

بررسی اعتبار رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت در تحلیل جریان متغیر تدریجی در کانالهای مرکب

سید محمدرضا علوی مقدم^۱، سید محمود حسینی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد، عضو هیات علمی گروه عمران، دانشگاه آزاد مشهد

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

Shosseini@Ferdowsi.um.ac.ir

چکیده- تحلیل جریان متغیر تدریجی در کانالهای مرکب، با استفاده از دو رهیافت انرژی و اندازه حرکت، می‌تواند به نتایج محاسباتی متفاوتی منجر شود. در این مقاله با هدف بررسی اعتبار این دو رهیافت، ابتدا معادلات انرژی و اندازه حرکت و شکل تعمیم یافته‌ای از معادله جریان دائمی غیر یکنواخت در کانالهای باز معرفی شده و اختلاف نتایج این دو رهیافت در قالب چند مثال عددی ساده نشان داده می‌شود. سپس نتایج تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مربوط به این تحقیق و داده‌های موجود در مراجع ارائه می‌شوند. در این آزمایشها، هر جا تمایز قابل توجهی بین نتایج دو رهیافت مشاهده می‌شود، برتری با رهیافت اندازه حرکت است. تحلیل خطاهای آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که نتیجه مشاهده شده در برتری رهیافت اندازه حرکت، تحت الشعاع عدم قطعیت‌های آزمایشگاهی قرار نمی‌گیرد. با توجه به عدم امکان تعمیم نتیجه مشاهده شده به تمامی شرایط، واکاوی دقیقتری بر روی این مسأله به کمک مدل دو بعدی معتبر Shiono and Knight انجام شد. این تحلیل موشکافانه، نه تنها منشأ برتری مشاهده شده در نتایج رهیافت اندازه حرکت در آزمایشهای مورد بررسی در این تحقیق را روشن می‌سازد، بلکه فرایندی محاسباتی را معرفی می‌نماید که به کمک آن می‌توان اعتبار رهیافت انرژی یا اندازه حرکت را برای هر کانال مرکب با شرایط هندسی و هیدرولیکی دلخواه، بدون نیاز به بررسیهای آزمایشگاهی تحلیل و تعیین کرد.

کلید واژگان: رهیافت اندازه حرکت، رهیافت انرژی، ضریب انتقال، عدد فرود، کانال مرکب، نیمرخ جریان.

۱- مقدمه

استفاده از معادلات انرژی یا اندازه حرکت در تحلیل مسائل هیدرولیک کانالهای باز، یکی از موضوعات کلاسیک و اساسی در این دانش محسوب می‌شود. در تحلیل پدیده‌های موضعی، انتخاب رهیافت انرژی یا اندازه حرکت، معمولاً با توجه به دانسته‌ها و نادانسته‌های مسائل انجام می‌شود. برای مثال در تحلیل جریان آزاد آب در تبدیل موضعی، با صرف نظر کردن از افت انرژی و قابل توجه انگاشتن نیروهای خارجی، اولویت را به استفاده از

معادله انرژی می‌دهند و بالعکس در مسأله پرش هیدرولیکی، اولویت با معادله اندازه حرکت است. اما در محاسبات جریان دائمی متغیر تدریجی در کانالهای باز، با توجه به اهمیت هر دو عامل افت انرژی و تنش برشی کانال، شبیه‌های انرژی و اصطکاکی، هر دو مقادیر قابل تأملی دارند و از اینرو است که Field et al. (1998) اظهار می‌دارند که «سر در گمی در مراجع در استفاده از معادلات انرژی و اندازه حرکت در تحلیل یک بعدی جریان در کانالهای باز همچنان ادامه دارد». روشن است

اطلاعات آزمایشگاهی مناسب، نتیجه‌گیری قابل قبولی ارائه نداده و پیشنهاد کرده‌اند که مطالعات ادامه یابد. هدف نگارندگان این مقاله آن است که پس از شکافتن ابعاد این مسأله در کانالهای مرکب، به کمک داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل آنها، نتایج دو رهیافت انرژی و اندازه حرکت را با داده‌های تجربی مقایسه نمایند و در سطح داده‌های موجود نتیجه‌گیری جدیدی ارائه دهند.

۲- معادلات انرژی و اندازه حرکت

معادله اندازه حرکت در جریان یک بعدی دائمی در کانالهای باز با شیب کم و با فرض توزیع هیدرواستاتیک فشار، عبارت است از (Field et al., 1998):

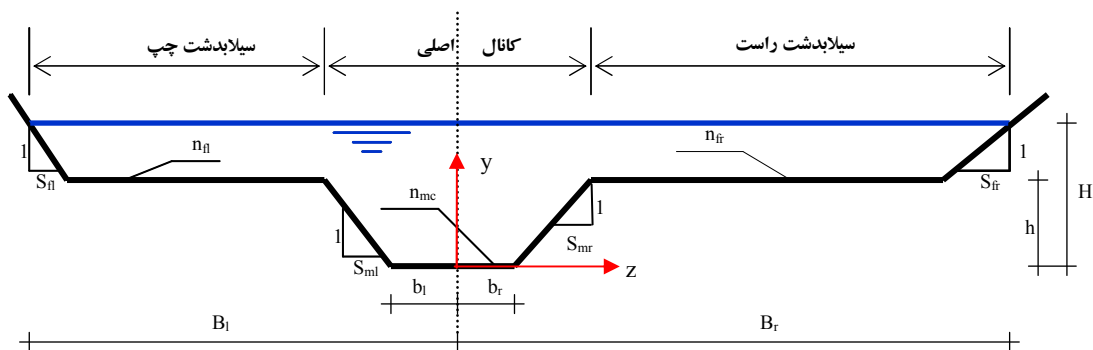
$$\frac{1}{A} \frac{d}{dx} \left(\beta \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A \right) = S_0 - S_f \quad (1)$$

که در آن، A ، مساحت مقطع جریان، x ، راستای طولی کانال در جهت افق، β ، ضریب تصحیح اندازه حرکت، Q دبی، g شتاب ثقل، $\bar{y}$ فاصله مرکز سطح مقطع جریان تا سطح آزاد، S_0 شیب طولی کانال و S_f شیب اصطکاکی است که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$S_f = \frac{\tau_o}{\rho g R} \quad (2)$$

که τ_o تنش برشی جدار کانال، ρ جرم مخصوص آب و R شعاع هیدرولیکی مقطع جریان است.

که این موضوع در جایی اهمیت می‌یابد که اختلاف قابل توجهی بین شیب انرژی و شیب اصطکاکی و یا به عبارتی بین افت انرژی در طول کانال با کار انجام شده توسط نیروی برشی جدار کانال در همان طول وجود داشته باشد. این شرایط به نحو قابل توجهی در جریان متغیر تدریجی در کانالهای مرکب بروز می‌کند. کانالهای مرکب مطابق شکل ۱، از یک کانال اصلی و یک یا دو سیلابدشت در دو طرف آن تشکیل می‌شوند. اختلاف سرعت جریان، بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها سبب بروز یک ناحیه اندرکنشی، در مرز بین زیر مقاطع می‌شود که تبادل تنش داخلی جریان در این ناحیه موجب بروز افت انرژی قابل توجهی خواهد شد (Alavi Moghaddam and Hosseini, 2007). این ویژگیهای هندسی و هیدرولیکی خاص، شرایطی را فراهم می‌آورد که پرسش اعتبار معادلات انرژی و اندازه حرکت و استفاده عملی از آنها در محاسبات جریان غیر یکنواخت در کانالهای مرکب اهمیت یافته و به عنوان یک موضوع تحقیقاتی مطرح می‌شود. اهمیت این موضوع هنگامی روشن‌تر می‌شود که به نقش اساسی مقاطع مرکب و فراوانی آنها در رودخانه‌ها، مسیله‌ها و نهادهای طبیعی و کاربرد قابل توجه محاسبات جریان متغیر تدریجی در طرحهای مهندسی رودخانه، ساماندهی و حفاظت سیلاب توجه شود. هرچند Field et al. (1998) سعی در نشان دادن تأثیرگذاری متفاوت رهیافت‌ها داشته‌اند، اما به دلیل فقدان



شکل ۱ کانال مرکب و پارامترها

که T ، عرض سطح آزاد جریان است و η_i بسته به دیدگاه‌های مختلف تحلیلی و تقریبی، مقادیر زیر را به خود اختصاص می‌دهد.

$i=0$: در این حالت $\eta_0=0$ و در نتیجه $F_0=0$ فرض می‌شود. این حالت انتزاعی در تشابه با جریان آب در محیط متخلخل، معادل است با شرایطی که جریان آب بدون اثر اینرسی یا اندازه حرکت و تنها متأثر از اثر وزن، نیروهای فشاری و لزجت، در کانال حرکت می‌کند. در ادامه نشان داده می‌شود که در جریان بر روی شیب ملایم، چنین فرضی می‌تواند به تقریبی از برآورد نیمرخ سطح آب منجر شود. اما در شیب تند، اصولاً چنین فرضی، با رفتار طبیعی جریان هیچ‌گونه هم‌خوانی ندارد.

