

برآورد عمق بحرانی در مقاطع مرکب روباز با در نظر گرفتن اثر انتقال ممتوم

*اسماعیل کردی^۱، سید علی ایوب زاده^۲ میرخالق ضیاء تبار احمدی^۳، عبدالرضا ظهیری^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشگاه مازندران، ^۲ استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس،

^۳ استاد گروه مهندسی آب دانشگاه مازندران، ^۴ مدیر دفتر پژوهش و مطالعات رسوب سازمان آب و برق خوزستان

تاریخ دریافت: ۸۴/۸/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۱۲/۲۱

چکیده

در تجزیه و تحلیل هیدرولیکی مقاطع مرکب روباز محاسبه عمق بحرانی اهمیت بسزایی دارد. روش‌های متفاوتی از جمله مقطع واحد، روش سنتی یا تجزیه مقطع، روش انرژی، روش ممتوم و روش عدد فرود وزنی را می‌توان جهت برآورد تعداد و مقدار این اعماق بکار گرفت. در کلیه این روش‌ها اثر انتقال ممتوم ناشی از وجود تغییرات عرضی سرعت بین مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در نظر گرفته نشده است. این پدیده که تحت عنوان اثر متقابل تشریح می‌گردد مبهم و پیچیده بوده و نتایج کار محققین تا به امروز منجر به معرفی و پیشنهاد یک روش جامع و کاربردی که قابلیت استفاده در طراحی و مطالعه مجاری با مقطع مرکب را داشته باشد، نشده است. روش سنتی سرعت متوسط را در مقطع اصلی بیشتر از و در سیلاب‌دشت‌ها کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. در این مقاله روش یک بعدی اصلاحی جهت برآورد عمق بحرانی با در نظر گرفتن اثر متقابل، ارائه شده است. در این مطالعه سرعت متوسط جریان در نواحی مقطع اصلی و دشت سیلابی و به تبع آن دبی‌های جریبی و کل با استفاده از روشی موسوم به کوهیرنس تصحیح گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش سنتی یا تجزیه مقطع عمق بحرانی و انرژی مخصوص بیشتری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌کند. این افزایش به شکل هندسی و شرایط هیدرولیکی جریان وابسته بوده و از چند میلی‌متر در مقیاس‌های آزمایشگاهی کوچک، تا ده‌ها سانتی‌متر در رودخانه‌ها متغیر است. تغییرات در مقدار حداقل انرژی مخصوص نسبت به مقدار عمق بحرانی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: مقطع مرکب، عمق بحرانی، روش تجزیه مقطع، کوهیرنس، روش یک بعدی اصلاحی

مقدمه

مطالعات در مقاطع مرکب در گذشته بر جریان یکنواخت متمرکز بوده و بررسی‌های اندکی بر پیش‌بینی جریان بحرانی در این گونه مقاطع صورت گرفته است. به‌طور کلی، عمق بحرانی به‌عنوان نقطه حداقل انرژی مخصوص یا حداقل نیروی مخصوص تعریف شده است. حد فاصل بین جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی که سرعت موج سطحی برابر با سرعت متوسط جریان است، نیز به‌عنوان عمق بحرانی در نظر گرفته شده است. روش‌های معمول در برآورد عمق بحرانی که تا به امروز ارائه شده‌اند اثر انتقال ممتوم ناشی از اختلاف سرعت در مقاطع جزئی را در محاسبات خود در نظر نگرفته‌اند. این پدیده را تداخل جریان یا اثر متقابل^۱ می‌نامند که به کمیت درآوردن آن بسیار پیچیده است. در این ارتباط محققین زیادی از دو دهه قبل مطالعاتی را انجام داده‌اند که نتایج کار آنها تا به امروز منتج به معرفی و پیشنهاد یک روش جامع و کاربردی که قابلیت استفاده در طراحی و مطالعه مجاری با مقطع مرکب را داشته باشد، نشده است. وجود اثر متقابل باعث می‌گردد محاسبه مقادیر عمق بحرانی و حتی تعداد اعماق بحرانی ممکنه با خطا همراه باشد. در این تحقیق روشی کاربردی برای اصلاح روش سنتی به‌منظور در نظر گرفتن پدیده اثر متقابل، ارائه شده است. سابقه تحقیق: اولین بار بختف (۱۹۳۲) ایده انرژی مخصوص را مطرح نمود. این ایده نخست برای محاسبه عمق بحرانی در مقاطع واحد از طریق رابطه ۱ مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۱).

$$E = y + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1)$$

در این رابطه E انرژی مخصوص، y عمق جریان، α و V به‌ترتیب ضریب انرژی مخصوص و سرعت متوسط است. با اعمال شرط حداقل بودن انرژی مخصوص رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

