Archive of SID

مجله علمی - پژوهشی
دوره 14، شماره 1، بهار 1398

Iranian Hydraulic Association

تعیین منحنی دبی - اشل در مقاطع مرکب نامتقارن

آرش احمدی[1]، محمود فغفور مغربی[2*] و کاظم اسماعیلی[3]

1- دانشجوی دکتری عمران آب و سازه هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد
2- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

* **maghrebi@um.ac.ir**
(دریافت مقاله: 97/5/20 ؛ پذیرش مقاله: 97/9/25)

چکیده- اغلب مجاری طبیعی دارای مقاطعی هستند که با افزایش سطح آب در آنها مساحت مقاطع به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. این مقاطع دارای سیلاب دشت‌های کم و بیش عریضی هستند. مقاطع مرکب دارای سیلابدشت بخصوص زمانی‌که از هندسه نامتقارنی برخوردار هستند، پیچیدگی‌های هیدرولیکی زیادی را به جریان تحمیل می‌کنند. تخمین منحنی دبی- اشل در این نوع از مجاری هیدرولیکی یکی از مسائل مهندسی رودخانه است. در این مقاله با استفاده از مفهوم کنتورهای هم سرعت در روش اندازه‌گیری تک نقطه‌ای سرعت (SPM) و پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مقطع جریان و بکارگیری آن‌ها در فرایند کمینه‌سازی خطا، رابطه‌ای نسبی برای تخمین منحنی دبی-اشل در مقاطع مرکب معرفی شده است. در این روش برای ترسیم منحنی دبی-اشل در مقاطع مختلف، فقط اطلاعات دبی در یک تراز مرجع، مورد نیاز است. نتایج این پژوهش بیانگر آنست که روش پیشنهادی در تخمین منحنی دبی-اشل مقاطع مرکب نامتقارن حتی مقاطع دارای سیلابدشت‌های با ترازهای مختلف از دقت مناسبی برخوردار است.

کلیدواژگان: مقطع مرکب نامتقارن، منحنی دبی-اشل، کنتورهای هم سرعت.

1- مقدمه

در شرایط سیلابی، وجود سیلابدشت‌ها در مقاطع هیدرولیکی از اهمیت بسزایی برخوردار هستند چراکه آن‌ها به عنوان یک مخزن ذخیره جریان عمل می‌کنند. در مدیریت سیلاب شناخت رفتار جریان و نیز مقدار دبی بر روی سلابدشت‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کند. دقت تخمین منحنی دبی-اشل در این نوع از مقاطع به علت پیچیدگی هندسی مقطع، انتقال اندازه حرکت، توزیع متفاوت زبری و حضور جریان‌های ثانویه الگوی جریان از پیچیدگی خاصی برخوردار است (Knight and Demetriou, 1983). در مقاطع هندسی ساده از فرمول‌های مانینگ و شزی جهت تخمین دبی استفاده می‌شود. مقطع بسیاری از رودخانه‌ها دارای سیلابدشت است بنابراین حل بسیاری از مسائل کاربردی در مهندسی رودخانه نیازمند تخمین دقیق دبی در مقاطع مرکب است. تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص شناخت الگوی جریان در این نوع از مقاطع و همچنین تخمین دبی عبوری از آن‌ها صورت گرفته است. روش‌های تک‌بعدی مانند SCM (Single Channel Method) و DCM (Divided Channel Method) در مقاطع مرکب همواره به ترتیب مقداری کمتر و بیشتر از دبی واقعی را تخمین می‌زنند (Sahu et al., 2011). در روش SCM تمامی مقطع به صورت یکپارچه فرض می‌شود و تفاوتی بین مقاطع مرکب و مقاطع بدون سیلابدشت لحاظ نمی شود. در حالی که در DCM مجموع دبی های عبوری از زیرمقاطع با فرض عدم وجود مرز فرضی بین آنها، مقدار کل دبی مقطع را مشخص می‌کند.

http://doi:10.30482/JHYD.2019.143971.1320

www.SID.ir

Archive of SID

برای رفع این مشکل روش‌های مختلفی مانند EDM[1]، WDCM[2] و Coh[3] ارائه شده است که اساس آن‌ها بر پایه نتایج آزمایشگاهی و تقسیم‌بندی مقطع است (Lambert and Myers, 1998; Ackers, 1993). روش EDM بر پایه روش *DCM* توسعه پیدا کرده است و به بررسی اثرات تبادل اندازه حرکت در مرزهای فرضی تقسیم‌کننده زیر مقاطع و همچنین لحاظ کردن اثرات تغییرات شکل مقطع به اصلاح شیب خط انرژی می‌پردازد. روش مقطع تقسیم‌شده وزنی WDCM روشی اصلاحی برای روش DCM است که توسط آزمایش‌هایی بر روی تغییرات سرعت متوسط در کانال اصلی و سیلاب‌دشت که ناشی از تقابل اندازه حرکت بین این نواحی است توسعه یافته است. روش کوهیرنس Coh اساساً یک روش تجربی است که مقدار دبی عبوری از مقطع جریان را به میزان اندرکنش بین زیر مقاطع کانال مرکب مرتبط می‌سازد. یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از این روش‌ها کالیبراسیون آن‌ها است و از سوی دیگر استفاده از روش‌هایی که اساس آن‌ها تقسیم مقطع است، برای مقاطع مرکب نامتقارن بویژه مقاطعی که ارتفاع سیلابدشت دو طرف متفاوت باشد، دشوار است چرا که تعیین مرز تقسیم‌بندی در این شرایط سخت است.

Shiono and Knight (1991) روش SKM[4] را جهت تخمین منحنی دبی – اشل در کانال باز ارائه کردند این روش با لحاظ کردن سه پارامتر لزجت گردابه‌ای، زبری بستر، سرعت متوسط‌گیری شده در عمق دارای دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها است، اما همانند سایر آن‌ها نیازمند کالیبراسیون است. Leonard et al. (2000) با استفاده از معادله مانینگ با داشتن شعاع هیدرولیکی مقطع و شیب سطح آب به جای تراز سطح آب که به صورت مرسوم استفاده می‌شود، در ترازهای مختلف یک رودخانه طبیعی اقدام به تخمین دبی در ترازهای دیگر با استفاده از برون‌یابی نمودند. Chen and Chiu (2002) بر پایه روش آنتروپی مقدار دبی را در رودخانه تخمین زدند. در این روش با استفاده از نسبت میان سرعت متوسط و سرعت حداکثر در مقطع جریان می‌توان دبی را در رودخانه‌های جزر و مدی محاسبه نمود. برای استفاده از این روش در مقاطع مرکب باید مقدار پارامترهای مورد استفاده در روش آنتروپی را برای کانال اصلی و سیلابدشت کالیبره نمود. مهندسین رودخانه به طور معمول برای شناخت خصوصیات جریان در رودخانه ها از مدل‌های عددی بهره می‌گیرند. Abril and Knight (2004) با مدل سرعت متوسط گیری شده در عمق و بکارگیری آن با استفاده از روش المان محدود، رابطه دبی- اشل را در رودخانه‌ای طبیعی پیش‌بینی نمودند. در این روش لازم است که سه ضریب هیدرولیکی مقاومت جریان محلی، لزجت گردابه‌ای عرضی و سرعت میانگین‌گیری شده واسنجی شوند. در این روش کالیبراسیون ضرایب باید در هر مقطع هیدرولیکی به صورت مجزا صورت گیرد.

