

«یادداشت تحقیقاتی»

تعیین منحنی سنج رسوب در رودخانه‌های مرکب با روش مقاطع پوش

*

۱- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشجوی دکترای تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵

ayyoub@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: اسفند ۱۳۸۳)

چکیده- در بسیاری از رودخانه‌ها هنگام وقوع سیل، جریان از مقطع اصلی خارج شده و دشتهای سیلابی را فرا می‌گیرد. ورود جریان در دشتهای سیلابی سازوکار هیدرولیکی پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند که بیش از دو دهه توجه بسیاری از محققین مسائل رودخانه و سیلاب را به‌خود معطوف کرده است. اگرچه بسیاری از جنبه‌های مطالعات هیدرولیک جریان آب در مقاطع مرکب هنوز به تحقیق و مطالعه نیاز دارد، اما نسبت به مطالعات هیدرولیک جریان رسوب در این مقاطع، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است. تاکنون مطالعات هیدرولیک رسوب مقاطع مرکب، بر روی مقاطع آزمایشگاهی انجام شده است و نیاز فراوانی به بررسی این موضوع در مقاطع طبیعی رودخانه‌ای احساس می‌شود. در این مقاله، روش پیشنهادی مؤلفان در سال ۱۳۸۲ موسوم به روش پوش - که در تبیین و شبیه‌سازی هیدرولیک جریان آب در مقاطع مرکب رودخانه‌ای با استفاده از مدل دوبعدی تحلیلی شیونو- نایت ارائه شده بود - و رابطه انتقال رسوب آکرز- وایت - که مبتنی بر مفهوم توان رودخانه‌ای است - تلفیق شده و مدلی به منظور شبیه‌سازی رفتار جریان رسوبی به‌شکل منحنیهای سنج رسوب استفاده گردید. به عنوان مطالعه موردی، این روش در مقطع مرکب رودخانه‌ی میناب در ایستگاه برنطین استفاده شده و منحنیهای سنج رسوب این رودخانه برای مقاطع پوش بالایی و پایینی محاسبه شده است. نتایج حاصل از کاربرد این روش براساس داده‌های رسوبی و هیدرولیکی رودخانه مذکور حاکی از آن است که مقادیر حاصل از منحنیهای پوش شبیه‌سازی شده در محدوده مقادیر اندازه‌گیری شده قرار دارند، لذا کاربرد این روش در چنین رودخانه‌هایی که تغییرات قابل ملاحظه مقطع هندسی دارد، می‌تواند به‌عنوان روشی استاندارد برای تولید منحنیهای سنج رسوب توصیه شود.

کلید واژگان: هیدرولیک مقاطع مرکب، روش مقاطع پوش، مدل دوبعدی شیونو- نایت، هیدرولیک دشتهای سیلابی، منحنی سنج رسوب.

۱- مقدمه

جریان سیلابی به دشتهای وسیع و پخش شدن آن، رقوم سیلاب کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته و از خسارتهای ناشی از سیل کاسته می‌شود. علاوه بر این، مقاطع مرکب،

رودخانه‌هایی که دشتهای سیلابی وسیعی دارند، نقش مهمی در مهار و کنترل سیلاب ایفا می‌کنند. با ورود

تنش برشی در مرز تماس آنها ظاهر می‌شود) بر هیدرولیک رسوب مقاطع مرکب کمتر مطالعه شده است. با توجه به اهمیت انتقال رسوبات به شکل بار بستر در رودخانه‌ها بویژه در شرایط سیلابی، مطالعه هیدرولیک رسوب مقاطع مرکب بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در این زمینه اولین بار آکرز^۴ با استفاده از مدل یک‌بعدی کوهیرنس و تلفیق آن با رابطه رسوبی آکرز- وایت^۵، به صورت تئوری نشان داد که پدیده اثر متقابل، به طور قابل توجهی میزان حمل رسوب بستر در مقاطع مرکب را کاهش می‌دهد [۴]. این مطالعه در مقطع رودخانه‌ای فرضی متقارن با مشخصات هندسی عمق و عرض مقطع اصلی بترتیب برابر ۱/۵ و ۱۵ متر و عرض دشتهای سیلابی ۲۰ متر انجام شد. تفاوت این مقطع با مقاطع رودخانه‌ای، در افقی بودن بستر سیلابی است که به افزایش بسیار ناگهانی پیرامون خیس شده در رقوم بالاتر از رقوم لبریز منجر خواهد شد. ضرایب زبری مقطع اصلی و دشتهای سیلابی بترتیب برابر ۰/۰۳ و ۰/۰۶ انتخاب شده بود. آکرز در این بررسی از دو نوع دانه‌بندی ماسه‌ای و شنی بترتیب با قطر ۰/۲۵ و ۳۰ میلیمتر برای مصالح بستر استفاده کرد. شیب طولی ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۳ نیز بترتیب برای رودخانه با بستر ماسه‌ای و شنی استفاده شد. در شکل ۱ نتایج محاسبات منحنیهای دبی رسوب-اشل حاصل از دو روش معمول و کوهیرنس و برای دو حالت بستر ماسه‌ای و شنی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در روش معمول با افزایش عمق جریان، دبی رسوب نیز بتدریج افزایش می‌یابد در حالی که در روش کوهیرنس، به محض اینکه جریان وارد دشتهای سیلابی می‌شود، کاهش ناگهانی در دبی رسوب مقطع ایجاد می‌شود که این مسأله در بستر شنی بیشتر مشهود است.

استفاده‌های فراوانی دارند و با توجه به اهمیت آنها، مطالعات و تحقیقات فراوانی در زمینه هیدرولیک این مقاطع انجام شده است. همزمان با ورود جریان به دشتهای سیلابی، اصطکاک بین جریان سریع مقطع اصلی و جریان کند دشتهای سیلابی ایجاد شده و این مسئله موجب به وجود آمدن تنش برشی در مرز تماس آنها می‌شود. از این پدیده به عنوان پدیده اثر متقابل^۱ یاد می‌شود. تنش برشی ایجاد شده، کاهش قابل توجه سرعت جریان را در مقطع اصلی به دنبال دارد و در نتیجه، دبی جریان و دبی رسوب عبوری از آن را کاهش می‌دهد. در روشهای معمول، تنش برشی ایجاد شده، در مقایسه با تنش برشی بستر ناچیز فرض شده و دبیهای جریان در مقطع اصلی و دشتهای سیلابی - بدون توجه به تنش برشی بین آنها - محاسبه و با یکدیگر جمع می‌شوند. در حالی که تحقیقات محققان نشان داده که این روش، خطای قابل توجهی در محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب ایجاد می‌کند. در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده و محققان، روشهای مختلفی را برای تحلیل و اصلاح هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب توسعه داده‌اند که روش یک‌بعدی کوهیرنس^۲ [۱] و مدل دو‌بعدی تحلیلی شیونو-^۳ نایت