$$F_r = \sqrt{\frac{Q^2 T}{g A^3}} = 1 \quad (2)$$

که T عرض سطح آزاد آب، Q دبی عبوری، A سطح مقطع، g شتاب ثقل و F_r عدد فرود می‌باشد. در این روش که به روش مقطع واحد^۲ نیز موسوم است مقدار ضریب تصحیح انرژی جنبشی α برابر واحد فرض شده است. این رابطه در مقاطع مرکب فقط قادر به تعیین یک عمق بحرانی است که با واقعیت منافات دارد زیرا بلالوک و استورم (۱۹۸۳ و ۱۹۸۱)، کونمان (۱۹۸۲)، پتريک و گرت (۱۹۷۸) به‌صورت تحلیلی و تجربی نشان دادند که در مقاطع مرکب، امکان وقوع بیش از یک عمق بحرانی وجود دارد. شول هامر و همکاران (۱۹۸۵)، امکان وجود عمق بحرانی را با استفاده از اعداد فرود مجزا برای کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که در مقطع اصلی عدد فرود در دو عمق مختلف برابر واحد است. بلالوک و استورم (۱۹۸۱) مقدار ضریب تصحیح را با استفاده از تجزیه مقطع قائم، اصلاح نمودند که به روش مقطع واحد اصلاح شده^۳ معروف است. هیچ یک از روش‌های مقطع واحد و واحد اصلاح شده در آبراهه مرکب، نتایج رضایت‌بخشی ارائه نمی‌کنند (بلالوک و استورم، ۱۹۸۱). پتريک و گرت (۱۹۷۸)، اظهار داشتند که عمق بحرانی، در جایی رخ می‌دهد که عدد فرود وزنی برابر یک بوده و رابطه‌های ۳ و ۴ را برای محاسبه عدد فرود وزنی توسط دبی، پیشنهاد نمودند:

$$Q F_r = Q_1 F_{r1} + Q_2 F_{r2} + \dots \quad (3)$$

$$F_r = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i F_{ri}}{Q} \quad (4)$$

که Q دبی کل جریان، Q_i دبی‌های مقاطع جزئی، F_{ri} عدد فرود مقطع جزئی، F_r عدد فرود معادل و N تعداد مقاطع جزئی می‌باشند. بلالوک و استورم (۱۹۸۱) برای محاسبه عمق بحرانی در مقاطع مرکب براساس تعریف

که F_r عدد فرود مقطع جریان، βd برابر $\frac{d\beta}{dy}$ بوده و براساس تجزیه مقطع به صورت عمودی محاسبه می شود. A_1 و A_2 به ترتیب مساحت مقطع اصلی و سیلاب دشت ها، A سطح مقطع کل، V سرعت متوسط، K_1 و K_2 ضریب انتقال مقاطع جزئی و B عرض سطح بالای آب است. این روش به روش ممتوم^۳ نیز موسوم است. روش استورم و ممتوم نتایجی با اختلاف کم ارائه می کنند (لی و همکاران، ۲۰۰۲).

مواد و روش ها

روش کوهیرنس^۴: نتایج تحقیقات نشان داده است که روش کوهیرنس می تواند دبی واقعی را با اختلاف کمتر از ۱ درصد برآورد نماید (آکرز، ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳؛ سکین، ۲۰۰۴). در این روش ابتدا دبی جریان از روش سنتی (تجزیه مقطع) برآورد شده و سپس به کمک چهار شرط منطقی، دبی مناسبت جریان تعیین می شود. روابط جریان در نواحی چهارگانه بشرح زیر است:

روابط جریان در ناحیه ۱: در این منطقه از جریان، روابط حاکم به شرح زیر است:

$$Q_{*2F} = -1.0H_* f_C / f_F \quad (12)$$

$$Q_{*2C} = -1.24 + 0.395 B/W_C + GH_* \quad (13)$$

$$\begin{cases} G = 10.42 + 0.17 \cdot \left[\frac{f_F}{f_C} \right] & s_C > 1.0 \\ & (14) \end{cases}$$

$$\begin{cases} G = 10.42 + 0.17 s_C \left[\frac{f_F}{f_C} \right] & s_C < 1.0 \end{cases}$$

$$Q_{R1} = Q_{TB} - (Q_{*2C} + N_F Q_{*2F}) \quad (15)$$

$$(V_C - V_F) H h \times ARF$$

در روابط فوق، f_C و f_F به ترتیب ضرایب اصطکاک داری و یسباخ مقاطع اصلی و سیلابی، h عمق تراز لبریز، H عمق کل جریان در مقطع اصلی، B نیم عرض فوقانی

حداقل انرژی مخصوص ضریب تصحیح انرژی را به عنوان تابعی از عمق جریان در نظر گرفته و رابطه عمومی عدد فرود را به صورت رابطه های ۵، ۶، ۷ و ۸ بیان کردند:

$$F_r = \frac{Q^2}{2gK_T^3} \sqrt{\frac{\sigma_2 \sigma_3}{K_T} - \sigma_1} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^3 \left(\left(\frac{K_i}{A_i} \right)^3 \left(3T_i - 2R_i \frac{dP_i}{dy} \right) \right) \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \sum_{i=1}^3 \frac{K_i^3}{A_i^2} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \sum_{i=1}^3 \left(\left(\frac{K_i}{A_i} \right) \cdot \left(5T_i - 2R_i \frac{dP_i}{dy} \right) \right) \quad (8)$$

که Q دبی کل، T_i عرض فوقانی سطح آب در مقطع جزئی، P_i محیط خیس شده در مقطع جزئی، R_i شعاع هیدرولیکی مقاطع جزئی، K_T ضریب انتقال کل مقطع، K_i ضریب انتقال مقاطع جزئی، A_i سطح مقاطع جزئی و $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ پارامترهای خصوصیت مقاطع جزئی^۱ است. سرعت در داخل مقاطع جزئی یکنواخت فرض شده و در محاسبات محیط خیس شده فصل مشترک بین مقاطع جزئی در نظر گرفته نشده است. چادری و بالامودی^۲ (۱۹۸۸) جایی را که در آن سرعت آشفستگی سطحی (تعریف شده براساس روش خطوط مشخصه) برابر با سرعت متوسط افزوده شده (βV) باشد به عنوان نقطه بحرانی تعریف نمودند (رابطه ۹):

$$F_r = \frac{\beta V}{\sqrt{\frac{gA}{B} + V^2 \left(\beta^2 - \beta + \beta' \frac{A}{B} \right)}} \quad (9)$$

$$\beta = \left(\frac{K_1^2}{A_1} + \frac{2K_2^2}{A_2} \right) \cdot \frac{A}{(K_1 + 2K_2)^2} \quad (10)$$

$$m = \frac{K_1}{K_1 + 2K_2} \quad (11)$$

$$Q_{R4} = Q_{basic} \times DISADF_4 \quad (21)$$

که Q_{R4} و $DISADF_4$ به ترتیب دبی اصلاحی و ضریب اصلاح دبی منطقه چهار می‌باشند.