Maghrebi (2006) با شبیه‌سازی جریان عبوری از سیم لوله و جریان عبوری از مقطع هیدرولیکی روشی ارائه نمود تا بتوان تنها با استفاده از اندازه‌گیری سرعت در یک نقطه از مقطع جریان مقدار سرعت متوسط را تخمین زد. در این روش با در اختیار داشتن سرعت اندازه‌گیری شده در یک نقطه دلخواه از مقاطع و محاسبه مقدار کنتور بدون بعد سرعت متناظر با آن مقدار سرعت متوسط جریان تخمین زده می‌شود و بر اساس آن دبی عبوری محاسبه می‌گردد. در این روش فرض بر آنست که مسیر جریان مستقیم و جریان پایدار باشد.

Habib and Meselhe (2006) از روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون‌گیری غیر پارامتری منحنی دبی- اشل را توسعه دادند. Liao and Knight (2007) سه رابطه تحلیلی برای تخمین منحنی دبی-اشل در مقطع مستطیلی ساده، مقطع مرکب مستطیلی متقارن و نامتقارن ارائه نمودند. روابط تحلیلی پیشنهاد شده شامل سه پارامتر ضریب اصطکاک، لزجت گردابه‌ای و پارامتر جریانات ثانویه است که نتایج این روابط بیانگر آن است که سرعت متوسط عمقی و تنش برشی کف کانال با لحاظ کردن فرضیاتی برای این سه پارامتر مقادیری قابل قبول ارائه می‌کند.

سلطانی و همکاران (1389) از سه روش شبکه‌های عصبی

[1] Exchange Discharge Model
[2] Weighted Divided Channel Method
[3] Coherence
[4] Shiono and Knight Method

www.SID.ir

Archive of SID

مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی-فازی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌سازی رابطه دبی-اشل روزانه در دو ایستگاه یامولا و سوقوتلوهان واقع در رودخانه قیزیلیرماک کشور ترکیه استفاده کردند. ظهیری و همکاران (1391) با استفاده از حدود 400 داده دبی- اشل از 30 مقطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی با شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی، رابطه‌ای بر مبنای روش الگوریتم ژنتیک برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب ارائه نمودند.

Maghrebi et al. (2017) و Ahmadi et al. (2017) روشی را که با استفاده از آن می‌توان تنها با در اختیار داشتن اطلاعات دبی در یک تراز دلخواه، منحنی دبی- اشل را تخمین زد، ارائه نمودند. نتایج بیانگر دقت بالای مدل ارائه شده در رودخانه‌ها و مقاطع مرکب بوده به طوری که خطای میانگین آن کمتر از 5 درصد است. با توجه به وجود رودخانه‌هایی با مقاطع مرکب نامتقارن در طبیعت، ارائه‌ی روشی دقیق، مناسب، کوتاه و کاربردی برای برآورد دبی در مقاطع مرکب نامتقارن امری ضروری است. Maghrebi et al. (2017) روش ارائه شده را توسعه و نتایج آن را در تعدادی از مقاطع مرکب متقارن بررسی نمودند. نتایج حاصل بیانگر دقت بسیار مطلوب روش در تخمین منحنی دبی- اشل بود. هدف اصلی این تحقیق تخمین منحنی دبی- اشل مقاطع مرکب نامتقارن با استفاده از روش پیشنهادی Maghrebi et al. (2017) در یک مدل آزمایشگاهی است. در این مدل آزمایشگاهی حالت‌های مختلفی از عدم تقارن در مقطع کانال مرکب ایجاد و بررسی شده است.

2- مواد و روش

روش مطرح شده در این تحقیق برگرفته از مفهوم روش اندازه‌گیری تک نقطه‌ای سرعت (SPM[1]) بوده که این روش برای اولین بار توسط Maghrebi (2006) ارائه شده است. در روش SPM با استفاده از قانون بیو- ساوارت[2] می‌توان تأثیر جدار بر سرعت در یک نقطه را با در نظر گرفتن اثرات ناشی از نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره با بار ساکن که در میدان الکتریکی سیمی با جریان الکتریکی قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی نمود. ازجمله فرضیات حاکم بر روش SPM می‌توان به فرض پایداری جریان و عدم وجود شتاب در آن اشاره نمود. به عبارت دیگر فرض می‌شود جریان در مجرایی منشوری و مستقیم به صورت پایدار برقرار بوده و جریان کاملاً توسعه یافته است به گونه‌ای که با گذر از هر مقطع به مقطعی دیگر فرض می‌شود الگوی خطوط جریان و کنتورهای هم سرعت مقطع، بی تغییر باقی بمانند. هر گونه تخطی از این شرایط می‌تواند منجر به وارد شدن درجه ای از خطا در محاسبات گردد.

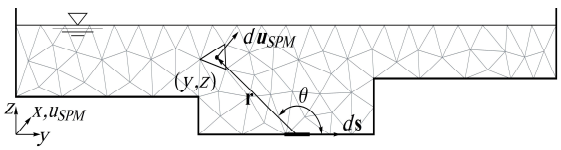
شکل 1 نحوه شبکه‌بندی مقطع جریان جهت تعیین پارامترهای روش SPM را نشان می‌دهد که در آن اثر طول محدودی از مرز (ds) بر روی نقطه‌ای دلخواه با مختصات (y,z) در مقطع از رابطه (1) به دست می‌آید:

$$d\mathbf{u}_{SPM} = f(\mathbf{r}) \times c_1 \mathbf{ds} \qquad (1)$$

که در آن $d\mathbf{u}_{SPM}$ انحراف تغییرات سرعت ناشی از المان مرزی نظیر $d\mathbf{s}$، $\mathbf{r}$ برداری مابین المان مرزی و نقطه موردنظر، c_1 ثابت مرتبط با زبری مرز و $f(r)$ تابع سرعت است که بر میدان جریان حاکم می‌شود. در این روش جهت تعیین اثرات کل جدار جریان بر یک نقطه u_{SPM}، طول محیط‌تر شده از ساحل چپ تا ساحل راست به المان‌های مرزی $d\mathbf{s}$ تقسیم می‌شود. با انتگرال‌گیری از اثرات تمام المان‌های مرزی بر روی هر نقطه از جریان مقدار u_{SPM} محاسبه می‌شود:

$$u_{SPM}\mathbf{i} = \int_{boundray} f(\mathbf{r}) \times c_1 \mathbf{ds} \qquad (2)$$

که در آن $\mathbf{i}$ بردار یکه موازی جهت جریان، یا به عبارت دیگر هم‌جهت با محور x است.



شکل 1 تأثیر المانی از بستر بر روی سرعت در مرکز سطح المانی با مختصات (y,z) در مقطع عرضی جریان

از طرفی، حاصل‌ضرب خارجی دو بردار $f(\mathbf{r})\times d\mathbf{s}$، میدانی به بزرگی $f(r)ds\sin\theta$ در جهت جریان ایجاد می‌کند، بنابراین می‌توان رابطه (3) را نوشت:

[1] Single Point Velocity Measurement
[2] Biot-Savart

www.SID.ir

Archive of SID

$$u_{SPM}(y,z)=\int_{boundary} c_1 f(r)\sin\theta\, ds \qquad (3)$$

که در آن θ زاویه بین بردار موقعیت و بردار المان مرزی است. گام بعدی این روش جستجو برای تعیین بهترین تابع سرعت وابسته به r است.