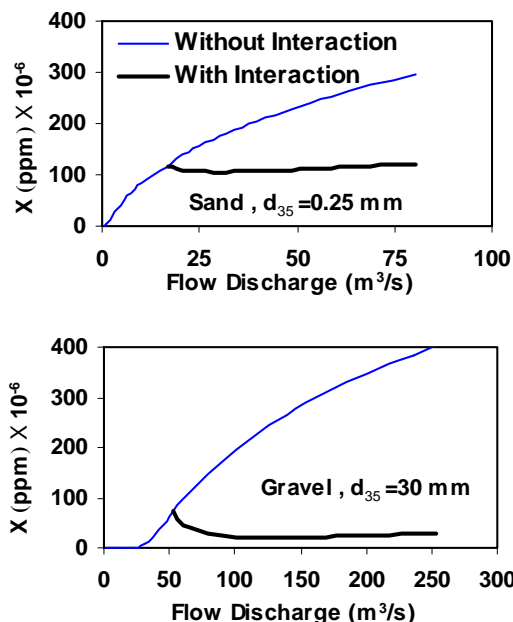
[۲، ۳] اعتبار بیشتری دارد. در روش کوهیرنس ابتدا دبی جریان از روش معمول تجزیه قائم مقطع مرکب محاسبه شده و سپس با تعریف ضرایب اصلاحی، دبی محاسبه شده جریان، اصلاح می‌شود. مدل دو‌بعدی شیونو- نایت بر اساس معادلات ناویر-استوکس توسعه داده شده و توزیع عرضی سرعت جریان و تنش برشی مرزی در مقاطع مرکب را حل می‌کند.

اگرچه در زمینه تحلیل هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب، موفقیت‌های زیادی حاصل شده، اما اثر تداخل جریان بین مقطع اصلی و دشتهای سیلابی (که به صورت

4. Ackers
5. Ackers and White

1. Interaction Effect
2. Coherence Method
3. Shiono and Knight

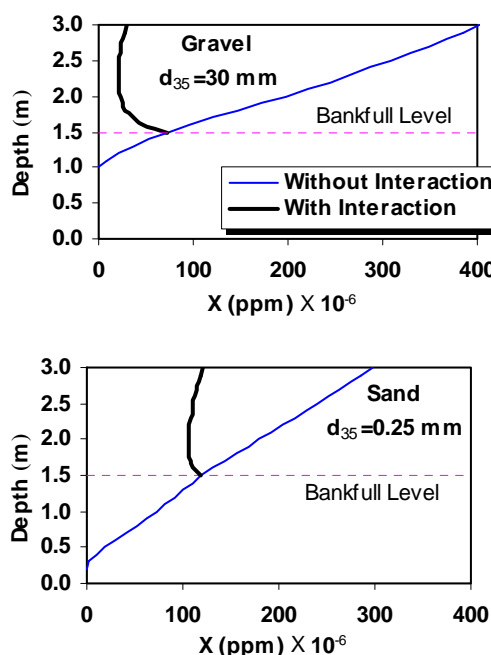
جریانات سیلابی در مدل‌های رودخانه‌ای)، پدیده اثر متقابل و تداخل جریان باید در نظر گرفته شود [۴]. در شکل ۲ این نتایج به شکل منحنیهای سنج رسوب ارائه شده است.



شکل ۲ مقایسه منحنیهای دبی آب-دبی رسوب رودخانه فرضی آکرز در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای و شنی {۶}

تأثیر تداخل جریان بر ظرفیت حمل رسوب در مقاطع مرکب (فرضیه آکرز) با استفاده از فلوم آزمایشگاهی با مقطع مرکب توسط ایوب‌زاده در سال ۱۹۹۷ مطالعه شد [۶]. در این مطالعه رسوباتی با $d_{35}=0.802$ میلیمتر انتخاب شده است. نتیجه این مطالعه آزمایشگاهی در شکل ۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که اگرچه در این تحقیق، فرضیه آکرز - که به صورت تئوری مطرح شده بود - تأیید شده اما اختلاف دو روش معمول و کوهیرنس در برآورد دبی رسوبی مقطع مرکب، کمتر از نتایج تئوری آکرز است.

با توجه به اینکه جریان در رودخانه‌های طبیعی بویژه در شرایط سیلابی، از پیچیده‌ای خاصی برخوردار بوده و عوامل بسیاری در پیچیدگی فرایند هیدرولیکی جریان آب و رسوب نقش دارند، لذا نحوه مطالعه و ارزیابی ظرفیت



شکل ۱ مقایسه منحنیهای دبی رسوب-اشل رودخانه فرضی آکرز در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای و شنی {۶}

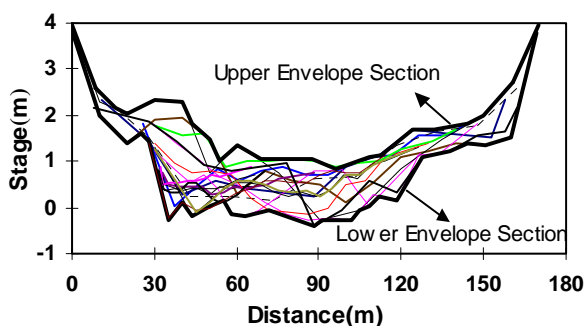
دلیل این کاهش ناگهانی آن است که وقتی جریان به دشتهای سیلابی وارد می‌شود، دبی جریان، سرعت و تنش برشی مقطع اصلی - به علت افت انرژی ناشی از فرایند انتقال ممتوم که سبب ایجاد جریانهای ورتکس با محور قائم و درامتدادفصل مشترک مقطع اصلی و دشتهای سیلابی و اثر متقابل بین این دو جریان شده [۵] - کاهش یافته و به تبع آن، از ظرفیت حمل رسوب مقطع اصلی نیز کاسته می‌شود. با افزایش عمق جریان، دبی رسوبی پس از اینکه به یک مقدار حداقل رسید، بار دیگر افزایش می‌یابد. اصطکاک ایجاد شده در مقطع مرکب با بستر شنی به حدی است که دبی رسوبی به دست آمده از روش کوهیرنس، به نصف تا یک سوم دبی رسوبی حاصل از روش معمول کاهش یافته است. نکته مهم دیگر آن است که دبی رسوبی در رقوم سیلابی، حتی از دبی رسوب عمقهای کم جریان در مقطع اصلی نیز کمتر است. بنابراین بدیهی است که در هرگونه تحلیل جریان سیلابی در رودخانه‌ها (مانند شبیه‌سازی هیدرولیک و هیدرولیک رسوب

موقعیت رودخانه میناب در شکل ۴ نشان داده شده است [۷]. به دلیل وقوع سیلابهای متعدد، رودخانه میناب در ایستگاه برنطین، تغییرات عرضی قابل توجهی دارد.