انتخاب منطقه مناسب جریان برای یک عمق معین: برای انتخاب منطقه مناسب جریان و در نتیجه دبی جریان در مقطع، از چند شرط منطقی زیر استفاده می‌گردد:

اگر $Q_{R1} > Q_{R2}$ آنگاه $Q = Q_{R1}$ است.

اگر $Q_{R1} < Q_{R2}$ و $Q_{R2} \leq Q_{R3}$ آنگاه $Q = Q_{R2}$ می‌باشد.

اگر $Q_{R1} < Q_{R2}$ و $Q_{R2} > Q_{R3}$ و $Q_{R3} \geq Q_{R4}$ آنگاه $Q = Q_{R3}$ است.

نهایتاً اگر $Q_{R3} < Q_{R4}$ آنگاه $Q = Q_{R4}$ است.

در منطقه یک و با توجه به مقادیر Q_{*2C} و Q_{*2F}

می‌توان دبی‌های جزئی را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q_{CR1} = Q_{CB} - Q_{*2C} (V_C - V_F) H h \times ARF \quad (22)$$

$$Q_{FR1} = Q_{FB} - Q_{*2F} (V_C - V_F) H h \times ARF \quad (23)$$

Q_{CR1} و Q_{FR1} به ترتیب دبی مقطع اصلی و سیلابی در منطقه یک، Q_{CB} و Q_{FB} نیز دبی‌های مقطع اصلی و سیلابی از روش سنتی می‌باشند. برای اعماق بالاتر جریان، ضرایب اصلاحی از رابطه ۲۴ به دست می‌آیند:

$$Q_{CR2,3,4} = Q_{CB} \times DISADF_{CR1} \quad (24)$$

که $Q_{CR2,3,4}$ دبی مقطع اصلی در مناطق دو، سه و

چهار و $DISADF_{CR1} = \frac{Q_{CR1}}{Q_{CB}}$ که با افزایش تدریجی

عمق محاسبه می‌شود. در تمام شرایط جریان از ضریب تصحیح مربوط به ناحیه یک استفاده می‌شود.

نتایج نشان داده است که در اعماق نسبی بیش از ۱

مقطع مرکب شبیه مقطع واحد عمل نموده و اثر متقابل اندک است (آکرز، ۱۹۹۲). در این حالت می‌توان از روابط معمول استفاده نمود. البته گستره وسیعی از جریان در مقاطع مرکب در عمق نسبی کمتر از ۱ رخ می‌دهند.

تئوری روش اصلاحی: در این تحقیق ابتدا با استفاده از مدل یک بعدی آکرز (۱۹۹۲) توزیع دبی جریان بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی محاسبه شده و سپس فاکتور

سطح آب، W_C نیم عرض مقطع اصلی در رقوم لبریز، G پارامتر تخمین جریان در منطقه ۱، H^* عمق نسبی $(\frac{H-h}{h})$ ، ARF فاکتور نسبت شکل، Q_{RI} دبی جریان در ناحیه ۱، Q_B دبی کل جریان با روش سنتی، Q_{*2} دبی کاهش‌ی مقاطع جزئی و S_C شیب جانبی مقطع اصلی است.

روابط جریان در ناحیه ۲: تابع یا رابطه طراحی در این منطقه براساس تابع کوهیرنس بیان می‌شود. رابطه مورد نظر را می‌توان با محاسبه مقدار کوهیرنس برای عمق جریانی بیش از مقدار واقعی، به دست آورد. مقدار جابجایی^۱ از رابطه ۱۶ قابل محاسبه است:

(۱۶)

$$\begin{cases} \text{shift} = 0.05 + 0.05 N_F S_C \geq 1 \\ \text{shift} = -0.01 + 0.05 N_F + 0.06 S_C S_C < 1 \end{cases}$$

که N_F تعداد سیلابدشت‌هاست. ضریب تصحیح دبی برابر کوهیرنس محاسبه شده بر مبنای عمق اصلاح شده یا $(H^* + \text{shift})$ است. در نهایت رابطه ۱۷ حاصل می‌شود:

$$Q_{R2} = Q_{basic} \times DISADF_2 \quad (17)$$

که Q_{R2} دبی اصلاح شده در منطقه دو، Q_{basic} دبی کل جریان به روش سنتی و $DISADF_2$ ضریب اصلاحی منطقه دو می‌باشند.

روابط جریان در ناحیه ۳: این منطقه، شامل محدوده

کوچکی است که با تابعی از کوهیرنس بیان می‌شود:

$$DISADF_3 = 1.567 - 0.667 COH \quad (18)$$

$$Q_{R3} = Q_{basic} \times DISADF_3 \quad (19)$$

که Q_{R3} و $DISADF_3$ به ترتیب دبی اصلاحی و ضریب اصلاح دبی منطقه سه می‌باشند.

