



جناب آقای عباسعلی قزل سوفلو

موضوع: پذیرش نهایی مقاله

با سلام،

احتراما، با کمال مسرت به استحضار می رساند مقاله جنابعالی تحت عنوان :

مدل سازی عددی جریان آبهای کم عمق باوجود امواج تیز ایستا وپویا

بر اساس نظرات داوران و هیئت تحریریه برای چاپ در مجله فنی و مهندسی
دانشگاه آزاد اسلامی مورد پذیرش قرار گرفته است.

با تشکر و احترام

مجله فنی و مهندسی

دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

آدرس: مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، دبیرخانه مجله فنی مهندسی

Website: iaumjournals.com

e-mail: teJournal@yahoo.com
info@iaumjournals.com

تلفن، فکس: ۰۵۱۱-۶۶۲۵۰۵۵

- برنامه‌ریزی استفاده از واحدهای تولید پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع به منظور حداکثر سازی رفاه اجتماعی
۱..... رضا قاضی، اسماعیل قدیریان.....
- بررسی تأثیرات عوامل غیر خطی بر روی رفتار سیستم های قدرت
۱۵..... سپهر سلطانی، رضا قاضی، ناصر پریز.....
- مدل سازی عددی جریان آب های کم عمق با وجود امواج تیز ایستا و پویا
۲۷..... عباسعلی قزل سوفلو، محمدرضا جعفرزاده.....
- تحلیل و کنترل پدیده ری انتری با استفاده از شناسایی هدایت های یونی در بافت میوکارد بطن
۴۱..... زینب السادات دستغیب، مرتضی خادمی، اسد عازمی، حسین قلی زاده نرم، مهتوش شجعی، مهناز اروانه، وحید رضا سیزواری.....
- بهبود پایداری کنترل کننده GPC در کنترل سیستم های غیر حداقل فاز ناپایدار و استفاده موردی آن در کنترل Stewart
Platform
۶۵..... مهدی یعقوبی، محمد حائری.....
- تعیین ارتباط بین عناصر ساختاری و کانی زایی مس به منظور پتانسیل یابی مناطق جدید با استفاده از تکنیک های سنجش
از دور و GIS در محدوده چهارگنبد، استان کرمان
۷۹..... رضا درخشانی، علی مهرابی، زینب باغفلکی.....
- نقد روش اقلیم بندی دوارتن برای بارش حداکثر روزانه در ایران به کمک روش گشتاورهای خطی
۹۳..... فرهاد خام چین مقدم، حجت رضائی پزند.....
- بررسی استحکام کنشی و سطوح شکست کامپوزیت های Al/ZrO_2 ساخته شده به روش گردابی (یادداشت پژوهشی)
۱۰۵..... محمدامین باغچه سرا، حسین عبدی زاده، حمیدرضا بهاروندی.....
- A CMOS Ring Oscillator VCO with Quadrature Outputs and High-Tuning Range**
Mahdi Parvizi, A. Nabavi..... 117
- Heat Transfer Modeling and Thermal Analysis for a Fluidized Bed (Research Note)**
Hamid Reza Goshayeshi, John Missenden 127
- ۱۳۵..... چکیده های انگلیسی.....

مدل سازی عددی جریان آب‌های کم عمق با وجود امواج تیز ایستا و پویا

عباسعلی قزل سوفلو^(۱)محمد رضا جعفرزاده^(۲)

(۱) استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

(۲) دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده امواج تیز در کانال‌های باز از تغییر ناگهانی در عمق و سرعت جریان حاصل می‌شوند. حل کننده‌های ریمن با سود جستن از نظریه مشخصه‌ها، بدون ساده سازی معادلات حاکم، به شکل مطلوبی قادر به شبیه سازی ناپیوستگی‌ها از جمله امواج تیز می‌باشند. اگر موقعیت و مشخصات امواج با زمان تغییر پیدا کند، به عبارت دیگر موج متحرک باشد، به آن "موج تیز پویا" گفته می‌شود. به عنوان مثال امواج ناشی از شکست سد و یا باز و بسته شدن ناگهانی دریچه‌ها که به واسطه تیزی پیشانی موج به عنوان امواج تیز پویا طبقه بندی می‌شوند. در صورتی که موقعیت و مشخصات موج پس از دائمی شدن جریان نسبتاً ثابت باقی بماند "موج ایستا" نامیده می‌شود. بنابراین پرش هیدرولیکی و امواج تولید شده در تبدیل‌ها و یا در اثر وجود مانع عرضی در مسیر جریان در جریان‌های فوق بحرانی در دسته امواج تیز ایستا قرار می‌گیرند. در این مقاله از حل کننده تقریبی ریمن به روش Roe برای شبیه سازی رفتار امواج تیز ایستا و پویا در جریان آب‌های کم عمق در یک و دو بعد، در کانال‌های باز استفاده شده است. در این راه از بعضی مسائل، با وجود حل تحلیلی آن‌ها، برای ارزشیابی و تصدیق نتایج استفاده شده است. با مقایسه نتایج عددی با برخی حل تحلیلی برخی مسائل می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی Roe به خوبی قادر به شبیه سازی یک و دو بعدی امواج تیز ایستا و پویا در جریان آب‌های کم عمق را داراست.

واژه‌های کلیدی جریان آب‌های کم عمق، حل کننده‌های ریمن، روش Roe، ناپیوستگی، امواج تیز.

* عهده دار مکاتبات

نشانی: دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، دانشکده مهندسی، گروه عمران

پست الکترونیکی: ghezel@wali.um.ac.ir

تلفن: ۰۵۱۱-۶۶۲۴۸۱۳

۱- مقدمه

هنگامی که در کانال، عمق یا سرعت جریان به طور ناگهانی تغییر پیدا می‌کند، موج تیز؛ (Shock) به وجود می‌آید. به طور عمده، امواج تیز در جریان‌های فوق بحرانی تولید می‌شود؛ لیکن عبور جریان از حالت زیر بحرانی به فوق بحرانی نیز یک شاک محسوب می‌شود که به آن جریان گذار از حالت بحرانی (Transcritical flow) گفته می‌شود (همانند پرش هیدرولیکی). اگر موقعیت و مشخصات موج تیز با زمان تغییر پیدا کند، و یا موج تیز متحرک باشد، به آن "موج تیز پویا" گفته می‌شود. به عنوان مثال امواج ناشی از شکست سد و یا باز و بسته شدن ناگهانی دریچه‌ها از جمله امواج تیز پویا هستند. در صورتی که موقعیت و مشخصات موج تیز، پس از دائمی شدن جریان، نسبتاً ثابت باقی بماند "موج تیز ایستا" نامیده می‌شود. بنابراین پرش هیدرولیکی و امواج تیز تولید شده در تبدیل‌ها در اثر وجود مانع عرضی در مسیر جریان در جریان‌های فوق بحرانی به عنوان امواج تیز ایستا طبقه بندی می‌شوند.