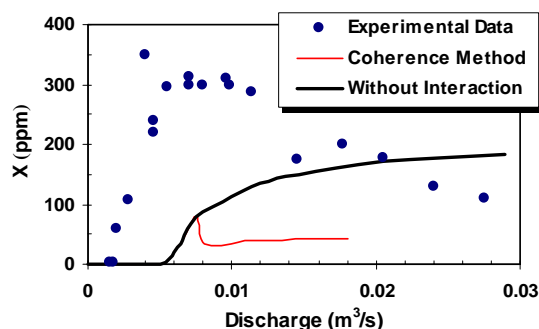
شکل ۴ موقعیت رودخانه میناب، ایستگاه برنطین و سد استقلال میناب

تغییرات عمق جریان در ایستگاه برنطین فقط در طول سه سال، حتی به ۱/۵ متر نیز می‌رسد (نسبت به حداکثر عمق آب حدود ۴/۵ متر). مقاطع عرضی برداشت شده رودخانه میناب در ایستگاه برنطین تحت جریانهای عادی و سیلابی در فاصله زمانی سالهای ۷۶-۱۳۷۴ در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۳]. محدوده مقادیر عمق جریان و عرض فوقانی سطح آب در این مقاطع بترتیب برابر ۴/۴-۰/۴ و ۱۷۰-۴۵ متر بوده که نشانگر تغییرات قابل ملاحظه شکل مقطع رودخانه میناب بر اثر وقوع سیلابهای متعدد است.



شکل ۵ مقاطع عرضی برداشت شده از رودخانه میناب در ایستگاه برنطین (سالهای ۷۶-۷۴) همراه با مقاطع پوش بالا و پایین [۱۳]

حمل رسوب در چنین رودخانه‌ای با مقطع مرکب، از نظر مهندسی می‌تواند حائز اهمیت باشد.



شکل ۳ منحنیهای دبی- رسوب به دست آمده از مدل کوهیرنس و روش معمول به همراه با نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی [۶].

بررسیهای اولیه مقاطع هندسی و رسوبی رودخانه میناب در ایستگاه برنطین نشان داد که این رودخانه - به‌عنوان یکی از محدود رودخانه‌های کشور که داده‌های اندازه‌گیری مناسبی دارد - برای جهت این مطالعه مناسب است. در این تحقیق، از تلفیق مدل هیدرولیکی دوبعدی شیونو-نایت و رابطه رسوبی آکرز- وایت برای شبیه‌سازی منحنی سنج رسوب این رودخانه استفاده شده است. مبانی هیدرولیکی مدل‌های یک‌بعدی کوهیرنس و دوبعدی شیونو نایت در بخشهای ۳ و ۴ ارائه شده است.

۲- مشخصات هیدرولیکی و رسوبی رودخانه میناب

رودخانه میناب یکی از رودخانه‌های استان هرمزگان است که از به هم پیوستن دو رودخانه رودان و جغین تشکیل می‌شود. وسعت حوضه آبریز این رودخانه (تا سد میناب در پایین دست رودخانه) ۹۸۰۰ کیلومتر مربع است. مهمترین ایستگاه هیدرومتری این رودخانه، ایستگاه برنطین است که در حدود ۴۰ کیلومتری بالادست سد استقلال میناب قرار دارد. آبدهی متوسط رودخانه میناب در ایستگاه برنطین حدود ۱۱/۵ مترمکعب بر ثانیه است.

منحنی بیان کننده افزایش انتقال رسوب با افزایش دبی جریان است، لیکن تغییر شیب در دبی جریان حدود ۸ مترمکعب بر ثانیه بوضوح ملاحظه می شود و بنظر می رسد حداقل بخشی از آن ناشی از تأثیر شکل مقطع مرکب این رودخانه بر شرایط هیدرولیکی و رسوبی آن باشد.

۳- مدل یک بعدی کوهیرنس

یکی از مهمترین روشهای تجزیه مقطع مرکب روش کوهیرنس (Coherence Method) است که توسط آکرز (Ackers) در سال ۱۹۹۱ ارائه شده. این روش مبتنی بر مفهومی است که با عنوان کوهیرنس معرفی شده است. اثر متقابل بین مقطع اصلی و دشت سیلابی، به شرایط جریان در هر یک از این دو مقطع بستگی دارد. اگر سرعتها و اعماق جریان آب به هم نزدیک باشند، اثر متقابل کم خواهد بود و اگر بسیار متفاوت باشند انتظار داریم که اثر متقابل، شدید باشد. میزان تشابه جریان در مناطق مختلف، با معیاری به نام کوهیرنس مقطع بیان می شود (COH). کوهیرنس مقطع عبارت است از نسبت دبی جریان در حالت در نظر گرفتن مقطع واحد و یکپارچه بر مجموع دبیهای جزئی که به طور جداگانه و بدون در نظر گرفتن اثر متقابل به دست آمده است. در صورتی که از معادله داریسی و ایسباخ برای بیان مقاومت جریان استفاده شود، با قرار دادن

$$H_* = (H - h) / H \quad P_* = N_F P_F / P_C \quad A_* = N_F A_F / A_C$$

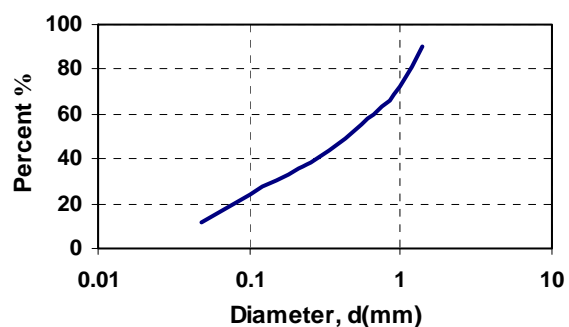
و $f_* = f_F / f_C$ که NF تعداد پهنه های سیلابی در مقاطع مرکب است - داریم:

$$COH = \frac{(1 + A_*) \sqrt{[(1 + A_*) / (1 + f_* P_*)]}}{1 + A_* \sqrt{(A_* / f_* P_*)}} \quad (1)$$

و در صورت استفاده از رابطه مانینگ داریم:

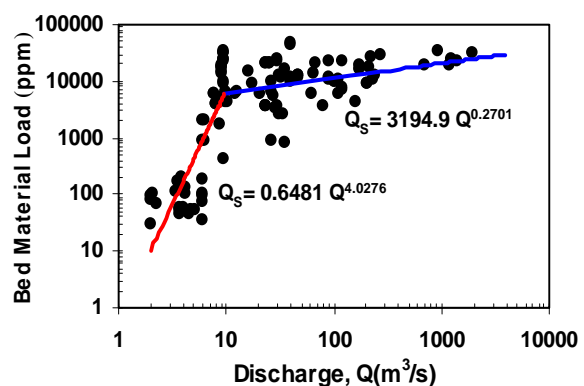
$$COH = \frac{(1 + A_*)^{3/2} / \sqrt{(1 + P_*^{4/3} n_*^2 / A_*^{1/3})}}{1 + A_*^{5/3} / n_* P_*^{2/3}} \quad (2)$$

اطلاعاتی از دانه بندی مصالح بستر رودخانه میناب در ایستگاه برنظین در دست نیست، اما اندازه گیریهای فراوانی از دانه بندی مصالح بستر این رودخانه در بالادست سد استقلال میناب در دست است. در این مقاله از منحنی دانه بندی مربوط به بالادست ترین نقطه سد - که کمترین فاصله را با ایستگاه برنظین دارد - به عنوان منحنی دانه بندی ایستگاه برنظین استفاده شده است [۸] (شکل ۶). مصالح بستر رودخانه از نوع ماسه ای با $d_{۲۵} = ۰/۲$ میلیمتر است.



