

# توسعه مدل عددی دوبعدی در پلان به منظور بررسی شکل دیوار هدایت آب پل‌ها

فواد کیلانه‌ئی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
امیر محجوب، دانش‌آموخته دکترا، پژوهشکده حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مسعود منتظری‌نمین، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۰۴ - پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۸

## چکیده

در این تحقیق یک مدل عددی برای شبیه‌سازی دو بعدی جریان‌های با سطح آزاد به منظور بررسی شکل دیوار هدایت آب پل‌ها ارائه شده است. معادلات حاکم بر این مدل، معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده در عمق می‌باشند که با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و به کمک روش گام جزئی حل شده‌اند. محیط حل نیز با استفاده از یک شبکه بدون ساختار مثلثی تولید شده به روش دلونی، منقطع شده است. با استفاده از این مدل، تراز سطح آزاد آب و سرعت‌های متوسط‌گیری شده عمقی در محیط حل محاسبه می‌شوند. برای محاسبه پارامترهای یاد شده، ابتدا ترم‌های جابه‌جایی و پخش معادلات اندازه حرکت حل شده و مقادیر میانی سرعت‌ها به دست می‌آیند. در گام دوم اثر اصطکاک کف اضافه می‌شود و در ادامه با حل همزمان معادله پیوستگی و ترم‌های باقی‌مانده معادلات اندازه حرکت، تراز سطح آزاد آب تعیین می‌گردد و در نهایت با استفاده از تراز سطح آزاد آب محاسبه شده، مقادیر نهایی سرعت‌ها به دست می‌آیند. پس از صحت‌سنجی مدل با آزمون‌های مختلف و اطمینان از عملکرد مناسب آن، مدل توسعه داده شده جهت بررسی شکل‌های مختلف دیوار هدایت و تعیین حالت بهینه مورد استفاده قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: جریان دو بعدی در پلان، روش حجم محدود، روش گام کسری، شبکه بدون ساختار مثلثی، دیوار هدایت آب پل‌ها

## ۱- مقدمه

کاهش ظرفیت هیدرولیکی پل، آشفتگی جریان در دهانه اول، فرسایش موضعی در مقطع رودخانه و در محل کوله و افزایش احتمال تخریب پل می‌شود (شکل ۱- الف).  
به منظور بهبود شرایط جریان در محل پل، از دیوارهای هدایت آب استفاده می‌شود. ایجاد دیوار هدایت آب در بالادست پل موجب موازی شدن خطوط جریان در محل پل، توزیع یکنواخت‌تر دبی عبوری از نقاط مختلف مقطع، افزایش ظرفیت هیدرولیکی پل، انتقال شروع انقباض خطوط جریان به بالادست پل و فاصله گرفتن از محل کوله و در نهایت کاهش میزان آبشستگی در محل کوله‌ها می‌شود (شکل ۱- ب). با توجه به مطالب ارائه شده، تعیین مناسب شکل هندسی دیوار هدایت آب شامل طول، ارتفاع و زاویه اتصال به منظور اطمینان از عملکرد مناسب آن جهت هدایت سیلاب به محل پل از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

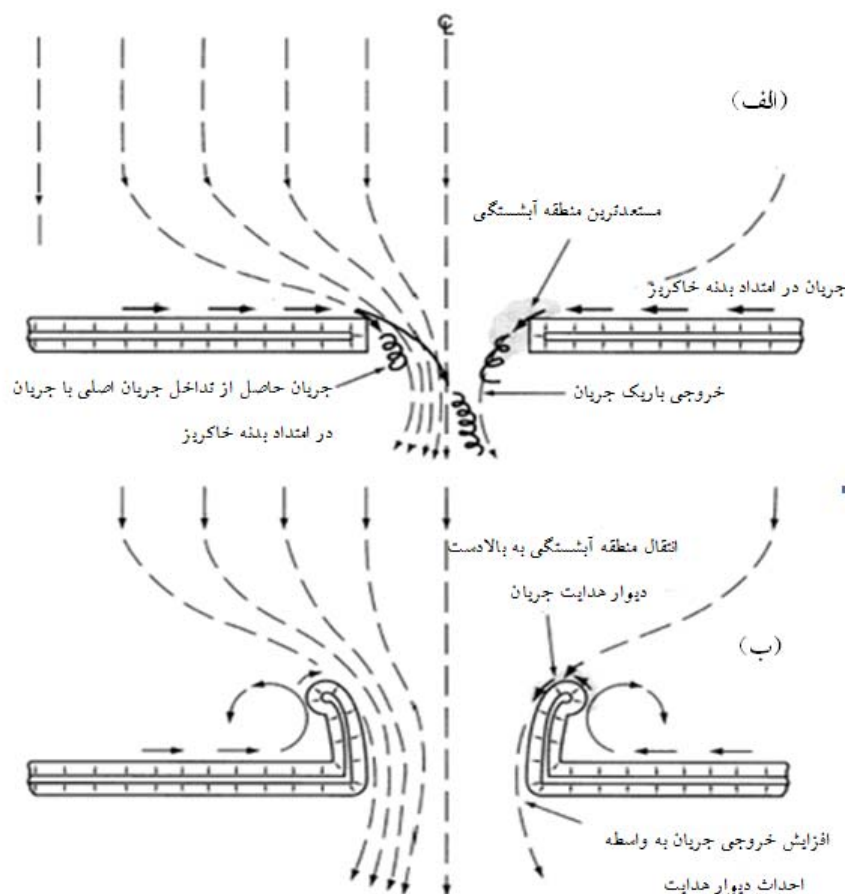
در بسیاری از رودخانه‌های فصلی و سیلابی، عرض بستر رودخانه زیاد بوده و در غالب اوقات سال جریانی در آن وجود ندارد. در چنین مواردی با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و به منظور کاهش طول پل معمولاً عرضی از رودخانه که در قسمت سیلابدشت قرار گرفته است توسط خاکریز عبور راه مسدود می‌شود. پیشروی خاکریزهای طرفین پل در بستر رودخانه موجب تنگ شدن معبر تخلیه آب و محدود شدن آن به دهانه پل می‌گردد. در این حالت جریان آب در امتداد خاکریز بدنه راه جریان یافته و در جهت عمود بر جهت جریان اصلی رودخانه وارد دهانه پل می‌شود. در این شرایط سرعت جریان در مقطع تنگ‌شده، زیاد شده و در نتیجه آن تنش برشی وارد بر کف افزایش می‌یابد ضمن آن‌که گردابه‌های مختلفی نیز در این ناحیه به وجود می‌آیند که نیروهایی در جهت مماس و همچنین عمود بر کف به ذرات بستر وارد می‌نمایند. مجموعه این شرایط باعث

## ۲- پیشینه تحقیق

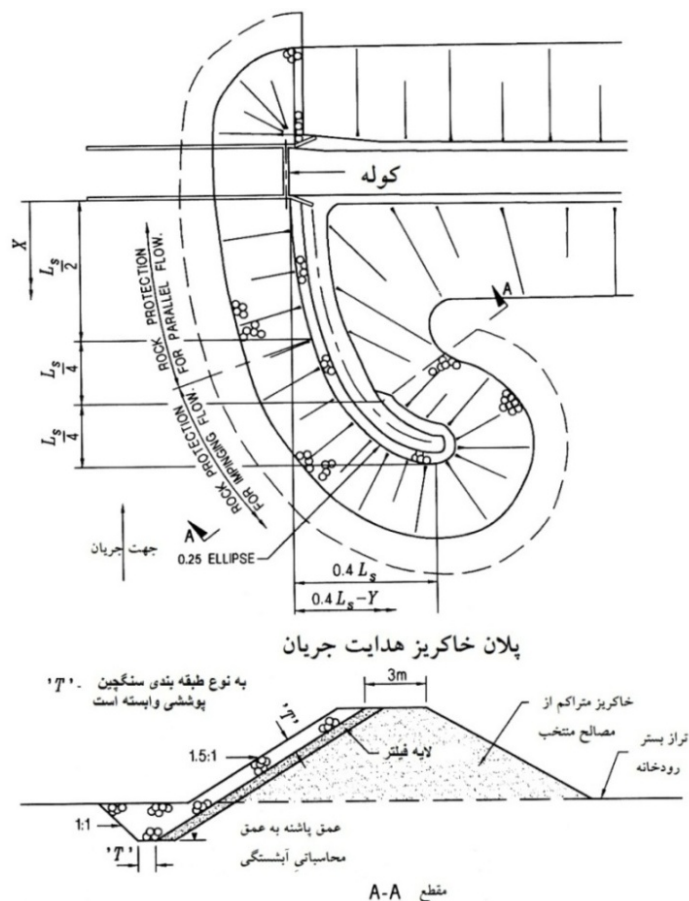
در ادبیات فنی پیشنهادهای مختلفی برای شکل دیوارهای هدایت آب در پلان ارایه شده است. بیشتر مراجع، از جمله برادلی<sup>۱</sup> (۱۹۷۸)، فارادی و چارلتون<sup>۲</sup> (۱۹۸۳)، فلاول<sup>۳</sup> (۱۹۹۴)، نیل<sup>۴</sup> (۲۰۰۰)، همیل<sup>۵</sup> (۲۰۰۴)، پیشنهاد کاراکی<sup>۶</sup> (۱۹۶۱) را جهت هندسه دیوار هدایت آب توصیه نموده‌اند. طبق پیشنهاد یاد شده هندسه دیوار هدایت آب به صورت یک ربع بیضی که قطر بزرگ آن ۲/۵ برابر قطر کوچک است، در نظر گرفته می‌شود. تراز فوقانی دیوار نیز طوری لحاظ می‌گردد که از تراز آب سیلاب و امواج ناشی از آن بالاتر بوده و ارتفاع آزاد قابل قبولی داشته باشد. شکل مقطع عرضی دیوار هدایت نیز تابعی از نوع مصالح، روش ساخت و عامل پایداری دیوار است و به شکل‌های هندسی مختلف مانند دیواره قائم کم عرض (صفحه‌ای یا سپری)، دیواره قائم عریض (مستطیلی)، پلکانی یا دوزنقه‌ای ساخته می‌شود. به عنوان نمونه، دیوار هدایت طره‌ای با مقطع مستطیلی کم عرض، دیوارهای هدایت تورسنگی با مقطع پلکانی و دیوارهای هدایت

سنگریزه‌ای یا خاکی (با پوشش حفاظتی) با مقطع دوزنقه‌ای ساخته می‌شوند. در شکل شماره ۲، پلان و سطح مقطع یک نمونه دیوار هدایت خاکی با پوشش حفاظتی ارایه شده است. علاوه بر مشخصات هندسی ذکر شده، محاسبه طول دیوار نیز پارامتر مؤثری است که با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی صورت پذیرفته در دانشگاه کلورادو<sup>۷</sup> تعیین می‌گردد. نتیجه مطالعات دانشگاه نام برده به صورت نموداری در آیین‌نامه HDS1 سازمان بزرگراه‌های آمریکا ارایه و مبنای محاسبه طول دیوار هدایت در این آیین‌نامه قرار گرفته است.