الگوی توزیع سرعت در کانال‌های باز برای جریان لایه‌ای یک توزیع سهمی شکل است و در جریان آشفته توزیع آن با استفاده از قانون توانی و لگاریتمی بیان می‌شود. به‌طور معمول در مجاری بسته و باز با توجه به آشفتگی جریان از قانون توانی سرعت جهت تخمین توزیع پروفیل سرعت استفاده می‌شود. تابع سرعت به صورت رابطه (4) بیان می‌شود:

$$f(r)=u_*\left(c_2\, r^{1/m}\right) \qquad (4)$$

که در آن c_2 ضریب مرتبط با آشفتگی و تنش برشی جدار است. با جایگذاری معادله (4) در معادله (3) می‌توان در هر نقطه دلخواه با مختصات (y,z) مقدار $u_{SPM}(y,z)$ را به‌دست آورد:

$$u_{SPM}(y,z)=\int_{boundary} c_1\, c_2\, u_*\left(r^{1/m}\right)\sin\theta\, ds \qquad (5)$$

با در نظر گرفتن مقدار $c_3= c_1.\ c_1.u_*$ و $m=7$ رابطه فوق به صورت رابطه (6) بازنویسی می‌شود:

$$u_{SPM}(y,z)=\int_{boundary} c_3\left(r^{1/7}\right)\sin\theta.ds \qquad (6)$$

مقدار متوسط u_{SPM} در مقطع جریان برابر U_{SPM} است که از معادله (7) محاسبه می‌شود:

$$U_{SPM}=\frac{\int_A u_{SPM}(y,z)dA}{A} \qquad (7)$$

اکنون می‌توان با استفاده از پارامترهای حاصل از روش *SPM* به تخمین رابطه دبی-اشل در مقاطع مختلف پرداخت. در روش *SPM* پارامترهایی نظیر u_{SPM} و U_{SPM} در هر نوع شکل هندسی و برای هر ترازی قابل‌محاسبه هستند.

3- تعیین رابطه دبی- اشل پیشنهادی

پارامترهای مؤثر در تخمین منحنی دبی- اشل شامل مساحت (A)، محیط ترشده (P)، عرض سطح آب (T)، زبری معادل (n)، شیب کف کانال (S_0) و پارامتر U_{SPM} هستند. ارتباط بین دبی عبوری از مقطع و پارامترهای مؤثر را می‌توان به صورت زیر رابطه (8) نمود:

$$Q=f\left(A,P,T,U_{SPM},n,s_0\right) \qquad (8)$$

گام بعدی ایجاد ارتباط بین دبی در دو تراز مختلف است. رابطه تناسبی، شکل مناسبی از این ارتباط را نشان می‌دهد. ارتباط بین دبی و پارامترهای مؤثر به صورت رابطه (9) بیان شده است:

$$Q\propto A^{a_1}P^{a_2}P_t^{a_3}U_{SPM}^{a_4}n^{a_5}S_0^{a_6} \qquad (9)$$

در این رابطه P_t برابر است با مجموع محیط ترشده و $P_t=P+T$ سطح آزاد آب است. هدف از اعمال این پارامتر در رابطه پیشنهادی، تخمین دقیق‌تر مقدار دبی در مقاطع مرکب است. اکنون باید پارامترهایی که نقش مهمی در رابطه پیشنهادی دارند، از پارامترهایی که در ترازهای مختلف ثابت هستند، تمیز داده شوند. توان پارامتر S_0 به علت ثابت بودن در ترازهای مختلف برابر صفر است ($a_{6=0}$)؛ بنابراین شکل کلی رابطه پیشنهادی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{Q_e}{Q_r}=\left(\frac{A_e}{A_r}\right)^{a_1}\left(\frac{P_e}{P_r}\right)^{a_2}\left(\frac{(P_t)_e}{(P_t)_r}\right)^{a_3}\left(\frac{(U_{SPM})_e}{(U_{SPM})_r}\right)^{a_4}\left(\frac{n_e}{n_r}\right)^{a_5} \qquad (10)$$

که در آن اندیس‌های e و r به ترتیب مربوط به اطلاعات تراز تخمینی و مرجع است. پیش از تعیین توان‌های رابطه (9)، باید اشاره نمود که توان a_4 برابر یک در نظر گرفته شده است چرا که پارامتر U_{SPM} نقشی مشابه پارامتر سرعت دارد بنابراین توان آن واحد در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر با توجه به رابطه معکوس بین دبی و مقدار زبری معادل، توان a_5=-1 در نظر گرفته شده است. حال باید تنها توان‌های a_1، a_2 و a_3 را با استفاده از حل معادله پنج پارامتری مشخص‌شده، محاسبه کرد.

در مرحله نخست به منظور حل معادله پنج پارامتری حاضر با استفاده از فرایند کمینه سازی نیاز به اطلاعات دبی- اشل در مقاطع مختلف است. مقطع مورد نظر، هر مقطع دلخواهی با هر شکل هندسی و با هر ابعادی می‌تواند باشد، فقط کافیست مقدار دبی در آن را با استفاده از معادله مانینگ به صورت تحلیلی استخراج نمود. در این تحقیق از مشخصات مقطع مستطیلی با عرض مقطع B=1m، ارتفاع H_{max}=1m، ضریب زبری معادل n=0/015 و شیب کف کانال S_0=0/001 استفاده شده است. در روند حل از اطلاعات منحنی دبی- اشل

www.SID.ir

Archive of SID

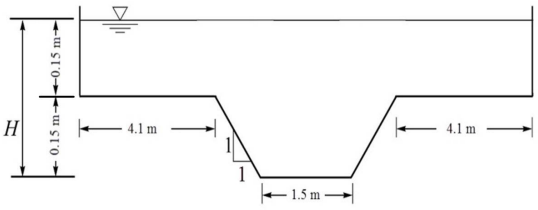
مقطع مرکب *FCF-S1* که توسط Knight (1992) آزمایش گردیده، استفاده شد (شکل 2). در این کانال زبری معادل در مقطع و شیب کف کانال به ترتیب برابر 0/01 و $1/027\times10^{-3}$ هستند.

در مرحله بعدی بر اساس شکل 3 باید مقادیر پارامترهای A، P، P_t، n و U_{SPM} را در هر دو مقطع به ازای ترازهای مختلف حساب کرد. مقادیر A_{max}، P_{max}، $(P_t)_{max}$، n_{max} و $(U_{SPM})_{max}$ در جدول 2 ارائه شده است.

برای حل معادله چند پارامتری (10) از پارامتر آماری $\overline{NRMSE}$ در فرایند کمینه‌سازی خطا که رابطه آن به صورت رابطه (11) ارائه شده، استفاده می‌شود. در رابطه (11)، زیرنویس‌های i و j به ترتیب مربوط به اطلاعات تراز مرجع و تخمینی هستند. مقدار برابر N تعداد نقاطی است که در آن اطلاعات دبی و اشل مشاهداتی وجود دارد. به بیان دیگر می‌توان گفت که عبارت زیر برابر مقدار Q_e در تراز jام به ازای نقطه مرجع i ام است:

$$(Q_r)_i\left(\frac{A_j}{A_i}\right)^{a_1}\left(\frac{P_j}{P_i}\right)^{a_2}\left(\frac{(P_t)_j}{(P_t)_i}\right)^{a_3}\left(\frac{(U_{SPM})_j}{(U_{SPM})_i}\right)^{1}\left(\frac{n_j}{n_i}\right)^{-1} \quad (12)$$

همان‌طور که اشاره شد به ازای هریک از نقاط مرجع یک منحنی دبی- اشل تخمین زده می‌شود که هریک از آن‌ها دارای خطایی برابر *RMSE* هستند.