معادلات حاکم بر پویایی امواج تیز، همان معادلات جریان آب‌های کم عمق است. با توجه به غیر خطی بودن این معادلات، حل تحلیلی آن‌ها محدود به حالات ساده و یا مستلزم حذف جملات مهم معادلات می‌باشد؛ از این‌رو در حالات عمومی از روش‌های عددی به عنوان ابزاری سودمند برای حل معادلات مذکور استفاده می‌شود. از طرف دیگر شبیه سازی موقعیت و شکل شاک‌ها به علت تغییر ناگهانی وضعیت جریان در مجاورت آن‌ها، بسیار پیچیده است؛ بنابراین روش‌های عددی متعارف نظیر روش چهار نقطه‌ای پریسمن؛ (Box Scheme, Preissman, 1961) قادر به تسخیر موقعیت ناپیوستگی‌ها نیستند. جمیسون برای حل معادلات اولر تکنیک، "لزجت مصنوعی" و "معادلات اصلاح شده" را به منظور حذف نوسانات غیرفیزیکی در مجاورت ناپیوستگی‌ها پیشنهاد کرد (Jameson et al., 1981). این روش‌ها بعدها در مسائل

آب‌های کم عمق نیز به کار برده شد. فنما و چادری در سال ۱۹۸۵ روش‌های بیم وارمینگ، گابوتی و مک کورمک را همراه با تکنیک لزجت مصنوعی، برای حل دو بعدی مسئله شکست سد به کار بردند. در ابتدای دهه ۱۹۸۰، ایده روش ابقایی گودونف، برای حل معادلات اولر به کار برده شد. این روش، بدون نیاز به اعمال لزجت مصنوعی و یا ساده سازی معادلات حاکم، به شکل مطلوبی قادر به شبیه سازی ناپیوستگی‌ها می‌باشد.

رو در سال ۱۹۸۱، ون لیر در سال‌های ۱۹۷۷ - ۱۹۸۲ و اوشر و سولومون در سال ۱۹۸۲ از جمله دانشمندانی هستند که حل کننده‌های تقریبی ریمن را در معادلات اولر توسعه دادند. برای حذف نوسانات غیرفیزیکی در مجاورت موج تیز، هارتن در سال ۱۹۸۳ ضابطه کاهش مجموع تغییرات فود. روش‌های نوع TVD که بعداً توسط سووبی در سال ۱۹۸۴ و یی در سال ۱۹۸۷ تکمیل شد، در دهه ۱۹۹۰ توسط بسیاری از محققین، برای حل معادلات جریان آب‌های کم عمق به کار گرفته شد. گلیستر در سال ۱۹۸۸ روش Roe را برای حل معادلات آب‌های کم عمق به کار برد.

الکروود و گارسیا ناوارو در سال ۱۹۹۳ روش حجم محدود نوع گودونف را برای حل معادلات آب‌های کم عمق استفاده کردند. ژائو و هم‌کاران در سال ۱۹۹۶، روش حل کننده تقریبی ریمن به روش اوشر و سولومون را برای شبیه سازی جریان غیر دائمی در رودخانه‌ها به کار بردند. چیپادا و هم‌کاران در سال ۱۹۹۸، روش Roe را برای مدل سازی جریان در تبدیل‌ها و امواج جزر و مدی، و یانگ و گریمان در سال ۲۰۰۰ مدل Roe-TVD را برای حل مسئله شکست سد با رسوب استفاده نمودند. ژوپو و رابرتز در سال ۲۰۰۰ مدل فلاکس متوسط وزنی WAF را برای محاسبه شکست سد به کار بردند. تسنگ در سال ۲۰۰۱ از روش‌های پایستار، با دقت زیاد برای روندیابی موج در کانال‌ها استفاده نمود. کالفی و هم‌کاران در سال

که در آنجا، U بردار متغیرهای ابقاء شده، $F(U)$ و $G(U)$ بردارهای فلاکس، به ترتیب در جهات x و y ، می‌باشد.

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F(U) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + 0.5gh^2 \\ huv \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G(U) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + 0.5gh^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در معادلات فوق، g ؛ شتاب جاذبه، h ؛ عمق جریان، u (v)؛ سرعت جریان در جهت x (y) می‌باشد و $S(U)$ بردار جملات منبع است. در شناسایی و تسخیر شکاها در معادلات آب‌های کم عمق، با نادیده گرفتن برخی اثرات فیزیکی، هم‌چون نیروهای تنش سطحی ناشی از وزش باد، نیروی کریولیس، تبخیر و بارش و تنها با منظور نمودن اثرات شیب بستر کانال و نیروی اصطکاک، بردار جملات منبع به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(s_{0x} - s_{fx}) \\ gh(s_{0y} - s_{fy}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

در معادله فوق (s_{0y}) ، (s_{0x}) و (s_{fy}) و (s_{fx}) به ترتیب، شیب کف کانال و شیب اصطکاکی در جهت x و y می‌باشد. شیب اصطکاکی براساس رابطه مانینگ تخمین زده می‌شود.

۲۰۰۳ حل کننده تقریبی ریمن به روش HLL را برای شبیه سازی حرکت موج سیلاب‌های حدى در رودخانه‌ها به کار بردند. قزل سوفلو و جعفرزاده در سال ۲۰۰۴، روش عددی Roe را برای شبیه سازی بعدی امواج تیز ایستای ناشی از وجود یک مانع عرضی در مسیر جریان فوق بحرانی به کار بردند. در این مقاله، حل کننده تقریبی ریمن به روش Roe برای شبیه سازی امواج تیز ایستا و پویا در جریان آب‌های کم عمق یک و دو بعدی استفاده می‌شود. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود در مسئله شبیه سازی پرش هیدرولیکی در یک بعد، ملاحظه گردید که مدل عددی به کار رفته به خوبی قابلیت تسخیر امواج تیز ایستا را دارد. هم‌چنین از مسائل آزمایشی استخدام شده نیز قابلیت مدل در شبیه سازی امواج تیز پویا مشخص گردید. امواج ناشی از شکست متوالی خاکریزها به عنوان یک مسئله یک بعدی و هم‌چنین پرش هیدرولیکی مایل، شکست دایک‌های متوالی، امواج ایستای ناشی از وجود یک خم زاویه دار در پلان یک کانال در دو بعد مدل خواهد گردید.