در آیین‌نامه مذکور طول فوقانی دیوار هدایت ( $L_S$ ) بر اساس دبی کل ( $Q$ )، دبی عبوری از سیلاب‌دشت در یک طرف ( $Q_f$ )، دبی عبوری تا فاصله ۳۰ متری از کوله ( $Q_{30}$ )، طول بازشدگی پل ( $b$ )، مساحت عبور جریان در محل پل ( $An_2$ ) و سرعت متوسط عبور جریان از محل پل ( $V_{n2}$ ) قابل تعیین است (Bradley, 1978). جزئیات روش مذکور به تفصیل در آیین‌نامه HDS1 سازمان بزرگراه‌های آمریکا آمده است.



شکل ۱. تأثیر دیوار هدایت آب در اصلاح الگوی جریان عبوری از پل  
الف) بدون احداث دیوار هدایت، ب) با احداث دیوار هدایت. (Hamill, 2004)



شکل ۲. جزییات پلان و مقطع دیوار هدایت آب پل‌ها

است. در تحقیق حاضر، یک مدل عددی دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد بر روی شبکه بدون ساختار مثلثی و با استفاده از روش حجم محدود توسعه داده شده است. پس از صحت‌سنجی مدل با آزمون‌های مختلف و اطمینان از عملکرد مناسب آن، مدل توسعه داده شده برای بررسی شکل‌های مختلف دیوار هدایت و تعیین حالت بهینه مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳- معادلات حاکم

یکی از انواع معادلات هیدرودینامیک متداول برای شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد، معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق یا میانگین عمقی است. این معادلات به کمک انتگرال‌گیری از معادلات ناویراستوکس سه بعدی از کف کانال تا سطح آزاد آب به دست می‌آیند. در فرآیند انتگرال‌گیری از معادلات ناویراستوکس فرض می‌شود که توزیع سرعت در عمق جریان یکنواخت بوده و فشار در جریان به صورت هیدرواستاتیک است. فرضیات یاد شده در بسیاری از جریان‌های رودخانه‌ای و دریایی که نسبت بعد قائم

در کشور ما نیز مطالعات آزمایشگاهی محدودی روی شکل دیوار هدایت آب انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مدل فیزیکی زراتی و هادیان (۱۳۸۱) اشاره کرد. محققان نام برده با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی پنج نوع دیوار هدایت آب پل پرداخته و توزیع سرعت در محل پل را مقایسه کردند. بدین منظور کانالی با سیلاب‌دشت و بستر فرسایش‌ناپذیر تهیه و آزمایشات برای تراز سطح آب پایین‌دست و دبی‌های مختلف انجام گرفته است. نتایج نشان داد که رفتار دیوار هدایت دایروی و بیضوی تا حد زیادی مشابه بوده و در تمامی آزمون‌ها بهتر از انواع دیگر دیوارها بوده است.

شبیه‌سازی جریان و رسوب در اطراف کوله‌های پل توسط محققان مختلفی از جمله مک‌کوی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، کوهنل<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، ژانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، یزدی و همکاران (۲۰۱۰)، کوکن و کانستنت تینسکو<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۱)، عباسی و همکاران (۲۰۱۱) انجام و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این در حالی است که بررسی شکل‌های مختلف دیوار هدایت با استفاده از مدل‌سازی عددی کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده

در مدل‌های دارای مقیاس‌های بزرگ و جهانی و به خصوص در نقاط نزدیک به قطبین اثرگذار است و در مدل‌های منطقه‌ای و دور از قطبین تأثیر عمده‌ای در پارامترهای جریان ندارد.

#### ۴- شبکه‌بندی میدان محاسباتی

اغلب جریان‌های طبیعی در مهندسی رودخانه دارای هندسه پیچیده می‌باشند. یکی از روش‌های برخورد با هندسه‌های پیچیده، استفاده از شبکه بدون ساختار<sup>۱۴</sup> است. در این نوع شبکه می‌توان المان‌ها را در میدان با هر پیچیدگی هندسی تولید نمود. در شبکه بدون ساختار، گره‌های شبکه روی خطوط یک شبکه منظم قرار نداشته و برای مشخص نمودن نقاط شبکه باید مثلث‌ها و یا چند ضلعی‌هایی را به صورت جدا از خطوط شبکه تشکیل داد (هادیان و زراتی، ۱۳۸۸).

مزیت بارز شبکه بدون ساختار علاوه بر انعطاف‌پذیری در هندسه‌های پیچیده، امکان قابلیت ریز و درشت کردن شبکه در مناطق مختلف میدان حل، بسته به دقت و شرایط مورد نیاز است. از آنجایی که در این تحقیق هدف شبیه‌سازی جریان اطراف دیوارهای هدایت آب با شکل‌های مختلف است، بنابراین، برای گسسته‌سازی محیط فیزیکی، شبکه بدون ساختار مثلثی مد نظر قرار گرفت. در این تحقیق جهت تولید شبکه مثلثی به عنوان شبکه محاسباتی از برنامه EASYMESH استفاده شده است. این برنامه برای مثلث‌بندی قلمرو حل از روش دلاونی<sup>۱۵</sup> بهره می‌گیرد. شکل شماره ۴ نمونه‌ای از شبکه‌بندی انجام شده توسط برنامه مذکور را نمایش می‌دهد که ابعاد شبکه در نزدیکی کوله‌ها و پایه‌ها ریزتر شده است.

جریان در مقایسه با ابعاد افقی آن ناچیز است، برقرار می‌باشند. در ادامه معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق در سیستم دستگاه مختصات کارتزین با فرض عدم تراکم‌پذیری آب، ارائه شده است (Abbott and Basco, 1989).

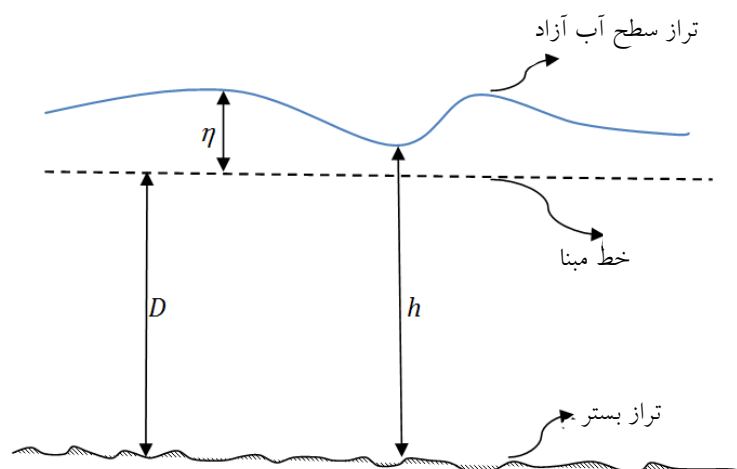
$$\begin{aligned} p &= uh \\ q &= vh \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial (up)}{\partial x} + \frac{\partial (vp)}{\partial y} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right) \right) - \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2h^2} + q\Omega \quad (2)$$

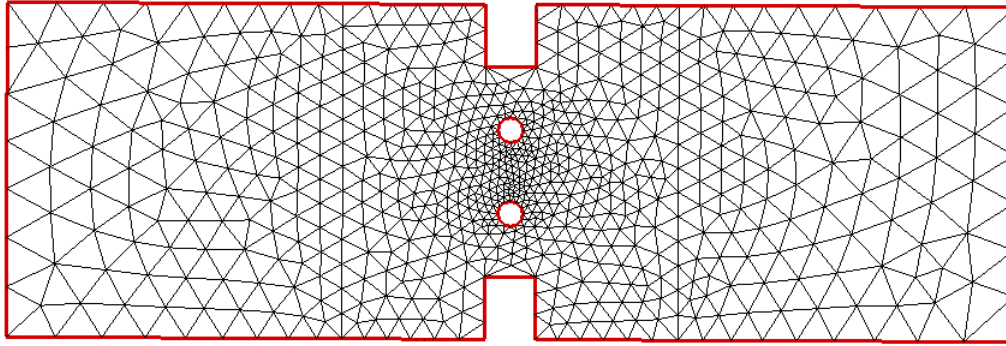
$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial (uq)}{\partial x} + \frac{\partial (vq)}{\partial y} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \left( \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \left( \frac{\partial q}{\partial y} \right) \right) - \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{c^2h^2} - p\Omega \quad (3)$$

رابطه (۱) معادله پیوستگی در پلان و روابط (۲) و (۳) معادلات اندازه حرکت در راستای x و y می‌باشند. در روابط مذکور، u: مؤلفه سرعت متوسط‌گیری شده عمقی در راستای x، v: مؤلفه سرعت متوسط‌گیری شده عمقی در راستای y، h: عمق آب، D: تراز بستر نسبت به خط مبنا،  $\eta$ : تراز سطح آب نسبت به خط مبنا، p: شار سرعت در راستای x، q: شار سرعت در راستای y،  $v_t$ ،  $\Omega$ : ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای، C: ضریب شزی،  $\Omega$ : پارامتر کوریولیس و g شتاب ثقل است. در شکل شماره ۳ تعریف پارامترهای h، D و  $\eta$  ارائه شده است.

معادلات اندازه حرکت در راستای x و y دارای پنج بخش مختلف است این بخش‌ها به ترتیب از راست به چپ عبارتند از: ترم کوریولیس، ترم اصطکاک کف، ترم پخش یا دیفیوژن<sup>۱۶</sup>، ترم ثقلی و ترم جابه‌جایی<sup>۱۷</sup>. اثر شتاب کوریولیس در معادلات آب‌های کم عمق با استفاده از ترم کوریولیس اعمال می‌گردد. ترم مذکور تنها



شکل ۳. تعریف پارامترهای h، D و  $\eta$  در مدل دو بعدی آب‌های کم عمق

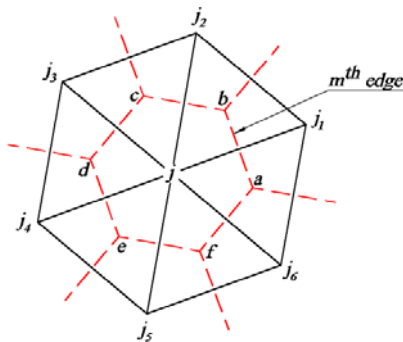


شکل ۴. نمونه‌ای از شبکه‌بندی محیط فیزیکی با استفاده از برنامه EASYMESH

میزان تغییرات جرم در هر حجم کنترل را محاسبه نمود. معادله جابه‌جایی در فضای دو بعدی به شکل رابطه ۴ می‌باشد.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

حجم کنترل مورد استفاده در تحقیق حاضر یک چند ضلعی است که توسط نقاط برخورد عمود منصف‌های مثلث‌های متصل به یک نقطه پدید می‌آید. با توجه به شکل شماره ۵، چنان‌چه از روی خط  $jj_1$  یک صفحه قائم عبور داده شود فضای دو بعدی شبیه به فضای یک بعدی خواهد شد.