شکل ۶ منحنی دانه بندی مصالح بستر رودخانه میناب [۸]

منحنی سنج رسوب رودخانه میناب در ایستگاه برنظین در شکل ۷ نشان داده شده است. این منحنی از داده های اندازه گیری شده دبی آب - دبی رسوب معلق این رودخانه - با در نظر گرفتن اینکه بار بستر حدود ۲۰٪ بار معلق را تشکیل می دهد - محاسبه شده است. اگرچه روند این



شکل ۷ نتایج دبی - دبی کل رسوب رودخانه میناب در ایستگاه برنظین

که Q_{R2} دبی اصلاح شده در منطقه دو، Q_B دبی کل جریان از روش معمول و $DISADF_2$ ضریب اصلاحی منطقه دو است.

منطقه ۳:

در این منطقه داریم:

$$DISADF_3 = 1.567 - 0.667COH$$

$$Q_{R3} = Q_B \times DISADF_3 \quad (5)$$

که $QR3$ و $DISADF3$ بترتیب دبی اصلاحی و ضریب اصلاح دبی منطقه سه است.

منطقه ۴:

در این منطقه ضریب اصلاحی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DISADF4 = COH$$

$$Q_{R4} = Q_B \times DISADF4 \quad (6)$$

که $QR4$ و $DISADF3$ بترتیب دبی اصلاحی و ضریب اصلاح دبی منطقه چهار است.

انتخاب مناطق:

پس از آن که برای مناطق جریان، دبیهای $Q_{R4}, Q_{R3}, Q_{R2}, Q_{R1}$ به دست آمد، برای انتخاب منطقه مناسب جریان و در نتیجه دبی جریان در مقطع، از روابط منطقی زیر استفاده می‌شود:

$$Q = Q_{R1} \quad \text{آنگاه} \quad Q_{R1} > Q_{R2} \quad \text{اگر}$$

$$Q = Q_{R2} \quad \text{آنگاه} \quad Q_{R2} \leq Q_{R3} \quad \text{و} \quad Q_{R1} < Q_{R2} \quad \text{اگر}$$

$$Q_{R3} \geq Q_{R4} \quad \text{و} \quad Q_{R2} > Q_{R3} \quad \text{و} \quad Q_{R1} < Q_{R2} \quad \text{اگر}$$

$$Q = Q_{R3} \quad \text{آنگاه}$$

$$Q = Q_{R4} \quad \text{و} \quad \text{بالاخره اگر} \quad Q_{R3} < Q_{R4}$$

۴- مدل دوبعدی شیونو- نایت

شیونو و نایت با استفاده از معادلات ناویر-استوکس، رابطه‌ای را برای محاسبه توزیع عرضی سرعت متوسط در

در این روش ابتدا دبی جریان از روش معمول محاسبه شده و سپس با توجه به وجود چهار منطقه متفاوت جریان، چهار دبی اصلاح شده محاسبه و سپس به کمک شرایط منطقی، دبی مناسب جریان مشخص می‌شود. دبی اصلاح شده در چهار منطقه جریان عبارتند از: منطقه ۱:

در این منطقه، روابط پیشنهادی عبارت است از:

$$\begin{aligned} Q_{*2F} &= -1.0H_* f_C / f_F \\ Q_{*2C} &= -1.24 + 0.395B/W_C + GH_* \\ \begin{cases} G = 10.42 + 0.17f_F / f_C & s_C > 1.0 \\ G = 10.42 + 0.17s_C f_F / f_C & s_C < 1.0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

$$Q_{R1} = Q_B - (Q_{*2C} + N_F Q_{*2F})(V_C - V_F)Hh \times ARF$$

در این روابط Q_{R1} دبی جریان در ناحیه ۱، Q_B دبی کل جریان محاسبه شده از روش معمول، Q_{*2} مقدار دبی کاهش در مقاطع جزئی، V_C و V_F بترتیب سرعت جریان در مقاطع اصلی و سیلابی از روش معمول، H عمق کل جریان، h عمق لبریز و ARF ضریب نسبت شکل، f_C و f_F بترتیب ضرایب اصطکاک دارسی-ویسباخ در مقاطع اصلی و سیلابی، B نیم عرض فوقانی سطح آب، WC نیم عرض مقطع اصلی در رقوم لبریز، G پارامتر تخمین جریان در منطقه ۱، H_* عمق نسبی و s_C شیب جانبی مقطع اصلی است.

منطقه ۲:

در این منطقه، به جای عمق واقعی جریان از عمق اصلاح شده H' استفاده می‌شود:

$$H' = Hh / (h - shift)$$

که $shift$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

و در نتیجه داریم:

$$Q_{R2} = Q_B \times DISADF_2 \quad (4)$$

جریان، حل تحلیلی زیر ارائه شده است [۲]:
برای نواحی با عمق ثابت (مناطق ۲ و ۴ در شکل ۸):

$$u_d = \left[A_1 e^{\gamma y} + A_2 e^{-\gamma y} + \frac{8gS_0 H}{f} \right]^{1/2} \quad (۸)$$

برای نواحی با عمق متغیر (مناطق ۱ و ۳ در شکل ۸):

$$u_d = \left[A_3 Y^{\alpha_1} + A_4 Y^{-\alpha_2} + \omega Y \right]^{1/2} \quad (۹)$$

که A مجهول معادله بوده و به کمک شرایط مرزی مناسب به دست می آید. در معادلات فوق داریم:

$$\gamma = \left(\frac{2}{\lambda} \right)^{1/2} \left(\frac{f}{8} \right)^{1/4} \frac{1}{H}$$

$$\alpha_1 = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{s\sqrt{1+s^2}}{\lambda} \sqrt{8f} \right\}^{1/2}; \alpha_2 = \alpha_1 + 1$$

$$\omega = \frac{gS_0}{\frac{\sqrt{1+s^2}}{s} \frac{f}{8} - \frac{\lambda}{s^2} \sqrt{\frac{f}{8}}} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۹) Y عمق جریان در نواحی با شیب جانبی است.