۲- معادلات حاکم

معادلات جریان آب‌های کم عمق در کانال‌های باز با متوسط گیری در عمق از معادلات سه بعدی ناویراستوکس به دست می‌آید. در استخراج معادلات مذکور، سیال غیر قابل تراکم و توزیع فشار در عمق به صورت هیدرواستاتیک فرض می‌شود. این معادلات علاوه بر مسئله امواج در کانال‌های باز، برای مسائل دیگری هم‌چون شکست سد، جریان سیلاب و امواج سونامی نیز قابل کاربرد است. شکل برداری معادله دیفرانسیلی جریان آب‌های کم عمق در حالت کلی به صورت زیر می‌باشد: (Toro, 2001)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U) \quad (1)$$

۳- حل عددی معادلات

معادلات ابقائی (Conservative) جریان آب های کم عمق در شکل دیفرانسیلی قابلیت تسخیر ناپیوستگی ها را ندارد. بدین منظور، باید از شکل انتگرالی آن استفاده شود (Toro, 2001). با انتگرال گیری از معادله حاکم، فرمول عمومی ابقائی به شکل رابطه (۶) حاصل می شود:

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n \right] + \Delta t S_i^n \quad (6)$$

در معادله فوق:

U^n : بردار متغیرهای حالت در گام زمانی n ، $F_{i \pm 1/2}$: بردار فلاکس های عددی بین سلولی ورودی و خروجی سلول محاسباتی، Δx و Δt گام مکانی و زمانی و S_i^n بردار جملات منبع می باشد. در روش های حجم محدود، محاسبه فلاکس های عددی بسیار مهم است که در ادامه به آن پرداخته می شود.

۳-۱- روش Roe

فلاکس عددی در روش Roe برای معادلات آب های کم عمق به صورت صریح با استفاده از تکنیک متکی به بالادست، مطابق رابطه زیر به دست می آید (Glaister, 1988):

$$F_{i+1/2}^{Roe-TVD} = 0.5(F_i + F_{i+1}) - 0.5 \sum_{k=1}^3 \tilde{\alpha}_{i+1/2}^k |\tilde{\lambda}_{i+1/2}^k| \tilde{R}_{i+1/2}^k + 0.5 \sum_{k=1}^3 \Phi(\tilde{\tau}_{i+1/2}^k) \tilde{\alpha}_{i+1/2}^k |\tilde{\lambda}_{i+1/2}^k| \left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta x} |\tilde{\lambda}_{i+1/2}^k| \right) \tilde{R}_{i+1/2}^k \quad (7)$$

در این رابطه $\phi(r)$ تابع محدود کننده فلاکس است. اگر $\phi(r) = 0$ باشد، مدل مرتبه اول متکی به بالادست (upwind) حاصل می شود و در صورتی که $\phi(r) = 1$ باشد، مدل مرتبه دوم لاکس - وندروف به دست می آید. چنانچه $\phi(r)$ با توابع مختلف محدود کننده شیب یا محدود کننده فلاکس جایگزین شود، مدل

نوع TVD روش Roe حاصل می شود.

توابع محدود کننده به دو گروه: توابع محدود کننده فلاکس و توابع محدود کننده شیب، تقسیم بندی می شوند. یکی از معروف ترین توابع محدود کننده فلاکس، تابع Superbee است که در مدل سازی حاضر از آن استفاده شده است. (Toro, 2001)

$$\phi(r) = \max[0, \min(2r, 1), \min(r, 2)] \quad (8)$$

سایر اجزای رابطه (۱۰) به صورت زیر است:

λ : مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبی بردار فلاکس $A = \frac{\partial F}{\partial U}$ ، R : بردارهای ویژه راست ماتریس A و α : ضرایب خطی Roe است که به صورت روابط ذیل تخمین زده می شود (Toro, 2001):

$$\tilde{\alpha}_{i+1/2,j}^{1,3} = \frac{1}{2} \Delta h \pm \frac{1}{2c} \{ \Delta(uh) - u \cdot \Delta h \} \quad (9)$$

$$\tilde{\alpha}_{i+1/2,j}^2 = \Delta(vh) - v \cdot \Delta h \quad (10)$$

محاسبات عددی نشان داده است که روش مرتبه اول متکی به بالادست، باعث میرایی پیشانی موج شک می شود با اضافه نمودن جملات مرتبه دوم (مدل لاکس - وندروف) نوسانات غیر فیزیکی در مجاورت شک تولید می شود؛ اما استفاده از مدل Roe-TVD به شکل بسیار مطلوبی قادر به شبیه سازی ناپیوستگی ها می باشد (Ghezelsofloo and Jaefarzadeh, 2005).

۴- کاربردهای مدل عددی

در این بخش، کاربردهای مختلف روش عددی حل کننده تقریبی مسئله ریمن به روش Roe در مسائل متنوع آب های کم عمق یک و دو بعدی شامل موارد زیر بررسی خواهد شد. لازم به توضیح است که برخی کاربردها نظیر استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود و هم چنین مسائل آزمایشی که دارای حل تحلیلی می باشند، دارای کاربرد ارزیابی قابلیت روش عددی استخدام شده هستند؛ در حالی که می توان مسائل دیگر

ایستا قرار دارد که بر اثر تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی تشکیل می‌شود. این مسئله اصطلاحاً از نوع جریان‌های متغیر سریع (RVF) بوده و شبیه سازی آن می‌تواند حاکی از توانمندی یک مدل عددی باشد. پیش بینی محل تشکیل، مشخصات هیدرولیکی جریان در قبل و بعد از پرش، شامل اعماق اولیه و ثانویه، عدد فرود، سرعت جریان و هم‌چنین میزان اتلاف انرژی، از اهداف اصلی شبیه سازی پرش هیدرولیکی بوده و کاربردهای وسیعی در طراحی سازه‌های هیدرولیکی از جمله سازه‌های اتلاف انرژی دارد. ون تی چاو در سال ۱۹۵۹ برای تعیین محل پرش، نیمرخ‌های سطح آب را برای جریان فوق بحرانی با شروع آن از بالا دست و جریان زیر بحرانی با شروع آن از پایین دست، محاسبه و تعیین نمود. در محاسبات انجام شده، نیروی مخصوص در دو طرف پرش، مساوی فرض شده است. مک کرکودل و خلیفه در سال ۱۹۸۳ روش انتگرال نواری را برای محاسبه طول پرش و نیمرخ سطح آب و فشار در بستر کانال به کار بردند. آبوت و هم‌کاران روش تفاضل محدود و کاتپودس در سال ۱۹۸۴ روش اجزای محدود را برای حل عددی معادلات سنت و نانت تا رسیدن به حالت دائمی به کار بردند.