شکل ۵. حجم کنترل اطراف نقطه  $j$  متشکل از تقاطع عمود منصف‌های یال‌ها

در فضای یک بعدی یک غلظت در هر سلول وجود داشت مقدار شار هر مرز محاسبه می‌شد و از سلول (گره) بالادست کم شده و به سلول (گره) پایین دست اضافه می‌گردید. در این حالت نیز همانند فضای یک بعدی شارها روی مرزها محاسبه می‌شوند. بنابراین، برای هر یال هر دو کمیت سرعت و غلظت ( $\bar{u}$  و  $\bar{c}$ ) در مرز می‌بایست محاسبه گردد.

$\bar{u}$  سرعت در امتداد یال است. چنان‌چه یال  $jj_1$  از شبکه شکل شماره ۵ در نظر گرفته شود، روی هر کدام از گره‌های  $j_1$  و  $j$  یک  $u$  و  $v$  وجود دارد متوسط مقادیر  $u$  و  $v$  در نقاط  $j_1$  و  $j$  به عنوان

## ۵- روش حل عددی

در این تحقیق جهت منقطع‌سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود و گام جزئی<sup>۱۶</sup> استفاده می‌شود. با استفاده از روش گام جزئی امکان تفکیک و حل مجزای ترم‌های مختلف معادلات حاکم فراهم می‌شود. با توجه به این‌که بخش عمده معادلات حاکم بر جریان سیال را معادله انتقال<sup>۱۷</sup> (جابه‌جایی و پخش) تشکیل می‌دهد، بنابراین، حل آن اهمیت زیادی در حل کل معادلات دارد و دقت حل عددی معادلات جریان به طور فوق‌العاده‌ای تحت تأثیر دقت حل معادله انتقال است. در این قسمت ابتدا حل معادله جابه‌جایی و پخش بر روی شبکه مثلثی ارایه می‌گردد سپس حل معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق در حالت کلی بیان می‌گردد.

### ۵-۱- حل معادله انتقال در شبکه مثلثی

اولین گام جهت حل معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق، حل معادله انتقال (ترم‌های جابه‌جایی و پخش) است. اگر چه ترم‌های جابه‌جایی و پخش از اجزای معادله انتقال هستند اما رفتار فیزیکی کاملاً متفاوتی دارند و روش عددی مناسب برای یکی الزاماً مناسب‌ترین برای دیگری نخواهد بود. استفاده از روش گام جزئی این امکان را فراهم می‌سازد که از روش‌های عددی متفاوت و مناسب برای حل هر یک از ترم‌های جابه‌جایی و پخش استفاده کرد (Namin, 2003).

### ۵-۱-۱- حل معادله جابه‌جایی در شبکه‌بندی مثلثی

به طور کلی در روش حجم محدود با توجه به نحوه تعریف و محاسبه شارهای عبوری از مرزهای هر حجم کنترل، می‌توان

$$c_j^{n+1} = c_j^n + \Delta t \frac{\sum \text{FluxAdv}(j)}{\text{area}(j)} \quad (12)$$

در این رابطه  $\sum \text{FluxAdv}(j)$  جمع جبری شارهای ورودی و خروجی به گره  $j$  از مرزهای حجم کنترل اطراف آن و  $\text{area}(j)$  مساحت حجم کنترل اطراف گره  $j$  است.

### ۵-۱-۲- حل معادله پخش در شبکه مثلثی

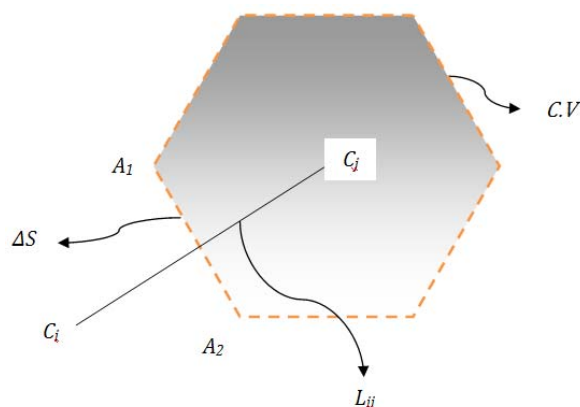
معادله پخش در فضای دو بعدی به شکل رابطه ۱۳ است.

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) = 0 \quad (13)$$

با توجه به شکل شماره ۷، شار ناشی از پخش که از مرز  $A_1 A_2$  عبور می‌نماید با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه می‌گردد.

$$\text{Flux} = -D_n \frac{\partial c}{\partial L} \Delta S = -D_n \frac{c_j - c_i}{L} \Delta S \quad (14)$$

در رابطه اخیر  $D_n$  ضریب پخش در امتداد یال  $ij$  است. بقیه پارامترها نیز تعریف شده‌اند.



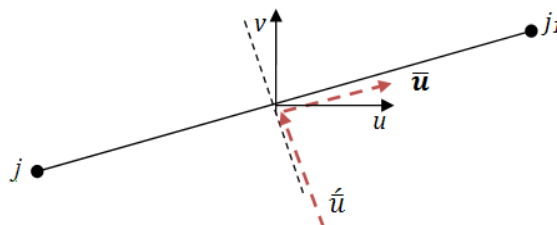
شکل ۷. پارامترهای مرتبط با تعیین شار پخش

روش مورد استفاده در خصوص شار پخش بستگی به تعریف  $\frac{\partial c}{\partial L}$  دارد، چنانچه رابطه  $\frac{c_j^{n+1} - c_i^{n+1}}{L}$  مورد استفاده قرار گیرد روش حل به صورت غیرصریح خواهد بود. همانند مراحل جابه‌جایی در این مرحله نیز برای تمام یال‌ها شار پخش با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه شده و به گره پایین دست اضافه و از گره بالادست کم می‌گردد. در نهایت با استفاده از رابطه ۱۵ مقدار  $c_j^{n+1}$  تعیین می‌شود.

$$c_j^{n+1} = c_j^n + \Delta t \frac{\sum \text{FluxDiff}(j)}{\text{area}(j)} \quad (15)$$

در این رابطه،  $\sum \text{FluxDiff}(j)$  برابر با جمع جبری شارهای ورودی و خروجی به گره  $j$  از مرزهای حجم کنترل اطراف آن در اثر پخش می‌باشد. لازم به ذکر است جزییات و تکنیک‌های خاص سایر روش‌های حل معادله جابه‌جایی-پخش در

$u$  و  $v$  در وسط یال (روی مرز) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶). جهت محاسبه سرعت در امتداد  $ij$  باید تصویر  $u$  و  $v$  تعیین شده در وسط یال را در امتداد ذکر شده به دست آورد. روابط مربوطه در زیر بیان می‌گردد.



شکل ۶. نحوه تعریف سرعت در امتداد هر یال از شبکه مثلثی

$$\sin \theta = \frac{y_{j1} - y_j}{L_{jj1}} \quad (5)$$

$$\cos \theta = \frac{x_{j1} - x_j}{L_{jj1}} \quad (6)$$

$$u = \frac{u_j + u_{j1}}{2} \quad (7)$$

$$v = \frac{v_j + v_{j1}}{2} \quad (8)$$

$$\bar{u} = u \times \cos \theta + v \times \sin \theta \quad (9)$$

$$\bar{u} = v \times \cos \theta - u \times \sin \theta$$

در روابط فوق،  $L_{jj1}$ : طول یال  $ij$ ،  $\bar{u}$ : سرعت در امتداد یال  $ij$ ،  $\bar{u}$ : سرعت در امتداد عمود بر یال  $ij$  است. تعیین مقدار  $\bar{c}$  در مرز، بستگی به روش مورد استفاده دارد. در توسعه مدل عددی حاضر برای منقطع‌سازی معادله جابه‌جایی از روش فروم<sup>۱۸</sup> که روشی صریح و با درجه دقت مرتبه دوم است، برای محاسبه شار ناشی از جابه‌جایی استفاده می‌شود. در روش مذکور  $\bar{c}$  با استفاده از روابط زیر تعیین می‌گردد.

$$\bar{c} = \frac{\left[ \left( c_j + \frac{\Delta x}{2} S_j \right) + \left( c_{j1} + \left( \frac{\Delta x}{2} - u \Delta t \right) S_j \right) \right]}{2} \quad (10)$$

$$S_j = \frac{c_{j+1} - c_{j-1}}{2 \Delta x}$$

میزان شیب تغییرات  $c$  به کمک مشتق‌گیری مرکزی از متغیرهای مورد نظر بر روی شبکه بدون ساختار انجام می‌گیرد. پس از تعیین مقادیر  $\bar{u}$  و  $\bar{c}$  مقدار شار عبوری از مرز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (محمدزاده قمی و منتظری نمین، ۱۳۸۴).

$$\text{Flux} = \bar{u} \cdot \bar{c} \cdot \Delta S \quad (11)$$

در این رابطه  $\Delta S$  طول مرز است.

در ادامه شار محاسبه شده از گره ابتدا کم شده و به گره انتها اضافه می‌شود. عملیات یاد شده برای تمام یال‌ها انجام می‌شود و در نهایت با استفاده از رابطه ۱۲ مقدار  $c_j^{n+1}$  تعیین می‌گردد.

