مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد هفدهم، شماره چهارم، ۱۳۸۹
www.gau.ac.ir/journals

گزارش کوتاه علمی

شبیه‌سازی جریان متغیر تدریجی در مقاطع مرکب

عبدالرضا ظهیری*
استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۱٤

چکیده

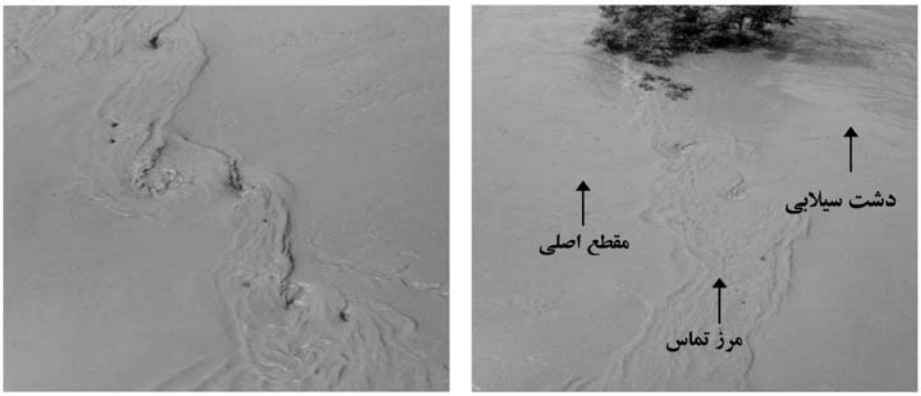
تفاوت زیاد عمق جریان و ضریب زبری دشت‌های سیلابی نسبت به مجرای اصلی رودخانه، باعث ایجاد گرادیان عرضی سرعت شده و تنش برشی قابل ملاحظه‌ای در مرز مشترک مجرای اصلی و دشت سیلابی اتفاق می‌افتد. در نتیجه این فرآیند، افت انرژی اضافه‌ای به سیستم رودخانه تحمیل می‌شود. مدل‌های ریاضی معمول در محاسبه پروفیل سطح آب رودخانه‌ها مانند HEC-RAS و MIKE11، این مکانیسم را در نظر نمی‌گیرند. برای در نظر گرفتن این مکانیسم، باید شیب انرژی و ضریب تصحیح انرژی جنبشی در محاسبات جریان متغیر تدریجی اصلاح شود. در این مقاله، با استفاده از روش تبادل دبی، محاسبات پروفیل سطح آب در مقاطع مرکب اصلاح شده است. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج مدل ریاضی HEC-RAS در یک کانال آزمایشگاهی غیرهمگن در حالت پروفیل M_2 نشان می‌دهد که دقت این روش‌ها به‌ترتیب ۹۵ و ۸٤/۵ درصد است.

واژه‌های کلیدی: جریان متغیر تدریجی، روش تبادل دبی، مقاطع مرکب

* مسئول مکاتبه: zahiri@gau.ac.ir

مقدمه

با توجه به این‌که پروفیل سطح آب رودخانه‌ها یکی از اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز اغلب طرح‌های مهندسی رودخانه می‌باشد، بنابراین محاسبه‌های یاد شده باید از دقت مناسبی برخوردار باشند. اگرچه در بیش‌تر کاربردهای مهندسی رودخانه از محاسبات پروفیل فراآب (M_1) استفاده می‌شود، اما در موارد مهم دیگری مانند طراحی کانال‌های انحراف سیلاب و طراحی آب‌گیرها، محاسبات پروفیل فروآب (M_2) مورد نیاز است. هم‌اکنون در مدل‌های ریاضی، محاسبه‌های بالا با استفاده از رابطه انرژی و با فرض نبود تداخل جریان بین مجرای اصلی رودخانه و دشت‌های سیلابی انجام می‌شود که نتایج آن‌ها مطمئن نیست. به‌دلیل تنش برشی عرضی ناشی از اختلاف سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، افت انرژی اضافه‌ای ایجاد می‌شود که باید در نظر گرفته شود. شکل ۱، گردابه‌های تشکیل شده در مرز تماس مجرای اصلی با دشت سیلابی در یک رودخانه طبیعی را نشان می‌دهد.