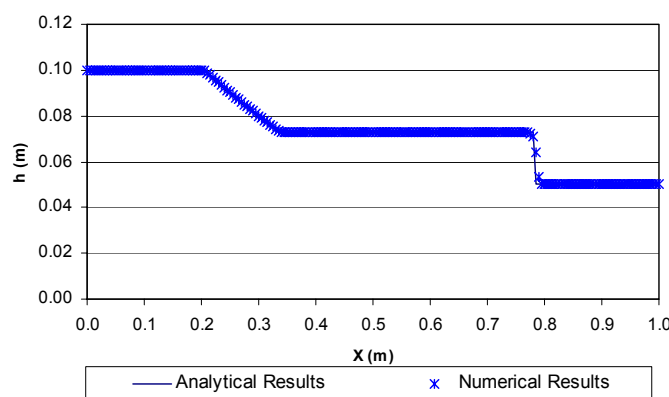
یک و دو بعدی را کاربردهای مدل عددی Roe در مسائل آب‌های کم عمق منظور نمود. در این راستا با توسعه یک برنامه کامپیوتری توسط مولفین، از مدل عددی Roe برای حل مسائل آب‌های کم عمق در کاربردهای مختلف آن استفاده شده است.

۴-۱- مسئله شکست یک بعدی سد

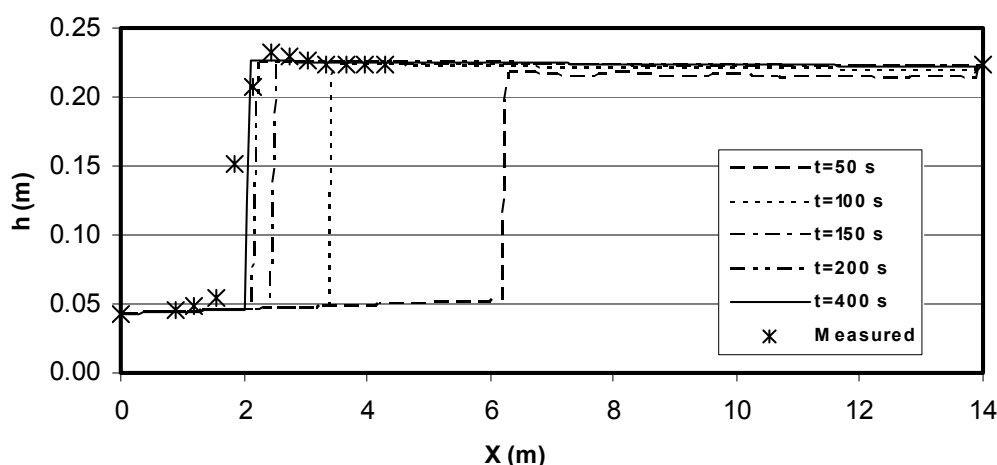
حل تحلیلی این مسئله برای یک کانال مستطیلی شکل افقی و بدون احتساب اثرات اصطکاک، توسط استوکر در سال ۱۹۵۷ ارائه گردید. یک کانال مستطیلی به طول واحد ($L=1m$) که سد در وسط آن قرار دارد ($X_{dam}=0.5m$) را در نظر بگیرید عمق آب در بالادست $h_u=0.1m$ و در پایین دست $h_d=0.05m$ است سرعت اولیه آب در پایاب صفر می‌باشد. شیب طولی کانال صفر و از اثرات اصطکاک چشم پوشی می‌شود. سد به صورت ناگهانی شکسته شده و نتایج عددی (نشانه) و تحلیلی (خط پر) نیمرخ عمق در زمان $t=0.3$ sec در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج عددی، سازگاری مطلوبی با حل تحلیلی دارد.

۴-۲- پرش هیدرولیکی یک بعدی

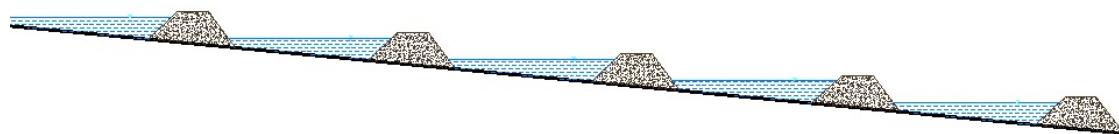
پرش هیدرولیکی در طبقه‌بندی امواج تیز یا ناپیوستگی



شکل ۱ نیمرخ طولی در مسئله شکست سد پس از گذشت $t=0.3$ Sec



شکل ۲ مقایسه نتایج عددی و اندازه گیری آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در پایاب یک دریچه



شکل ۳ نیم رخ طولی شماتیک مسئله دایک های متوالی

مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی، به وضوح نشان می دهد که مدل عددی Roe، به خوبی توانمندی مدل سازی پرش هیدرولیکی را دارد.

۳-۴ شکست سدهای متوالی ناشی از موج شکست سدهای بالا دست

شکست یک سد در مجموعه چند سد متوالی احداث شده بر یک رودخانه می تواند بر شکست سدهای پائین دست، مستقیماً مؤثر باشد. مثال دیگر مربوط به حوضچه های پخش سیل است که معمولاً صورت خاکریزهای متوالی در مسیر جریان در مخروط های افکنه و با هدف پخش و کنترل سیل و یا تغذیه مصنوعی احداث می شود. شکست یکی از خاکریزها در بالا دست باعث ایجاد موج می شود، چنانچه ارتفاع