روابط جریان در ناحیه ۴: مقدار کوهیرنس مقطع، به گونه‌ای است که می‌توان آبراهه را به صورت مقطع واحد فرض نمود. برای محاسبات کل مقطع رابطه‌های ۲۰ و ۲۱ به دست می‌آید:

$$DISADF_4 = COH \quad (20)$$

انتقال مقاطع جزئی تصحیح شده است. این تصحیح به صورت زیر انجام شده است:

$$K_c^* = \frac{Q_c^*}{Q_c} K_c \quad (25)$$

$$K_f^* = \frac{Q_f^*}{Q_f} K_f \quad (26)$$

که نشانه (*) بیانگر مقادیر اصلاح شده دبی و فاکتور انتقال در مقاطع جزئی است. با توجه به مقادیر اصلاحی فاکتور انتقال، ضریب تصحیح انرژی و شیب انرژی به صورت زیر اصلاح شده است:

$$\alpha' = \frac{\sum_i \left(\frac{K_i^*}{A_i^2} \right) \times \sum_i A_i}{\left(\sum_i K_i^* \right)^3} \quad (27)$$

$$S_f' = \left(\frac{Q}{K^*} \right)^2 \quad (28)$$

$$E' = y + \frac{\alpha' \cdot V^2}{2 \cdot g}, \quad F'r = \frac{V \cdot \sqrt{\alpha'}}{g \cdot y} \quad (29)$$

Q و Q^* به ترتیب دبی‌های به دست آمده از روش تجزیه مقطع مرکب و مدل یک بعدی آکرز است. c و f به ترتیب بیانگر پارامتر مربوط به مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی است. مراحل محاسبات روش اصلاحی بشرح زیر می‌باشد (کردی و همکاران، ۲۰۰۶):

۱- دبی کل و دبی‌های جزئی از روش معمول در عمق و هندسه مشخص از مقطع (بدون در نظر گرفتن اثر متقابل) محاسبه می‌شوند. پارامترهای معلوم عبارتند از: عمق تراز لبریز (h)، شیب کف (S_0)، نسبت زبری سیلاب‌دشت به مقطع اصلی (n_r)، عرض کف سیلاب‌دشت (b) و نیم عرض کف مقطع اصلی (B) و عمق کل جریان (H) پارامتر متغیر است.

۲- مطابق بند ۱ دبی کل و دبی‌های جزئی از روش کوهپرنس در همان عمق و هندسه مشخص از مقطع محاسبه می‌شود.

۳- نسبت دبی‌های محاسبه شده از روش معمول به روش کوهپرنس بازا اعماق مختلف تعیین می‌شود.

۴- ضریب انتقال محاسبه شده با روش معمول در هر عمق با استفاده از نسبت به دست آمده از گام ۳ اصلاح می‌شود.

۵- عدد فرود و انرژی مخصوص اصلاح شده برای کل مقطع در هر عمق محاسبه می‌شود.

اصلاح انرژی مخصوص در یک دبی مشخص: ۶- با استفاده از روش کوهپرنس در دبی ثابت فرضی و هندسه مشخص، عمق جریان و انرژی مخصوص واقعی، با تغییر شیب مقطع محاسبه می‌شود (پارامترهای معلوم به جز شیب S_0 نظیر بند ۱).

۷- با استفاده از روش معمول در دبی ثابت فرضی و عمق جریان محاسبه شده در گام ۷، انرژی مخصوص (بدون در نظر گرفتن اثر متقابل) محاسبه می‌شود (پارامترهای معلوم نظیر بند ۷).

۸- با استفاده از روش سعی و خطا در یک دبی ثابت، از گام‌های ۷ و ۸ مقادیر عمق بحرانی محاسبه می‌شود. در نتیجه، مقدار عمق بحرانی محاسبه شده توسط گام ۸ اصلاح شده است.

مدل‌های آزمایشگاهی و فرضی مورد مطالعه: مشخصات مدل‌های فرضی و آزمایشگاهی منتخب جهت بررسی نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. مدل فرضی آکرز (۱۹۹۱) و آزمایشگاهی استورم (۲۰۰۱)، توسط بسیاری از محققین مورد استفاده قرار گرفته است (پتريک و گرنٲ، ۱۹۷۵؛ بلالوک و استورم، ۱۹۸۰؛ استورم، ۲۰۰۱؛ و ایوب‌زاده و ظهیری، ۲۰۰۴). مدل آکرز در حالت همگن دارای ضریب زبری مانینگ ۰/۰۳ و در حالت غیر همگن، ضرایب ۰/۰۳ برای کانال اصلی و ۰/۰۶ برای سیلاب‌دشت‌ها در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های فرضی و آزمایشگاهی.

مقطع عرضی	نوع مقطع	عرض کف	تراز لبریز	عرض سیلابدشت	شیب جانبی مقطع اصلی	شیب جانبی سیلابدشت
استورم	مستطیلی با یک دشت سیلابی	۰/۲۹۷	۰/۱۶۲	۰/۷۶۷	۰	۰
آکرز	ذوزنقه ای متقارن	۱۵	۱/۵	۲۰	۱	۱
مقطع ۰۲	ذوزنقه ای متقارن	۳	۰/۱۵	۲/۲۵	۱	۱

* کلیه ابعاد به متر است.

را در مقطع ۰۲ در دبی ۰/۲۵ مترمکعب و در حالت همگن نشان می‌دهد. متوسط اختلاف در انرژی مخصوص اصلاح شده حداکثر برابر ۳/۴۷۵ درصد بوده است. شکل ۳ انرژی مخصوص اصلاح شده و سستی را در مقطع آکرز و در دبی ۱۰۳/۴۶ مترمکعب در ثانیه نشان می‌دهد. انرژی مخصوص اصلاح شده عمق بحرانی را در ۱/۷۶ متری برآورد می‌کند که با روش سنتی (۱/۸۴ متری) ۸ سانتی‌متر اختلاف دارد. متوسط اختلاف در انرژی مخصوص در مقطع آکرز در حالت بحرانی برابر ۴ درصد است. به عبارت دیگر، روش سنتی عمق بحرانی و انرژی مخصوص بیشتری را در شرایط هندسی و هیدرولیکی مشابه پیش‌بینی می‌کند.