در رابطه ۲۰ طول نمونه آشفته‌گی و  $\bar{S}_{ij}$  نرخ کرنش است که به ترتیب با استفاده از رابطه (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌گردند.

$$L = C_S \cdot \Delta \quad (21)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (22)$$

در رابطه فوق،  $C_S$  ضریب اسماگورینسکی است که با توجه به شرایط و نوع جریان متفاوت است. مقادیر عددی ضریب مذکور بین ۰/۲۵ تا ۱ قرار دارد.  $\Delta$  معرف متوسط اندازه شبکه است.  $\Delta$  برای جریان‌های دو بعدی میانگین‌گیری شده در عمق با استفاده از رابطه ۲۳ تعیین می‌گردد.

$$\Delta = (\Delta_x \cdot \Delta_y)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

قسمت دوم حل معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق شامل حل قسمت اصطکاک است. برای اعمال اثر این پارامتر از یک روش نیمه ضمنی استفاده می‌شود. بدین ترتیب که در معادله اندازه حرکت در راستای  $x$ ، مقدار  $p$  خارج از رادیکال در سمت راست معادله، با استفاده از مقدار آن در زمان جدید وارد محاسبات می‌گردد. بنابراین مقدار  $p^{**}$  با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\frac{p^{**} - p^{*2}}{\Delta t} = - \frac{gp^{**} \sqrt{(p^{*2})^2 + (q^{*2})^2}}{C^2 \cdot h^2} \quad (24)$$

به طور مشابه مقدار  $q^{**}$  نیز با استفاده از رابطه ۲۵ تعیین می‌گردد.

$$\frac{q^{**} - q^{*2}}{\Delta t} = - \frac{gq^{**} \sqrt{(p^{*2})^2 + (q^{*2})^2}}{C^2 \cdot h^2} \quad (25)$$

پس از حل معادله انتقال و اثر ترم اصطکاک، معادلات زیر باقی می‌ماند.

$$\frac{p^{n+1} - p^{**}}{\Delta t} + gh \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^{n+1} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{q^{n+1} - q^{**}}{\Delta t} + gh \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^{n+1} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \right)^{n+1} = 0 \quad (28)$$

چنانچه معادلات باقی‌مانده اندازه حرکت (معادلات ۲۶ و ۲۷) در امتداد هر یال تصویر شود، دو معادله در راستای  $x$  و  $y$  تبدیل به یک معادله در راستای یال می‌گردد. با توجه به شکل شماره ۸ روابط ذیل حاصل می‌گردد.

$$r = \bar{p} \cdot \cos\theta + \bar{q} \cdot \sin\theta \quad (29)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + gh \left( \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right)^{n+1} = 0 \quad (30)$$

$$\left( \frac{\partial \eta}{\partial t} \right)_i - \frac{\sum_{m=1}^k r_m^{n+1} \cdot \Delta s_m}{\text{Area}(i)} = 0 \quad (31)$$

شبکه‌های بدون ساختار در نمین و همکاران (۲۰۰۴) و کیلانته‌ئی (۱۳۹۰) آمده است.

### ۲-۵- حل معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق

با توجه به معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق (روابط (۱) تا (۳))، مراحل حل شامل سه قسمت کلی است. در قسمت اول، دو معادله انتقال (جابه‌جایی و پخش) برای شارهای سرعت در راستای  $x$  و  $y$  ( $p$  و  $q$ ) حل می‌گردد. اثر اصطکاک کف در قسمت دوم اضافه می‌شود و در قسمت سوم، ترم ثقلی و معادله پیوستگی وارد محاسبات می‌گردند.

قسمت اول محاسبات خود شامل چهار زیر مرحله است. در مرحله اول، شار سرعت در راستای  $x$  ( $p$ ) در امتدادهای  $x$  و  $y$  جابه‌جا می‌شود تا مقدار  $p^{*1}$  به دست آید. مقدار  $p^{*1}$  به دست آمده به عنوان زمان پایه جهت حل معادله پخش  $p$  در نظر گرفته می‌شود. مرحله دوم شامل حل معادله پخش  $p$  است. با حل معادله پخش  $p$  مقدار  $p^{*2}$  حاصل می‌گردد. مراحل سوم و چهارم نیز همانند مراحل اول و دوم به حل معادله جابه‌جایی و پخش برای شار سرعت در راستای  $y$  ( $q$ ) اختصاص دارد. خروجی این قسمت مقادیر  $p^{*2}$  و  $q^{*2}$  برای هر گره خواهد بود. که خلاصه روابط ارایه می‌گردد.

$$\frac{p^{*1} - p^n}{\Delta t} = - \left( \frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} \right)^n \quad (16)$$

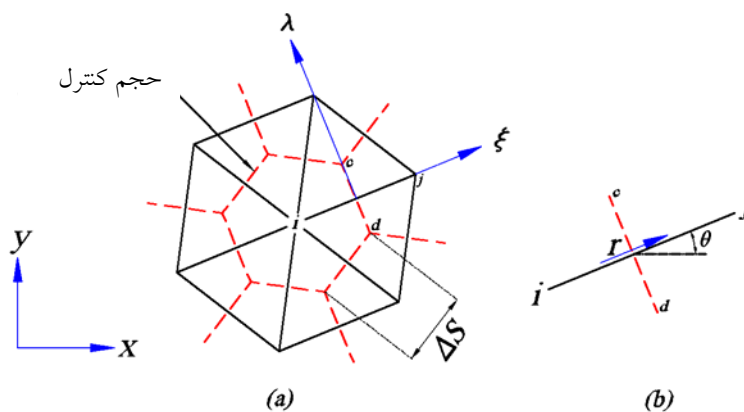
$$\frac{p^{*2} - p^{*1}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{*1} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial p}{\partial y} \right)^{*1} \quad (17)$$

$$\frac{q^{*1} - q^n}{\Delta t} = - \left( \frac{\partial(uq)}{\partial x} + \frac{\partial(vq)}{\partial y} \right)^n \quad (18)$$

$$\frac{q^{*2} - q^{*1}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial q}{\partial x} \right)^{*1} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial q}{\partial y} \right)^{*1} \quad (19)$$

به منظور حل معادله، پخش تعیین ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای ضروری است. در مدل عددی حاضر برای محاسبه ضریب مذکور، مدل زیر مقیاس شبکه (اسماگورینسکی<sup>۱۹</sup>) مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل زیر مقیاس شبکه، یک لزجت گردابه‌ای خطی به تانسور تنش مرتبط می‌شود. مقدار لزجت گردابه‌ای با استفاده از رابطه ۲۰ تعیین می‌گردد (Smagorinsky, 1963).

$$v_t = L^2 \sqrt{2 \cdot \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij}} \quad (20)$$



شکل ۸. تعریف مختصات محلی برای هر یال و محل قرارگیری  $r$

به جواب مورد نظر با دقت مناسب دست یابد. اگر چه با توجه به شرایط مرزی و توسعه زمانی حل معادلات، اثر شرایط اولیه به تدریج از بین می‌رود و دقت زیاد در شرایط اولیه تأثیری در جواب نهایی ندارد اما شرایط اولیه مناسب، نقش بسزایی در سرعت همگرایی مدل دارد و باعث کاهش زمان انجام محاسبات می‌شود. بنابراین، انتخاب شرایط اولیه نزدیک به مقادیر واقعی، بهترین گزینه خواهد بود. شرایط اولیه در مدل دو بعدی حاضر شامل تراز سطح آزاد آب و سرعت‌های اولیه است که عموماً تراز اولیه برابر با تراز پایین دست و سرعت‌های اولیه برابر با صفر در نظر گرفته شده‌اند.

برای مدل‌های دو بعدی آب‌های کم عمق، شرایط مرزی مختلفی را بر اساس نیاز مسئله می‌توان تعریف کرد. در تحقیق حاضر دو نوع شرط مرزی کلی شامل مرز باز و مرز بسته در نظر گرفته شده است. مرز بسته، مرزی است که از آن جریان عبور نمی‌کند (مانند دیوار و موج شکن) اما مرز باز، مرزی است که در آن یک یا چند پارامتر مجهول مسئله دارای مقادیر معلومی است. در مدل توسعه داده شده، دو نوع مرز باز تعریف شده است. مرز باز اول، مرزی است که در آن تراز سطح آزاد آب به عنوان پارامتر معلوم است و مرز باز دوم، مرزی است که در آن مقدار سرعت معلوم است. شرط مرزی بسته در محل دیواره‌ها می‌تواند به صورت شرط لغزش آزاد یا شرط بدون لغزش باشد. در تحقیق حاضر از هر دو نوع شرط مرزی در مسایل مختلف استفاده شده است. در شرط مرزی لغزش آزاد، سرعت در امتداد عمود بر مرز برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود در حالی که در حالت دیوار بدون لغزش، سرعت جریان در تمام راستاها در مرز برابر با صفر لحاظ می‌گردد.

و در نهایت دو معادله به صورت زیر حاصل می‌گردد.

$$r_m^{n+1} = r_m^{**} - \frac{\Delta t \cdot g \cdot h}{\Delta \xi} (\eta_j^{n+1} - \eta_i^{n+1}) \quad (32)$$

$$\eta_i^{n+1} = \eta_i^n + \frac{\Delta t}{\text{area}(i)} \left[ \sum_{m=1}^k (r_m^{n+1} \cdot \Delta S_m) \right] \quad (33)$$

در روابط فوق،  $k$  تعداد یال‌های تشکیل دهنده حجم کنترل است. با توجه به معادله ۳۲ مقدار  $r^{n+1}$  تابع مقدار  $\eta_i^{n+1}$  است. اگر مقدار  $r^{n+1}$  از رابطه ۳۲ در رابطه ۳۳ قرار داده شود، برای هر گره معادله‌ای به دست می‌آید که  $\eta_i^{n+1}$  در آن گره، تابع  $\eta_i^{n+1}$  نقاط اطراف آن است. چنانچه تعداد نقاط فضای حل،  $n$  باشد بنابراین،  $n$  معادله و  $n$  مجهول وجود خواهد داشت.

حل همزمان  $n$  معادله و  $n$  مجهول مطلوب نیست و با توجه به نامنظم بودن شبکه محاسباتی امکان استفاده از روش ADI نیز وجود ندارد، بنابراین، استفاده از روش‌های تکراری ضروری است. با جایگذاری مقادیر  $r^{n+1}$  در معادله ۳۳ مشاهده می‌شود که معادله شکل گوس سایدل به خود می‌گیرد، بنابراین، می‌توان  $\eta_i^{n+1}$  را در نظر گرفت و برای نقاط اطراف  $\eta^n$  را لحاظ نمود و با روش تکراری به جواب با دقت مورد نظر رسید. پس از تعیین مقادیر  $\eta^{n+1}$  برای همه نقاط، با استفاده از روابط ذیل مقادیر  $p^{n+1}$  و  $q^{n+1}$  محاسبه می‌گردد (Kilanehei, Naeni, and Namin, 2011).

$$p^{n+1} = p^{**} - gh \Delta t \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^{n+1} \quad (34)$$

$$q^{n+1} = q^{**} - gh \Delta t \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^{n+1} \quad (35)$$

## ۶- شرایط اولیه و شرایط مرزی

در تمام روش‌های عددی، لازم است برای همه پارامترها در تمام نقاط شبکه، مقادیری به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفت تا مدل توسعه داده شده، بتواند در روند انجام محاسبات با تصحیح آنها

## ۷- ارزیابی مدل

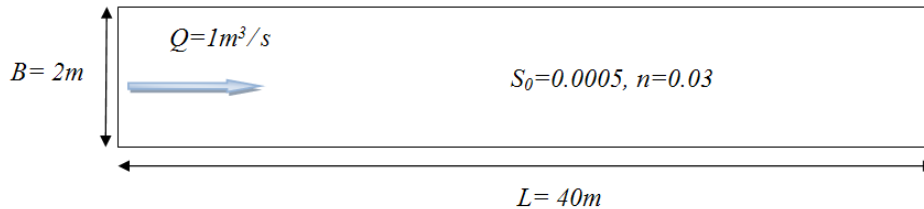
به منظور ارزیابی مدل دو بعدی تهیه شده، آزمون‌های مختلفی که حل آنها به صورت تئوری یا اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی موجود است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پروفیل طولی جریان متغیر تدریجی در یک کانال مستطیلی و جریان اطراف آبشکن، آزمون‌هایی می‌باشند که در این مرحله برای ارزیابی مدل در نظر گرفته شده‌اند.