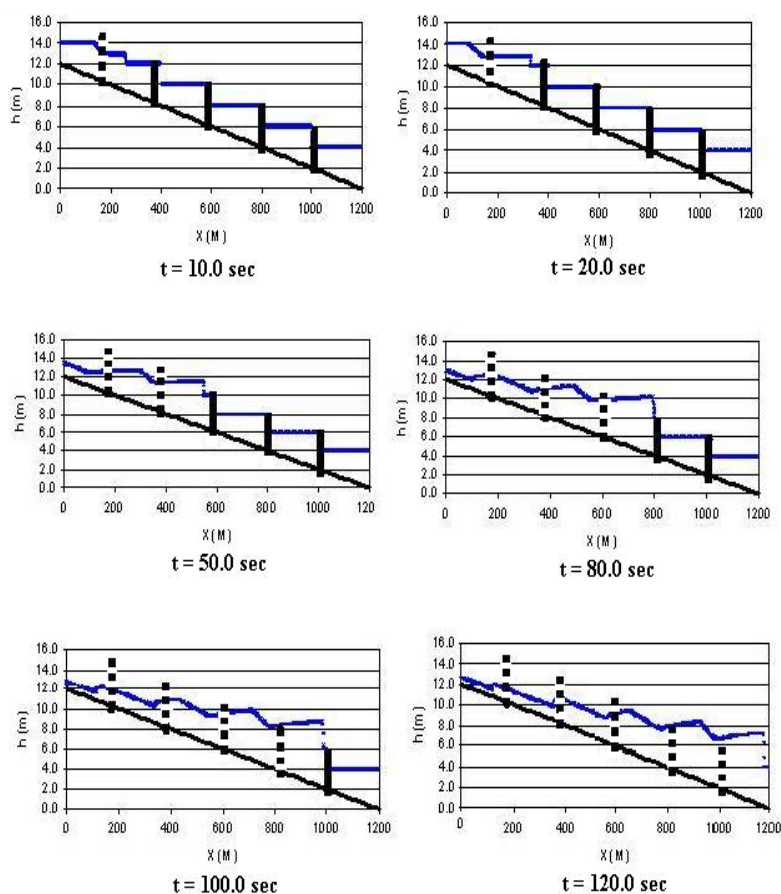
در این بخش، پرش هیدرولیکی ناشی از باز شدن بخشی از یک دریچه کشویی در پایین دست بررسی می شود. مسئله فوق در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۴ متر، ارتفاع ۰.۹۱۵ متر و عرض ۰.۴۶ متر که در دانشگاه واشنگتن شبیه سازی شده است که در اینجا از نتایج آن استفاده خواهد شد. اندازه گیری عمق جریان برای مسئله ای با عدد فرود قبل از پرش برابر $Fr=4.23$ ، انجام شده است. برای مسئله ای با هندسه مذکور و ضریب زبری مانینگ $n=0.009$ (زبری کانال آزمایشگاهی)، با استفاده از روش عددی Roe به صورت یک مسئله متغیر زمانی حل گردیده است. در ابتدا برای بررسی زمان رسیدن به حالت دائمی، همان گونه که از شکل (۲) ملاحظه می گردد، مسئله پس از گذشت زمان $t=400 \text{ Sec}$ به حالت دائمی می رسد.

است. شیب طولی کانال برابر $S_0=0.001$ و ضریب زبری اصطکاک $n=0.015$ فرض شده است. دایک شماره یک به صورت ناگهانی شکسته می شود. موج تیز حاصله به سمت پایاب حرکت کرده و پس از رسیدن به دایک شماره دو، باعث شکسته شدن آن می گردد و فرایند به همین شکل ادامه می یابد. نیم رخ جریان ناشی از فرایند فوق الذکر طی زمان های مختلف براساس روش Roe در شکل (۴) ارائه شده است. هیدروگراف عمق جریان در سراب و پایاب دایک ها در اشکال (۵) و (۶) ترسیم شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، عمق آب ناشی از شکست چند دایک متوالی به شکل محسوسی نسبت به شکست یک دایک افزایش یافته است.

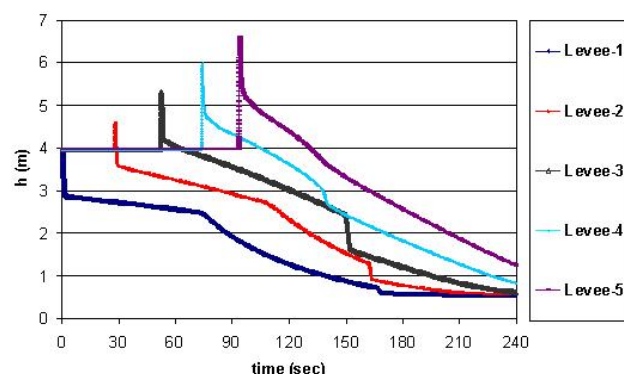
آزاد در حوضچه های پایین دست از ارتفاع موج حاصله از شکست خاک ریز به علاوه ی اثرات روراندگی کم تر باشد، خاک ریز دوم شکسته می شود و فرایند می تواند به همین شکل ادامه یابد. در ادامه این مسئله در یک و دو بعد به کمک روش عددی شبیه سازی می شود.

۴-۳-۱- شبیه سازی یک بعدی

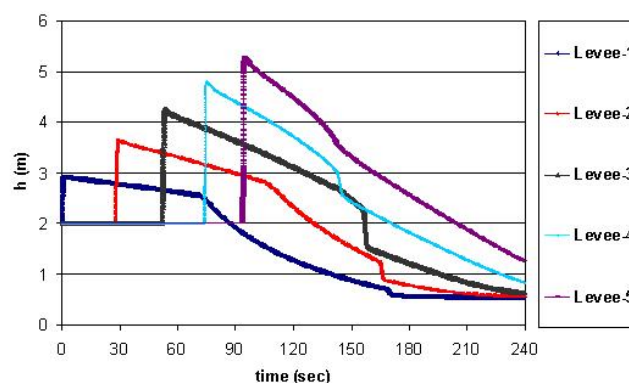
برای مدل سازی عددی مسئله مذکور، یک کانال به طول ۱۲۰۰ متر با پنج سد متوالی را در نظر بگیرید. دایک ها در فاصله های به ترتیب $X_1=200$ m, $X_2=400$ m, $X_3=600$ m, $X_4=800$ m, $X_5=1000$ m از ابتدای بازه مدل سازی قراردارند. عمق اولیه آب در بالادست و پایین دست تمامی دایک ها به ترتیب برابر ۴ و ۲ متر



شکل ۴ نیم رخ طولی سطح آب در زمان های مختلف در مسئله شکست دایک های متوالی در یک بعد



شکل ۵ هیدروگراف جریان در بالا دست دایک ها در مسئله شکست دایک های متوالی در یک بعد



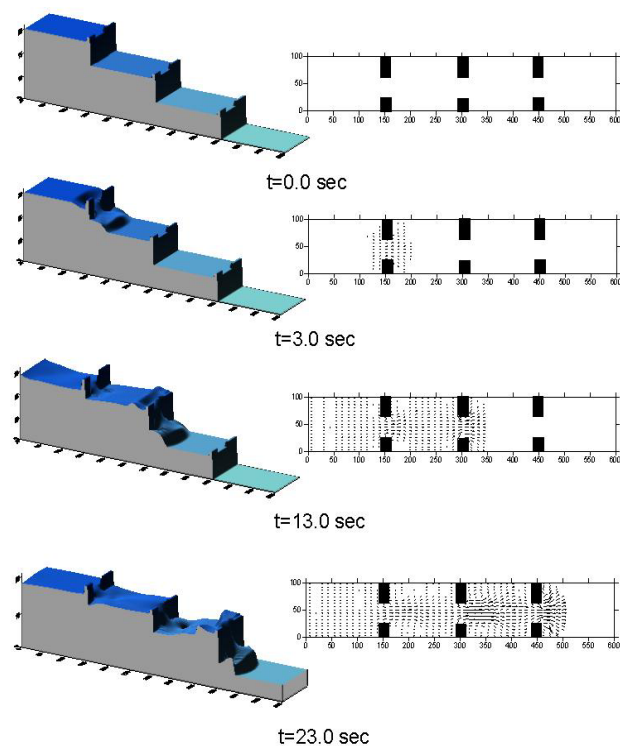
شکل ۶ هیدروگراف جریان در پایین دست دایک ها در مسئله شکست دایک های متوالی در یک بعد