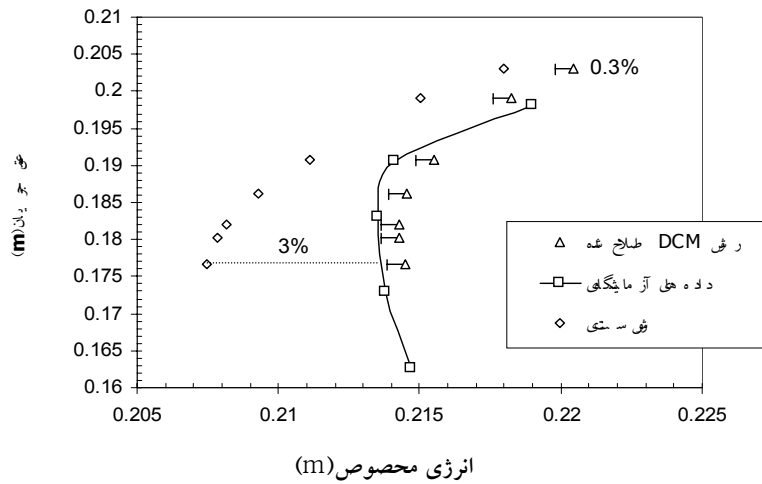
صحت برآورد تعداد اعماق بحرانی و رژیم جریان:
مطابق شکل ۴ در دبی ۰/۲۴ مترمکعب در ثانیه داده‌های آزمایشگاهی عمق بحرانی برابر ۰/۱۶۷ متر را در بالای تراز لبریز پیش‌بینی می‌کند. ولی روش سنتی فقط یک عمق بحرانی را در مقطع اصلی و در تراز کمتر از لبریز پیش‌بینی می‌نماید. به عبارت دیگر، روش سنتی قادر به پیش‌بینی این عمق نبوده و تعداد اعماق بحرانی را به‌طور صحیحی برآورد نمی‌کند.

در سال ۱۹۸۵ شورای تحقیقات علوم و مهندسی انگلستان^۱ به‌مراه مؤسسه تحقیقات هیدرولیک در والینگفورد^۲ تجهیزات آزمایشگاهی مجهزی شامل کانالی به‌طول ۵۶ متر و عرض ۱۰ متر با ظرفیت جریان حداکثر ۱/۱ مترمکعب در ثانیه ساختند که در این تحقیق از مقطع نوع ۰۲ نیز استفاده شد.

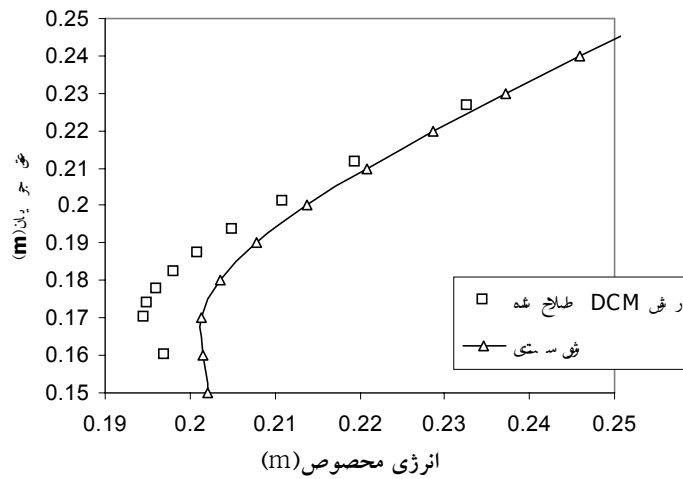
نتایج و بحث

در این بخش روش‌های برآورد عمق بحرانی بلحاظ محاسبه مقدار و تعداد اعماق بحرانی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر اثر انتقال ممنتوم و به تبع آن عدد فرود شامل عرض نسبی، عمق نسبی و زبری نسبی نیز بررسی شده‌اند.

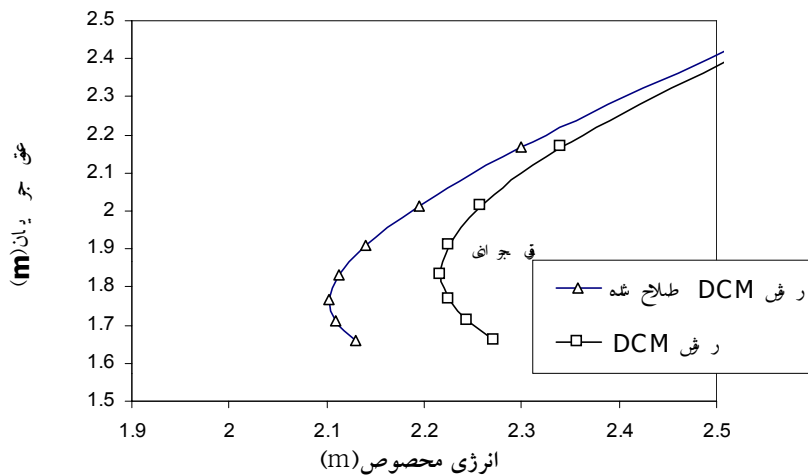
صحت برآورد مقدار اعماق بحرانی: مطابق شکل ۱ روش اصلاح شده نسبت به داده‌های آزمایشگاهی ۰/۳ درصد اختلاف دارد. اختلاف در عمق بحرانی در روش سنتی در مقطع صاف و همگن بیش از ۳ درصد است. لازم به ذکر است که مقطع آزمایشگاهی حالت صاف و همگن داشته و دارای اثر متقابل کمی است. این همپوشانی با داده‌های آزمایشگاهی، بر صحت روند اصلاح و انتخاب آن به‌عنوان معیاری از واقعیت صحت می‌گذارد. شکل ۲ تغییرات انرژی مخصوص اصلاح شده