۵- رابطه انتقال رسوب آکرز- وایت

آکرز و وایت با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه‌ای را برای محاسبه مستقیم ظرفیت کل حمل رسوب (بار بستر + بار معلق) بر مبنای مفهوم توان رودخانه‌ای در واحد سطح ارائه کرده‌اند. در این رابطه، دبی کل رسوبات به مشخصات قابل اندازه‌گیری جریان ارتباط داده شده است. پارامتر حرکت رسوبات^۲ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

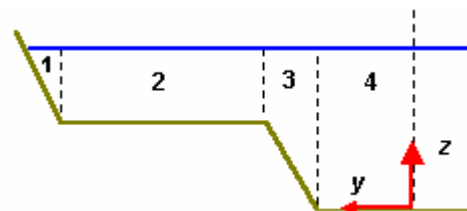
$$F_{gr} = U_*^n \left[gd \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \right]^{-1/2} \times \left[\frac{V}{\sqrt{32} \text{Log}(\alpha D / d)} \right]^{1-n} \quad (۱۱)$$

U* سرعت برشی، V سرعت متوسط جریان، n عدد

عمق و تنش برشی مرزی در مقاطع ساده و مرکب با مسیر مستقیم و در شرایط جریان یکنواخت و ماندگار ارائه داده‌اند [۲]:

$$\rho g H S_0 - \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{\partial u_d}{\partial y} \right\} = 0 \quad (۷)$$

که ρ جرم حجمی آب، g شتاب ثقل، H عمق کل جریان در مقطع اصلی، S₀ شیب طولی کانال، f ضریب اصطکاک دارسی- ویسباخ، u_d سرعت متوسط در عمق (میانگین عمقی سرعت جریان از بستر تا تراز آب)، s شیب جانبی مقطع اصلی یا دشتهای سیلابی، λ ضریب بی‌بعد لزجت جریان متلاطم و γ جهت عرضی کانال است. در معادله فوق از اثر جریانات ثانویه^۱ صرف نظر شده است. این اثر در مقاطع مرکب غیر عریض، انحنادار و غیرهمگن قابل ملاحظه بوده و باید در نظر گرفته شود [۹، ۱۰]. در مقاطع مرکب مستقیم رودخانه‌ای می‌توان از آن صرف نظر کرد و اثر آن را در واسنجی پارامترهای دیگر جریان توربولانت مانند f و λ به صورت ضمنی در نظر گرفت [۱۱]. برای حل تحلیلی معادله دیفرانسیل (۷)، ابتدا باید مقطع مرکب را به چند منطقه مجزا (مناطق با عمق ثابت و مناطق با عمق متغیر) تقسیم کنیم. این کار در شکل ۸ به عنوان نمونه برای مقطع مرکب منظم متقارن نشان داده شده است.



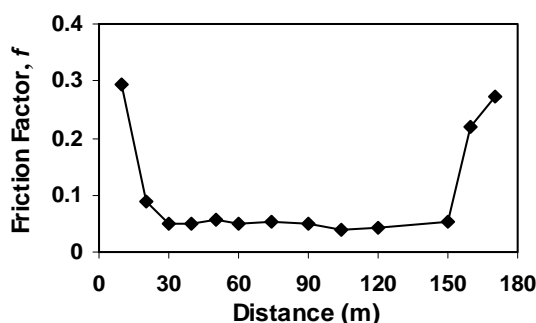
شکل ۸ تقسیم مقطع مرکب به مناطقی با عمق ثابت و متغیر

برای محاسبه توزیع عرضی سرعت در هر یک از مناطق

زمانی مورد مطالعه، منطقی به نظر نمی‌رسد. این وضعیت در رودخانه میناب در ایستگاه برنظین بخوبی قابل مشاهده است (شکل ۵). برای بررسی هیدرولیک جریان چنین رودخانه‌هایی، ایوب‌زاده و ظهیری روشی جدید را با عنوان روش مقاطع پوش^۱ توسعه داده و از آن در تولید منحنیهای دبی-اشل برای رودخانه میناب استفاده کرده‌اند [۱۲].

در این تحقیق، به منظور تحلیل هیدرولیک رسوب این رودخانه و استخراج منحنیهای رسوب سنج، ابتدا با توجه به مقاطع عرضی برداشت شده در دوره زمانی مورد مطالعه، مقاطع پوش بالا و پایین رودخانه مشخص شد. این مقاطع در شکل ۴ نشان داده شده است. سپس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در چند رقوم سیلابی و مشخصات هندسی رودخانه در شرایط سیلاب مورد نظر، توزیع ضریب زبری مانینگ و به تبع آن توزیع ضرایب اصطکاک داری-ویسباخ در عرض رودخانه به کمک حل تحلیلی مدل دوبعدی شیونو-نایت (۱۹۸۸) واسنجی شد.

نمونه‌ای از توزیع عرضی ضریب مقاومت داری-ویسباخ در رودخانه میناب با استفاده از واسنجی مدل تحلیلی شیونو-نایت در رقوم سیلابی ۳/۸۲ متر (سیلاب مورخ ۷۴/۱۲/۲۳ با دبی ۱۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه) در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ توزیع عرضی ضریب اصطکاک داری-ویسباخ حاصل از واسنجی مدل دوبعدی در رقوم سیلابی ۲/۶ متر در رودخانه میناب

انتقال بر اساس اندازه رسوبات، α ضریب معادله جریان متلاطم (برابر ۱۰)، d اندازه قطر متوسط رسوبات، D عمق آب، γ_s و γ بترتیب وزن مخصوص رسوبات و آب است. قطر بی‌بعد رسوبات چنین بیان می‌شود [۱۲]:

$$d_{gr} = d \left[\frac{g((\gamma_s/\gamma) - 1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (12)$$

که v لزجت سینماتیکی آب است.

تابع بی‌بعد انتقال رسوبات چنین تعریف می‌شود [۱۲]:

$$G_{gr} = \frac{XD}{d(\gamma_s/\gamma)} \left(\frac{U_*}{V} \right)^n \quad (13)$$

که X غلظت وزنی رسوبات است. تابع بی‌بعد حمل رسوب را چنین نیز می‌توان نوشت:

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (14)$$

مقادیر C ، A ، m و n توسط آکرز و وایت در آزمایشگاه و برای ذرات رسوب بزرگتر از ۰/۰۴ میلیمتر و عدد فرود کمتر از ۰/۸ چنین به دست آمده است [۱۲]:

برای ناحیه انتقالی $60 < d_{gr} < 1$:

$$\begin{aligned} n &= 1.00 - 0.56 \text{ Log } d_{gr}; \\ A &= 0.23 d_{gr}^{-1/2} + 0.14; \\ m &= 6.83 d_{gr}^{-1} + 1.67; \\ \text{Log } C &= 2.79 \text{ Log } d_{gr} - 0.98 (\text{Log } d_{gr})^2 - 3.46 \end{aligned} \quad (15)$$