۴-۳-۲- شبیه سازی مسئله در دو بعد

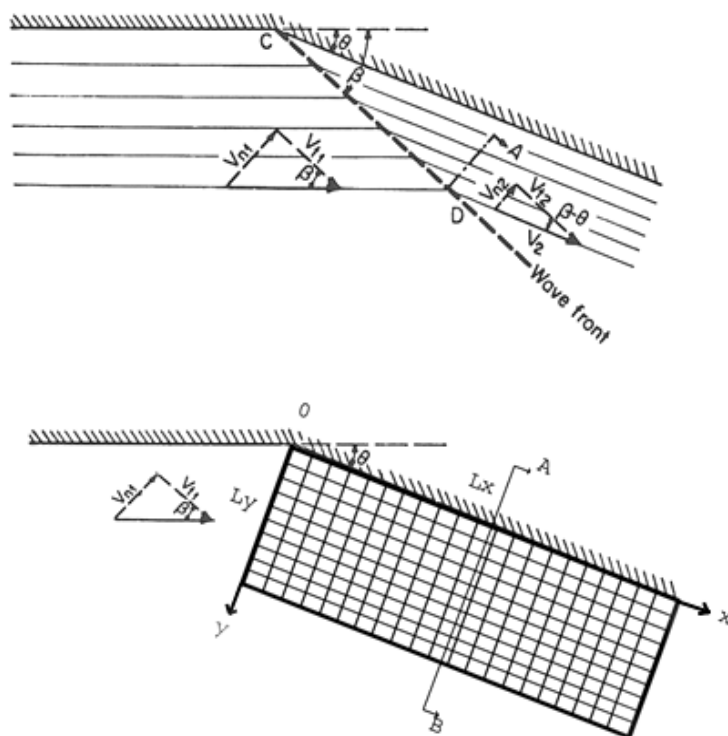
مدل سازی یک بعدی نمی تواند رفتار یک مسئله را بیان نماید، از این رو می بایست از شبیه سازی دو بعدی استفاده نمود. در این جا یک مسئله فرضی از شکست دایک های متوالی با مکانیزم عملکردی مشابه مسئله یک بعدی در نظر می گیریم. یک بازه ی ۶۰۰ متری با عرض کانال برابر ۱۰۰ متر که سه دایک در موقعیت های $X_1=150$ ، $X_2=300$ و $X_3=450$ متری ابتدای بازه قرار دارند، در نظر بگیرید. موقعیت و طول رخنه ثابت، و برابر ۳۰ متر می باشد که دارای ۳۰ متر فاصله از تکیه گاه راست و ۴۰ متر از تکیه گاه چپ می باشد. ضخامت دایک ثابت و برابر ۱۰ متر فرض شده است. کانال در طول و عرض بدون شیب و ضریب

زبری مانینگ $n=0.015$ می باشد.

همانند تحلیل یک بعدی مسئله، مکانیزم حاکم بدین شکل است که ابتدا دایک شماره یک به صورت ناگهانی شکسته می شود. موج تیز حاصله به سمت پایاب حرکت کرده و پس از رسیدن به دایک شماره ی دو باعث شکسته شدن آن می گردد و فرایند به همین شکل ادامه می یابد. نمای سه بعدی عمق و توزیع سرعت ناشی از این فرآیند در زمان های مختلف براساس روش Roe در شکل (۷) ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، عمق آب ناشی از شکست چند دایک متوالی به شکل محسوسی نسبت به شکست یک دایک افزایش یافته است.



شکل ۷ نمای سه بعدی عمق و توزیع سرعت در زمان‌های مختلف در مسئله شکست دایک‌های متوالی در دو بعد



شکل ۸ شبکه بندی تفاضل محدود و مرز ورودی جریان

۴-۴- پرش هیدرولیکی مایل

پرش هیدرولیکی، مایل از برخورد یک جریان فوق بحرانی با یک دیواره مایل در مسیر جریان تولید می شود. جریان ورودی با مشخصات $V_1=8.57$ m/s و $h_1=1.0$ m و $Fr_1=2.74$ به دیواره ای که دارای زاویه انحراف $\theta = 8.95^\circ$ است، برخورد می نماید. در نتیجه یک موج تیز مایل هیدرولیکی ایستا به وجود می آید که نسبت به دیواره دارای زاویه انحراف β است. حل تحلیلی مسئله فوق، موجود است و براساس آن به صورت $h_2=1.5$ m و $V_2=7.955$ m/s و $Fr_2=2.075$ و $\beta=30.0^\circ$ خواهد بود.

برای حل عددی این مسئله با استفاده از شبکه حجم محدود با المان مستطیلی شکل، یک محدوده 12×6 m به موازات دیواره را انتخاب می نمایم (شکل ۸). بنابراین مرز جریان ورودی به محدوده محاسباتی براساس شرایط اولیه جریان به صورت، $v_{n1} = v_1 \sin \theta$ و $v_{t1} = v_1 \cos \theta$ خواهد شد. هم چنین در محدوده محاسباتی مطابق شکل ۸، یک شبکه بندی مستطیلی با ابعاد $L_x = n_x \Delta x$ و $L_y = n_y \Delta y$ خواهیم داشت.

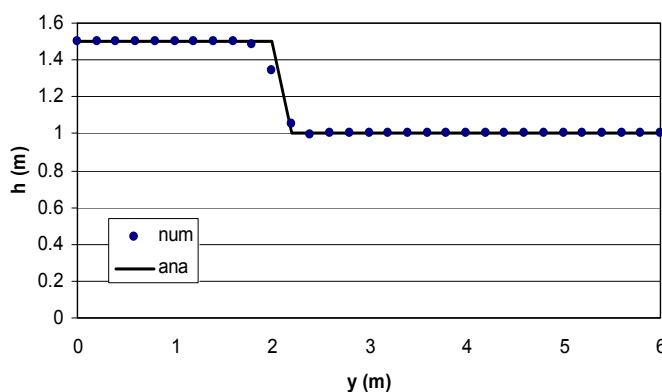
حال با استفاده از مدل TVD مرتبه دوم Roe با

انتخاب $\Delta x = 0.2$ m و $\Delta y = 0.2$ m، مسئله پرش هیدرولیکی مایل شبیه سازی می گردد. نتایج حاصله نیم رخ عرضی (نیم رخ AB در شکل ۹) واقع در میانه طول L_x در شکل ۹ ارائه شده است. شکل ۱۰ نشان دهنده نمای سه بعدی به همراه خطوط تراز عمق جریان می باشد. همان گونه که ملاحظه می شود، مدل عددی دو بعدی به خوبی موج تیز ایستا در این مسئله را تسخیر نموده است.