### ۷-۱- پروفیل طولی جریان متغیر تدریجی در یک کانال مستطیلی

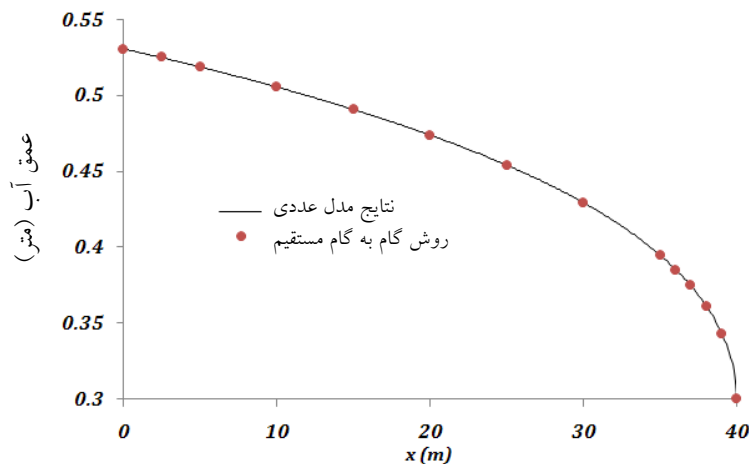
جریان متغیر تدریجی در یک کانال مستطیلی به عنوان اولین آزمون جهت ارزیابی مدل دو بعدی تهیه شده، در نظر گرفته می‌شود. در این آزمون یک کانال مستطیلی به طول ۴۰ متر، عرض ۲ متر، ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۰۳ و شیب بستر ۰/۰۰۰۵ که دبی یک متر مکعب بر ثانیه را از خود عبور می‌دهد، مفروض می‌گردد (شکل ۹).

با چشم‌پوشی از اصطکاک دیواره‌ها، عمق‌های بحرانی و نرمال برای کانال یاد شده به ترتیب برابر با ۰/۲۹۴ و ۰/۷۸۷ متر به‌دست می‌آیند. چنان‌چه عمق جریان در پایین‌دست کانال برابر

با ۰/۳ متر در نظر گرفته شود با توجه به عمق نرمال تعیین شده در کانال، شیب قابل توجهی در سطح آزاد آب به‌وجود می‌آید. به منظور مدل‌سازی جریان و تعیین تغییرات تراز سطح آزاد آب برای کانال با شرایط ذکر شده، محیط فیزیکی با استفاده از ۱۹۱۱۲ المان مثلثی که ابعاد اضلاع آن در حدود ۰/۱ متر است، شبکه‌بندی شد. در مرز بالادست (ورودی) شار سرعت در راستای  $x$  (p) از مقدار صفر تا ۰/۵ متر مربع بر ثانیه در ۲۰۰ گام زمانی افزایش داده می‌شود. این عمل برای جلوگیری از ایجاد تلاطم و ناپایداری در مدل مؤثر است. در مرز پایین‌دست (خروجی) تراز سطح آزاد آب، ثابت و برابر با ۰/۳ متر لحاظ می‌گردد. پروفیل به دست آمده از حل عددی پس از گذشت ۱۰۰ ثانیه با گام‌های زمانی برابر با ۰/۰۱ ثانیه در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است. همچنین در شکل مذکور نیز پروفیل حاصل از روش گام به گام مستقیم که از جمله روش‌های تعیین تراز سطح آزاد آب در محاسبات جریان متغیر تدریجی است، ارایه شده است. مقایسه بین نتایج، مؤید این مطلب است که مدل عددی با دقت مناسبی شیب زیاد سطح آزاد آب در نزدیکی عمق بحرانی را پیش‌بینی نموده است. لازم به ذکر است جذر متوسط مربع خطاها برای پیش‌بینی تراز سطح آزاد آب برابر با ۰/۰۱۵۳ درصد بوده است.



شکل ۹. مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمون پروفیل طولی جریان در یک کانال مستطیلی مستقیم



شکل ۱۰ مقایسه نتایج عددی پروفیل طولی جریان در یک کانال مستطیلی مستقیم با نتایج روش گام به گام مستقیم

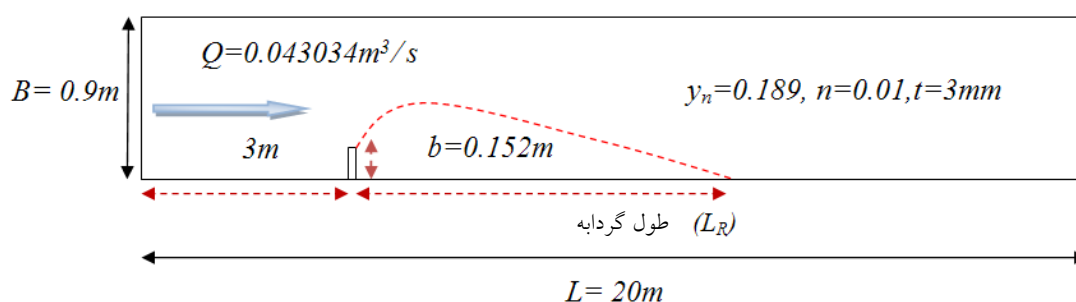
## ۷-۲- جریان اطراف آبشکن

یکی از مسایلی که معمولاً مهندسان آب با آن برخورد دارند، جریان‌های جدا شده هستند. جریان‌های جدا شده معمولاً در اثر وجود موانعی از جمله آبشکن‌ها، پله‌های معکوس و ... بر سر راه جریان ایجاد می‌شوند. به منظور ارزیابی مدل در رویارویی با چنین مسایلی، در این قسمت میدان جریان اطراف یک آبشکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. آبشکن‌ها با کاهش دادن مقطع عرضی رودخانه، الگوی جریان را به طور محسوسه تحت تأثیر قرار می‌دهند. خطوط جریان با نزدیک شدن به آبشکن، آرایش خود را تغییر می‌دهند و به تبعیت از هندسه آن (طول، زوایه و ...) الگوهای مختلفی را به خود می‌گیرند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی گسترده‌ای در خصوص پیش‌بینی الگوی جریان اطراف آبشکن‌ها توسط محققان مختلف انجام شده است. آزمون حاضر بر اساس کار آزمایشگاهی راجاراتنام و نواچکو<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۳) صورت گرفته است. در این آزمون، یک کانال مستقیم به طول ۲۰ و عرض ۰/۹ متر در نظر گرفته می‌شود. یک آبشکن به طول ۰/۱۵۲ متر و ضخامت ۳ میلی‌متر به صورت قائم در موقعیت ۳ متری از ورودی کانال تعبیه شده است. ضریب زبری مانینگ برای کانال یاد شده برابر با ۰/۰۱ برآورد می‌گردد (شکل ۱۱). عمق جریان و دبی عبوری از کانال به ترتیب برابر با ۰/۱۸۹ متر و ۰/۰۴۳۰۳ متر مکعب بر ثانیه است.

در این آزمون، محیط فیزیکی با استفاده از ۱۷۲۴۹ المان مثلثی که ابعاد اضلاع آن در حدود ۰/۰۵ متر است، شبکه‌بندی شده است. در مرز بالادست (ورودی) شار سرعت در راستای  $x$  (p) از مقدار

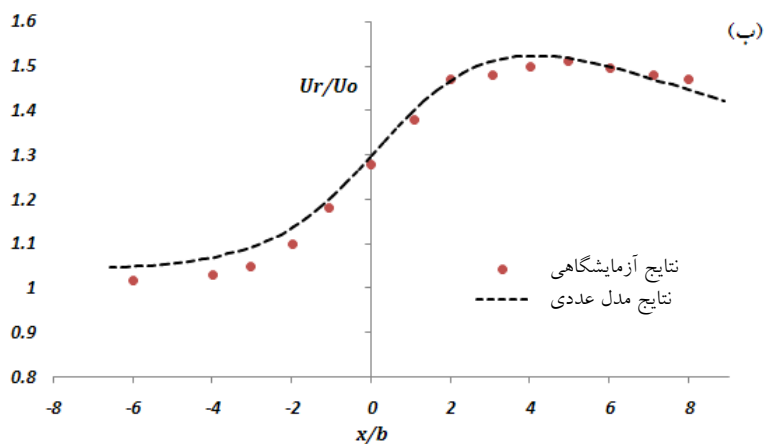
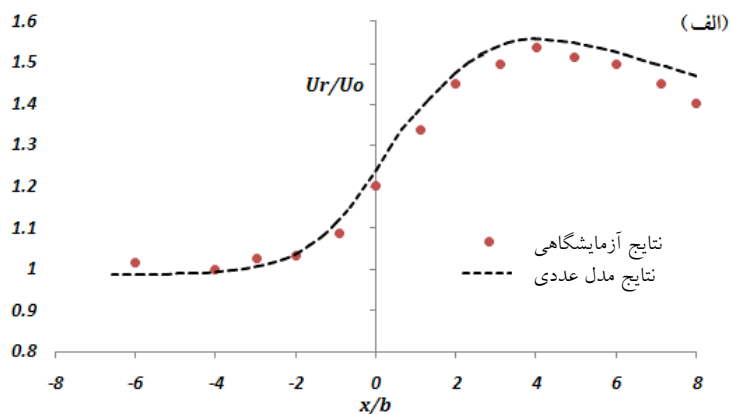
صفر تا ۰/۰۴۷۸۱۷ متر مربع بر ثانیه در ۲۰۰ گام زمانی افزایش داده می‌شود. در مرز پایین دست (خروجی) تراز سطح آب، ثابت و برابر با ۰/۱۸۹ متر لحاظ می‌گردد. نتایج حاصله از حل عددی پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه با گام‌های زمانی برابر ۰/۰۳ ثانیه در شکل‌های شماره ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. پروفیل سرعت نسبی حاصل از حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در دو مقطع طولی  $\frac{y}{b} = 3$  و  $\frac{y}{b} = 4$  که  $b$  برابر با طول آبشکن است، در شکل شماره ۱۲ ارائه شده است. در شکل مذکور موقعیت آبشکن به عنوان مبدأ مختصات بر روی محور افقی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است تمام مقادیر سرعت با استفاده از سرعت ورودی جریان که برابر با ۰/۲۵۳ متر بر ثانیه است، متعادل شده است. تطابق نسبتاً مناسب بین حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در شکل شماره ۱۲ حاکی از توانایی مدل جهت شبیه‌سازی جریان‌های جدا شده، دارد. جذر متوسط مربع خطاها در مقاطع طولی  $\frac{y}{b} = 3$  و  $\frac{y}{b} = 4$  به ترتیب برابر با ۰/۷۴۸ و ۰/۵۱۱ درصد است.

