۸۸. مقایسه مدل های Mike 11 و SMS در شبیه سازی پخش و انتقال غلظت در رودخانه ها. مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.
۵. سعادت پور ع. و حیدری پور م. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر آرایش بلوک های مستغرق بر ضریب اختلاط عرضی در یک فلوم آزمایشگاهی. مجله علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۳۲(۱): ۸۷-۹۷.
6. Ahsan N. 2008. Estimating the Coefficient of Dispersion for a Natural Stream. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 34, October, 131-134, ISSN 2070-3740.
7. Chau K. W. 2000. Transverse Mixing Coefficient Measurement in Open Rectangular Channel. Advances in Environmental Research, Elsevier Science. 4(4):287-294
8. Cheong T. S. Bassam A. Y. and Il W. S. 2007. Estimating of Key Parameters in Model for Solute Transport in Rivers and Streams. Water Resource Manage. 21(7):1165-1186.
9. Deng Z. Q. Singh V. P. and Bengtsson L. 2001. Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 127(11):919-927.