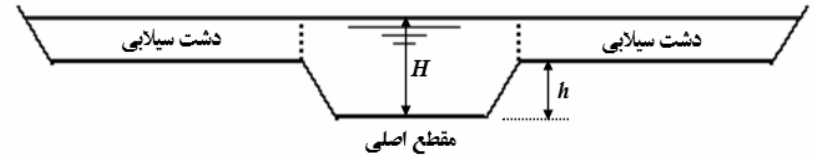


شکل ۱- آشفتگی جریان در ناحیه اتصال مقطع اصلی به دشت سیلابی در یک رودخانه طبیعی (کردی و همکاران، ۲۰۰۹).

در مدل ریاضی HEC-RAS برای محاسبه دبی کل جریان در مقاطع مرکب، از تجزیه قائم مقطع استفاده می‌شود. در این روش مطابق شکل ۲، رودخانه به مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی تقسیم شده و با استفاده از فرمول مانینگ، دبی جریان در هر یک از این مقاطع محاسبه می‌گردد. دبی کل جریان از مجموع این دبی‌ها به‌دست خواهد آمد:

$$Q = \sum_{i=1}^{N} Q_i = \sum_{i=1}^{N} K_i S_0^{1/2} = \sum_{i=1}^{N} \frac{A_i R_i^{2/3}}{n_i} S_0^{1/2} \qquad (1)$$

که Q: دبی کل جریان، i: بیان‌کننده مقاطع جزئی (مقطع اصلی یا دشت سیلابی)، N: تعداد کل مقاطع جزئی، K: فاکتور انتقال، A: سطح مقطع جریان، R: شعاع هیدرولیکی، S_0: شیب طولی کانال و n: ضریب زبری مانینگ می‌باشند.



شکل ۲- مقطع مرکب و تجزیه آن به مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی.

روش بالا با وجود سادگی محاسبه‌ها، به‌دلیل در نظر نگرفتن تنش برشی بین مقطع اصلی و دشت سیلابی، دبی کل جریان را بیش‌تر از واقع محاسبه می‌کند. خطای این روش در مقاطع مرکب همگن (زبری یکسان در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی) حدود ۱۰ درصد و در مقاطع مرکب غیرهمگن (دشت سیلابی زبرتر از مجرای اصلی) تا ٤٠ درصد گزارش شده است (مارتین و میرز، ۱۹۹۱).

تاکنون بیش‌تر مطالعات مقاطع مرکب با فرض جریان یکنواخت بوده است. روش‌های اصلاحی زیادی برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب در این حالت ارایه شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها، روش دوبعدی شیونو و نایت (۱۹۸۸)، روش کوهیرنس (آکرز، ۱۹۹۳) و روش تبادل دبی (بوسمار و زخ، ۱۹۹۹) می‌باشند. با توجه به رفتار و طبیعت پیچیده رودخانه‌ها در زمان سیل، فرض جریان یکنواخت منطقی نیست. از سوی دیگر، در زمینه اثر هیدرولیک دشت‌های سیلابی بر محاسبات جریان متغیر تدریجی، بررسی‌ها و داده‌های آزمایشگاهی بسیار کمی وجود دارد. ین و کوهن (۱۹۸۵) روشی برای محاسبه پروفیل سطح آب در مقاطع مرکب با دشت‌های سیلابی عریض ارایه داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نحوه توزیع دبی در مقاطع مرکب در محاسبات پروفیل سطح آب نقش مهمی دارد. ستورم و صادق (۱۹۹٦) با انجام مطالعه‌ای در یک کانال مرکب آزمایشگاهی، وجود چند عمق بحرانی در یک دبی جریان را نشان دادند. ریویر و همکاران (۲۰۰۲)، کارایی روش معمول و یک

