

## Stage-discharge relationship developing for multi-stage compound channels based on 1D and 2D models

Abdolreza Jamali<sup>1</sup>, Babak Aminnejad<sup>2</sup>, Abdolreza Zahiri<sup>\*3</sup>

1. Ph.D. Student of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Email: [abdoreza64@gmail.com](mailto:abdoreza64@gmail.com)
2. Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Email: [babak1406@yahoo.com](mailto:babak1406@yahoo.com)
3. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 09.07.2023  
Revised: 11.11.2023  
Accepted: 11.21.2023

**Keywords:**  
Flood,  
Momentum exchange,  
Multi-stage compound  
channels,  
Stage-discharge curve

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Flood is a phenomenon during which the water fills the river's main channel and spreads to the floodplains. In some natural rivers and artificial canals in cities, there may be more than one floodplain flank the main channel, which is called the multi-stage compound channel. In these channels, when the flood occurs and the main channel is filled, the first floodplain is activated, and then when this floodplain overflows, the second floodplain is activated immediately. One of the hydraulic aspects of these channels is the stage-discharge relationship, which is used to estimate the flow discharge for any given flow depth and, hence, is an important tool in river design and management during floods. In this study, the one-dimensional model of interacting divided channels and the two-dimensional model of Shiono and Knight, which were previously proposed to calculate the flow discharge in classic compound channels, are developed for multi-stage compound channels.

**Materials and Methods:** For a one-dimensional model, using Newton's second law and by considering into account the apparent shear stresses at the interface of the main channel and the first flood plain, as well as the interface between the first and second floodplains, a linear equation system was derived to simultaneously estimate the average flow velocities in adjacent flow compartments of these sections. Huthoff et al. equation was used to involve apparent shear stresses in the interfaces. In this method, the momentum exchange coefficients were calibrated using the laboratory data from Singh (2021) in a three-stage rectangular compound channel and the nonlinear generalized reduced gradient optimization algorithm. A differential equation was obtained in terms of shear stress by deriving the semi two-dimensional model of Shiono and Knight by depth integrating of the Navier-Stokes equations. Then, applying several appropriate assumptions for Reynolds stresses and secondary flows, a simple equation was obtained regarding depth-averaged velocity. This equation was solved numerically using finite difference method.

**Results:** The one-dimensional flow interacting model results showed that this method has a good efficiency in estimating the total flow discharges with an average and maximum error of about 2.6 and 5.7 percent, respectively. Meanwhile, the vertical divided channel method, widely used in water engineering packages, does not provide reliable results, with an average error of 9.1% and a maximum error of 17.4%. The results of the numerical solution of the Shiono and Knight model showed a good

---

agreement between the observed and calculated lateral velocity distributions. It was also found that the effect of eddy viscosity and secondary currents in this channel is significant and should be considered. This model's mean and maximum error in estimating the total flow discharges was 2.4% and 4.1%, respectively.

**Conclusion:** The results of both one- and two-dimensional models proposed in this research showed that these models can estimate the total flow discharge and the subdivision flow discharges in multi-stage compound channels. Investigations revealed that in terms of the intensity of turbulence and the strength of the secondary currents, the interface plane between the main channel and the first floodplain is much more affected than the interface between the first and second floodplains.

---

Cite this article: Jamali, Abdolreza, Aminnejad, Babak, Zahiri, Abdolreza. 2024. Stage-discharge relationship developing for multi-stage compound channels based on 1D and 2D models. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (4), 103-123.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2023.21689.3679

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## استخراج رابطه دبی - اشل مقاطع مرکب چندسیلابدستی با مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی

عبدالرضا جمالی<sup>۱</sup> ID، بابک امین‌نژاد<sup>۲</sup> ID، عبدالرضا ظهیری<sup>۳\*</sup> ID