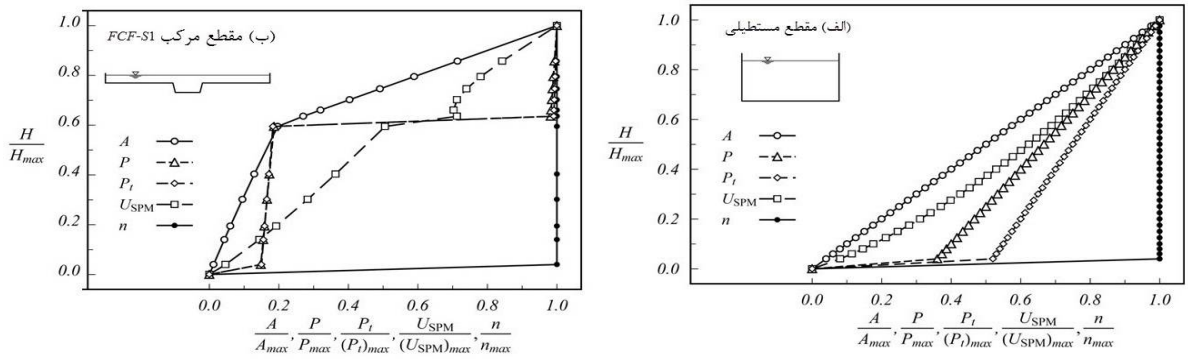


شکل 2 مشخصات هندسی مقطع مرکب *FCF-S1*

بنابراین مقدار خطای میانگین آن‌ها با پارامتر $\overline{RMSE}$ مشخص شده است. به منظور بدون بعد کردن این پارامتر آماری، مقدار بدست آمده آن بر اختلاف دبی حداکثر و حداقل مشاهداتی تقسیم شده است. هریک از مقاطع مستطیلی و مرکب یک مقدار $\overline{NRMSE}$ دارند، از این‌رو در فرایند کمینه‌سازی از مقدار مجموع آن‌ها $\overline{NRMSE_T}$ استفاده می‌شود:

$$\overline{NRMSE_T}=\overline{NRMSE_R}+\overline{NRMSE_C} \quad (13)$$

که در آن اندیس‌های R و C به ترتیب مربوط به مقاطع مستطیلی و مرکب است. اکنون می‌توان تابع هدف $\overline{NRMSE_T}$ را با استفاده از روش نیوتن چند متغیره کمینه نمود. برای استخراج توان‌ها باید از فرایند کمینه‌سازی خطا بین دبی‌های مشاهداتی و تخمین زده‌شده استفاده کرد. بدین منظور از روش نیوتن چند متغیره بهره گرفته می‌شود.



شکل 3 تغییرات پارامترهای A، P، P_t، n و U_{SPM} در مقطع الف) مستطیلی و ب) مرکب *FCF-S1*

$$\overline{NRMSE}=\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left((Q_r)_i\left(\frac{A_j}{A_i}\right)^{a_1}\left(\frac{P_j}{P_i}\right)^{a_2}\left(\frac{(P_t)_j}{(P_t)_i}\right)^{a_3}\left(\frac{(U_{SPM})_j}{(U_{SPM})_i}\right)^{1}\left(\frac{n_j}{n_i}\right)^{-1}-(Q_r)_j\right)^2}}{(Q_r)_{max}-(Q_r)_{min}}=\frac{\overline{RMSE}}{(Q_r)_{max}-(Q_r)_{min}} \quad (11)$$

در روش نیوتن، تابعی پارامتریک که معمولاً به صورت یک پارامتر آماری است به عنوان تابع هدف فرض می‌شود و

www.SID.ir

Archive of SID

پارامترهای مجهول طوری به دست می‌آیند که تابع هدفی نظیر f به کمترین مقدار خود برسند. این تابع در فرایندی تکراری و براساس رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^{n} - \left[\mathrm{H}\, f(\mathbf{x}^{n})\right]^{-1} \nabla f(\mathbf{x}^{n}) \qquad (14)$$

که در رابطه فوق، $\mathbf{x}^{n}$ و $\mathbf{x}^{n+1}$ به ترتیب بردارهای متغیر در مراحل n ام و $(n+1)$ ام هستند که شامل m متغیر است. همچنین $\nabla f(\mathbf{x}^{n})$ برابر مقدار گرادیان و ماتریس $\mathrm{H}\, f(\mathbf{x}^{n})$ مقدار ماتریس هسین بردار $\mathbf{x}^{n}$ هستند.

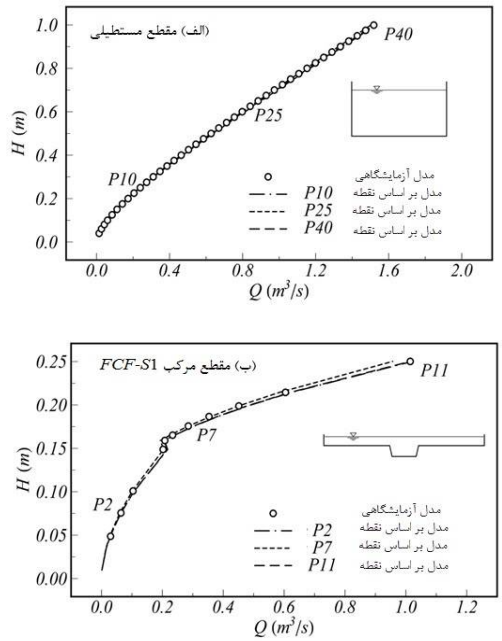
پس از اتمام فرایند کمینه‌سازی خطا، شکل نهایی رابطه پیشنهادی به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$Q_e = Q_r \left(\frac{A_e}{A_r}\right)^{0.972} \left(\frac{P_e}{P_r}\right)^{-1.27} \left(\frac{(P_t)_e}{(P_t)_r}\right)^{0.83} \left(\frac{(U_{SPM})_e}{(U_{SPM})_r}\right)^{1} \left(\frac{n_e}{n_r}\right)^{-1} \qquad (15)$$

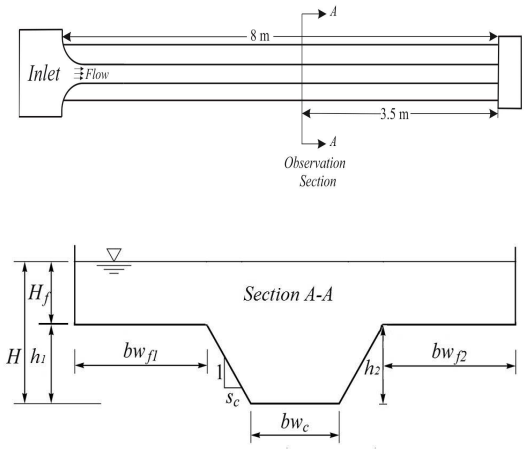
در شکل 4- الف منحنی دبی- اشل تخمین زده شده در مقطع مستطیلی به ازای اطلاعات دبی مرجع در سه تراز *P10*، *P25* و *P40* و در شکل 4- ب منحنی دبی- اشل تخمین زده شده در مقطع مرکب به ازای اطلاعات دبی مرجع در سه تراز *P2*، *P7* و *P11* نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقطع مستطیلی به ازای هر سه نقطه مرجع منحنی‌های تخمین شده شده تقریبا یک رفتار را نشان می‌دهند در حالی که در مقطع مرکب اختلاف اندکی بین منحنی‌های دبی- اشل تخمین زده شده وجود دارد. نتایج آماری نشان می‌دهند که مقدار $\overline{NRMSE}$ در مقاطع مستطیلی و مرکب به ترتیب برابر 0/006 و 0/019 است.