روش اصلاحی محاسبه پروفیل سطح آب در مقاطع مرکب در حالت هم‌گرایی شدید دشت سیلابی را ارزیابی نمودند. بوسمار و همکاران (۲۰۰٤) نشان دادند که محاسبه‌های معمول پروفیل سطح آب در مقاطع مرکب با دشت‌های سیلابی واگرا به‌دلیل اثر شدید جریان ثانویه، همراه با خطای زیادی است. پراست و همکاران (۲۰۰۹) با حل معادلات مومنتوم در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، مدل ریاضی محاسبه پروفیل سطح آب به‌صورت مجزا در مقاطع جزئی را ارایه نمودند. پراست و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از این مدل ریاضی، افت انرژی در مقطع اصلی و دشت سیلاب را از یکدیگر تفکیک نمودند. این پژوهش نشان داد که بر خلاف فرض مدل HEC-RAS، شیب انرژی در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی یکسان نیست.

با توجه به خطای محاسبه‌های معمول پروفیل سطح آب در مقاطع مرکب و لزوم اصلاح آن‌ها، در این مقاله با استفاده از روش تبادل دبی که با فرض جریان یکنواخت ارایه شده، ابتدا ضریب انرژی جنبشی تصحیح شده و سپس در روابط جریان متغیر تدریجی به‌کار رفته است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی، از داده‌های آزمایشگاهی پروفیل سطح آب در یک کانال مرکب غیرهمگن استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

در روش تبادل دبی، براساس معادله‌های مومنتوم در جهات طولی و عرضی جریان، ۳ ضریب اصلاحی χ برای تصحیح دبی جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی محاسبه می‌شوند. سپس فاکتور انتقال در این مقاطع از رابطه زیر تصحیح خواهد شد:

$$K_i' = \frac{K_i}{\sqrt{1+\chi_i}} \qquad (۲)$$

در رابطه بالا K' فاکتور انتقال اصلاح شده است. ضرایب اصلاحی χ از حل دستگاه معادله غیرخطی ذیل به‌دست می‌آیند:

$$\chi_1 = \frac{1}{gA_1}\left[\varphi^t (H-h)\left(\frac{R_2^{2/3}}{n_2}\left(\frac{1+\chi_1}{1+\chi_2}\right)^{1/2} - \frac{R_1^{2/3}}{n_1}\right)\right]\left[\frac{R_1^{2/3}}{n_1} - \frac{R_2^{2/3}}{n_2}\left(\frac{1+\chi_1}{1+\chi_2}\right)^{1/2}\right] \qquad (۳)$$

$$\chi_2 = \frac{1}{gA_2}\left\{\left[\varphi^t(H-h)\left(\frac{R_2^{2/3}}{n_2}\left(\frac{1+\chi_1}{1+\chi_2}\right)^{1/2} - \frac{R_1^{2/3}}{n_1}\right)^2\left(\frac{1+\chi_2}{1+\chi_1}\right)\right]\right. \\ \left. + \left[\varphi^t(H-h)\left(\frac{R_2^{2/3}}{n_2}\left(\frac{1+\chi_3}{1+\chi_2}\right)^{1/2} - \frac{R_3^{2/3}}{n_3}\right)^2\left(\frac{1+\chi_2}{1+\chi_3}\right)\right]\right. \quad (4)$$

$$\chi_3 = \frac{1}{gA_3}\left[\varphi^t(H-h)\left(\frac{R_2^{2/3}}{n_2}\left(\frac{1+\chi_3}{1+\chi_2}\right)^{1/2} - \frac{R_3^{2/3}}{n_3}\right)\right]\left[\frac{R_3^{2/3}}{n_3} - \frac{R_2^{2/3}}{n_2}\left(\frac{1+\chi_3}{1+\chi_2}\right)^{1/2}\right] \quad (5)$$

زیرنویس ۲ بیانگر مقطع اصلی و زیرنویس‌های ۱ و ۳ بیانگر دشت‌های سیلابی است. در رابطه‌های بالا، φ^t ضریب تبادل مومنتوم بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی بوده و برابر ۰/۱۶ می‌باشد (ریویر و همکاران، ۲۰۰۲). با تعیین ضرایب اصلاحی χ_1، χ_2 و χ_3، می‌توان دبی اصلاحی هر یک از مقاطع جزئی و دبی کل جریان در مقطع مرکب را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$Q = \sum_i^N Q_i = \sum_i^N K_i' S_0^{1/2} = \sum_i^N \left(\frac{K_i}{\sqrt{1+\chi_i}}\right) S_0^{1/2} \quad (6)$$