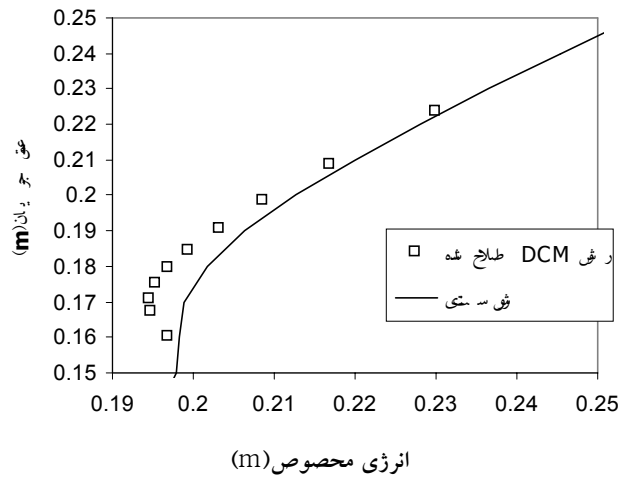
شکل ۱- تغییرات انرژی مخصوص بر حسب عمق نسبی در مقطع آزمایشگاهی استورم.



شکل ۲- تغییرات انرژی مخصوص بر حسب عمق نسبی در مقطع آزمایشگاهی $FCF_{0.2}$ ($Q=0.25 \text{ m}^3/\text{sec}$).



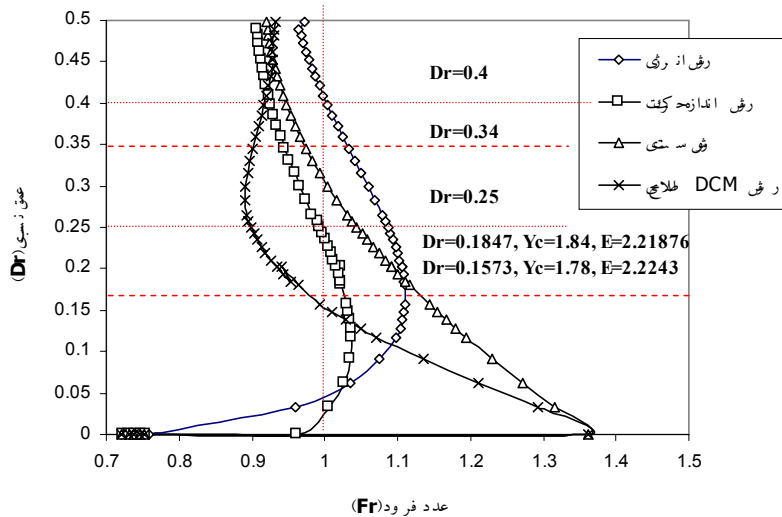
شکل ۳- تغییرات انرژی مخصوص بر حسب عمق نسبی با استفاده از روش‌های معمول و اصلاح شده (مقطع همگن).



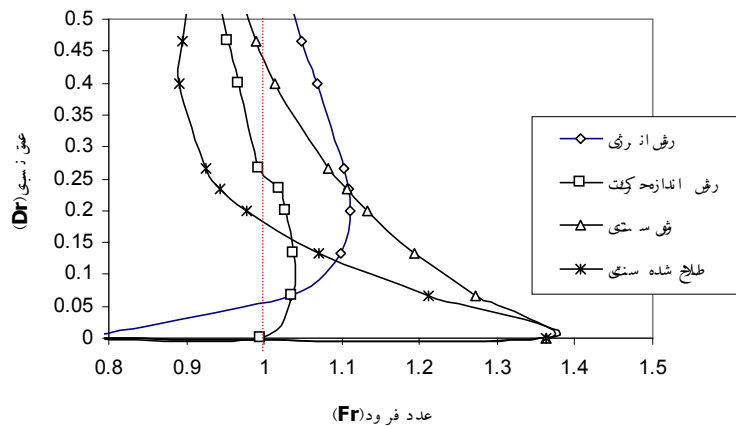
شکل ۴- تغییرات انرژی مخصوص برحسب عمق نسبی در مقطع آزمایشگاهی FCF۰۲ ($Q=0.24 \text{ m}^3/\text{sec}$).

شکل ۶ تغییرات عدد فرود را برحسب عمق نسبی در مقطع فرضی آکرز در حالت همگن و در شیب طولی ۰/۰۰۵ با استفاده از روش‌های معمول نشان می‌دهد. مطابق شکل روش سنتی عمق بحرانی بیشتری را برآورد می‌کند. لازم به ذکر است که در اصلاح عدد فرود به روش تجزیه مقطع با توجه به اینکه مقدار دبی تغییر می‌کند، از اصلاح ضریب تصحیح انرژی استفاده شده است.

مطابق شکل ۵ روش سنتی، عمق بحرانی را در مقطع آکرز در دبی ۱۰۳/۴۶ مترمکعب در ثانیه، برابر ۱/۸۴ متر برآورد می‌کند، جریان واقعی تحت این شرایط زیر بحرانی می‌باشد. روش اصلاح شده عدد فرود را برابر ۰/۹ برآورد می‌نماید. مطابق شکل تمامی روش‌ها در این دبی رژیم جریان را فوق بحرانی پیش‌بینی می‌کنند که با واقعیت منافات دارد.