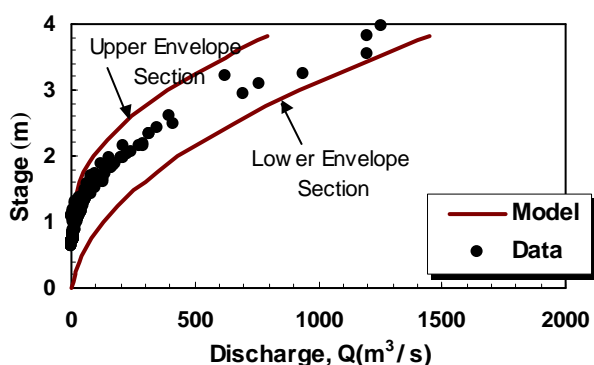
برای رسوبات درشت‌دانه، $d_{gr} > 60$:

$$n=0.00; A=0.17; m=1.78; C=0.025 \quad (16)$$

۶- روش تحقیق

بر اساس آنچه در بخشهای قبل آورده شد، روشهای مختلفی برای تحلیل هیدرولیک مقاطع مرکب ارائه شده است. این روشها برای مقاطع مرکب، منظم و پایدار توسعه داده شده است. مقاطع مرکب رودخانه‌ای چنین وضعیتی ندارند و ممکن است در طول زمان، تغییرات زیادی در مقطع عرضی ایجاد شود. در این حالت، در نظر گرفتن فقط یک مقطع عرضی در مقطع زمانی معین، به‌عنوان نماینده کلیه مقاطع عرضی رودخانه در فاصله

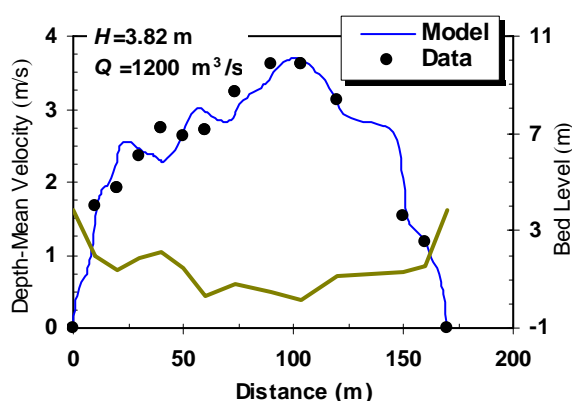
دبی- اشل مقاطع پوش بالا و پایین با داده‌های مشاهده شده دبی- اشل تعیین کرد به طوری که بیشترین انطباق بین نتایج مدل و مشاهدات ایجاد شود. در این رودخانه یکی از شرایط سیلابی (با رقوم ۲/۶ متر و دبی ۳۵۶ متر مکعب برثانیه) به عنوان شرایط بهینه انتخاب شده است [۸]. منحنیهای دبی- اشل بهینه همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که داده‌های اندازه‌گیری شده دبی- اشل، کاملاً در محدوده منحنیهای پوش بالا و پایین قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۱ منحنیهای دبی- اشل بهینه مقاطع پوش بالا و پایین همراه با داده‌های اندازه‌گیری در رودخانه میناب در ایستگاه برنطین

پس از تعیین شرایط بهینه واسنجی، با استفاده از توزیع ضرایب اصطکاک داریسی- وایسباخ در این شرایط و هندسه مقاطع پوش بالا و پایین، به ازای هر عمق جریان دلخواه، توزیع عرضی سرعت را از حل تحلیلی مدل شیونو- نایت در مقاطع پوش می‌توان محاسبه کرد. مقادیر سرعت به دست آمده از مدل دوبعدی، در رابطه انتقال رسوب (دراینجا رابطه آکرز- وایت) وارد شده و توزیع عرضی دبی کل رسوب به ازاء عمقهای مختلف جریان محاسبه می‌شود. در شکل ۱۲ نمونه‌ای از توزیع عرضی دبی کل رسوب در رودخانه میناب و به ازای عمق جریان ۲/۸ متر نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که در بخش وسیعی از عرض رودخانه، بجز در قسمتهای مربوط به شیبهای جانبی، ضریب اصطکاک تقریباً ثابت است. این نتیجه با نتایج تحقیقات شیونو و نایت نیز مطابقت دارد [۱۴]. در شکل ۱۰ توزیع عرضی سرعت حاصل از واسنجی مدل در جریان سیلابی مذکور همراه با داده‌های مشاهداتی ارائه شده است.



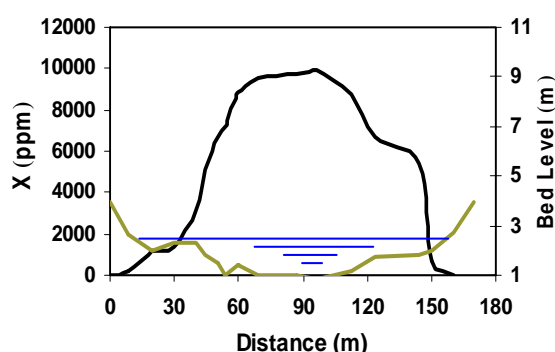
شکل ۱۰ توزیع عرضی سرعت جریان حاصل از واسنجی مدل دوبعدی در رقوم سیلابی ۳/۸۲ متر همراه با داده‌های مشاهده شده در رودخانه میناب

مراحل فوق باید برای چند سیلاب واقعی انجام شده و توزیع ضرایب اصطکاک برای هر یک از این سیلابها واسنجی شود. پس از واسنجی توزیع عرضی ضریب اصطکاک برای هر سیلاب، محاسبات مربوط به توزیع عرضی میانگین عمقی سرعت جریان با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی در مقاطع پوش بالا و پایین انجام شده و از انتگرالگیری عرضی توزیع سرعت به دست آمده به ازای هر عمق جریان، دبی کلی جریان محاسبه می‌شود. با تکرار این مرحله برای عمقهای مختلف، منحنی دبی- اشل رودخانه برای مقاطع پوش بالا و پایین در شرایط جریانهای عادی و سیلابی استخراج می‌شود. در این تحقیق از چهار سیلاب مشاهده شده برای واسنجی مدل ریاضی دوبعدی در رودخانه میناب استفاده شده است. بهترین نتیجه واسنجی را می‌توان با مقایسه منحنیهای

سیلابی معمولاً ته‌نشینی رسوبات روی می‌دهد، اما در این مطالعه از توزیع عرضی سرعت و جریان انتقال رسوبی در سرتاسر مقطع عرضی برای محاسبات حمل رسوب بستر استفاده شده است.