برای محاسبه پروفیل سطح آب در طول رودخانه و در دو مقطع متوالی (۱ و ۲) از رابطه انرژی استفاده می‌شود:

$$WS_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = WS_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + C\left|\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g}\right| + S_f L \quad (7)$$

که WS: رقوم سطح آب، V: سرعت متوسط مقطع، α: ضریب تصحیح انرژی جنبشی، S_f: شیب انرژی، L: طول بازه بین مقاطع بالادست و پایین‌دست و C: ضریب افت موضعی می‌باشد. در مدل ریاضی HEC-RAS، ابتدا مشخصات هندسی و هیدرولیکی مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی محاسبه شده و سپس شیب انرژی و ضریب تصحیح انرژی جنبشی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\sum_i \left(\frac{K_i^3}{A_i^2} \right) \times \left(\sum_i A_i \right)^2}{\left(\sum_i K_i \right)^3} \qquad (۹)$$

در این مقاله، به‌منظور دخالت تنش برشی عرضی در محاسبه‌های پروفیل سطح آب در مقاطع مرکب، ابتدا از معادله (۲)، مقادیر فاکتور انتقال اصلاحی مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی محاسبه شده و سپس به کمک روابط زیر، مقادیر اصلاح شده ضریب تصحیح انرژی جنبشی (α') و شیب انرژی (S'_f) تعیین می‌شوند (ظهیری، ۲۰۰٦):

$$\alpha' = \frac{\sum_i \left(\frac{(K'_i)^3}{A_i^2} \right) \times \left(\sum_i A_i \right)^2}{\left(\sum_i K'_i \right)^3} \qquad (۱۰)$$

$$S'_f = \left(\frac{Q}{\sum_i K'_i} \right)^2 \qquad (۱۱)$$

روش حل معادله انرژی در مقاطع مرکب: برای حل معادله انرژی در مقاطع مرکب، با توجه به هندسه مقطع مرکب، دبی جریان، شیب طولی و ضرایب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، مراحل ذیل انجام می‌شوند:

۱- فرض اولیه برای رقوم سطح آب در مقطع بالادست مقطع کنترل

۲- محاسبه S_f (از رابطه ۸) و α (از رابطه ۹)

۳- محاسبه ضرایب اصلاحی χ_1، χ_2 و χ_3 با توجه به عمق جریان به‌صورت زیر:

۳-۱- فرض دو مقدار اولیه برای ضریب χ_2 (مثلاً ۱=χ_2^1 و ۱/۱ =χ_2^2)

۳-۲- محاسبه ضرایب χ_1 و χ_3 از رابطه‌های (۳) و (۵) با استفاده از روش عددی سکانت برای حل معادلات غیرخطی

۳-۳- محاسبه $F(\chi_2)$ (از رابطه ٤) به‌ازای مقادیر اولیه مرحله ۳-۱ و ضرایب معلوم χ_1 و χ_3 از مرحله ۳-۲

۳-٤- محاسبه مقدار جدید χ_2 از روش سکانت به‌صورت $\chi_2^2 = \chi_2^1 - F(\chi_2^1)\frac{\chi_2^1 - \chi_2^0}{F(\chi_2^1) - F(\chi_2^0)}$

۳-۵- تکرار مراحل محاسباتی ۳-۲ تا ۳-٤ تا رسیدن به همگرایی در محاسبه ضریب χ_2

٤- اصلاح مقادیر K در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی (رابطه ۲)

۵- محاسبه مقادیر اصلاحی α' (از رابطه ۱۰) و S'_f (از رابطه ۱۱)