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران. رایانامه: [abdoreza64@gmail.com](mailto:abdoreza64@gmail.com)
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران. رایانامه: [babak1406@yahoo.com](mailto:babak1406@yahoo.com)
۳. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	<b>سابقه و هدف:</b> سیل پدیده‌ای است که در طی آن جریان آب، مقطع اصلی رودخانه را پر نموده و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود. در بعضی از رودخانه‌های طبیعی و نیز کانال‌های مصنوعی در شهرها ممکن است بیش از یک دشت سیلاب در طرفین مقطع اصلی وجود داشته باشد که به این مقاطع، کانال مرکب چندسیلابدستی گفته می‌شود. در این مقاطع با وقوع سیلاب و پر شدن مقطع اصلی، ابتدا دشت سیلاب اول فعال شده و سپس با سرریز شدن این دشت سیلابی، دشت سیلاب دوم بلافاصله وارد عمل می‌شود. یکی از جنبه‌های هیدرولیکی این مقاطع، رابطه دبی - اشل است که به ازای هر عمق جریان دلخواه، دبی مشخصی را برآورد نموده و ابزار مهمی در طراحی و ساماندهی رودخانه‌ها در زمان سیلاب است. در این مقاله، روش‌های یک‌بعدی تجزیه تبادلی و دوبعدی شیونو و نایت که قبلاً برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب پیشنهاد شده‌اند، برای مقاطع مرکب چندسیلابدستی توسعه داده شدند.
تاریخ دریافت: ۰۲/۰۶/۱۶ تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۸/۳۰	<b>مواد و روش‌ها:</b> در مدل یک‌بعدی، ابتدا با استفاده از قانون دوم نیوتن و دخالت تنش‌های برشی ظاهری در مرز تماس مقطع اصلی و دشت سیلابی اول و نیز دشت سیلابی اول با دوم، یک دستگاه معادله خطی برای برآورد هم‌زمان سرعت‌های متوسط جریان در بخش‌های مختلف این مقاطع استخراج شد. از معادله هاتوف و همکاران برای دخالت تنش‌های برشی ظاهری در مرزهای تماس استفاده شد. ضرایب انتقال مومنتوم در این روش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱) در یک مقطع مرکب مستطیلی و به کمک الگوریتم بهینه‌سازی گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته، واسنجی شدند. برای استخراج مدل شبه دوبعدی شیونو و نایت، ابتدا با انتگرال‌گیری در عمق از معادلات ناویر - استوکس، یک معادله دیفرانسیلی برحسب تنش برشی به دست آمد و سپس با اعمال فرض‌های ساده برای تنش‌های رینولدزی و نیز جریان‌های
واژه‌های کلیدی: اثر متقابل، انتقال مومنتوم، سیلاب، مقاطع مرکب چندپله‌ای، منحنی دبی - اشل	

---

ثانویه، معادله ساده‌تری برحسب سرعت متوسط در عمق ارائه شد. این معادله به کمک روش تفاضل‌های محدود حل شد.

**یافته‌ها:** نتایج مدل یک‌بعدی تبادل دبی نشان داد که این روش با میانگین و حداکثر خطای حدود ۲/۶ و ۵/۷ درصد، کارایی مناسبی در تخمین دبی کل جریان دارد. این در حالی است که روش تجزیه قائم مقطع مرکب که هم‌اکنون کاربرد گسترده‌ای در نرم‌افزارهای مهندسی آب دارد، با میانگین خطای ۹/۱ درصد و حداکثر خطای ۱۷/۴ درصد، نتایج قابل‌اعتمادی ارائه نمی‌کند. نتایج حل عددی مدل شبه دویبعدی شیونو و نایت نشان داد که مطابقت خوبی بین پروفیل‌های توزیع عرضی سرعت مشاهداتی و محاسباتی برقرار است. هم‌چنین مشخص شد که اثر لزجت گردابه‌ای و نیز جریان‌های ثانویه در این کانال قابل‌توجه بوده و باید در نظر گرفته شوند. میانگین و حداکثر خطای این مدل در تخمین دبی کل جریان به ترتیب ۲/۴ و ۴/۱ درصد به دست آمد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج هر دو مدل یک و دویبعدی پیشنهادی این پژوهش نشان داد که این مدل‌ها قابلیت مناسبی برای تخمین دبی کل و نیز دبی‌های جزئی در مقاطع مرکب چندسیلابدستی دارند. بررسی‌ها نشان داد که مرز تماس مقطع اصلی با دشت سیلابی اول از نظر شدت تلاطم و نیز قدرت جریان‌های ثانویه قوی‌تر از مرز تماس دشت سیلابی اول و دوم است.

---

**استناد:** جمالی، عبدالرضا، امین‌نژاد، بابک، ظهیری، عبدالرضا (۱۴۰۲). استخراج رابطه دبی- اشل مقاطع مرکب چندسیلابدستی با مدل‌های یک‌بعدی و دویبعدی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۰ (۴)، ۱۲۳-۱۰۳.