در شکل شماره ۱۳ خطوط جریان و بردارهای سرعت اطراف آبشکن حاصل از نتایج مدل عددی نشان داده شده است. در مطالعات آزمایشگاهی، نسبت طول ناحیه‌ای که برگشت جریان در آن وجود دارد به طول آبشکن، برابر با ۱۲/۵ گزارش شده است. با توجه به شکل ۱۳-الف نسبت مذکور که از نتایج حل عددی به دست آمده است برابر با ۱۳/۲ است، بنابراین، مقدار خطا در پیش‌بینی طول گردابه پایین دست و نقطه برخورد مجدد در حدود ۵ درصد می‌باشد که عدد قابل قبولی است.



شکل ۱۱. مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمون آزمایشگاهی راجاراتنام و نواچکو

توسعه مدل عددی دوبعدی در پلان به منظور بررسی شکل دیوار ...

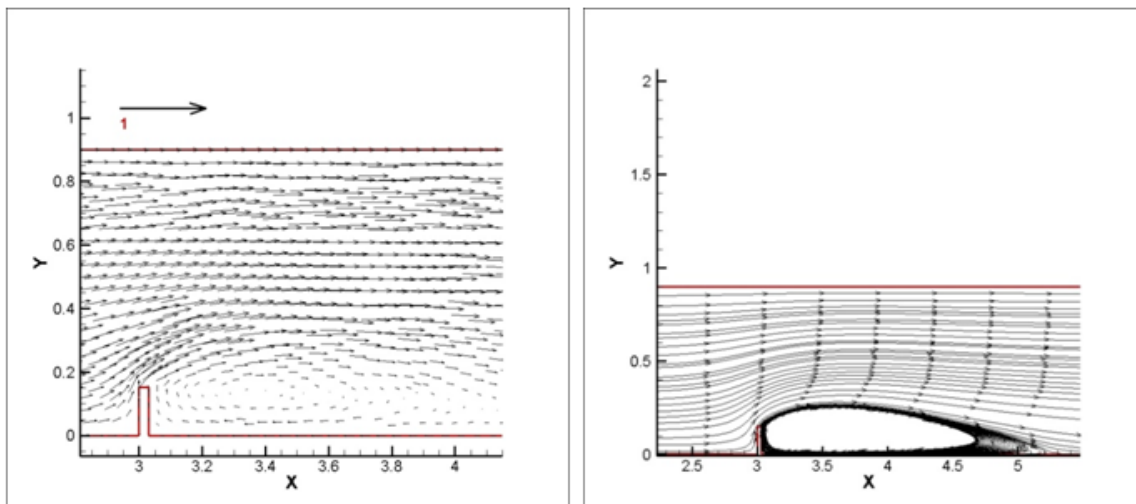


شکل ۱۲. مقایسه بین پروفیل سرعت حاصل از حل عددی و داده‌های آزمایشگاهی.

(الف)  $\frac{y}{b} = 3$ , (ب)  $\frac{y}{b} = 4$

(ب)

(الف)



شکل ۱۳. نتایج حاصل از مدل عددی اطراف آبشکن، (الف) خطوط جریان، (ب) بردارهای سرعت

## ۸- بررسی اثر پارامترهای مختلف هندسی دیوار

## هدایت

در این قسمت با استفاده از مدل عددی تهیه شده به بررسی جریان در محل پل پرداخته شده است. هدف از این بررسی، ارزیابی شکل‌های مختلف دیوار هدایت آب بر همواری و موازی بودن خطوط جریان عبوری از محل پل است.

## ۸-۱- بررسی زاویه دیوار هدایت

معمولاً دیوارهایی که جهت هدایت جریان در کشور ما ساخته می‌شوند از نوع دیوارهای خطی هستند. این دیوارها از منتهی‌الیه خاکریز پل شروع شده و با زاویه نسبت به خاکریز راه به ساحل رودخانه متصل می‌گردند. از طرف دیگر، همان‌طور که در بند ۲ بدان اشاره شد، اغلب مراجع، ربع بیضی با نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک برابر با عدد ۲/۵ را برای دیوار هدایت پیشنهاد نموده‌اند. با توجه به مطالب مطرح شده، در این قسمت پنج آزمون زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

جریان عبوری از محل پل بدون احداث دیوار هدایت آب، (آزمون شماره ۱)

جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری با زاویه ۱۵ درجه با راستای پل، (آزمون شماره ۲)

جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری با زاویه ۳۰ درجه با راستای پل، (آزمون شماره ۳)

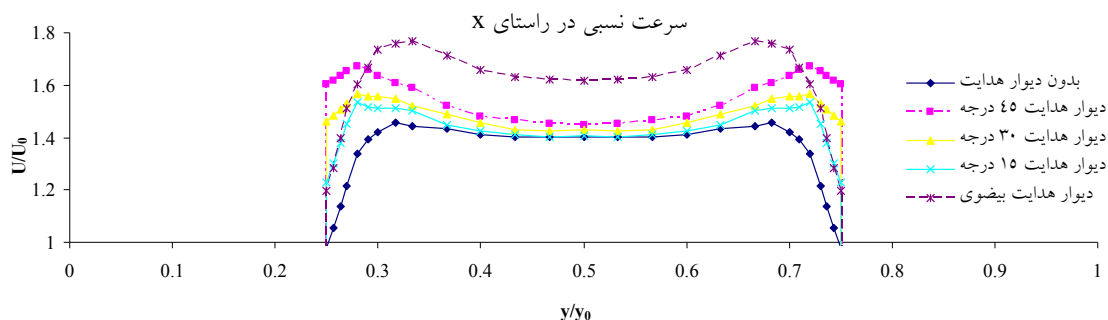
جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری با زاویه ۴۵ درجه با راستای پل، (آزمون شماره ۴)

جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری به شکل بیضوی با نسبت شعاع ۱ به ۲/۵، (آزمون شماره ۵)

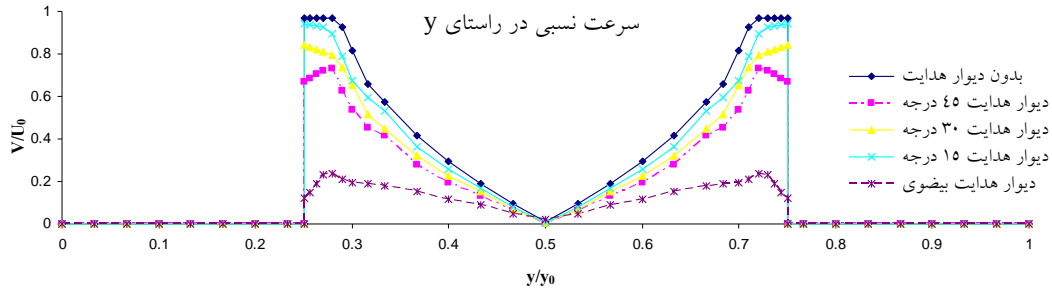
در تمام موارد فوق، فاصله پل تا مرز بالادست ۱۵۰۰ متر و فاصله آن تا مرز پایین‌دست ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. عرض

کلی کانال نیز ۳۰۰ متر فرض شده است به طوری که عرض کانال در محل پل ۱۵۰ متر، خاکریز سمت چپ و سمت راست نیز هر یک برابر با ۷۵ متر لحاظ شده است. بنابراین، نسبت بازشدگی مقطع برابر با عدد ۰/۵ خواهد بود. سرعت بالادست ۲/۵ متر بر ثانیه و عمق پایین‌دست ۳ متر اعمال شده است. در آزمون پنجم طول دیوار با استفاده از نمودار ارایه شده توسط FHWA برابر با ۴۰ متر تعیین شد. همان‌طور که پیش از این اشاره شده است نسبت شعاع ۱ به ۲/۵ نیز در اغلب آیین‌نامه‌ها پیشنهاد شده است. شرایط مطرح شده برای آزمون‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت و مدل تهیه شده جهت شبیه‌سازی جریان به کار رفت. جهت مقایسه جریان در آزمون‌های مختلف نمودارهای سرعت طولی، سرعت عرضی و مقدار کلی سرعت در محل پل رسم گردید. فواصل نقاط عرضی کانال با استفاده از عرض کل کانال (۳۰۰ متر) بی‌بعد شده است. همچنین مقادیر سرعت‌های طولی، سرعت عرضی و سرعت کلی نیز با استفاده از مقدار سرعت در بالادست (۲/۵ متر بر ثانیه) بی‌بعد گردید.

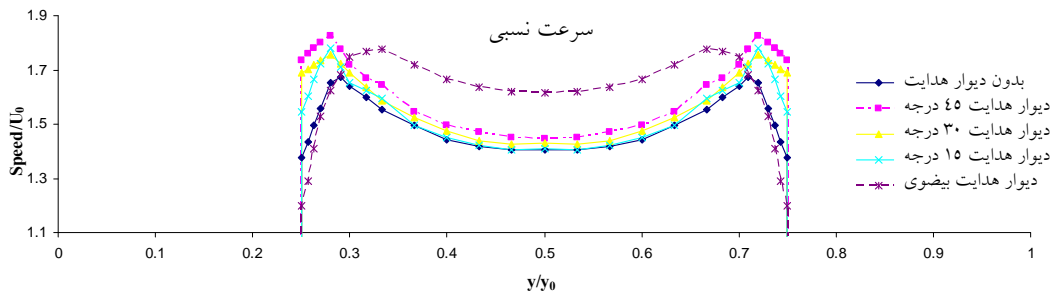
شکل‌های شماره ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب مقادیر بی‌بعد شده سرعت طولی، سرعت عرضی و سرعت کلی را در مورد آزمون‌های انجام شده، نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های شماره ۱۴ و ۱۶ قابل مشاهده است، روند سرعت طولی و سرعت کلی یکسان است. در آزمون دیوار هدایت بیضوی مقدار سرعت عبوری از محدوده وسط کانال نسبت به سایر آزمون‌ها بیشتر بوده و به تدریج با رسیدن به کناره‌ها مقدار سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به ثابت بودن مقدار دبی سیلاب، زیاد شدن سرعت در وسط کانال سبب کاهش عمق در محل بازشدگی رودخانه شده است. همچنین کم بودن مقدار کلی سرعت در محل دیواره بیضوی نسبت به سایر دیواره‌ها امکان آبشستگی پای دیواره بیضوی را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۴. نمودار سرعت طولی نسبی در عرض کانال. آزمون‌های ۱ تا ۵