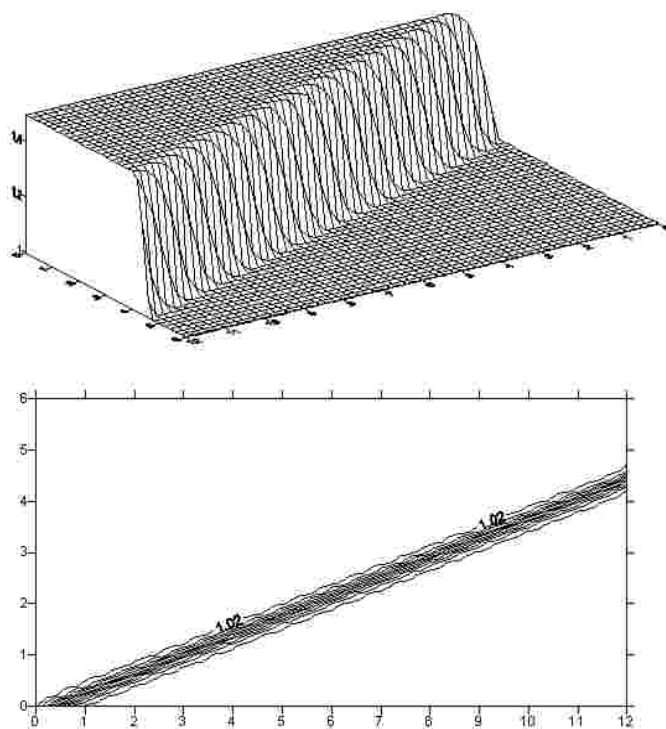
۴-۵ - شبیه سازی جریان در یک خم زاویه دار در

پلان یک کانال

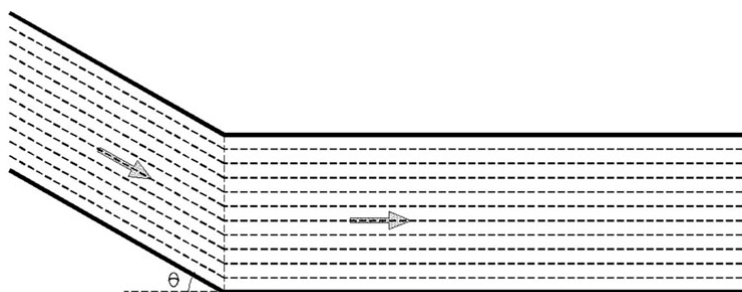
در بخش قبل، پرش هیدرولیکی مایل که ناشی از برخورد جریان فوق بحرانی با یک دیواره بود، بررسی و مدل سازی شد. در این بخش، شک های مایل حاصل از خم زاویه دار در پلان کانال و برخوردهای متوالی آن با دیواره های کانال بررسی و تحلیل می شود. در شکل ۱۱) کانال، نسبت به مسیر اولیه در پلان به اندازه زاویه θ منحرف شده است.



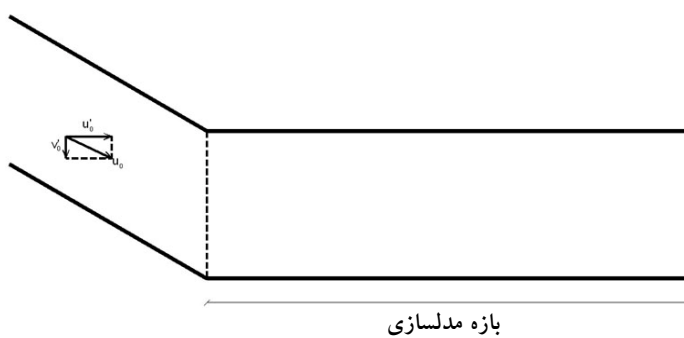
شکل ۹ نتایج عددی و تحلیلی نیم رخ عرضی جریان در مسئله پرش هیدرولیکی مایل در دو بعد



شکل ۱۰ نمای سه بعدی به همراه خطوط تراز عمق جریان در مسئله پرش هیدرولیکی مایل در دو بعد



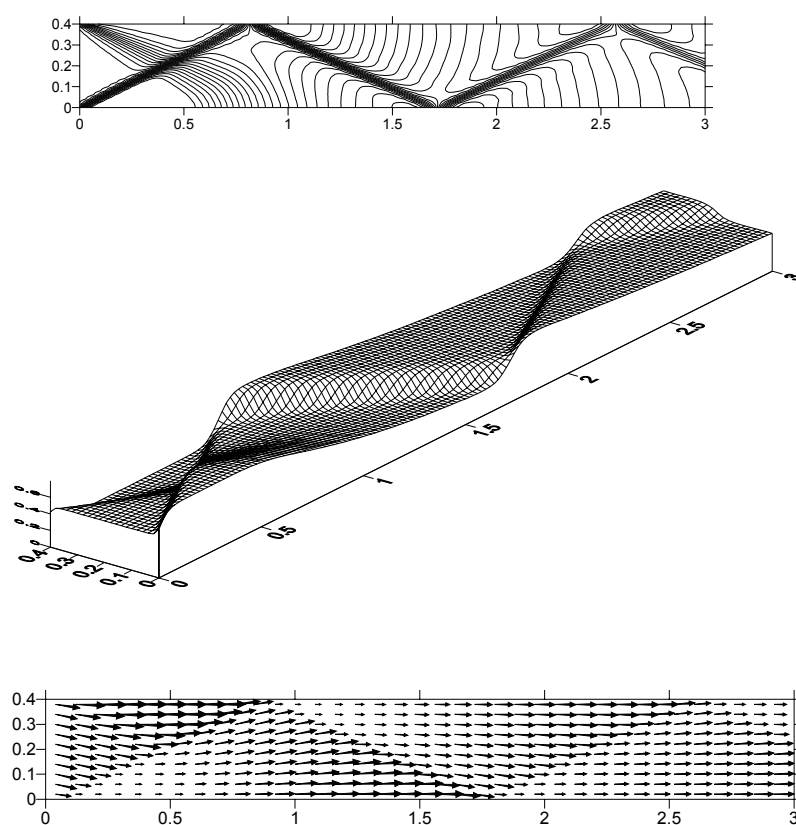
شکل ۱۱ وجود یک خم در پلان کانال



شکل ۱۲ تجزیه بردار سرعت جریان به بردارهای سرعت ورودی به بازه مدل سازی



شکل ۱۳ امواج تیز تولید شده در یک خم زاویه دار در پلان در یک کانال آبیاری (قزل سوفلو، ۱۳۸۲)



شکل ۱۴ نتایج عددی حاصله (خطوط تراز عمق جریان، نمای ۳ بعدی عمق و بردار سرعت جریان) با استفاده از مدل Roe برای مسئله خم زاویه دار در یک کانال باز

امواج تیز را ندارند. روش‌های ابقایی بر پایه حل کننده‌های مسئله ریمن، دارای ویژگی تسخیر امواج تیز ایستا و پویا بوده و به عنوان روش‌های «تسخیر کننده موج تیز» شناخته شده اند. در این مقاله از حل کننده ریمن به روش Roe که دارای خاصیت کاهش مجموع تغییرات (TVD) نیز هست، برای شبیه سازی امواج تیز استفاده شده است.