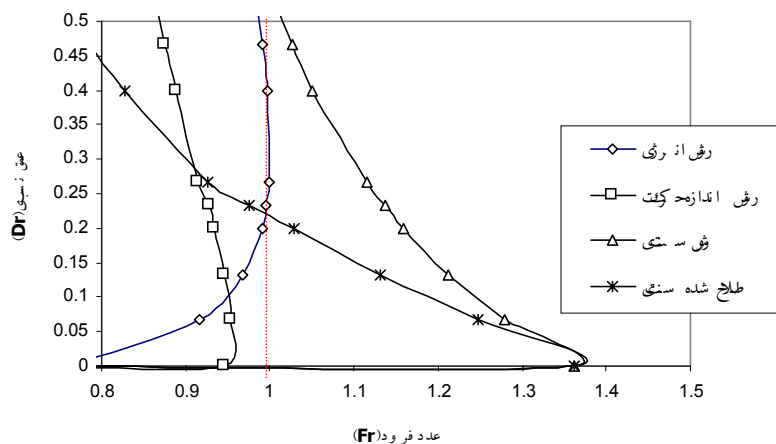
شکل ۵- تغییرات عدد فرود برحسب عمق نسبی با استفاده از روش‌های معمول (مقطع همگن).



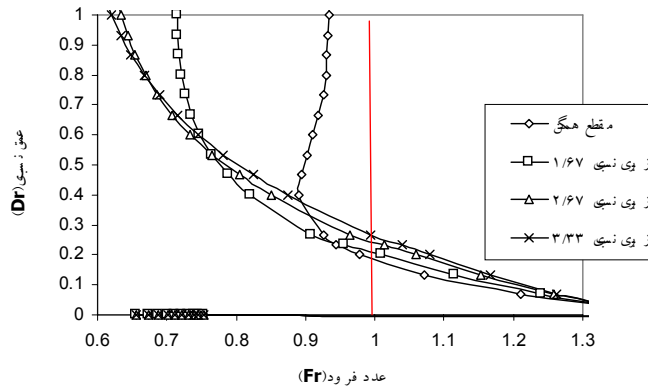
شکل ۶- تغییرات عدد فرود برحسب عمق نسبی با استفاده از روش‌های معمول.

بررسی تأثیر عرض نسبی بر عدد فرود: با افزایش عرض نسبی در حالت همگن در شرایط بحرانی عمق بحرانی کاهش می‌یابد. در شرایط زیر بحرانی نیز با افزایش عرض نسبی عدد فرود کاهش می‌یابد. در مقطع آکرز در حالت همگن در زبری نسبی بالاتر از ۱۰ فقط ۰/۰۳ از عمق نسبی بحرانی کاسته خواهد شد. در همین شرایط کاهش برآورد شده توسط روش سنتی حدود ۵ برابر مقدار مذکور خواهد بود (شکل ۹). در حالت غیر همگن در زبری نسبی ۲/۶۷ این مقدار کاهش برابر ۰/۰۴ است. افزایش عرض نسبی در رژیم زیر بحرانی باعث کاهش عدد فرود شده است (شکل ۱۰).

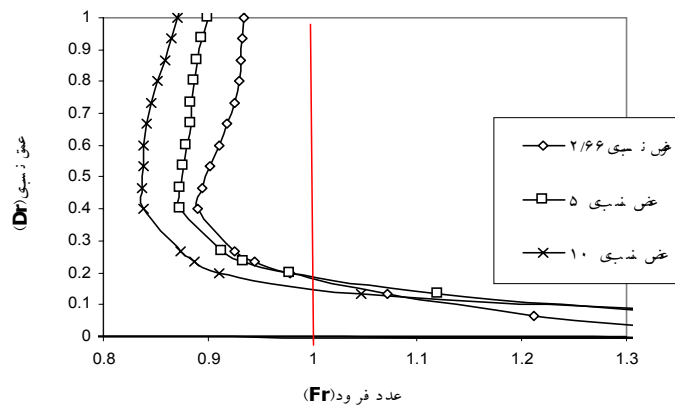
بررسی تأثیر زبری نسبی بر عدد فرود: در حالت غیرهمگن عمق بحرانی در دبی بیشتری ایجاد می‌شود. خطا در محاسبه عمق بحرانی بوسیله روش سنتی نسبت به روش اصلاحی افزایش می‌یابد. به طور مثال، در مقطع فرضی آکرز با افزایش زبری نسبی به میزان ۶۰ درصد، میزان خطا در برآورد عمق نسبی بحرانی ۲۵ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۷). میزان واقعی افزایش عمق نسبی بحرانی در این زبری نسبی برابر ۰/۰۴ است (شکل ۸). در رژیم فوق بحرانی با افزایش زبری نسبی عدد فرود افزایش می‌یابد. در استفاده از این روش در مقاطع آبراهه‌های طبیعی که زبری نسبی بالایی دارند، باید محتاط بود.



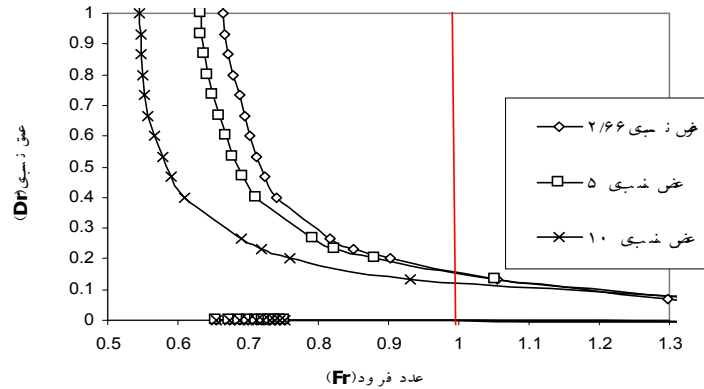
شکل ۷- تغییرات عدد فرود برحسب عمق نسبی با استفاده از روش‌های معمول در زبری نسبی ۱/۶۷.