4- نتایج

برای بررسی قابلیت روش معرفی شده در مقاطع مرکب نامتقارن از اطلاعات آزمایشگاهی برداشت شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شده است. کانال مورد استفاده دارای طول 8 متر، عرض 0/77 متر و ارتفاع 0/5 متر است. در شکل 5 شکل مقطع مرکب کانال آمده است. مجموعاً 6 مدل مختلف مورد آزمایش قرار گرفت که اطلاعات هندسی آن در جدول 1 مشخص شده است. ضریب زبری مانینگ در کلیه مقاطع و ترازها برابر 0/015 است. مقدار دبی با استفاده از دبی سنج مغناطیسی اندازه‌گیری شد.



شکل 4 منحنی دبی- اشل تخمین زده شده الف) مقطع مستطیلی و ب) مقطع مرکب به ازای نقاط مرجع مختلف



شکل 5 نمایش پلان و برش مقطع عرضی مدل آزمایشگاهی

جدول 1 مشخصات هندسی مقاطع مرکب را نشان می‌دهد که در آن S_0 شیب کانال، S_c شیب دیواره کانال اصلی، Bw_c عرض کانال اصلی، Bw_{f1} و Bw_{f2} به ترتیب عرض سیلابدشت چپ و راست، h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع سیلابدشت چپ و راست و H_f ارتفاع آب روی سیلابدشت ساحل چپ است. در کلیه مدل‌ها به جز مدل 6 شیب

www.SID.ir

Archive of SID

دیواره کانال اصلی برابر صفر است. در مدل 1 و 5 یک سیلابدشت وجود دارد. در مدل 1 عرض سیلابدشت و کانال اصلی یکسان است در حالی که در مدل 5 عرض کانال اصلی تقریبا 2 برابر سیلابدشت است. در مدل 2 عرض سیلابدشت‌ها برابر نیست و سیلابدشت ساحل چپ تقریبا 1/5 برابر سیلابدشت ساحل راست است. در مدل 3، نامتقارنی در ارتفاع دو سیلابدشت است به نحوی که ارتفاع سیلابدشت ساحل چپ تقریبا 1/5 برابر سیلابدشت دیگر است. این حالت از عدم تقارن یکی از حالت‌های خاص به شمار می‌رود؛ چرا که در این نوع از مقاطع روش‌هایی که اساس آن‌ها بر پایه تقسیم‌بندی کانال اصلی و سیلابدشت‌ها است در تعیین مرز بین آن‌ها با مشکل روبرو می‌شوند. یکی از دلایل ارائه چنین مدلی آن است که توانایی روش حاضر در تخمین منحنی دبی-اشل در این نوع از مقاطع بررسی شود. در این روش کانال به صورت واحد در نظر گرفته می‌شود و نیازی نیست که مقطع کانال به قسمت‌های مختلف تقسیم شود. در مورد مدل 6 می‌توان گفت که ویژگی این مدل این است که دیواره کانال اصلی متصل به سیلابدشت دارای شیب جانبی 1:1/1 است. جهت سهولت در تخمین منحنی دبی– اشل در مقاطع مورد مطالعه، بهتر است که مقادیر پارامترهای A، P، P_t، U_{SPM} و n در کلیه ترازها محاسبه شود. شکل 6 تغییرات بدون بعد این پارامترها در کلیه ترازها را نمایش می‌دهد. مقادیر حداکثری پارامترهای A، P، P_t و U_{SPM} در جدول 2 ارائه شده است.

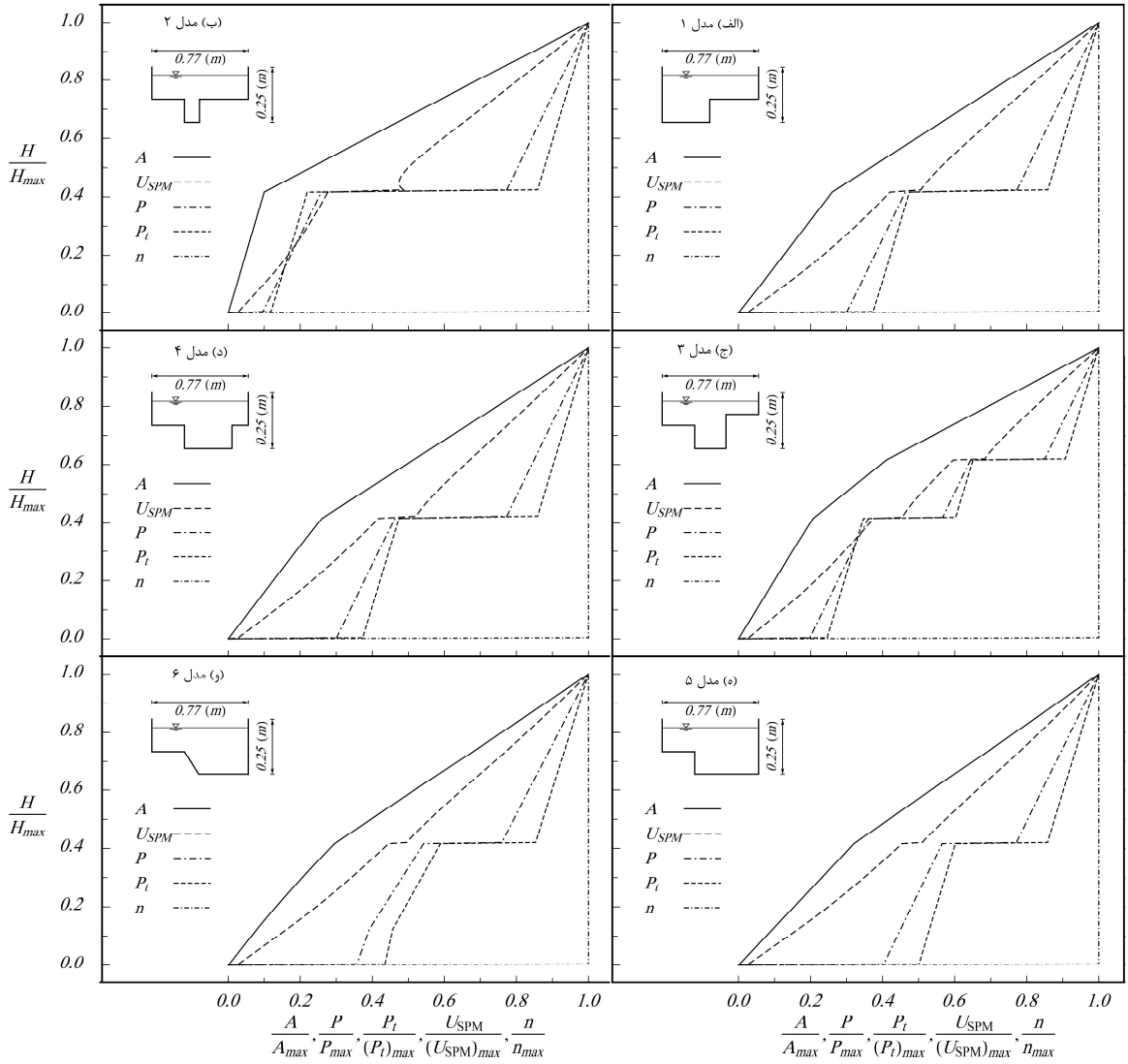
اکنون می‌توان با استفاده از رابطه (15) و بر اساس هریک از نقاط مشاهداتی منحنی دبی- اشل را تخمین زد. شکل 7 منحنی دبی- اشل تخمین زده شده در مقاطع مختلف را نمایش می‌دهد. در هریک از شکل‌ها جهت تخمین منحنی دبی-اشل از اطلاعات سه تراز مرجع استفاده شده است که تراز اول مربوط به اطلاعات برداشت شده دبی مشاهداتی در عمق‌های پایین، تراز دوم نماینده دبی‌های برداشت شده در عمق‌های میانه منحنی دبی-اشل و نهایتاً تراز سوم متناظر با اطلاعات دبی در حداکثر تراز ممکن هیدرومتری شده، است. با توجه به شکل 7- الف می‌توان مشاهده کرد که در مدل 1 منحنی دبی- اشل تخمین زده شده بر اساس سه تراز مرجع مختلف دارای اختلافاتی نسبت به یکدیگر هستند. این شرایط در مدل‌های 3، 4 و 5 نیز صادق است. یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد این شرایط، حساسیت مدل به مقدار دقت دبی برداشت شده است؛ چرا که هر چه در تعیین دبی این تراز دقت شود، مقدار خطای منحنی دبی- اشل تخمین زده شده کاهش خواهد یافت. شایان ذکر است که با توجه به مشکلات هیدرومتری در مقاطع طبیعی و حتی مصنوعی مقادیر تخمینی توسط مدل حاضر از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. از منظر دیگر می‌توان در صورت لزوم مقدار متوسط منحنی دبی- اشل تخمین زده شده توسط دو یا چند تراز مرجع را به عنوان منحنی دبی- اشل یک مقطع در نظر گرفت.