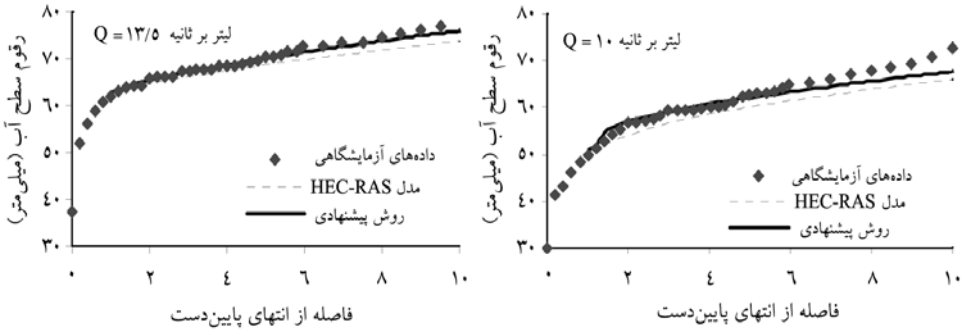
٦- مقایسه مقادیر انرژی کل در دو مقطع متوالی ۱ و ۲ از رابطه انرژی

۷- در صورت یکسان بودن مقادیر انرژی کل، محاسبات متوقف می‌شود. در غیر این صورت، فرض قبلی رقوم سطح آب در مقطع بالادست، اصلاح شده و مراحل محاسباتی ۲ تا ٦ تکرار می‌شوند.

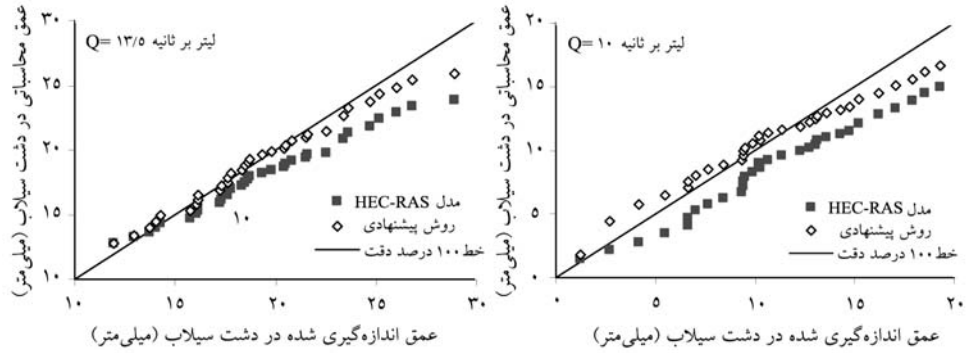
داده‌های آزمایشگاهی: برای ارزیابی دقت نتایج روش پیشنهادی و مدل ریاضی HEC-RAS، از داده‌های آزمایشگاهی پروفیل سطح آب M_2 در یک کانال با مقطع مرکب مستطیلی استفاده شده است (بوسمار و زخ، ۱۹۹۹). عرض و عمق مقطع اصلی به‌ترتیب ۰/٤۰۲ متر و ۰/۰۵ متر، عرض دشت‌های سیلابی ۰/٤۰٤ متر، شیب طولی ۰/۰۰۰۸۵، ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌ترتیب ۰/۰۰۹۸ و ۰/۰۱۱ و طول کانال ۱۰ متر می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی دبی‌های ۱۰ و ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج و بحث

در شکل ۳، نتایج پروفیل سطح آب به‌دست آمده از مدل HEC-RAS، روش پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی به‌ازای دبی‌های ۱۰ و ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج مدل HEC-RAS نسبت به پروفیل واقعی سطح آب، تراز آب پایین‌تری را نشان می‌دهد. این مسأله به‌دلیل در نظر نگرفتن افت انرژی ناشی از تنش برشی عرضی بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی است. در شکل ٤، مقادیر محاسباتی و واقعی عمق جریان در دشت سیلاب در دو دبی جریان ۱۰ و ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه مقایسه شده است. این مقایسه از این نظر دارای اهمیت می‌باشد که در بسیاری از مطالعات کنترل سیل رودخانه‌ها، عمق آب در دشت سیلاب یکی از معیارهای مهم محاسبه خسارت ناشی از سیل است. مشاهده می‌شود که نتایج روش پیشنهادی نسبت به نتایج مدل HEC-RAS به خط نیم‌ساز ٤۵ درجه با ۱۰۰ درصد دقت، بسیار نزدیک‌تر می‌باشد. با بررسی این نتایج به کمک محاسباتی رگرسیونی، دقت روش پیشنهادی و مدل HEC-RAS در برآورد عمق جریان در دشت سیلاب به‌ترتیب ۹۵ و ۸٤/۵ درصد به‌دست آمده است.