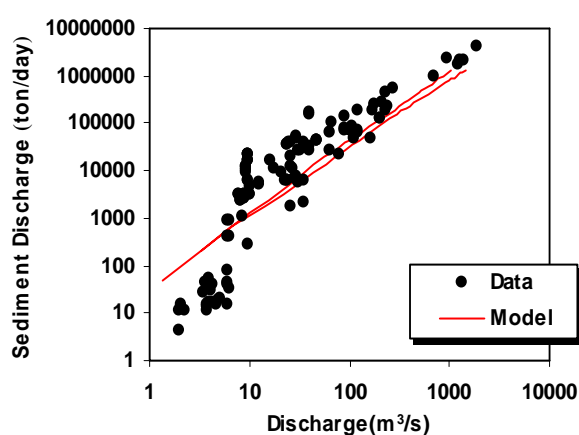
۷- تحلیل نتایج

منحنیهای پوش بالا و پایین نشان داده شده در شکل بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و هر دو، بین داده‌های مشاهده شده منحنیهای سنج رسوب قرار گرفته‌اند. همچنین در دبیهای کم جریان (کمتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه)، میزان دبی رسوب حاصل از مدل ریاضی، بسیار بیشتر از داده‌های اندازه‌گیری شده است. لیکن خطای مدل ریاضی در دبیهای بیش از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه بسیار کمتر از حالت فوق است. نکته قابل توجه آن است که داده‌های مشاهده شده از دبی کل رسوب (شکل ۷) نیز بویژه در دبیهای کم جریان پراکندگی بسیار زیادی را نشان می‌دهد. برای مثال در دبی جریان حدود ۴۰ مترمکعب بر ثانیه، میزان دبی رسوب اندازه‌گیری شده در محدوده ۴۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ ppm قابل ملاحظه‌ای (۴۵-۱ برابر) است. نکته مهم دیگر آن است که بخلاف داده‌های اندازه‌گیری دبی-اشل رودخانه میناب - که کاملاً در بین منحنیهای دبی-اشل مقاطع پوش بالا و پایین (شکل ۱۱) قرار گرفته‌اند - برای داده‌های رسوب سنج این رودخانه چنین وضعیتی دیده نمی‌شود. به بیان دیگر، هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها، اغلب تابع هندسه مقاطع عرضی آنها است به طوری که نتایج نسبتاً دقیقی را می‌توان به دست آورد در حالی که در مورد هیدرولیک رسوب، این وضعیت صادق نیست. در این شرایط، علاوه بر هندسه مقطع رودخانه، عوامل زیادی مانند تغییرات زمانی خصوصیات مصالح تشکیل دهنده رسوبات (اندازه و شکل ذرات) شکل منحنی دانه‌بندی و وزن مخصوص نیز تأثیرگذار است. بنابراین روش جدید مقاطع پوش که فقط بر تعیین خصوصیات هندسی مقاطع



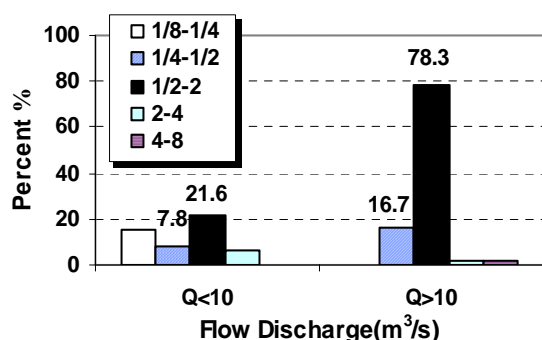
شکل ۱۲ توزیع عرضی دبی رسوبی حاصل از حل تحلیلی مدل دوبعدی و رابطه رسوبی آکرز- وایت در رقم ۲/۸ متر

با انتگرالگیری از توزیع عرضی دبی رسوبی، دبی کل رسوب رودخانه به دست می‌آید. بدین ترتیب به ازای ترازهای مختلف سطح آب، دبی جریان آب و دبی جریان رسوب محاسبه می‌شود. با این روش، منحنی سنج رسوب رودخانه برای دو مقطع پوش بالا و پایین استخراج می‌شود. در شکل ۱۳ نتایج محاسبات منحنی سنج رسوب رودخانه میناب در ایستگاه برنظین، برای دو مقطع پوش بالا و پایین همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده در مقیاس لگاریتمی ارائه شده است. اگرچه بخش عمده انتقال رسوب بستر در مقطع اصلی انجام شده و در مقاطع



شکل ۱۳ منحنیهای دبی-رسوب مقاطع پوش بالا و پایین همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده در رودخانه میناب در ایستگاه برنظین

قرار دارند و برای دبیهای کمتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه این مقدار به ۵۱٪ کاهش یافته است. ضمناً این نتایج برای هر دو مقطع پوش بالا و پایین مشابه بوده و در این شکل فقط نتایج مقطع پوش بالا ارائه شده است.



شکل ۱۵ نسبت مقادیر محاسباتی دبی رسوب به مقادیر مشاهده شده به تفکیک برای دبیهای کمتر و بیشتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه

۸- نتیجه گیری

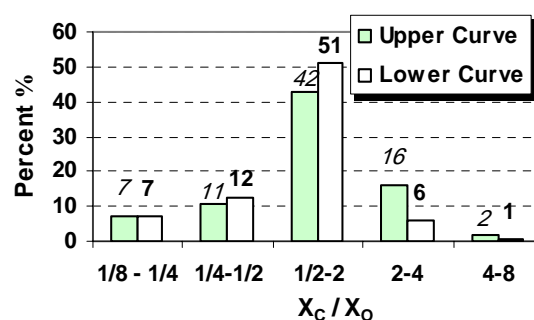
۱- با استفاده از روش مقاطع پوش و تلفیق مدل دوبعدی تحلیلی شیونو- نایت با رابطه رسوبی آکرز- وایت، منحنی سنج رسوب رودخانه میناب در ایستگاه برنظین استخراج و با داده‌های نظیر حاصل از اندازه گیری صحرایی مقایسه شد. اگرچه منحنیهای محاسباتی در محدوده مقادیر مشاهده شده قرار دارند، اما نتایج مدل تلفیقی در دبیهای جریان بزرگتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبیهای کمتر، دقت بیشتری دارند. در محدوده دبیهای کم، حتی مقادیر اندازه‌گیری دبی رسوبی نیز پراکندگی بسیار زیادی رانشان می دهد.

۲- فرضیه آکرز که توصیف کننده کاهش قابل ملاحظه دبی رسوبی در مقاطع مرکب بلافاصله پس از رقوم لبریز است، تا حدودی در منحنی سنج رسوب مبتنی بر داده‌های اندازه گیری شده رودخانه میناب قابل مشاهده است به طوری که این منحنی در قبل و بعد از رقوم لبریز، دو شیب کاملاً متفاوت دارد. این مسأله در منحنیهای محاسباتی پوش بالا و پایین چندان قابل مشاهده نیست.