جدول 1 مشخصات هندسی و هیدرولیکی در مقاطع مرکب

مدل آزمایشگاهی	S_0	S_c	Bw_c (m)	bw_{fl} (m)	bw_{f2} (m)	h_1 (m)	h_2 (m)	H_f (m)
مدل 1	0/005	0	0/38	0	0/39	0/104	0/104	0/146
مدل 2	0/005	0	0/12	0/26	0/39	0/104	0/104	0/146
مدل 3	0/005	0	0/25	0/26	0/26	0/104	0/154	0/146
مدل 4	0/005	0	0/38	0/26	0/13	0/104	0/104	0/146
مدل 5	0/005	0	0/51	0/26	0	0/104	0/104	0/146
مدل 6	0/005	1/1	0/396	0/26	0	0/104	0/104	0/146

www.SID.ir

Archive of SID



شکل 6 تغییرات پارامترهای A، P، P_t، n و U_{SPM} در مدل‌های مختلف

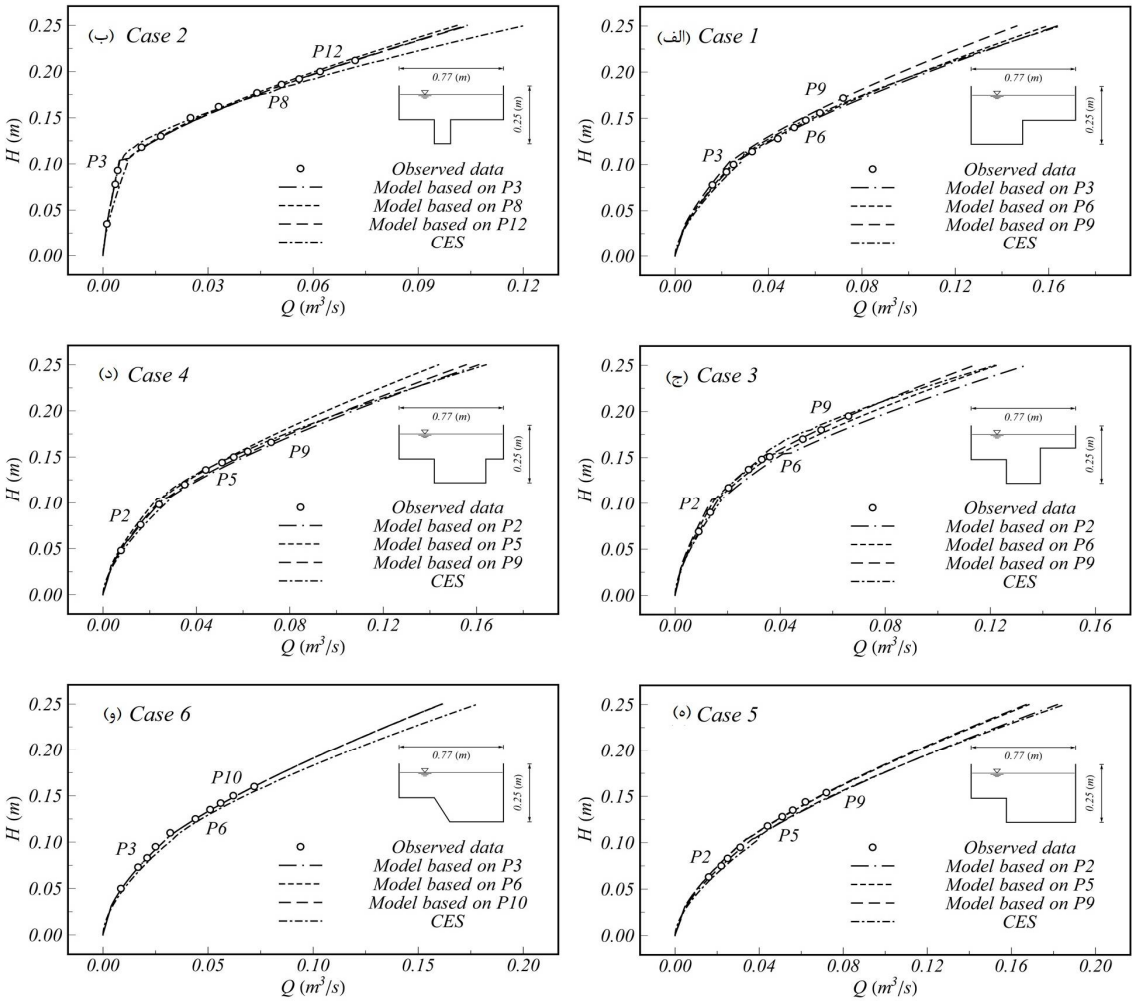
جدول 2 مقادیر حداکثر پارامترهای موجود در شکل‌های 3 و 6

مقطع	H_{max}(m)	A_{max}(m^2)	P_{max}(m)	$(P_t)_{max}$ (m)	$(U_{SPM})_{max}$
مرکب *FCF-S1*	0/25	1/248	10/32	20/32	1/147
مستطیلی	1	1	3	4	2/077
مدل 1	0/25	0/152	1/27	2/04	0/649
مدل 2	0/25	0/125	1/27	2/04	0/607
مدل 3	0/25	0/125	1/27	2/04	0/619
مدل 4	0/25	0/152	1/27	2/04	0/654
مدل 5	0/25	0/165	1/27	2/04	0/669
مدل 6	0/25	0/159	1/20	1/97	0/632

Knight et al (2009) مدل عددی CES را برای تخمین منحنی دبی- اشل معرفی نمودند که در این قسمت نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج به دست آمده از روش CES مقایسه شده است. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌شود که همخوانی مطلوبی بین نتایج مدل پیشنهادی و مدل CES و داده‌های مشاهداتی وجود دارد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل **7** منحنی‌های دبی- اشل تخمین زده شده در مدل‌های مختلف