$i=1$: در این حالت، $\eta_1=1$ فرض می‌شود که معادل است با توزیع سرعت یکنواخت و $\alpha=\beta=1$.
 $i=2$: در این حالت، $\eta_2=\alpha$ فرض می‌شود که به مفهوم اعتبار معادله انرژی و صرفنظر کردن از $\frac{d\alpha}{dy}$ است.

$i=3$: در این حالت $\eta_3=\alpha-\frac{A}{2T}\frac{d\alpha}{dy}$ است که معادل است با اصالت دادن به معادله انرژی و وارد کردن تأثیر $\frac{d\alpha}{dy}$ و

$i=4$: در این حالت $\eta_4=\beta$ فرض می‌شود که به مفهوم اعتبار معادله اندازه حرکت و صرفنظر کردن از $\frac{d\beta}{dy}$ است.

$i=5$: در این حالت $\eta_5=\beta-\frac{A}{T}\frac{d\beta}{dy}$ است که معادل است با اصالت معادله اندازه حرکت و وارد کردن تأثیر β و $\frac{d\beta}{dy}$.

البته در تعریف عدد فرود در کانالهای مرکب، تعاریف متعدد دیگری نیز ارائه شده است (Chaudhry and Bhallamudi, 1988; Subramanya, 2001; French, 1987) که یا از معادلات غیر دائمی آبهای کم عمق استخراج شده‌اند، یا دقت آنها به سبب نوع تعریف و فرضیات به کار گرفته شده، پایین است.

متناظر با معادله (۱)، معادله انرژی در نگرشی کاملاً ترمودینامیکی، به صورت زیر استخراج شده است (Field et al., 1998):

$$\frac{d}{dx}\left(y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}\right) = S_o - S_e \quad (3)$$

که در آن، y عمق جریان، α ضریب تصحیح انرژی جنبشی و S_e شیب انرژی است. شیب انرژی عبارت است از مجموع دو عامل نرخ تغییرات انرژی درونی و نرخ اتلاف حرارتی در واحد وزن و در واحد طول که به صورت زیر بیان می‌شود (Field et al., 1998):

$$S_e = \frac{1}{g} \frac{du}{dx} + \frac{q}{Qpgdx} \quad (4)$$

که در آن u انرژی درونی جریان در واحد جرم و q نرخ اتلاف حرارتی است.

در ضمن مشتق‌گیری از معادلات (۱) و (۳)، (با فرض ثابت بودن Q یعنی نبود دبی جانبی در طول کانال و منشوری بودن کانال)، صرفنظر کردن یا نکردن از تغییرات α و β نسبت با عمق، موجب دستیابی به معادلات متفاوتی می‌شود. لذا در مجموع می‌توان معادله تعمیم یافته زیر را با عنوان معادله جریان یک بعدی دائمی غیر یکنواخت در کانالهای باز ارائه کرد که در آن گرادین عمق در طول کانال به عنوان تابعی از عمق به صورت زیر قابل تعریف است (Alavi Moghaddam and Hosseini, 2007):

$$\frac{dy}{dx} = \psi(y) = \frac{S_o - S}{1 - F_i^2} \quad (5)$$

که S در رهیافت انرژی برابر S_e و در رهیافت اندازه حرکت برابر S_f و F_i متغیر بی‌بعدی است که به نام عدد فرود نامیده می‌شود، اما روشن است که F_i تعاریف متفاوتی را با توجه به رهیافت مورد بررسی پیدا می‌کند. در دیدگاهی جامع نگر، برای F_i رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$F_i = \left(\eta_i \frac{Q^2 T}{gA^3}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

۳- حل معادله جریان متغیر تدریجی

حل معادله دیفرانسیل جریان متغیر تدریجی (رابطه ۵) مستلزم برآورد دو عامل S و F_i و همچنین به کارگیری یک الگوی حل عددی است. اما در برآورد هر دو عامل S و F_i ، ضریب انتقال مقطع مرکب (K) نیز مؤثر است. در ادامه به این نکات پرداخته می‌شود.

با توجه به شرایط هیدرولیکی و هندسی خاص کانالهای مرکب، برآورد ضریب انتقال این مقاطع توسط روشهای سنتی یعنی، «روش مقطع واحد (SCM)» (با فرض عملکرد مقطع مرکب به عنوان یک مقطع واحد) و «روش تقسیم مقطع (DCM)» (با فرض تقسیم مقطع، به زیر مقاطع سیلابدشت و کانال اصلی و صرف نظر کردن از اثر اندرکنشی آنها)، توأم با خطا است (علوی مقدم و همکاران، ۱۳۸۵). لذا روشهای اصلاحی متعددی در تحقیقات مختلف پیشنهاد شده است. در این تحقیق علاوه بر دو روش مذکور، از سه روش اصلاحی معتبر به نام «روش تقسیم وزنی مقطع (WDCM)» (Lambert and Myers, 1998)، «روش کوهرنس (COH)» (Ackers, 1992) و «مدل تبادل دبی (EDM)» (Bousmar and Zech, 1999) استفاده شده است. علوی مقدم و همکاران (۱۳۸۵) به معرفی اجمالی و مقایسه عملکرد آنها در شرایط جریان یکنواخت پرداخته‌اند.

از آنجا که برآورد دقیق عوامل مؤثر بر S_f یا S_e ، با توجه به روابط (۲) و (۴) به سادگی امکان پذیر نیست، لذا در حل معادله دیفرانسیل جریان متغیر تدریجی (رابطه ۵)، عموماً بر اساس یک اصل ساختاری، مقدار S (اعم از S_f یا S_e)، به کمک روابط جریان یکنواخت و توسط رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$S = \frac{Q^2}{K^2} \quad (7)$$

1. Single Channel Method
2. Divided Channel Method
3. Weighted Divided Channel Method
4. Coherence
5. Exchange Discharge Model

که در آن K ، ضریب انتقال در شرایط جریان یکنواخت متناظر با همان عمق است.

در برآورد عدد فرود (F_i)، در صورتی که $i=2$ یا $i=4$ فرض شود، به ترتیب خواهم داشت (Alavi Moghaddam and Hosseini, 2007):

$$\eta_2 = \alpha = \frac{\sum_j k_j^3 a_j}{K^3 A} \quad (8)$$

$$\eta_4 = \beta = \frac{\sum_j k_j^2 a_j}{K^2 A} \quad (9)$$

که در آنها a_j و k_j به ترتیب مساحت و ضریب انتقال زیر مقطع j ام است.

اگر $i=3$ فرض شود، برای برآورد F_3 به روابطی نیاز است که $\frac{d\alpha}{dy}$ را در کانال مرکب محاسبه کند. این روابط توسط Blalock and Sturm (1980) استخراج شده است. با فرض همگن بودن زبری در هر زیر مقطع، F_3 به وسیله معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$F_3 = \left[\frac{Q^2}{2gK^3} \left(-\frac{\sigma_2 \sigma_3}{K} - \sigma_1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$\sigma_1 = \sum_j \left[\left(\frac{k_j}{a_j} \right)^3 (3t_j - 2r_j \frac{dp_j}{dy}) \right], \sigma_2 = \sum_j \left(\frac{k_j^3}{a_j^2} \right), \sigma_3 = \sum_j \left[\left(\frac{k_j}{a_j} \right) (5t_j - 2r_j \frac{dp_j}{dy}) \right] \quad (11)$$

در روابط (۱۰) و (۱۱)، t_j ، r_j و p_j به ترتیب عرض سطح آزاد، شعاع هیدرولیکی و پیرامون مرطوب زیر مقطع j ام است.

و در صورتی که $i=5$ فرض شود، پس از استخراج $\frac{d\beta}{dy}$ توسط نگارندگان، F_5 توسط معادلات زیر قابل محاسبه است:

$$F_5 = \left[\frac{Q^2}{3gAK^2} \left(\frac{2\delta_2 \delta_3}{K} - 3\delta_1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\delta_1 = \sum_j \left[\frac{4}{3} \left(\frac{k_j}{a_j} \right)^2 (2t_j - r_j \frac{dp_j}{dy}) \right], \delta_2 = \sum_j \left(\frac{k_j^2}{a_j} \right), \delta_3 = \sum_j \left[\left(\frac{k_j}{a_j} \right) (5t_j - 2r_j \frac{dp_j}{dy}) \right] \quad (13)$$

این اطلاعات نتیجه‌گیری خاصی مقدور نیست». لذا این اطلاعات از کاربری لازم در این تحقیق برخوردار نیست.

(۲) آزمایشهای (Sturm and Sadiq (1996): این دو محقق آزمایشهایی را بر روی کانالی مرکب با ابعاد زیر انجام داده و نیمرخ‌های همواری را از جریان متغیر تدریجی برداشت کرده‌اند که از اطلاعات نیمرخ‌های M1 این آزمایشها، در تحقیق حاضر استفاده شده است.