شکل ۳- مقایسه پروفیل سطح آب واقعی با نتایج مدل *HEC-RAS* و روش پیشنهادی در دو دبی جریان ۱۰ و ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه.



شکل ٤- مقایسه تراز سطح آب واقعی با نتایج مدل *HEC-RAS* و روش پیشنهادی در دو دبی جریان ۱۰ و ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه.

منابع

1.Ackers, P. 1993. Stage-Discharge functions for two-stage channels. Water and Environmental Management, 7: 52-61.

2.Bousmar, D. and Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. J. Hydr. Engin. ASCE, 125: 7. 696-70.

3.Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, H. and Zech, Y. 2004. Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. J. Hydr. Engin. ASCE, 130: 4. 305-312.

4.Kurdi, E., Ayyoubzadeh, S.A., Ahmadi, M.Z. and Zahiri, A. 2009. Prediction of the lateral flow regime and critical depth in compound open channels. Can. J. Civil Engin. 36: 1-13.

5.Martin, L.A. and Myers, R.C. 1991. Measurement of overbank flow in a compound river channel. J. Ins. of Water and Environ. Manage. Pp: 645-657.
6.Proust, S., Bousmar, D., Riviere, N., Paqure, A. and Zech, Y. 2009. Nonuniform flow in compound channel: A 1-D method for assessing water level and discharge distribution, J. Water Resour. Res. 45: 1-16.
7.Proust, S., Bousmar, D., Riviere, N., Paqure, A. and Zech, Y. 2010. Energy losses in compound open channels, Advances in Water Resources, 33: 1-16.
8.Riviere, N., Proust, S., Bousmar, D., Morel, R. and Zech, Y. 2002. Relevance of 1D flow modeling for compound channels with a converging floodplain. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Belgium, Pp: 187-195.
9.Shiono, K. and Knight, D.W. 1988. Two-dimensional analytical solution for a compound channel. 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Japan, Pp: 503-510.
10.Sturm, T.W. and Sadiq, A. 1996. Water surface profiles in compound channel with multiple critical depths. J. Hydr. Engin. ASCE, 122: 12. 703-709.
11.Yen, B.C. and Kohane, R. 1985. Significance of floodplains in backwater computation. Int. Association for Hydraulic Research (IAHR), 21st Congress, Australia, Pp: 439-445.
12.Zahiri, A. 2006. Numerical study of water surface profile and flood routing computations in compound channels using finite difference method. Ph.D. Thesis in irrigation structures, Tarbiat Modares Univrsity, 165p.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 17(4), 2011
www.gau.ac.ir/journals

Simulation of gradually varied flow in compound channels

***A. Zahiri**
Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
Received: 2009/08/18; Accepted: 2010/12/05

Abstract

Great difference of flow depth and Manning's roughness coefficients in main channels and floodplains, generate a strong gradient of lateral velocity and hence, a lateral shear stress in the interface of the main channel and floodplain. This phenomenon increases the head loss in river system. Mathematical models which are currently used for water surface profile computations in rivers, e.g. HEC-RAS and MIKE11, neglect this mechanism. For taking into account this mechanism, the energy slope and energy correction factor should be modified in gradually varied flow computations. In this paper, using exchange discharge method, the current procedure of gradually varied flow computations were modified for compound channels. Comparison of this method and HEC-RAS results in an experimental flume with heterogeneous compound section in case of drawdown profile, M_2, showed that the accuracy of these methods are 95 and 84.5%, respectively.

Keywords: Gradually varied flow, Exchange discharge method, Compound channels

* Corresponding Author; Email: zahiri@gau.ac.ir