اطلاعات بررسی شده در شکل 7 به صورت کیفی بوده از این‌رو جهت بررسی بیشتر نتایج حاصل از روش ارائه‌شده از پارمترهای آماری استفاده شده است. معادلات (16) و (17) به ترتیب پارامترهای آماری درصد میانگین خطای مطلق *MAPE* و مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده *NRMSE* نشان می‌دهند که مقدار آنها بر اساس مقادیر تخمین زده شده Q_e و اندازه‌گیری شده Q_r محاسبه می‌گردد:

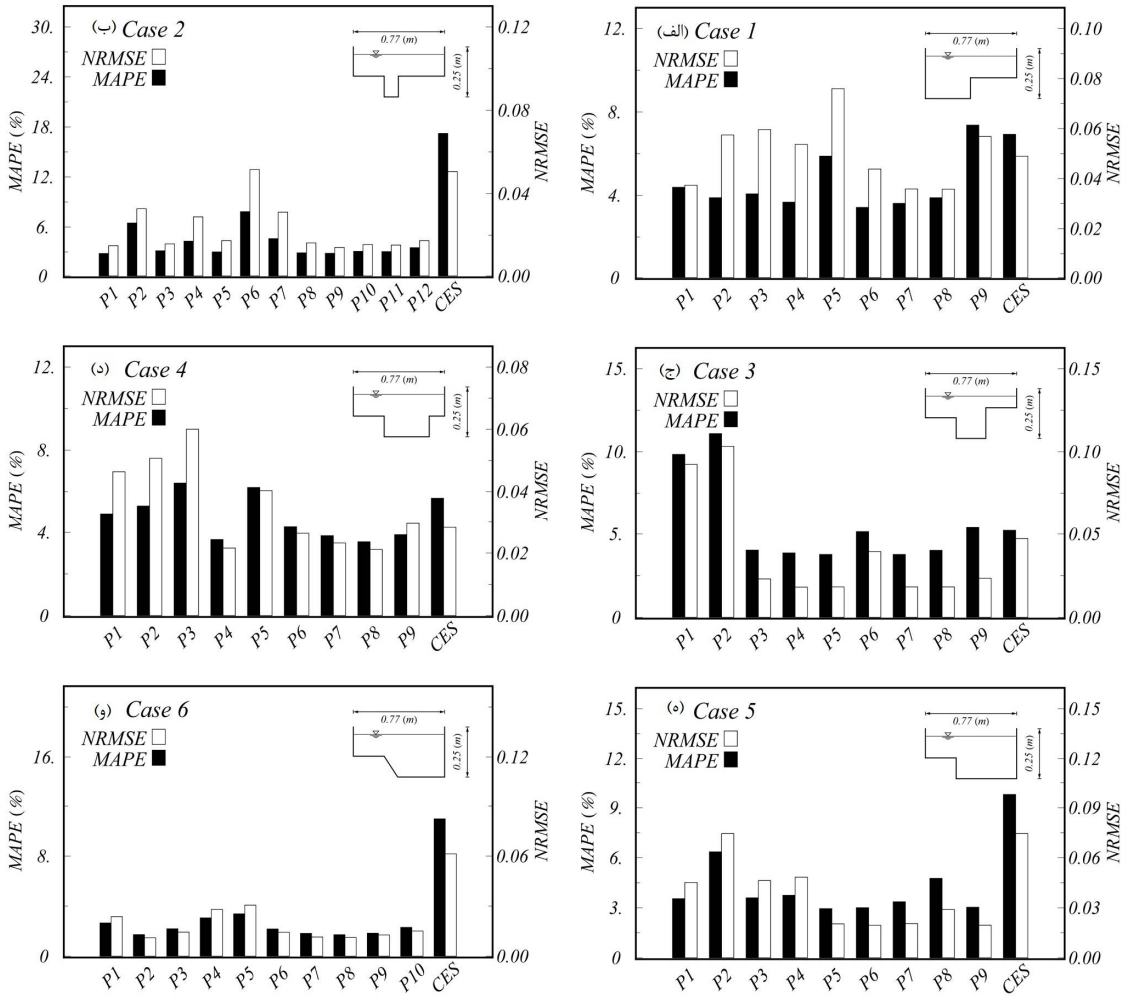
$$MAPE\,(\%) = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{(Q_r)_i - (Q_e)_i}{(Q_r)_i}\right| \qquad (16)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left((Q_r)_i - (Q_e)_i\right)^2}}{(Q_r)_{\max} - (Q_r)_{\min}} \qquad (17)$$

در شکل 8 مقادیر پارامترهای *MAPE* و *NRMSE* بر اساس مقایسه مقادیر تخمینی با مقادیر مشاهداتی برای روش‌های پیشنهادی و CES ارائه شده است. در مدل 1 به جز در تراز P9 با در نظر گرفتن سایر مقاطع به عنوان تراز مرجع مقدار پارامتر *MAPE* تقریباً برابر 4 درصد است. در مدل 2 در اکثریت نقاط مقدار خطا کمتر از 4 درصد است. در مدل 3 که تراز سیلاب‌دشت‌ها یکسان نیست، با در نظر گرفتن اطلاعات دبی در دو تراز پایین، خطای بیشتری مشاهده می‌شود. حال آنکه در سایر ترازها مقدار خطا به شدت کاهش می‌یابد. در سه مدل 4، 5 و 6 تغییرات پارامترهای *MAPE* و *NRMSE* دارای نوسان نسبتا کمتری است. نکته حائز اهمیت در تخمین دبی دقت دبی مشاهداتی است. چرا که هراندازه دقت این اطلاعات بیشتر باشد، خطای تخمین منحنی دبی- اشل کاهش می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل 8 تغییرات پارامترهای آماری *MAPE* و *NRMSE* در مدل‌های مختلف

میانگین خطای پارامترهای *MAPE* و *NRMSE* به ترتیب از 4/5 درصد و 0/06 تجاوز نمی‌کند. به طور کلی می‌توان مشاهده نمود که نتایج روش پیشنهادی حاضر در مدل‌های مورد مطالعه به جز مدل‌های 3 و 4 به ازای در نظر گرفتن کلیه ترازهای مرجع از نتایج حاصل از روش *CES* از دقت بیشتری برخوردار است. اختلاف بین دو مدل در مقاطع 2، 5 و 6 بیشتر بوده به طوری که این اختلاف نزدیک به 4 برابر است.

5- نتیجه‌گیری

با توجه به مشکلات اندازه‌گیری دبی در مقاطع سیلابدشتی، ارائه روشی ساده و کارآمد در تخمین منحنی دبی- اشل در مقاطع مرکب به ویژه مقطع مرکب نامتقارن می‌تواند بسیار مفید باشد که این مهم هدف اصلی این مقاله است. در این پژوهش، به منظور تخمین منحنی دبی-اشل از روش ارائه شده توسط Maghrebi et al. (2017) استفاده شده که اساس آن، استفاده از مفهوم کنتورهای هم سرعت و ارتباط آن با پارامترهای هندسی مقطع است. نکته حائز اهمیت روش پیشنهادی، عدم نیاز به کالیبراسیون است و همچنین در تخمین مقاطع سیلابدشتی نیازی به تقسیم مقطع عرضی نیست و کل مقطع به صورت واحد در نظر گرفته می‌شود. تخمین منحنی دبی-اشل با استفاده از این روش نیاز به حداقل اطلاعات مشاهداتی دارد به نحوی که تنها بر اساس

www.SID.ir

Archive of SID

اطلاعات دبی در یک تراز دلخواه، رابطه دبی-اشل در کل مقطع به ازای سایر ترازها تخمین زده می‌شود. به منظور صحت‌سنجی روش پیشنهادی، از اطلاعات آزمایشگاهی 6 مقطع مرکب نامتقارن استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از دقت مناسب روش پیشنهادی بوده به طوری که به جز در یکی از مدل‌ها، میانگین خطای *MAPE* در مقاطع مرکب از 8 درصد تجاوز نکرده است.