شکل ۸- تغییرات عدد فرود برحسب عمق نسبی با استفاده از روش اصلاح شده در زبری نسبی متفاوت.



شکل ۹- تغییرات عدد فرود برحسب عمق نسبی با استفاده از روش اصلاح شده در عرض نسبی متفاوت (مقطع همگن).



شکل ۱۰- تغییرات عدد فرود برحسب عمق نسبی با استفاده از روش اصلاح شده در عرض نسبی متفاوت (مقطع غیرهمگن).

نتیجه گیری

هندسی و هیدرولیکی مشابه رژیم واقعی جریان را بدرستی پیش‌بینی نمی‌کنند. در اعماق نسبی بالا (بیش از ۱) مقطع مرکب به لحاظ هیدرولیکی مشابه مقطع واحد عمل نموده و از روش سنتی می‌توان بهره برد. روش اصلاح شده می‌تواند معیاری از واقعیت باشد زیرا علاوه بر داده‌های FCF در مقاطع آزمایشگاهی کوچک مقیاس نیز نتایج رضایت‌بخشی دارد.

انرژی مخصوص غیراصلاحی که در گذشته به‌عنوان معیاری برای ارزیابی صحت سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است تعداد و مقدار عمق بحرانی را بیش از واقعیت برآورد می‌کند. نتایج حاصل از روش‌های مبتنی بر انرژی مخصوص و نیروی مخصوص شامل مقطع واحد، تجزیه مقطع، انرژی، ممنتوم و عدد فرود وزنی در مقاطع مرکب قابل اطمینان نیستند. این روش‌ها در شرایط

منابع

1. Ackers, P. 1992. Hydraulic design of two-stage channel. Proc., Inst. Civ. Eng., Water, maritime and Energy, Vol. 96, 247-257.
2. Ackers, P. 1993. Stage-Discharge functions for two-stage channel. Water and Environmental Management, Vol. 7. pp. 52-61.
3. Ayyoub zadeh, S.A., and Zahiri, A. 2004. Numerical study of flood routing in compound channel, Int. Conference on Hydraulics of Dams and River Structures, Tehran, Iran, pp 353-358.
4. Bakhmeteff, B.A. 1932. Hydraulics of Open Channels. McGraw-Hill, New York.
5. Blalock, M.E., and Sturm, T.W. 1981. Minimum specific energy in compound channel. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107, 699–717.
6. Blalock, M.E., and Sturm, T.W. 1983. Closure of minimum specific energy in compound channel. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 109, 483–486.
7. Chaudhry, M.H., and Bhallamudi, S.M. 1988. Computation of critical depth in symmetrical compound channels. Journal of Hydraulic Research, 26, No. 4, 377-396.
8. Konemann, N. 1982. Discussion of Blalock and Sturm. (1981), Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 108, 462–464.
9. Kordi, E., Ahmadi, M.Z., Ayyoub zadeh, S.A., and Zahiri, A. 2006. Prediction of critical depth in compound Channels. M.Sc. thesis, University of Mazandaran, PP: 141.
10. Lee, P.J., Lambert, M.F., and Simpson, A.R. 2002. Critical Depth prediction in straight compound channels. Water & Maritime Engineering, 154, Issue 4, pp. 317-332.
11. Petryk, S., and Grant, E.U. 1978. Critical flow in rivers with flood plains. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 104, No. HY5, May, 583–594.
12. Schoellhamer, D.H., Peters, J.C., and Larok, B.E. 1985. Subdivision Froude Number. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111, No. 7, July, 1099–1104.
13. Seckin, G. 2004. A Comparison of one-dimensional methods for estimating discharge capacity of straight compound channels. Canadian Journal of civil Engineering, 31: 619–631.
14. Sturm, T.W. 2001. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co., New York.

Calculation of critical depth in open compound cross sections considering Momentum transfer effect

E. Kordi¹, S.A. Ayyoubzaseh², M. Z. Ahmadi³ and A. Zahiri⁴

¹Former M.Sc. Student of Dept. of Water Engg. Mazandaran University, Iran, ²Assistant Prof. Dept. of Water Engg. of Trabiati Modarres University, Iran, ³Prof. of Dept. of Water Engg. Mazandaran University, Iran, ⁴Manager of Sediment Research office Khozestan Water and Power Authority (KWPF), Iran

Abstract

In hydraulic analysis of open compound cross sections, the calculation of the critical depth is very important. There are different methods for estimating the number and amount of critical depths such as unit cross section, the conventional method with separation of cross section, energy method, momentum method and weighted Froude Number method. In all these methods the momentum transfer effect resulting from occurrence of cross gradient of velocity between main cross section and flood plains are not considered. This phenomenon, which is described as interaction effect, is ambiguous and complicated and the results of the works of researchers have not ended to the introducing and proposing of a practical and comprehensive method for design and investigation about compound cross section yet. The conventional method calculates average velocities higher in main cross section and lower in flood plains than real values. In this paper, the corrected one-dimensional method for estimation of critical depth was introduced the interaction effect is considered. In this study, the average flow velocity in main cross section and flood plain and consequently partial and total discharge rates have been corrected using the coherence method. Results showed that the conventional method with separation of cross section gives higher critical depth and specific energy. This increase depends on geometry and hydraulic condition of flow, and varies from few millimeters in small scale laboratory to tens of centimeter in the rivers. The variation range in minimum specific energy is higher than in critical depth.

Keywords: Compound cross section; Critical depth; Cross section separation method; Coherence; Corrected one-dimensional method