$B_l = B_r = 1.0675m$, $b_l = b_r = 0.1335m$, $h = 0.152m$,
 $S_{ml} = S_{mr} = S_{fl} = S_{fr} = 0$, $n_{fl} = n_{fr} = 0.0171$,
 $n_{mc} = 0.0176$, $S_0 = 0.005$

(۳) آزمایشهای (Bousmar and Zech (2003): این دو محقق، با هدف ارزیابی روش EDM در مجاورت عمق بحرانی، نیمرخ‌هایی از نوع M2 را در فلوام آزمایشگاهی تولید و برداشت کرده‌اند. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی نگارندگان و همچنین Sturm and Sadiq (1996)، این نیمرخ دارای رفتار دوبعدی بوده و لذا از این اطلاعات نیز در تحقیق حاضر استفاده نشده است.

(۴) آزمایشهای ظهیری (۱۳۸۴): در این تحقیق که در قالب رساله دکترا در داخل کشور انجام شده، در چند مرحله مختلف، نیمرخ‌هایی از جریان متغیر تدریجی تولید و اطلاعات آنها برداشت شده است. هدف اصلی تحقیق مذکور، در زمینه جریان متغیر تدریجی، بررسی کارایی روشهای مختلف برآورد ظرفیت انتقال در تحلیل جریان متغیر تدریجی در کانالهای مرکب از دیدگاه انرژی و مقایسه نتایج این روشها با مشاهدات تجربی بوده است. نتایج یکی از این مراحل آزمایشگاهی، در مقاله‌ای توسط ظهیری و ایوب‌زاده (۱۳۸۴) گزارش شده است. در این مقاله، علت عدم همواری داده‌های مشاهداتی، «عدم همواری بستر در جهات طولی و عرضی کانال» ذکر شده است. از آنجا که داده‌های گزارش شده در این مقاله از همواری مطلوب در حد مورد نظر تحقیق حاضر برخوردار نیست و نگارندگان، مقاله‌ای را که نتایج سایر مراحل آزمایشگاهی رساله مذکور را منتشر سازد، در جستجوی خود در مراجع نیافتند، لذا از این نتایج

از آنجا که معادله دیفرانسیل (۵) حل تحلیلی ندارد، از روش حل عددی بر پایه معادله زیر استفاده می‌شود:

$$y_2 = y_1 + \frac{\Delta x}{2} [\psi(y_1) + \psi(\hat{y}_2)] \quad (14)$$

فرایند حل چنین است که با معلوم بودن عمق y_1 (به عنوان مقطع کنترل یا عمق محاسبه شده از گام قبلی) و انتخاب گام Δx عمق $\hat{y}_2$ حدس زده شده و متناظر با y_1 و $\hat{y}_2$ ، مقادیر $\psi(y_1)$ و $\psi(\hat{y}_2)$ محاسبه می‌شوند. y_2 در صورتی پذیرفته می‌شود که اختلاف آن با $\hat{y}_2$ انتخابی، از رواداری مجاز کمتر باشد، در غیر این صورت $\hat{y}_2$ برابر با y_2 انتخاب و فرایند حل تکرار می‌شود.

۴- داده‌های آزمایشگاهی

(الف) داده‌های موجود در مراجع: از میان داده‌های گسترده مربوط به جریان یکنواخت در مراجع، تعدادی از اطلاعات UK-FCF^۱ در مثالهای مورد بررسی به کار گرفته شد. کانال بزرگ این مرکز با توجه به عوامل معرفی شده در شکل ۱ دارای ابعاد زیر است (Hosseini, 2004).

$B_l = B_r = var.$, $b_l = b_r = 0.75m$, $h = 0.15m$,

$S_{ml} = S_{mr} = 1$, $S_{fl} = S_{fr} = var.$,

$n_{fl} = n_{fr} = n_{mc} = 0.01$, $S_0 = 0.001027$

اما به عکس، اطلاعات مربوط به جریان متغیر تدریجی در مراجع، محدود به موارد زیر است. لازم است ذکر شود که از دیدگاه تحقیق حاضر، به علت اختلاف اندک نتایج محاسباتی رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت، همواری اطلاعات، بسیار حائز اهمیت است.

(۱) آزمایشهای FCF: نیمرخ‌های برداشت شده در آزمایش‌های FCF توسط Field et al. (1998) بررسی و تحلیل شده‌است. این بررسی نشان داده است که «ناهمواری قابل توجه داده‌های آزمایشگاهی، جزئیات مشاهدات را آن چنان تحت الشعاع قرار داده که بر مبنای

1. United Kingdom- Flood Channel Facility

$$B_l = B_r = 0.378m, b_l = b_r = 0.074m, h = 0.151m, \\ S_{ml} = S_{mr} = S_{fl} = S_{fr} = 0, n_{fl} = n_{fr} = n_{mc} = 0.0104, \\ S_0 = 0.0121$$

در مرحله دوم، مقطع مرکب مورد تغییر شیب و بازسازی مجدد با مشخصات (تغییر یافته) زیر قرار گرفت تا شرایط شیب از نوع «ملایم» را فراهم کند.

نیمرخ‌های تولید شده از نوع M1 و M2 بودند که با دقت ± 0.5 میلی متر برداشت شدند.

$$b_l = b_r = 0.0725m, S_0 = 0.0032$$

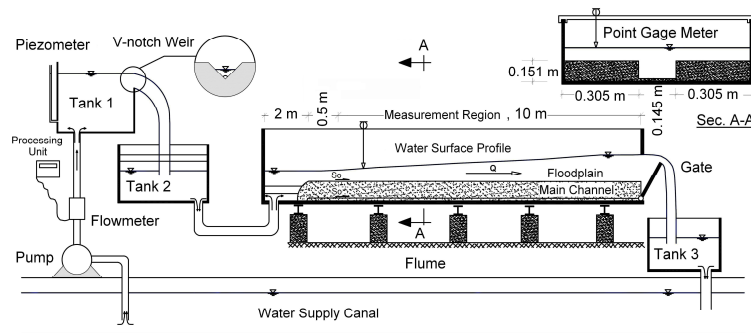
در ادامه، آزمایش‌های (Sturm and Sadiq (1996)، با نماد $Sturm(Q)$ و آزمایش‌های نگارندگان بر روی شیب‌های تند و ملایم به ترتیب با نمادهای $S(Q)$ و $M(Q)$ نام‌گذاری می‌شوند که Q مقدار دبی آزمایش بر حسب لیتر بر ثانیه است.

۵- بررسی تفاوت در روند نیمرخ‌های محاسباتی رهیافت‌های مختلف با چند مثال

می‌توان اختلاف رهیافت‌های انرژی یا اندازه حرکت در برآورد تغییرات عمق، در جریان متغیر تدریجی را، به صورت ایجاد یک مقطع کنترل فرضی (با اعمال تغییر ناچیزی در عمق جریان یکنواخت) و بررسی چگونگی شکل‌گیری نیمرخ سطح آب در حد فاصل مقطع کنترل تا عمق نرمال، آشکار کرد. این تغییر ناچیز، می‌تواند در جهت افزایش عمق (انحراف مثبت) یا کاهش عمق (انحراف منفی) برای جریان یکنواختی در شیب ملایم یا تند اعمال شود. حالت‌های مختلف در ادامه بررسی می‌شود.

آزمایشگاهی، در جمع‌بندی حاضر استفاده نشده است. بدیهی است انتشار کامل و مدون این نتایج توسط محققان محترم صاحب اثر، می‌تواند در این زمینه کمک شایانی باشد.

ب) داده‌های تولید شده توسط مؤلفان: اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی این تحقیق، بر روی مقطعی مرکب با دو شیب طولی مختلف، انجام شد. کانالی با طول سازه‌ای بالغ بر ۱۲ متر دارای مقطع مرکبی به طول ۱۰ متر، بدون همگرایی یا واگرایی در طول، احداث شد. مقطع مرکب با مصالح بنایی ساخته شد و در پرداخت سطحی، دقت کافی و بهسازی پس از ساخت، برای تأمین زبری و شیب طولی یکنواخت انجام شد. دبی توسط سرریز مثلی و دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت 0.1 لیتر بر ثانیه قابل اندازه‌گیری بود. جریان پس از عبور از ابزارهای اندازه‌گیری به مخزن آرامش بالا دست وارد شده و سپس در کانال جریان می‌یافت. کنترل سطح آب از پایین دست و توسط دریچه تنظیم سطح آب انجام شد. ضریب زبری از طریق اندازه‌گیری عمق و دبی در کانال اصلی و فرایند معکوس برآورد شد. شکل ۲ شمای کلی فلوم به کار گرفته شده در این تحقیق و اجزای جانبی آن را نشان می‌دهد. شیب طولی کانال در مرحله اول به گونه‌ای طراحی شد که در کل محدوده دبی‌های آزمایشی، از نوع «تند» باشد. نیمرخ‌های قابل شکل‌گیری، عبارت است از نیمرخ‌های S1 و S2 که با دقت اندازه‌گیری ± 0.5 میلی‌متر، توسط عمق‌سنج برداشت شد. مشخصات کانال به شرح زیر است:



شکل ۲ فلوم آزمایشگاهی بکار گرفته شده در این تحقیق و اجزاء وابسته آن

۵-۱- شیب ملایم

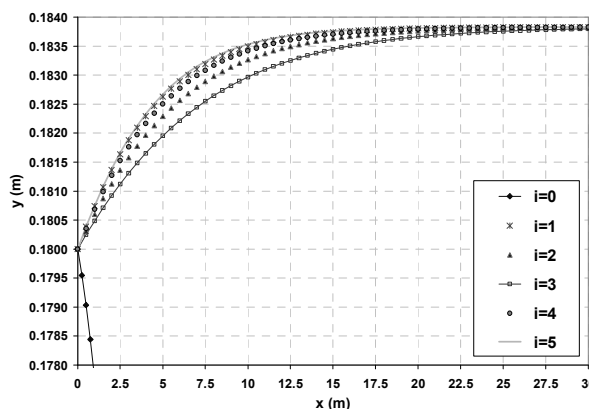
در آزمایش S2-5 از آزمایش‌های UK-FCF، دبی کل برابر $323/9$ لیتر بر ثانیه و عمق جریان یکنواخت (y_0) متناظر با آن برابر $18/68$ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. با توجه به اعماق بحرانی محاسبه شده در جدول ۱، شیب از نوع ملایم بوده و انحراف مثبت و منفی حول عمق یکنواخت محاسباتی، منجر به تولید نیمرخ‌های M1 و M2 می‌شود. نتایج نیمرخ M1 در شکل ۳ ارائه شده که در آن، تمامی تعاریف F_i به جریان یکنواخت همگرا می‌شوند. نتایج نیمرخ M2 نیز کاملاً مشابه نیمرخ M1 است.

جدول ۱ عمق‌های بحرانی محاسباتی توسط تعاریف مختلف

عدد فرود بر مبنای روش COH برای آزمایش

UK-FCF S2-5

i	0	1	2	3	4	5
y_c (m)	—	۰/۱۷۵۴	۰/۱۸۳۳	۰/۱۸۳۴	۰/۱۷۸۶	۰/۱۷۳۸



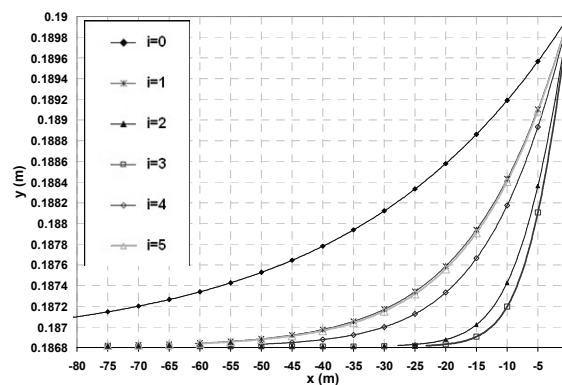
شکل ۴ نیمرخ‌های S3 محاسباتی بر مبنای تعاریف مختلف

S(61.34) برای F_i

با تکرار این محاسبات برای سایر داده‌های آزمایشگاهی جریان یکنواخت، در مجموع موارد زیر را می‌توان نتیجه گرفت:

- بین رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت در برآورد عمق جریان غیر یکنواخت در کانالهای مرکب، اختلاف وجود دارد. صحت و اعتبار این رهیافت‌ها، باید برای داده‌های تجربی بررسی شود.

- تعاریف مخالف صفر عدد فرود، منجر به همگرایی به جریان یکنواخت می‌شوند و از این‌رو، ارزش بررسی و توجه را دارند.



شکل ۳ نیمرخ‌های M1 محاسباتی بر مبنای تعاریف مختلف

UK-FCF_S2-5 Test برای F_i

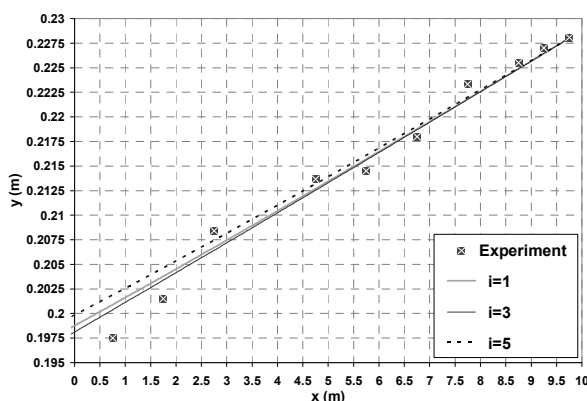
۵-۲- شیب تند

در آزمایش S(61.34)، عمق یکنواخت برابر $18/40$ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. جدول ۲ اعماق بحرانی محاسبه شده را نشان می‌دهد که مؤید تند بودن شیب کانال است.

در شکل‌های ارائه شده، مبدأ محورهای افقی و قائم به ترتیب، نقطه شروع اندازه‌گیریها در فلوم آزمایشگاهی و کف کانال است.

۶-۱- گروه اول

در تحلیل نتایج برخی نیمرخ‌های آزمایشگاهی، اصولاً اختلاف معناداری بین نتایج محاسباتی رهیافت‌های مختلف دیده نمی‌شود. این پدیده در اعماق سیلابدستی زیاد و دور از اعماق نرمال و بحرانی (نیمرخ‌های M1 یا S1) مشاهده می‌شود. نمونه‌ای از آن مربوط به آزمایش M(24.46) در شکل ۵ ارائه شده است. در پنج نیمرخ دیگر از نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده توسط مؤلفان نیز، این شرایط مشهود است. در این حالت تمامی روش‌های اصلاحی برآورد ضریب انتقال، پاسخهای یکسانی را ارائه می‌دهند.



شکل ۵ نیمرخ‌های M1 محاسباتی و مشاهداتی

در آزمایش M(24.46)

۶-۲- گروه دوم

در تحلیل برخی از آزمایش‌های موجود، اختلاف نتایج محاسباتی رهیافت‌های مختلف آشکار می‌شود، اما مقدار این اختلاف به اندازه‌ای اندک است که در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، نتیجه‌گیری خاصی را امکان‌پذیر نمی‌سازد. در میان سه نیمرخ از مجموع ۱۷ نیمرخ تحلیل شده

در صورتی که شیب کانال ملایم باشد، رهیافت انرژی دارای همگرایی سریعتر بوده و طبیعتاً طول نیمرخ کوتاه‌تر از رهیافت اندازه حرکت است و به‌عکس بر روی شیب تند، رهیافت اندازه حرکت دارای سرعت تقرب بیشتری به جریان یکنواخت است.

با تغییر روش برآورد ضریب انتقال، ترتیب همگرایی فوق تغییر نمی‌کند، بلکه مجانب این تقرب به عمق نرمال برآوردی آن روش منتقل می‌شود. این موضوع اهمیت انتخاب صحیح روش برآورد ضریب انتقال را نشان می‌دهد.

۶- تجزیه و تحلیل اطلاعات آزمایشگاهی

در تحلیل یک بعدی، روند شکل‌گیری نیمرخ جریان متغیر تدریجی در کانالهای مرکب، به پارامترهای مختلفی مانند موقعیت عمق‌های بحرانی و نرمال و رفتار معادله حاکم بر جریان در محدوده‌های ایجاد شده - یعنی بین این عمق‌ها و یا خارج از آنها - بستگی دارد. موقعیت نسبی این عمق‌ها، تعیین‌کننده نوع شیب کانال و رفتار ریاضی نیمرخ (تقعر و تحدب، نقطه عطف، مجانب و نقاط ناپیوستگی) است. موقعیت عمق نرمال محاسباتی صرفاً به انتخاب روش برآورد ضریب انتقال باز می‌گردد. اما موقعیت عمق بحرانی، علاوه بر این، به رهیافت انتخاب شده در تحلیل جریان نیز وابسته است. در این تحقیق، موقعیت عمق بحرانی، با برابر واحد قرار دادن معادله (۶) (عدد فرود) محاسبه شده است. در ادامه، به دلیل قابل بررسی بودن شکل‌ها، در حالت استفاده از رهیافت انرژی، تعریف متناظر با $i=3$ و در حالت استفاده از رهیافت اندازه حرکت، تعریف متناظر با $i=5$ در نظر گرفته شده است. تحلیل اطلاعات آزمایشگاهی موجود (۴ نیمرخ سطح آب مربوط به آزمایش‌های Sturm and Sadiq و ۱۳ نیمرخ مربوط به آزمایش‌های این تحقیق) با هدف بررسی اعتبار رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت، به نتایجی منجر شد که در ادامه، در سه گروه مختلف به‌اختصار ارائه می‌شود.