لازم به ذکر است در به کارگیری روش پیشنهادی، توسعه یافتگی جریان پایدار در یک مقطع منشوری و ثابت ماندن زبری جداره در طول مجرا و در ارتفاعات مختلف سطح آب فرض شده است. هر گونه تخطی از این موارد و همچنین تغییرات شرایط پایین دست باعث وارد شدن درجه‌ای از خطا در تخمین منحنی های دبی- اشل در رودخانه ها خواهد شد.

6- فهرست علایم

مساحت مقطع	A
مساحت مقطع به ترتیب متناظر با تراز تخمینی و مرجع	A_e, A_r
توان‌های رابطه پیشنهادی	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$
به ترتیب عرض کانال اصلی، سیلابدشت چپ و راست	bw_c, bw_{f1}, bw_{f2}
ضرایب ثابت که وابسته به مقدار زبری و آشفتگی جریان	c_1, c_2, c_3
المانی از جدار کانال	$d\mathbf{s}$
تابع سرعت	$f(r)$
درصد میانگین مطلق خطا	$MAPE$
مقدار متوسط پارامتر *MAPE*	$\overline{MAPE}$
مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده	$NRMSE$
مقدار متوسط پارامتر *NRMSE*	$\overline{NRMSE}$
مقدار زبری مانینگ در کانال اصلی و سیلابدشت	n_c, n_f
محیط مرطوب	P
محیط مرطوب متناظر با تراز تخمینی و مرجع	P_e, P_r
محیط کل	P_t
محیط کل متناظر با تراز تخمینی و مرجع	$(P_t)_e, (P_t)_r$
دبی	Q
دبی متناظر با تراز تخمینی و مرجع	Q_e, Q_r
شیب کانال	s_0
شیب دیواره کانال اصلی	s_c
عرض سطح آب	T
عرض سطح آب متناظر با تراز تخمینی و مرجع	T_e, T_r
مقدار متوسط پارامتر سرعت محاسباتی در روش *SPM*	U_{SPM}
مقدار پارامتر U_{SPM} متناظر با تراز تخمینی و مرجع	$(U_{SPM})_e, (U_{SPM})_r$
مقدار سرعت محاسباتی از روش *SPM* در هر نقطه از مقطع جریان	u_{SPM}
سرعت برشی	u_*
چگالی آب	ρ

7- منابع

سلطانی، ع.؛ علیائی؛ ا. و قربانی، م.؛ (1389). "مدل‌سازی رابطه دبی- اشل در رودخانه‌ها با استفاده از سیستم‌های هوشمند". دانش آب و خاک، جلد 1، ص.ص. 15-30.

ظهیری، ع.؛ دهقانی، ا.ا. و جریبی، ا.ه.؛ (1391). "تعیین رابطه دبی- اشل برای مقاطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک". مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 19، ص.ص. 179-191.

Abril, J.B. and Knight, D.W., (2004). "Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model". Journal of Hydraulic Research, 42(6): 616-629. DOI:10.1080/00221686.2004.9628315

Ackers, P., (1993). "Stage-Discharge Functions for Two-Stage Channels: The Impact of New Research". Water and Environment Journal, 7(1): 52-59.

Ahmadi, A., Kavousizadeh, A. and Maghrebi, M.F., (2017). "Setting-up rating curves in natural rivers using an efficient method", International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers, New Delhi, India.

Chen, Y.-C. and Chiu, C.-L., (2002). "An efficient method of discharge measurement in tidal streams". Journal of hydrology, 265(1): 212-224.

Habib, E.H. and Meselhe, E.A., (2006). "Stage–discharge relations for low-gradient tidal streams using data-driven models". Journal of Hydraulic Engineering, 132(5): 482-492. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:5(482), 482-492.

Knight, D., (1992). "SERC flood channel facility experimental data phase A". Hydraulic Research Wallingford, 198-204.

Knight, D.W. and Demetriou, J.D., (1983). "Flood plain and main channel flow interaction". Journal of

www.SID.ir

Archive of SID

Advances in Water Resources, 29(10):1504-1514. DOI:10.1016/j.advwatres.2005.11.007

Maghrebi, M.F. and Ahmadi, A., (2017). "Stage-discharge prediction in natural rivers using an innovative approach". Journal of Hydrology, 545:172-181. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.12.026

Maghrebi, M.F., Kavousizadeh, A., Maghrebi, R.F. and Ahmadi, A., (2017). "Stage–discharge estimation in straight compound channels using isovel contours". Hydrological Processes, 31(22): 3859-3870.
DOI:10.1002/hyp.11299

Sahu, M., Khatua, K.K. and Mahapatra, S.S., (2011). "A neural network approach for prediction of discharge in straight compound open channel flow". Flow Measurement and Instrumentation Journal, 22(-): 438-446.
DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.009

Shiono, K. and Knight, D., (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. Journal of Fluid Mechanics", 222:617-646. DOI:10.1017/S0022112091001246.

Hydraulic Engineering, 109(8): 1073-1092.

Knight D., McGahey C., Lamb R. and Samuels P. (2009). P*ractical channel hydraulics: Roughness, conveyance and afflux*: CRC Press.

Lambert, M. and Myers, W., (1998). "Estimating the discharge capacity in straight compound channels". Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, maritime and energy,130(2):84-94. DOI:10.1680/iwtme.1998.30477

Leonard, J., Mietton, M., Najib, H. and Gourbesville, P., (2000). "Rating curve modelling with Manning's equation to manage instability and improve extrapolation". Hydrological Sciences Journal, 45(5): 739-750.
DOI:10.1080/02626660009492374

Liao, H. and Knight, D., (2007). "Analytic stage-discharge formulas for flow in straight prismatic channels". Journal of Hydraulic Engineering, 133(10): 1111-1122.

Maghrebi, M.F. (2006). "Application of the single point measurement in discharge estimation".

www.SID.ir

Archive of SID

Determining the rating curves in asymmetric compound channels

Arash Ahmadi[1], Mahmoud F. Maghrebi[*2] and Kazem Esmaeili[3]

1- Ph.D. Candidate in Civil Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
2- Professor of Civil Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
3- Associated Professor of Water Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

[*] **maghrebi@um.ac.ir**

Abstract

Generally, natural open channels have sections in which by increasing the water level, the cross-sectional area will be increased considerably. These sections have consisted of relatively wide floodplains. In compound channels with asymmetric cross-sections, the hydraulic behavior of the flow would be complicated. Rating curves estimation in compound channels is one of the most critical issues of river engineering. In the current study, a new approach based on the concept of the cross-sectional isovel contours is introduced for the estimation of rating curves in compound channels. To extract the exponent values of the governing parameters, minimization approach is used to the difference between the observed and estimated data. In this method, in order to set up the rating curves in various cross-sections, it is only requisite to have the flow information at a reference water level. The results show that the proposed method has a good accuracy for predicting rating curves in asymmetric compound channels even in compound channels with different floodplain levels.

Keywords: Asymmetric compound channel; Stage-discharge curve; Isovel contours.

www.SID.ir