عرضی رودخانه‌ها در شرایط تغییرات عرضی شدید مبتنی است، در ارزیابی هیدرولیک رسوب، دقت کمتری نسبت به ارزیابی هیدرولیک جریان رودخانه‌ها دارد. برای ارزیابی دقیقتر نتایج هیدرولیک رسوب رودخانه میناب که حاصل از مدل تلفیقی هیدرولیک-رسوب است (مدل دوبعدی شیونو- نایت و رابطه رسوبی آکرز- وایت)، از نسبت مقادیر محاسباتی دبی رسوبی در دو مقطع پوش بالا و پایین به دبی رسوب مشاهداتی استفاده شد:

$$e = \frac{X_c}{X_o} \quad (17)$$

زیرنویسهای C و O بترتیب مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری را نشان می‌دهند. این نسبت ابتدا برای تمام نتایج محاسبه و سپس در چند گروه دسته‌بندی شده است. نتایج حاصل از این محاسبات برای هر دو مقطع پوش بالا و پایین در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴ نسبت مقادیر محاسباتی دبی رسوب به مقادیر مشاهداتی برای مقاطع پوش بالا و پایین رودخانه میناب در ایستگاه برنظین

مشاهده می‌شود که حدود ۸۰٪ از نتایج در محدوده $1 - \frac{1}{8}$ قرار داشته و ۲۰٪ باقیمانده نسبتی بزرگتر از ۸ دارند.

در شکل ۱۵ این نتایج به تفکیک برای دبیهای جریان بزرگتر و کوچکتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه نیز ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای دبیهای بزرگتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه، بیش از ۹۸٪ از نتایج در محدوده $1 - \frac{1}{8}$

۹- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مسؤولان معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس و کمیته تحقیقات و استانداردهای مهندسی آب سازمان آب و برق خوزستان، به دلیل حمایت فنی و مالی تشکر می‌کنند. همچنین از آقای مهندس خرسندی و آقای مهندس وثوق، به خاطر ارائه نظرها و راهنماییهای ارزنده تشکر می‌گردد.

۱۰- منابع

- [1] Ackers, P; "Stage-Discharge functions for two-stage channels"; Water and Environmental Management, Vol. 7(1993);pp. 52-61.
- [2] Shiono, K. and Knight, D. W; "Two dimensional analytical solution for a compound channel"; 3rd International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements; 26-28 July; 1988; pp. 1-8.
- [3] Shiono, K. and Knight, D.W; "Mathematical models of flow in two or multi stage straight channels"; International Conference on River Flood Hydraulics; 17-20 Sep; 1990; pp 229-238.
- [4] Ackers, P; "Hydraulic design of straight compound channels"; Hydraulic Research; Wallingford; Report SR 281; Vols. 1 and 2; 1991.
- [5] Myers, W.R.C. and Brennan, E.K.; "Flow resistance in compound channels"; Journal of Hydraulic Research; 28; 1990; pp 141-154.
- [6] Ayyobzadeh, S. A ; "Hydraulic aspects of straight compound channel flow and bed load sediment transport"; PhD Thesis; The University of Birmingham; U.K.; 1997.

[۷] احمري، ح. "بررسی اثر برداشت مصالح بر شکل بستر و رژیم رودخانه"; پایان نامه کارشناسی ارشد،

البته بر طبق نظریه آکرز و با توجه به ماسه‌ای بودن مصالح بستر رودخانه میناب در ایستگاه برنطین، انتظار نداریم که شکل مقطع مرکب این رودخانه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش دبی رسوب رودخانه داشته باشد.

۳- رفتار رسوب رودخانه‌ها بخلاف هیدرولیک جریان آنها، فقط تابع خصوصیات هندسی مقطع عرضی نیست، بلکه تغییرات زمانی خصوصیات رسوبات (مانند دانه‌بندی و وزن مخصوص رسوبات) نیز نقش مهمی را ایفا می‌کنند. در روش مقاطع پوش، فقط تغییرات زمانی هندسه مقاطع عرضی در نظر گرفته می‌شود بنابراین برای ارزیابی هیدرولیک رسوب رودخانه با استفاده از این روش، باید تغییرات زمانی دانه‌بندی رسوبات نیز به‌نحوی در نظر گرفته شود.

۴- برای ارزیابی نتایج مدل تلفیقی هیدرولیک- رسوب، از نسبت مقادیر محاسباتی به اندازه‌گیری دبی رسوبی استفاده شده است. نشان داده شده که بیش از ۸۰٪ از نتایج هر دو منحنی پوش بالا و پایین، در محدوده نسبت ۱- $\frac{1}{8}$ قرار داشته و ۲۰٪ باقیمانده نسبتی بزرگتر از ۸ دارند. نتایج مقایسه برای دبیهای بزرگتر و کوچکتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه نیز تفکیک شده است. بیش از ۹۸٪ از نتایج رسوبی مربوط به دبیهای بزرگتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه در محدوده ۱- $\frac{1}{8}$ قرار دارند.

۵- در مطالعه نظری آکرز (۱۹۹۳) و تحقیق آزمایشگاهی ایوب‌زاده (۱۹۹۷)، از رابطه رسوبی آکرز- وایت (۱۹۷۳) برای بررسی اثر هیدرولیک مقاطع مرکب بر رفتار رسوبی آنها استفاده شده است. به این دلیل، در تحقیق حاضر نیز همین رابطه رسوبی به کار برده شده است. ممکن است بخشی از خطای مدل ریاضی تلفیقی مورد استفاده در این تحقیق، ناشی از انتخاب رابطه رسوبی باشد و به کار بردن سایر روابط رسوبی، نتایج دقیقتری را ارائه کند.

- [11] Knight, D. W.; Shiono, K.; and Pirt, J.; "Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow"; International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters; Bradford; England; 1989.
- [12] Yang, C. T.; "Sediment Transport, Theory and Practice"; Ottawa University; McGraw Hill; 1996.
- [۱۳] ایوب‌زاده، ع و ظهیری، ع؛ "روش جدید مقاطع پوش در بررسی هیدرولیک جریان در مقاطع متغیر مرکب رودخانه‌ای با استفاده از مدل دوبعدی؛ مجله بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران؛ ۱۳۸۲؛ ۱۴(۲)؛ ۱۳۸۲؛ ۱۱۶-۱۰۳.
- [14] Shiono, K. and Knight, D.W.; "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel"; Journal of Fluid Mechanics; 222; 1991; pp 617-646.
- دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۵.
- [۸] ظهیری، ع؛ "بررسی هیدرولیک و هیدرولیک رسوب مقاطع مرکب و ارزیابی مدل‌های یک و دوبعدی جریان در اینگونه مقاطع؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد تأسیسات آبیاری: دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۷۸.
- [9] Ervine, D. A.; Babaeyan-Koopaei, K.; and Sellin, R. H. J.; "Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows"; Journal of Hydraulic Engineering; ASCE; 126: 2000; pp 653-669.
- [10] Abril, J. B.; and Knight, D. W.; "Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model"; Journal of Hydraulic Research; IAHR; 2004.