شکل ۱۵. نمودار سرعت عرضی نسبی در عرض کانال، آزمون‌های ۱ تا ۵



شکل ۱۶. نمودار سرعت نسبی در عرض کانال آزمون‌های ۱ تا ۵

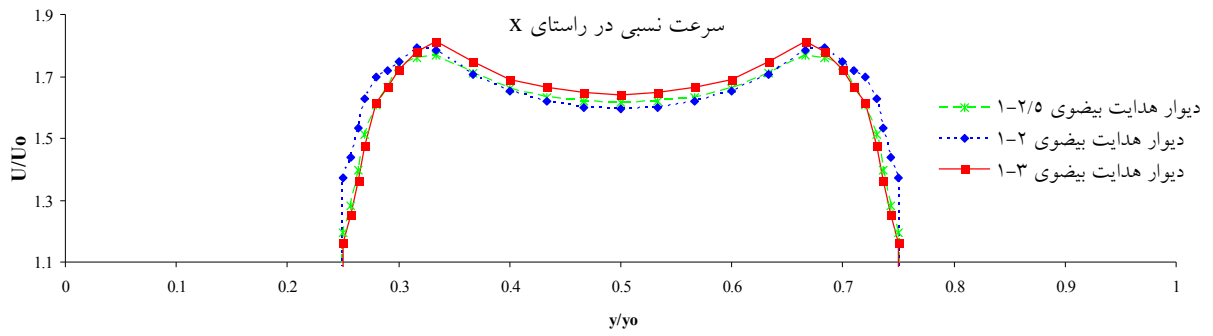
جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری به شکل بیضوی با نسبت شعاع ۱ به  $2/5$  و با طول ۳۲ متر، (آزمون شماره ۸)؛  
 جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری به شکل بیضوی با نسبت شعاع ۱ به  $2/5$  و با طول ۳۶ متر، (آزمون شماره ۹)؛  
 جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری به شکل بیضوی با نسبت شعاع ۱ به  $2/5$  و با طول ۴۴ متر، (آزمون شماره ۱۰)؛  
 جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری به شکل بیضوی با نسبت شعاع ۱ به  $2/5$  و با طول ۴۸ متر، (آزمون شماره ۱۱).  
 هدف از انجام آزمون‌های ۶ و ۷ بررسی نسبت شعاع‌های مختلف بیضی جهت ساخت دیوار هدایت است. در شکل‌های شماره ۱۷ تا ۱۹ به ترتیب نمودارهای مقادیر بی‌بعد شده سرعت طولی، سرعت عرضی و سرعت کلی آزمون‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور دیده می‌شود با افزایش نسبت شعاع‌های دیوار هدایت، سرعت طولی و سرعت کلی چندان تغییری نمی‌کند اما مقداری در کاهش سرعت عرضی مؤثر است. با توجه به شکل شماره ۱۸ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نسبت شعاع دیوار هدایت به عدد ۳، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش سرعت‌های عرضی نداشته است. در هر صورت بررسی موردی چنین مسئله‌ای منطقی به نظر می‌رسد. بدین معنا که در هر مورد خاص باید تحلیل هزینه-فایده صورت گرفته و در مورد افزایش نسبت مذکور تصمیم‌گیری شود.

بررسی سرعت‌های عرضی با استفاده از شکل شماره ۱۵ انجام پذیرفته است. مقادیر نشان داده شده در شکل شماره ۱۵ سرعت‌های عرضی هستند که سبب تمایل جریان به سمت کناره‌های کانال می‌گردد. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌گردد کمترین سرعت عرضی مربوط به آزمون دیوار هدایت بیضوی است که نشان می‌دهد جریان با کمترین برخورد به دیواره‌ها عبور می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که دیوار هدایت بیضوی گزینه مناسبی برای عبور جریان از محل پل خواهد بود. جهت بررسی بیشتر دیوار هدایت بیضوی شکل از لحاظ نسبت شعاع‌های دیوار و طول، آزمون‌های دیگری نیز انجام پذیرفت که در ادامه ارایه می‌گردد.

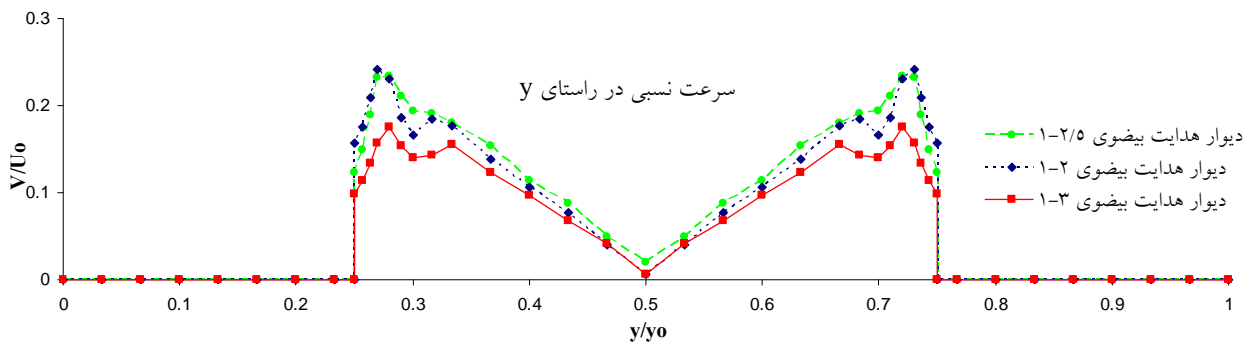
## ۸-۲- بررسی اثر شعاع دیوار و طول آن

به منظور بررسی اثرات شعاع و طول دیوار هدایت، مفروضات هیدرولیکی قسمت قبل در نظر گرفته می‌شود در آزمون پنجم، دیوار هدایتی به طول ۴۰ متر و نسبت شعاع ۱ به  $2/5$  مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی بیشتر اثر شعاع دیوار و طول آن، شش آزمون زیر با همان شرایط هیدرولیکی انجام و نتایج مربوطه ارایه می‌گردد:

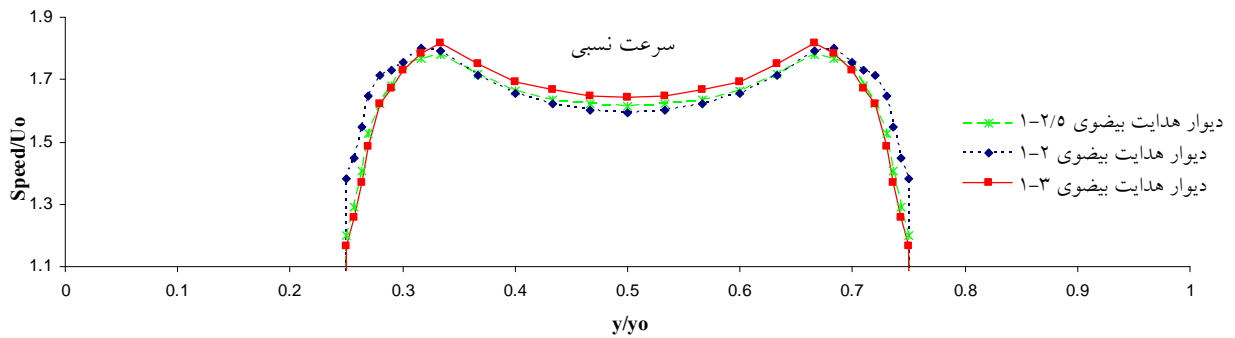
جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری به شکل بیضوی با نسبت شعاع ۱ به ۲ و با طول ۴۰ متر، (آزمون شماره ۶)؛  
 جریان عبوری از محل پل با احداث دیواری به شکل بیضوی با نسبت شعاع ۱ به ۳ و با طول ۴۰ متر، (آزمون شماره ۷)؛



شکل ۱۷. نمودار سرعت طولی نسبی در عرض کانال آزمون‌های ۶ و ۷



شکل ۱۸. نمودار سرعت عرضی نسبی در عرض کانال آزمون‌های ۶ و ۷

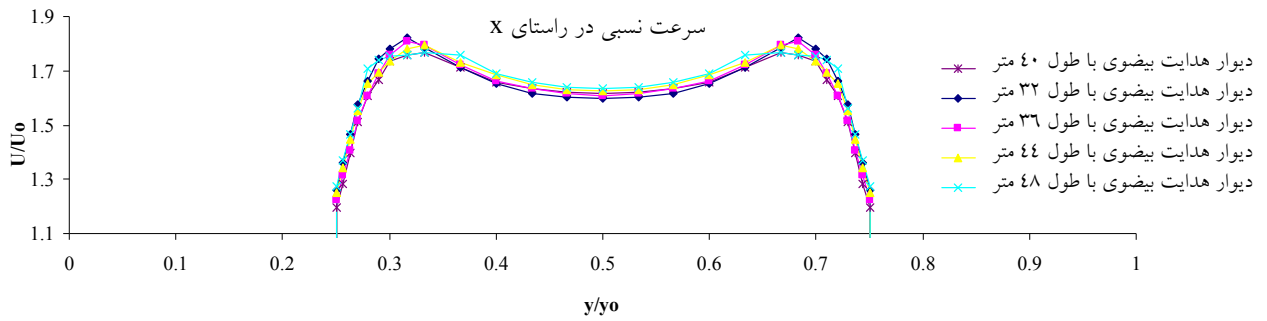


شکل ۱۹. نمودار سرعت نسبی در عرض کانال آزمون‌های ۶ و ۷

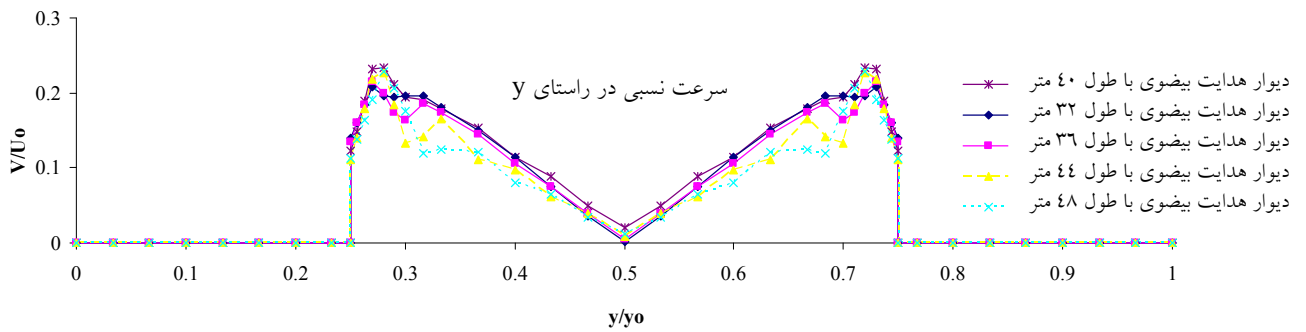
طولی و سرعت نسبی ایجاد نکرده است اما پروفیل سرعت عرضی تا حدودی تغییر داشته است. با توجه به شکل شماره ۲۱ می‌توان دید که در این قسمت هم تغییرات سرعت عرضی چندان قابل ملاحظه نیست و برای تعیین طول دقیق دیوار می‌بایست با در نظر گرفتن سرعت‌های عرضی و تحلیل هزینه-فایده به بررسی موضوع پرداخت.