در شبیه سازی موج تیز ایستا از داده های آزمایشگاهی در شبیه سازی پرش هیدرولیکی در یک کانال آزمایشگاهی استفاده شده و ملاحظه گردید مدل عددی استخدام شده به خوبی توانایی تسخیر موج تیز حاصله را دارد. بنابراین از این مدل برای شبیه سازی امواج پویا ناشی از شکست دایک‌های متوالی استفاده گردید و ملاحظه شد که با شکست دایک متوالی ارتفاع امواج تولید شده، یکی پس از دیگری افزایش می یابد و بهتر است در طراحی ها لحاظ گردد.

در ادامه امواج تیز دو بعدی مطالعه شده است. در این راستا پرش هیدرولیکی مایل که دارای حل تحلیلی نیز است، استفاده شد و ملاحظه گردید مدل عددی Roe به خوبی قابلیت شبیه سازی موج تیز ایستای دو بعدی را دارد. در ادامه شکست دایک‌های متوالی در دو بعد مدل شد. پس از آن امواج ایستایی ناشی از وجود یک خم زاویه دار، در پلان یک کانال شبیه سازی گردیده و ملاحظه شده مدل عددی به خوبی قابلیت تسخیر امواج پیچیده حاصله را دارد.

در مسئله‌ای با ابعاد فرضی، مشخصات جریان قبل از خم $u_0 = 5.0 \text{ m/s}$ و $h_0 = 0.5 \text{ m}$ و عدد فرود $Fr = 2.26$ می‌باشد. طول کانال برابر $L = 3.0 \text{ m}$ و عرض آن را $B_0 = 0.4 \text{ m}$ در نظر بگیرید. برای مدل‌سازی عددی با استفاده از شبکه بندی مستطیلی، در مرز بالا دست بردار سرعت u_0 به دو جزء سرعت $u'_0 = u_0 \cos \theta$ و $v'_0 = u_0 \sin \theta$ تجزیه شده، شکل (۱۲)، سپس قسمت دوم کانال مدل‌سازی می‌شود.

با عنایت به لزوم پیچ‌های اجباری در شبکه‌های آبیاری و انتقال آب در جریان‌های فوق بحرانی، شبیه سازی جریان و ردیابی امواج تیز به وجود آمده حائز اهمیت است.

شکل (۱۳) نمایی از تولید امواج تیز ایستا در یک جریان فوق بحرانی ناشی از یک خم ملایم، زاویه دار در پلان یک کانال آبیاری در تربت جام می‌باشد. مسئله فوق با استفاده از نسخه TVD روش عددی Roe مدل شد. نتایج مدل‌سازی عددی شامل عمق و سرعت جریان در شکل (۱۴) ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مدل به‌خوبی توانایی شبیه سازی الگوی توسعه امواج تیز ایستای تولید شده در مسئله فوق را دارا است. بررسی دقیق تر عملکرد مدل، مستلزم اندازه گیری در یک مدل آزمایشگاهی یا میدانی است.

۵ - نتیجه گیری

روش‌های عددی متعارف به خوبی قابلیت شبیه سازی

مراجع

1. A. Ghezelsofloo, "Numerical Modeling of Shocks' Behavior in Shallow Flows using Advanced Finite Volume Method," Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, 2005.
2. F. Alcrudo and P. Garcia-Navarro, "A High Resolution Godunov-type Scheme in Finite Volumes for the 2D Shallow-Water Equations," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 16, pp. 489-505, 1993.

3. V. Calceffi, A. Valiani and A. Zanni "Finite Volume method for Simulating Extreme Flood Events in Natural Channels," Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No. 2, pp. 167-177 ,2003.
4. R. J. Fennema and M.H. Chaudhry, "Explicit Method for 2D Transient Free-Surface Flows," Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 116, No. 8, pp. 1013-1034, 1990.
5. A. Ghezelsofloo and M.R. Jaefarzadeh, "Numerical Modeling of Dam-Break Problem with a High Resolution Finite Difference Method," International Journal of Engineering Science, Vol. 16, No. 4, 2005.
6. A. Ghezelsofloo and M.R. Jaefarzadeh "Numerical Modeling of successive Levee-Break with Roe-TVD Scheme," 2nd International, conference on Managing Rivers in 21st century, Kuching, Saramak, Maluysia, 2007.
7. P. Glaister, "Approximate Riemann Solutions of the Shallow Water Equations," Journal of Hydraulic Research, Vol. 26, No. 3, pp. 293-306, 1988.
8. A. Jameson, W. Schmidt and G. Turkel, "Numerical Solution of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time-Stepping Schemes," AIAA, 14th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Palo – Alto Calif. AIAA-81-1259, 1981.
9. R. Le Veque, "Numerical Methods for Conservation Laws," Birkhauser-Verlag, Basel, 1997.
10. S. Osher, "Riemann Solvers, the Entropy Condition, and Difference Approximation," SIAM J. Numer. Anal. Vol. 21, No. 2, 1984.
11. P.L. Roe, "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes," Journal of Computational Physics, Vol. 43, pp. 357-372, 1981.
12. P. K. Sweby, "High Resolution Schemes Using Flux Limiters for Hyperbolic Conservation Laws," SIAM J. Numer. Anal., Vol. 21, No. 6, pp. 995-1011, 1984.
13. E. F. Toro, "Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows," John Wiley & Sons LTD, 2001.
14. M.H. Tseng, C.A. Hsu, and C.R. Chu, "Channel Routing in Open-Channel Flows with Surges," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 2, pp. 115-122, 2001.
15. J. S. Wang, H.G. Ni and Y.S. He, "Finite-Difference TVD Scheme for Computation of Dam-Break Problems," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 253-262, 2000.
16. D.H. Zhao, H.W. Shen, J.S. Lai and G. Q. Tabios III, "Approximate Riemann Solvers in FVM for 2D Hydraulic Shock Wave Modeling," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 12., pp. 692-702, 1996.
17. C. Zoppou, and S. Roberts, "Explicit Schemes for Dam-Break Simulations," Journal of Hydraulic Engineers, Vol. 129, No. 1, 2003.