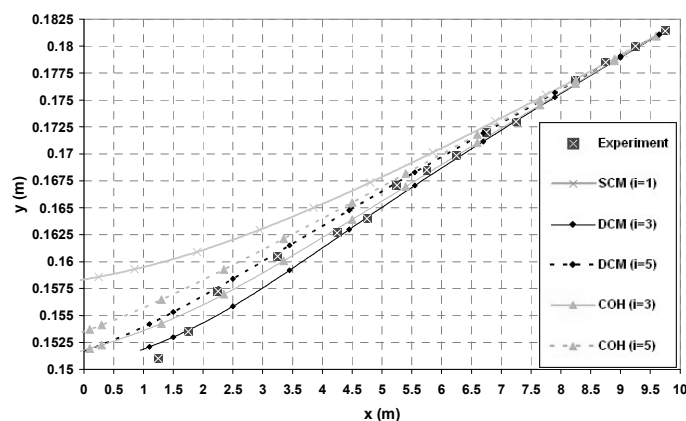
آزمایش **M(23.44)**: در این آزمایش، علاوه بر عمق بحرانی ۱۳/۸۶ سانتی متر در مقطع اصلی، دو عمق بحرانی دیگر نیز در سیلابدشت‌ها، ظاهر می‌شود که در باره بروز اعماق بحرانی چندگانه در کانال‌های مرکب می‌توان به French (1987) و Bousmar and Zech (2003) مراجعه نمود.

جدول ۳ اعماق بحرانی سیلابدشتی و عمق نرمال را ارائه می‌دهد که بر این اساس، بجز روش EDM، در سایر روش‌ها، شیب کانال و نیمرخ تولیدی توسط رهیافت انرژی، تند و S1 و توسط رهیافت اندازه حرکت، ملایم و M1، برآورد می‌شود. اما در روش EDM شیب کانال در هر حال ملایم و نوع نیمرخ، M1 است. با استفاده از روش SCM و صرف نظر از اختلاف رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت نیز شیب کانال ملایم برآورد می‌شود. ملاحظات کیفی شکل‌گیری نیمرخ در آزمایشگاه نیز، نیمرخ M1 را تأیید می‌کند.

در این تحقیق، این شرایط مشهود است. در شکل ۶ نیمرخ‌های M1 محاسباتی و مشاهداتی آزمایش M(11.80) ارائه شده است. نتایج مربوط به دو نیمرخ دیگر که مربوط به آزمایش Sturm(113) است، در مرجع (Alavi Moghaddam and Hosseini, 2007) قابل مشاهده است.

۳-۶- گروه سوم

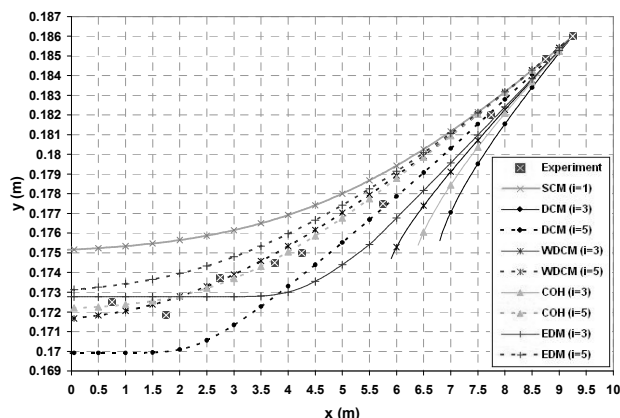
اما تحلیل برخی داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده توسط مؤلفان و Sturm and Sadiq (1996)، اختلاف معناداری را بین نتایج رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. در آزمایشی که در ادامه تشریح می‌شود، تمایز بین دو رهیافت، ناشی از پیش‌بینی‌های مختلف عمق بحرانی، نوع شیب و در نتیجه نوع نیمرخ جریان در طول کانال است.



شکل ۶ نیمرخ‌های M1 محاسباتی و مشاهداتی در آزمایش M(11.80)

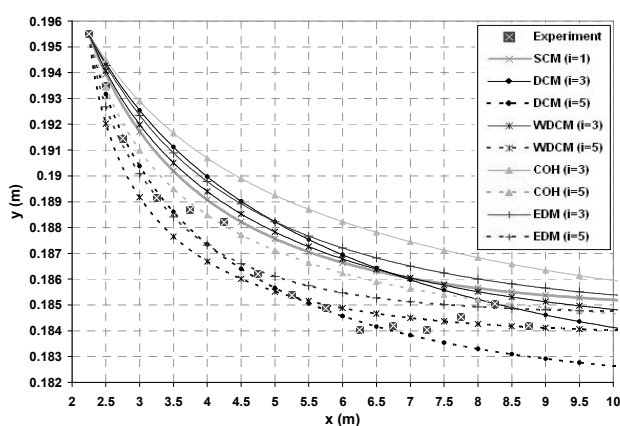
جدول ۳ اعماق نرمال و بحرانی محاسباتی بر اساس روشهای مختلف مربوط به آزمایش M(23.44) بر حسب متر

Method	SCM	DCM	WDCM	COH	EDM
y_0	۰/۱۷۴۹	۰/۱۶۹۹	۰/۱۷۲۲	۰/۱۷۲۰	۰/۱۷۲۹
$y_c(i=1)$	-۰/۱۶۸۵	—	—	—	—
$y_c(i=3)$	—	۰/۱۵۱۸ و ۰/۱۷۴۲	۰/۱۵۱۷ و ۰/۱۷۳۱	۰/۱۵۱۷ و ۰/۱۷۴۲	-۰/۱۷۲۱
$y_c(i=5)$	—	۰/۱۵۲۱ و ۰/۱۶۹۲	۰/۱۵۲۰ و ۰/۱۶۸۸	۰/۱۵۲۱ و ۰/۱۶۹۲	-۰/۱۶۷۸



شکل ۷ نیمرخ‌های محاسباتی و مشاهداتی

در آزمایش M(23.44)



شکل ۸ نیمرخ‌های محاسباتی و مشاهداتی

در آزمایش S(61.34)

عواملی که در این بررسی آزمایشگاهی مستقیماً مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند، دبی و عمق جریان است. سایر عوامل مانند ضریب زبری، به‌طور غیر مستقیم و وابسته به مقادیر این دو عامل، برآورد شده‌اند. از آنجا که دبی توسط دو ابزار مستقل اندازه‌گیری شد و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز از همخوانی کاملاً قابل قبولی برخوردارند (متوسط قدر مطلق‌های اختلاف نسبی، $3/17$ درصد)، لذا می‌توان با قطعیت بالایی فرض کرد که خطای اندازه‌گیری دبی، ناچیز و قابل صرف‌نظر است. بنابراین اصلی‌ترین عدم قطعیت در آزمایشهای مؤلفان، متناسب به اندازه‌گیری عمق است. برای تخمین عمق در هر موقعیت خاص، سه عامل مستقل مورد اندازه‌گیری قرار گرفت:

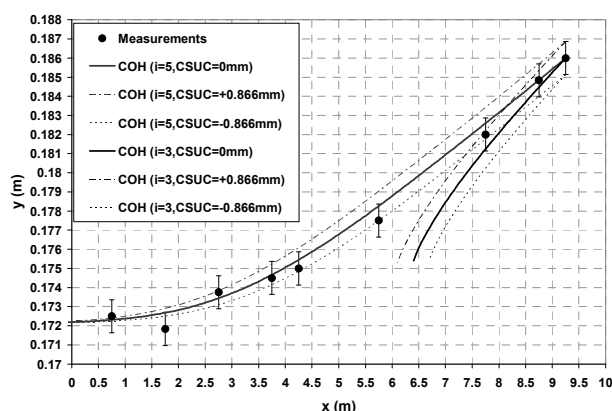
شکل ۷، مقایسه نتایج محاسباتی روش‌ها و رهیافت‌های مختلف را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. بجز در روش EDM، رهیافت انرژی با نزدیک شدن نیمرخ به عمق بحرانی، دچار ناپیوستگی می‌شود و رهیافت اندازه حرکت در این آزمایش از اعتبار بیشتری نسبت به رهیافت انرژی برخوردار است. دقیقاً همین شرایط در تحلیل دو نیمرخ اندازه‌گیری شده در آزمایش Sturm(42.5) نیز مشاهده گردید (Alavi Moghaddam and Hosseini, 2007).

از آنجا که همگرایی به شرایط یکنواخت بر روی شیب تند، در رهیافت اندازه حرکت سریعتر از رهیافت انرژی است، لذا آزمایشهای بعدی برای ثبت داده‌های تجربی به‌منظور بررسی اعتبار این دو رهیافت در نیمرخ S2 در ۵ دبی مختلف بر روی شیب تند انجام شد که همگی نتایج نسبتاً مشابهی را در تأیید اعتبار یا دقت بیشتر رهیافت اندازه حرکت، نشان دادند. از آن میان، شکل ۸ نتایج آزمایش S(61.34) را ارائه می‌کند.