آزمون‌های ۸ تا ۱۱ جهت بررسی طول دیوار هدایت بیضوی صورت پذیرفته است. آزمون‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب با ۸۰ درصد (۳۲ متر)، ۹۰ درصد (۳۶ متر)، ۱۱۰ درصد (۴۴ متر) و ۱۲۰ درصد (۴۸ متر) طول دیوار هدایت اولیه، طراحی شده است. شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ نتایج خروجی این قسمت از تحلیل را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های مذکور قابل استنتاج است، افزایش و کاهش طول دیوار تغییر چندانی در پروفیل سرعت

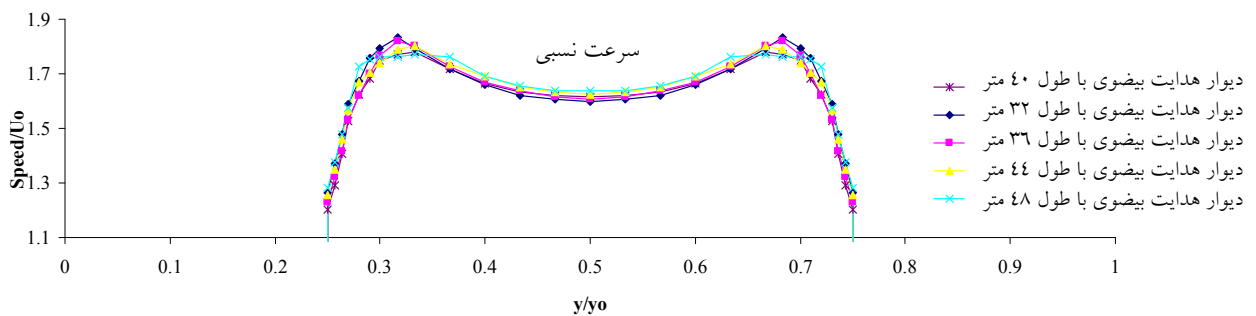
توسعه مدل عددی دوبعدی در پلان به منظور بررسی شکل دیوار ...



شکل ۲۰. نمودار سرعت طولی نسبی در عرض کانال آزمون‌های ۸ تا ۱۱



شکل ۲۱. نمودار سرعت عرضی نسبی در عرض کانال آزمون‌های ۸ تا ۱۱



شکل ۲۲. نمودار سرعت نسبی در عرض کانال آزمون‌های ۸ تا ۱۱

## ۹- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل عددی برای شبیه‌سازی دو بعدی جریان‌های با سطح آزاد ارایه گردید. در مدل توسعه داده شده، معادلات دو بعدی آب‌های کم عمق با استفاده از روش حجم محدود گسسته شدند. مقطع سازی محیط فیزیکی نیز با استفاده از شبکه بدون ساختار مثلثی انجام شد. در این مدل، معادله جابه‌جایی با استفاده از روش مرتبه دوم فروم و معادله پخش با کاربرد روش صریح حل گردید. مدل زیر مقیاس شبکه نیز برای مدل‌سازی آشفتنگی مورد استفاده قرار گرفت. آزمون جریان متغیر تدریجی در کانال مستطیلی و جریان اطراف آبشکن، آزمون‌هایی

بودند که برای صحت‌سنجی مدل و اطمینان از عملکرد صحیح آن، مورد استفاده قرار گرفتند. با کاربرد مدل عددی توسعه داده شده و انجام ۱۱ آزمون، عملکرد شکل‌های مختلف دیوار هدایت آب در اصلاح الگوی جریان عبوری از مقطع پیل مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج آزمون‌های ارایه شده می‌توان چنین استنباط کرد که شکل دیوار هدایت بیضوی با نسبت شعاع ۱ به ۲/۵ که بر اساس گراف تهیه شده از نشریه FHWA باشد، به عنوان طرح اولیه مناسب است و برای بررسی بیشتر توصیه می‌گردد در مورد هر مطالعه خاص، تغییرات پروفیل سرعت با در نظر گرفتن طول‌های مختلفی از دیوار بیضوی شکل و نسبت‌های

سواحل"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

مختلف شعاع‌های آن و همچنین ملاحظات اقتصادی مورد ارزیابی قرار گیرد.

— هادیان، م. ر. (۱۳۸۱) "بررسی شکل هندسی دیوار هدایت آب پل‌ها با استفاده از مدل فیزیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

**۱۰- سپاسگزاری**  
تحقیق حاضر با حمایت مالی پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی انجام شده است که بدین وسیله از زحمات مدیریت و کارشناسان محترم مجموعه مذکور قدردانی می‌گردد.

— Abbasi S., Kamanbedast A. and Ahadian J. (2011) "Numerical investigation of angle and geometric of L- shape groin on the flow and erosion regime at river bends", World Applied Sciences Journal, 15(2): pp. 279-284.

## ۱۱- پی‌نوشت‌ها

— Abbott M. B. and Basco D. R. (1989) "Computational fluid dynamics, an introduction for engineers", Longman Singapore Publisher Ltd.

1. Bradley
2. Faraday and Charlton
3. Flavel
4. Neill
5. Hamill
6. Karaki
7. Colorado
8. McCoy
9. Kuhnlel
10. Zhang
11. Koken and Constantinescu
12. Diffusion
13. Advection
14. Unstructured Mesh
15. Delaunay
16. Fractional Step
17. Transport
18. Fromm
19. Smagorinsky
20. Rajaratnam and Nwachukwu

— Bradley, J. N. (1978) "Hydraulics of Bridge Waterways" (HDS1), US Department of Transportation/ Federal Highway Administration. Washington DC.

— Faraday, R. V. and Charlton, F. G. (1983) "Hydraulic Factors in Bridge Design", Hydraulic Research Station, Wallingford, UK.

— Flavel, D. (1994) "Waterway Design: A Guide to the Hydraulic Design of Bridges, Culverts and Floodways", AUSTRROADS National Office.

— Hamill, L. (2004) "Bridge Hydraulics", Taylor & Francis e-Library.

— Kilanehei F., Naeeni S.T.O. and Namin M.M. (2011) "Coupling of 2DH-3D hydrodynamic numerical models for simulating flow around river hydraulic structures", World Applied Sciences Journal, 15(1): pp. 63-77

— Koken, M. and Constantinescu G. (2011) "Flow and turbulent structure around a spur dike in a channel with a large scour hole", Water Resources Research, Vol. 47.

— Kuhnlel R., Jia Y. and Alonso C. V. (2008) "Measured and simulated flow near a submerged spur dikes", Journal of Hydraulic Engineering, 134(7): pp. 916-924.

— McCoy A., Constantinescu G. and Weber J. (2008) "Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel whit series of groynes", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 134(2): pp. 157-172.

— Namin M. M., Lin B. and Falconer R. A. (2004) "Modeling estuarine and coastal flows using an

## ۱۲- مراجع

— کیلانته‌ئی، ف. (۱۳۹۰) "توسعه مدل دو بعدی- سه بعدی شبیه‌سازی جریان در اطراف سازه‌های هیدرولیکی رودخانه‌ای"، پایان‌نامه دکترا، گرایش سازه‌های هیدرولیکی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

— محمدزاده قمی، م. و منتظری نمین، م. (۱۳۸۴) "شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد به روش Projection Method بر روی شبکه بدون ساختار مثلثی"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

— هادیان، م. ر. و زراتی، ا. ر. (۱۳۸۸) "مدل‌های عددی آب‌های کم عمق و کاربرد آنها در مهندسی رودخانه و

- Smagorinsky J. (1963) "General circulation experiment with the primitive equations", Monthly Weather Review, 91: pp. 99-165.
- Yazdi J., Sarkardeh H., Azamatulla H. M. D. and Ghani A. (2010) "3D simulation of flow around a single spur dike with free surface flow", International Journal of River Basin Management, 8(1): pp. 55-62.
- Zhang H., Nakagawa H., Kawaike K. and Baba Y. (2009) "Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke", International Journal of Sediment Research, 24: pp. 33-45.
- unstructured triangular finite volume algorithm", Journal of Advances in Water Resources, 27: pp. 1179-1197.
- Namin M. M. (2003) "A fully three dimensional non hydrostatic free surface flow model for hydro environmental predictions", Ph.D. Thesis, Cardiff School of Engineering, Cardiff University.
- Neill, C. R. (2000) "Guide to Bridge Hydraulics", Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, Toronto.
- Rajaratnam N. and Nwachukwu B. A. (1983) "Flow near Groin-like structures", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 109(3): 463-480.

# Developing 2 DH Numerical Model to Assess the Geometry of Bridge Guide Wall

*F. Kilanehei, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

*A. Mahjoob, Ph.D., Grad., Transportation Research Institute, Iran University of Science and Technology, Tehran. Iran.*

*M. Montazeri Namin, Assistant Professor, Department of Civil Engineering University of Tehran, Tehran, Iran.*

*E-mail: kilanehei@eng.ikiu.ac.ir*

*Received: September 2012 - Accepted: February 2013*

## ABSTRACT

In this paper, flow around bridge guide wall bank has been simulated numerically using 2DH hydrodynamic model. A finite volume fractional step method has been used to solve the governing equations. In this study, an unstructured triangular mesh has been deployed to discretized the problem domain. Using this model, the free surface elevation and depth-averaged velocities have been calculated in computational domain. To calculate these mentioned parameters, at first, the advection and diffusion terms in the momentum equations have been solved and the intermediate velocities have been achieved. The influence of bed friction has been added in the second step. By solving the continuity equation and the remaining terms of the momentum equations simultaneously, the free surface elevation will be determined. Finally, using the calculated free surface elevation, final velocity values are obtained. After validating the model with several test cases and ensure its proper performance, the model was used to assess different forms of bridge guide wall bank and the appropriate geometry of bridge guide wall bank has been determined.

**Keywords:** 2DH Hydrodynamic Model, Finite Volume Method, Fractional Step Method, Unstructured Triangular Mesh, Bridge Guide Wall