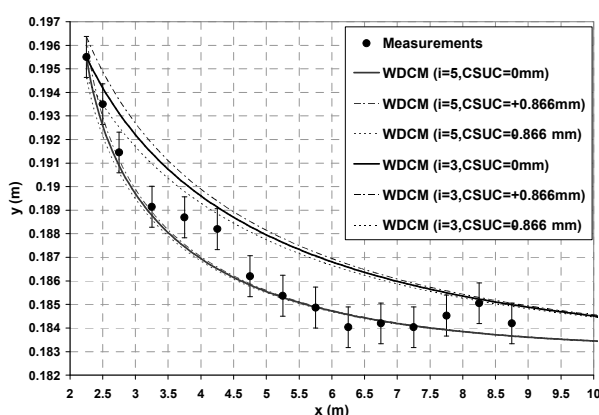
۷- تحلیل خطا

«هر نوع اندازه‌گیری، هرچند دقیق و علمی، با عدم قطعیت‌هایی روبه‌رو است (Taylor, 1997)». از آنجایی که اختلاف بین نتایج محاسباتی با یکدیگر و با داده‌های تجربی بسیار کم است، لذا این پرسش مطرح می‌شود که آیا تأثیر عدم قطعیت‌های آزمایشگاهی می‌تواند نتیجه مشاهده شده در برتری رهیافت اندازه حرکت را تحت الشعاع قرار دهد؟ لذا تحلیل خطاهای آزمایشگاهی بر روی نتایج مشاهده شده در ۶ نیمرخ از ۱۳ نیمرخ اندازه‌گیری شده در این تحقیق -که در آنها اعتبار رهیافت اندازه حرکت تأیید شد- انجام گردید. در خصوص آزمایش‌های Sturm and Sadiq (1996)، اطلاعاتی از جزئیات مراحل آزمایشگاهی و دقت ابزارها در دست نبود.

مجدداً نیمرخ‌های سطح آب با مقادیر جدید عمق کنترل (در حداقل و حداکثر مقادیر محتمل) محاسبه و نتایج با مقادیر مشاهداتی در دامنه خطای محتمل، مقایسه شد. این تحلیل خطا برای تمامی آزمایشها انجام شد که نتایج دو آزمایش M(23.44) و S(61.34) به عنوان نمونه، به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است. در شکل (۹)، نتایج متناظر با روش COH و در شکل ۱۰، نتایج متناظر با روش WDCM ارائه شده است. تحلیل خطا، در خصوص چهار آزمایش دیگر نیز، نتایجی مشابه را ارائه می‌کند. تحلیل خطای انجام شده نشان می‌دهد که اثر همزمان عدم قطعیت‌های آزمایشگاهی بر مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، اعتبار رهیافت اندازه حرکت را تحت الشعاع قرار نمی‌دهد.



شکل ۹ نتایج تحلیل خطا در آزمایش M(23.44)
(CSUC - عدم قطعیت مقطع کنترل)



شکل ۱۰ نتایج تحلیل خطا در آزمایش S(61.34)
(CSUC - عدم قطعیت مقطع کنترل)

مقادیر قرائت عمق سنج، تراز نصب آن و تراز کف فلووم. تمامی این مقادیر با عدم قطعیتی برابر ± 0.5 میلی متر اندازه گیری شده است. عدم قطعیت کل Δ_T ناشی از N اندازه گیری مستقل - که هریک عدم قطعیتی برابر Δ_i دارند - و مجموع یا تفاضل حسابی آنها عامل مورد نظر را تولید می‌کنند، با رابطه زیر محاسبه می‌شود (Taylor, 1997):

$$\Delta_T = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta_i)^2} \quad (15)$$

لذا عدم قطعیت اعماق اندازه گیری شده، ± 0.866 میلی متر (نوسانات در حدود $1/7$ میلی متر) است. اما در این تحقیق اندازه گیری عمق در هر مقطع خاص، در سه نقطه میانی سیلابدشت راست، کانال اصلی و سیلابدشت چپ انجام شد. در صورتی که تابعی مانند G ، وابسته به N متغیر مستقل x_i باشد و عدم قطعیت اندازه گیری در خصوص متغیر x_i ، Δx_i نامیده شود، آنگاه عدم قطعیت این تابع (ΔG) از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Taylor, 1997):

$$\Delta G = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (16)$$

و در هر حال حداکثر عدم قطعیت محتمل برای تابع G ($(\Delta G)_{MPU}$)، برابر است با (Taylor, 1997):

$$(\Delta G)_{MPU} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial G}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (17)$$

بنابراین از آنجا که سه اندازه گیری انجام شده در هر مقطع عرضی، مستقل از یکدیگر و همگی عدم قطعیتی برابر ± 0.866 میلی متر دارند، لذا میانگین حسابی عمق در آن مقطع، عدم قطعیتی برابر ± 0.50 میلی متر و حداکثر عدم قطعیت محتملی برابر ± 0.866 میلی متر دارد. در این تحقیق، برای اطمینان بیشتر، حداکثر عدم قطعیت محتمل، مبنای کار قرار گرفته است. این عدم قطعیت، نه تنها مستقیماً بر مقادیری که به عنوان عمق‌های مشاهداتی ثبت شده، مؤثر است، بلکه به طور غیر مستقیم نیز بر مقادیر محاسباتی نیمرخ‌های سطح آب، از طریق تغییر در عمق کنترل شروع محاسبات تأثیر گذار خواهد بود. بنابراین

۸- واکاوی منشأ اختلاف رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت

از دیدگاه کاربردی، برآوردهای مختلف رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت از عمق جریان - که در تحلیل ۸ نیمرخ از ۱۷ نیمرخ بررسی شده در این تحقیق مشاهده شد (و همگی برتری رهیافت اندازه حرکت را نشان می‌دادند) - ناشی از برآوردهای مختلف از عدد فرود است. لذا، این پرسش مطرح می‌شود که کدام برآورد از عدد فرود (انرژی یا اندازه حرکت) به واقعیت نزدیکتر است؟ هرچند عدد فرود بر خلاف عواملی مانند عمق یا سرعت موضعی، کمیتی غیر ذاتی و تعریفی برای جریان یک‌بعدی است و لذا اصطلاح «عدد فرود واقعی جریان»، فاقد تعریف هیدرولیکی خاصی است، اما آنچه در این تحقیق و در ادامه، با این عنوان معرفی می‌شود، در واقع مقدار محاسباتی عدد فرود است که مقادیر عوامل ذاتی مؤثر در آن (مانند سرعت)، منطبق بر واقعیت جریان در مقطع مرکب، اعمال شده‌اند. توجه به تعریف جامعی که توسط مؤلفان از عدد فرود در رابطه (۶) ارائه شده نشان می‌دهد که این عامل در روند «یک‌بعدی سازی» جریان ماهیتاً دو یا سه بعدی، مهمترین نقش را ایفا می‌کند. وظیفه ایفای این نقش را در دیدگاه انرژی، α و در دیدگاه اندازه حرکت، β به عهده دارند. بنابراین در واقع با دو رهیافت یک‌بعدی سازی متفاوت از جریان روبه‌رو هستیم که اولی توأم با وارد کردن اثرات α و $\frac{d\alpha}{dy}$ و دومی توأم با وارد کردن اثر β و $\frac{d\beta}{dy}$ است. لذا پرسش اصلی این مقاله (اعتبار رهیافت انرژی یا اندازه حرکت)، به پرسش دقت این دو روش ساده‌سازی و یک‌بعدی سازی جریان، تحویل می‌شود. برای پاسخ به این پرسش بایستی در خصوص کانالهایی که نیمرخ‌های سطح آب آن مورد تحلیل‌های قبلی قرارگرفت، مقادیر توزیع سرعت عرضی در مقطع مرکب مربوط و در محدوده اعماق متناظر با نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده، به‌طور دقیق و نسبتاً پیوسته

در اختیار باشد تا به‌وسیله آن بتوان مقادیر واقعی α و β ، $(\frac{d\alpha}{dy}$ و $\frac{d\beta}{dy})$ و $(F_3$ و $F_5)$ را محاسبه کرد. بدیهی است که این محاسبات، مستقل از روابطی است که در دیدگاه یک‌بعدی برای محاسبه $(\frac{d\alpha}{dy}$ و $\frac{d\beta}{dy})$ به‌کار گرفته شده است. مقایسه مقادیر واقعی عدد فرود از این روش، با مقادیر محاسباتی در دیدگاه یک بعدی محض، شاید بتواند وضوح بیشتری را به اختلاف بین نتایج رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت و منشأ آن ببخشد. مقادیر توزیع سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های محققان، محدود به هفت عمق مختلف است که از پیوستگی کافی برای هدف مورد نظر برخوردار نیست. همچنین مقادیر توزیع سرعت‌های عرضی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های (Sturm and Sadiq 1996) در اختیار نیست. لذا برای حل این مشکل، توزیع سرعت عرضی در دو کانال آزمایشگاهی مربوط به این تحقیق و تحقیق Sturm and Sadiq توسط یک روش دوبعدی معتبر در کانالهای مرکب محاسبه می‌شود. Shiono and Knight (1991) رابطه زیر را به عنوان معادله توزیع سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، برای کانال باز با عمق جریان H ارائه داده‌اند:

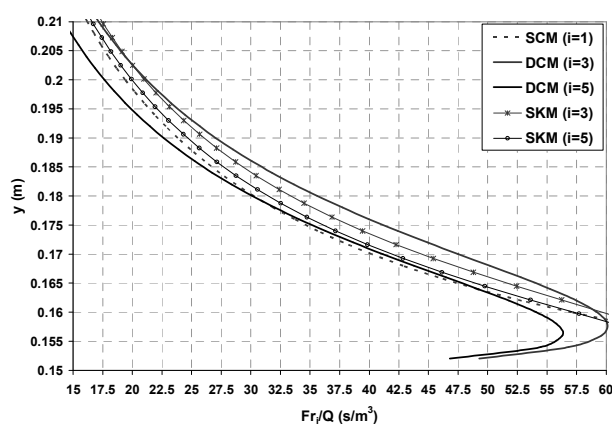
$$\rho g H S_0 - \frac{1}{8} \rho f U_d^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{S}{S_0} \right)^{1/2} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} U_d \frac{\partial U_d}{\partial z} \right\} = \Gamma \quad (18)$$

که f ضریب اصطکاک دارسی - وایسباخ، U_d سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، S شیب جانبی کف، λ ضریب بدون بعد لزجت گردابه‌ای و Z موقعیت محاسبه سرعت در عرض مقطع است. Γ عبارت جریان ثانویه است که توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma = \frac{\partial}{\partial z} \{ H (\rho \overline{UV})_d \} \quad (19)$$

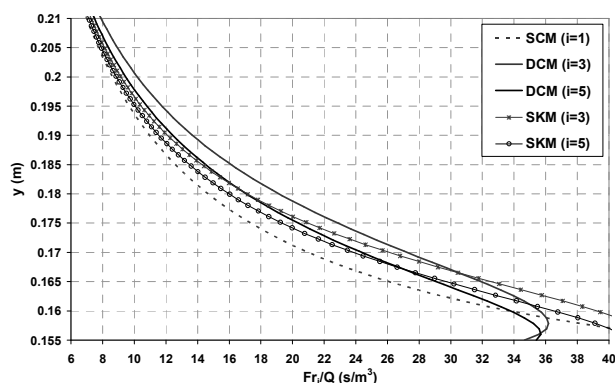
که در آن $\bar{U}$ و $\bar{V}$ به ترتیب سرعت‌های متوسط در زمان در دو راستای طولی (X) و عرضی (Z) است. برای برآورد

به‌رغم نزدیکی نسبی مقادیر به یکدیگر، نتیجه جالب توجهی که در هر دو شکل مشاهده می‌شود، تمایل بیشتر مقادیر محاسباتی SKM (اعم از مقادیر متناظر با رهیافت انرژی و مقادیر متناظر با رهیافت اندازه حرکت) به مقادیر محاسباتی روش یک‌بعدی متناظر با رهیافت اندازه حرکت، در محدوده‌ای از اعماق است که نیم‌رخ‌های مورد بررسی در این تحقیق، در آن ناحیه قرار داشته‌اند. نکته‌ای که لازم است ذکر شود این که مقادیر محاسباتی دو شکل اخیر، کاملاً مستقل از مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی است.



شکل ۱۱ مقایسه مقادیر عبارت F_r/Q در

کانال آزمایشگاهی این تحقیق



شکل ۱۲ مقایسه مقادیر عبارت F_r/Q در

کانال آزمایشگاهی Sturm and Sadiq (1996)

به عبارت دیگر، مستقل از اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی، تحلیل نظری نشان می‌دهد که در کانال آزمایشگاهی این

عبارت جریان ثانویه در این تحقیق از روابط پیشنهادی Abril and Knight (2004) استفاده شده است. این مرجع اخیر روابط واسنجی شده‌ای را نیز برای محاسبه ضریب بدون بعد لزجت گردابه‌ای و همچنین ضریب اصطکاک دارسی- وایسباخ در مقاطع مرکب ارائه داده است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. هر چند معادله دیفرانسیل رابطه (۱۸) را می‌توان با اعمال تبدیل دیفرانسیلی، به کمک روشهای عددی با سهولت بیشتری حل کرد (ظهیری و ایوب‌زاده، ۱۳۸۴)، اما نتایجی که در ادامه ارائه می‌شود بر پایه حل تحلیلی ارائه شده توسط Shiono and Knight (1991) بدست آمده‌است. این روش که عموماً SKM^۱ نامیده می‌شود، مستقل از روش حل تحلیلی یا عددی به‌کارگرفته شده، از دقت و توانایی قابل قبولی در برآورد صحیح توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب برخوردار است. این امر توسط Knight and Abril, Shiono and Knight (1991) و Ervine et al. (2000)، (1996) و Knight (2004) در مقاطع آزمایشگاهی و همچنین چند مقطع طبیعی محدود بررسی شده است. با توجه به مقادیر دقیق توزیع عرضی سرعت که توسط روش SKM برآورد شده، می‌توان اعداد فرود واقعی را متناظر با رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت محاسبه کرد. اما از آنجا که عبارت $\frac{F_i}{Q}$ مستقل از مقادیر دبی و شیب طولی کانال بوده و صرفاً تابعی از شرایط هندسی مقطع و زبری سطوح است، به منظور مقایسه جامع‌تر، مقادیر این عامل برای کانال آزمایشگاهی مربوط به این تحقیق و همچنین کانال آزمایشگاهی به‌کار رفته توسط Sturm (1996) and Sadiq and Sadiq بر مبنای دو روش یک‌بعدی SCM و DCM و روش دوبعدی SKM محاسبه شده‌است. این مقادیر به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شوند.

1. Shiono and Knight Method

تحقیق، در اعماق کمتر از ۱۹ سانتی‌متر و در کانال آزمایشگاهی (Sturm and Sadiq 1996) در اعماق سیلابدشتی بیش از ۱۷ سانتی‌متر، کاربرد توأم رهیافت اندازه حرکت و روش‌های یک‌بعدی برآورد ضریب انتقال، مقادیر عدد فرود را دقیق‌تر برآورد می‌کند. بنابراین از آنجا که نیمرخ‌های مورد بررسی در این تحقیق در هر دو گروه از آزمایش‌ها، در این محدوده از اعماق قرار داشته‌اند، نتایج رهیافت اندازه حرکت از همخوانی مناسبتری با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار بوده است. هر چند انجام این بررسی نظری در کانالهای مرکب با ابعاد و شرایط مختلف توصیه می‌شود، اما در حد بررسی انجام شده، این نتیجه‌گیری کلی را می‌توان ارائه کرد که اعتبار رهیافت اندازه حرکت نسبت به رهیافت انرژی، در شیوه متداول برآورد S ، ویژگی ذاتی و همیشگی این رهیافت نیست و بلکه در هر کانال مرکب، با توجه به شرایط خاص آن، این موضوع باید بررسی شود. لذا در شرایطی که محاسبات دقیق جریان متغیر تدریجی در کانال مرکب مورد نظر باشد، پیشنهاد می‌شود که ابتدا با انجام این تحلیل نظری و محاسبه عامل $\frac{F_i}{Q}$ در اعماق مختلف، برتری رهیافت انرژی یا اندازه حرکت در خصوص آن کانال بررسی و سپس با انتخاب رهیافت دقیق‌تر، تحلیل جریان متغیر تدریجی در آن کانال انجام شود.

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده است که اعتبار رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت در تحلیل جریان دائمی غیریکنواخت در کانالهای مرکب بررسی شود. از تحلیل‌های انجام شده، نتایج زیر به‌طور خلاصه قابل استخراج است.

۱- با ارائه دو مثال بر روی شیبهای ملایم و تند، نشان داده شد که در شیب ملایم، رهیافت انرژی و در شیب تند، رهیافت اندازه حرکت همگرایی سریعتری به جریان

یکنواخت دارد و انتخاب روش برآورد ضریب انتقال مقطع تأثیری در این نتیجه ندارد.

۲- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نشان می‌دهد که در اعماق سیلابدشتی زیاد، اصولاً اختلاف معناداری بین نتایج رهیافت‌های مختلف وجود ندارد. این اختلاف در اعماق سیلابدشتی متوسط شروع شده و در اعماق سیلابدشتی کم، معنادار می‌شود.

۳- در محاسبات یک‌بعدی جریان دائمی غیر یکنواخت در کانالهای مرکب، در دو شرایط زیر، تمایزی قابل بررسی بین رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت مشاهده می‌شود که نتایج را نیز به دنبال دارد.

الف) برآوردهای متفاوت از عمق بحرانی، نوع شیب، نوع نیمرخ و نقطه ناپیوستگی یا مجانب منحنی نیمرخ سطح آب در اعماق سیلابدشتی کم، به‌ویژه در محدوده دبی‌های با اعماق بحرانی چندگانه، می‌تواند تمایزی قابل بررسی را بین نتایج محاسباتی حاصل از رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت ایجاد کند.

ب) شکل عمومی نیمرخ و سرعت تقرب به جریان یکنواخت نیز، تمایزی قابل بررسی را بین رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت ایجاد می‌کند.

۴- تحلیل خطای اندازه‌گیری عمق نشان داد که عدم قطعیت اندازه‌گیری عمق اعتبار بیشتر رهیافت اندازه حرکت را تحت الشعاع قرار نمی‌دهد.

۵- با توجه به نقش اساسی عدد فرود در اختلاف نتایج رهیافت‌های انرژی و اندازه حرکت، به کمک روش دوبعدی SKM، مقادیر توزیع سرعت عرضی و اعداد فرود دقیق در این دو کانال آزمایشگاهی، محاسبه و با مقادیر برآورد شده روشهای یک‌بعدی مقایسه شد. این بررسی نشان داد که در محدوده اعماق اندازه‌گیری شده در این دو گروه آزمایش، رهیافت اندازه حرکت برآورد دقیق‌تری را از عدد فرود ارائه می‌کند که این تأییدی نظری بر مشاهدات آزمایشگاهی مذکور است. اما از این تحلیل نظری می‌توان نتیجه گرفت که اعتبار رهیافت

Q	دبی حجمی
R	شعاع هیدرولیکی
r_j	شعاع هیدرولیکی زیرمقطع j ام
S	عبارت شیب هیدرولیکی در رابطه ۵
s	شیب جانبی بستر
S_0	شیب طولی کانال
S_e	شیب انرژی
S_f	شیب اصطکاکی
S_{fl}	شیب دیواره جانبی در سیلابدشت چپ
S_{fr}	شیب دیواره جانبی در سیلابدشت راست
S_{ml}	شیب دیواره جانبی سمت چپ در کانال اصلی
S_{mr}	شیب دیواره جانبی سمت راست در کانال اصلی
T	عرض سطح آزاد
t_j	عرض سطح آزاد زیرمقطع j ام
u	انرژی درونی در واحد جرم
U_d	سرعت متوسط گیری شده در عمق
x	فاصله طولی از شروع کانال (راستای مختصات طولی)
y	عمق جریان (راستای مختصات قائم)
y_c	عمق بحرانی
y_0	عمق نرمال
z	فاصله عرضی نقاط (راستای مختصات جانبی)
$\bar{y}$	فاصله مرکز سطح مقطع عرضی تا سطح آزاد
q	شدت اتلاف حرارتی نسبت به زمان
$\bar{U}$	سرعت متوسط در زمان در راستای طولی (x)
$\bar{V}$	سرعت متوسط در زمان در راستای عرضی (z)
α	ضریب تصحیح انرژی جنبشی
β	ضریب تصحیح اندازه حرکت
Γ	عبارت جریان ثانویه
Δ	عدم قطعیت
Δx	گام محاسباتی در رابطه ۱۴
δ_i	عوامل کمکی برای تعریف عدد فرود در رابطه ۱۳
σ_i	عوامل کمکی برای تعریف عدد فرود در رابطه ۱۱
η_i	مقدار بی بعد در رابطه ۶
λ	ضریب بدون بعد لزجت گردابه ای
ρ	چگالی جرمی آب

اندازه حرکت نسبت به رهیافت انرژی، در شیوه متداول برآورد S، ویژگی ذاتی و همیشگی این رهیافت نیست، و بلکه در هر کانال مرکب با توجه به شرایط خاص آن، این موضوع باید بررسی شود.

۱۰- تشکر و قدردانی

۱- از شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی، به ویژه کمیته تحقیقات آن شرکت، برای حمایت مالی از این تحقیق سپاسگزاری می شود.

۲- آزمایشهای مؤلفان، در مؤسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو انجام شده است. از همکاری صمیمانه مسئولان محترم این مؤسسه، به خاطر در اختیار قرار دادن امکانات، صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

۱۱- فهرست علائم

A	مساحت
a_j	مساحت زیر مقطع j ام
B_l	عرض کل نیمه سمت چپ مقطع مرکب
b_l	عرض کف نیمه سمت چپ کانال اصلی
B_r	عرض کل نیمه سمت راست مقطع مرکب
b_r	عرض کف نیمه سمت راست کانال اصلی
f	ضریب اصطکاک دارسی
F_i	تعریف i ام عدد فرود بر اساس رابطه ۵
G	تابع دلخواه در رابطه ۱۶
g	شتاب جاذبه
h	عمق کانال اصلی زیر تراز سیلابدشت
H	عمق کل جریان در کانال اصلی
K	ضریب انتقال
k_j	ضریب انتقال زیرمقطع j ام
N	تعداد مشاهدات
n_{fl}	ضریب زبری مانینگ سیلابدشت چپ
n_{fr}	ضریب زبری مانینگ سیلابدشت راست
n_{mc}	ضریب زبری مانینگ کانال اصلی
p _j	پیرامون مرطوب زیرمقطع j ام

[10] Chaudhry, M. H., and Bhallamudi, S. M. (1988). "Computation of critical depth in symmetrical compound channels". J. Hyd. Res. IAHR, 26(4), 377-395.

[11] Ervine, D. A., Babaeyan K., K., and Sellin, R. H. J. (2000). "Two- dimensional solution for straight and meandering overbank flows". J. Hyd. Eng., ASCE, 126(9), pp. 653-669.

[12] Field, W. G., Lambert, M. F., and Williams, B. G. (1998). "Energy and momentum in one dimensional open channel flow". J. Hyd. Res. IAHR, 36(1), pp. 29-42.

[13] French, R. H. (1987). Open-channel hydraulics, 2nd Printing. McGraw-Hill, Singapore.

[14] Hosseini, S.M. (2004). "Equations for discharge calculation in compound channels having homogeneous roughness". Iranian Journal of Science and Technology. 28(B5), pp. 537-546.

[15] Knight, D. W., and Abril, J. B. (1996). "Refined calibration of a depth- averaged model for turbulent flow in a compound channel". Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy. pp. 118, 151- 159.

[16] Lambert, M. F., and Meyers, W. R. (1998). "Estimating the discharge capacity in straight compound channels". Proc. Instn. Civ. Engrs. Wat., Marit. and Energy. 130 (June), pp. 84-94.

[17] Shiono, K., and Knight, D. W. (1991). "Turbulent open- channel flows with variable depth across the channel". J. Fluid Mech., 222, pp. 617- 646.

[18] Sturm, T. W., and Sadiq, A. (1996). "Water surface profiles in compound channels with multiple critical depths". J. Hyd. Eng., ASCE, 122(12), pp. 703-709.

[19] Subramanya, K. (2001). Flow in open channels. 2nd Ed., McGraw Hill, New Delhi.

[20] Taylor, J. R. (1997). An introduction to error analysis. 2nd Edition, University Science Books, USA.

تابع تغییرات عمق در طول کانال در رابطه ۵
تنش برشی بستر و جداره‌ها
 τ_0

۱۲- منابع

[۱] ظهیری، ع. (۱۳۸۴). حل عددی پروفیل سطح آب و روندیابی هیدرولیکی سیلاب در مقاطع مرکب با استفاده از روش تفاضل محدود". رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس، ص. ۱۶۲.

[۲] ظهیری، ع. و ایوب زاده، س. ع. (۱۳۸۴). "مطالعه آزمایشگاهی پروفیل‌های سطح آب در مقاطع مرکب". مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. کرمان، ایران، جلد ۲، ص. ۱۰۷۹-۱۰۸۷.

[۳] علوی مقدم، س. م. ر.، حسینی، س. م. و ادیب اصل، ع. (۱۳۸۵). "بررسی عملکرد روشهای برآورد ظرفیت انتقال درکانالهای مرکب مستقیم با زبری یکنواخت". مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. اهواز، ایران، لوح فشرده.

[4] Abril, J. B., and Knight, D. W. (2004). "Stage- discharge prediction of rivers in flood applying a depth- averaged model". J. Hyd. Res 42(6), pp. 616- 629.

[5] Ackers, P. (1992). "Flow formulae for straight two-stage channels". J. Hyd. Res.. IAHR, 31(4), pp. 509-531.

[6] Alavi Moghaddam, S. M. R. and Hosseini, S. M. (2007). "Energy and momentum approaches for analysis of gradually-varied flow through compound channels". Proc. 32nd IAHR Cong., Venice, Italy.

[7] Blalock, M. E., and Sturm, T. W. (1980). "Minimum specific energy in compound open channel." J. Hyd. Div., ASCE, 107(HY6), pp. 699-717.

[8] Bousmar, D., and Zech, Y. (1999). "Momentum transfer for practical flow computation in compound channels". J. Hyd. Eng., ASCE, 125(7), pp. 696-706.

[9] Bousmar, D., and Zech, Y. (2003). "Adequacy of one dimensional flow modeling in compound channels near critical depth". Proc. 28th IAHR Cong., Graz, Austria.