DOI: 10.22069/jwsc.2023.21689.3679



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### مقدمه

سیل پدیده‌ای است که در طی آن جریان آب، مقطع اصلی رودخانه را پر نموده و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود. در این حالت، ضمن این‌که بخش قابل‌توجهی از حجم سیلاب در این دشت‌ها پخش می‌شود، به دلیل کاهش شدید سرعت جریان در این دشت‌ها رسوبات زیادی در آن‌ها ته‌نشین می‌شود

به‌طوری‌که در طی سال‌های متمادی دشت‌های سیلابی وسیع و حاصلخیزی را برای فعالیت‌های کشاورزی ایجاد می‌کند. در شکل ۱ نمونه‌هایی از رودخانه‌های سیلابی با دشت‌های سیلابی پوشیده از گیاه نشان داده شده است. رودخانه‌های سیلابی با عنوان مقاطع مرکب<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند.



(ب) (ب)

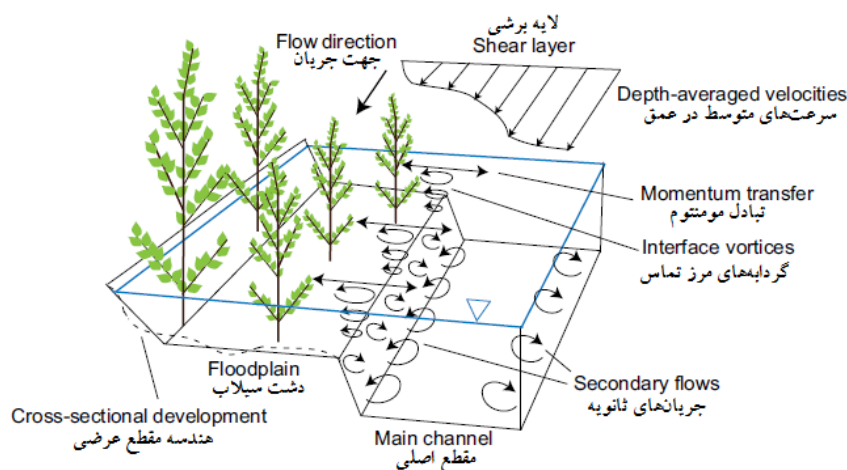
(الف) (الف)

شکل ۱- نمونه‌ای از رودخانه‌های سیلابی، (الف) رودخانه گرگان‌رود در استان گلستان، ایران، (ب) رودخانه سورن در انگلستان.

Figure 1. Examples of flooded rivers, (a) Gorganrood in Iran, (b) River Severn in England.

در این ناحیه در شکل ۲ نشان داده شده است. این گردابه‌ها عمدتاً به دلیل اختلاف سرعت جریان مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی تشکیل می‌شوند.

با ورود جریان آب به دشت‌های سیلابی، مکانیسم‌های متفاوتی در ناحیه اتصال مقطع اصلی به دشت سیلابی اتفاق می‌افتد. گردابه‌های عمقی و طولی

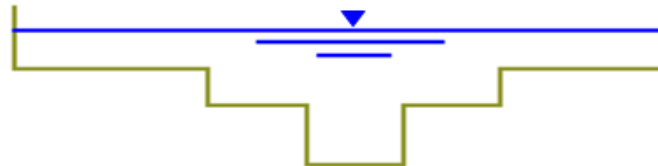


شکل ۲- مکانیسم هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب و گردابه‌های طولی و عمقی در مرز تماس مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی (۱).

Figure 2. Hydraulics of compound channels with longitudinal and vertical vortices (1).

سیلاب اول فعال شده و سپس با سرریز شدن این دشت سیلابی، دشت سیلاب دوم بلافاصله وارد عمل می‌شود. کانال‌های مرکب چندسیلاب‌دستی ضمن دارا بودن ظرفیت انتقال دبی جریان بیش‌تر از کانال‌های ساده و مرکب کلاسیک، سیلاب‌دشت‌های دوم و بالاتر از آن می‌توانند در نواحی شهری به‌عنوان مناطق تفریحی یا برای زیباسازی منظر مورد استفاده قرار گیرند. در شکل ۴، دو مقطع مرکب رودخانه‌ای چندپله‌ای در کشورهای چین و ژاپن نشان داده شده است.

اگرچه بیش از ۴۰ سال است که مقاطع مرکب مورد توجه بوده و مطالعات زیادی نیز در این زمینه انجام شده است، اما هنوز هم این موضوع در حال بحث و بررسی است. از طرف دیگر، مقاطع مرکب چندپله‌ای یا چندسیلاب‌دستی<sup>۱</sup> نیز به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته‌اند (۲، ۳). این مقاطع مطابق شکل ۳ دارای بیش از یک دشت سیلاب در طرفین مقطع اصلی بوده و احتمالاً هیدرولیک جریان متفاوتی نسبت به مقاطع مرکب معمولی یا کلاسیک دارند. در این مقاطع با وقوع سیلاب و پر شدن مقطع اصلی، ابتدا دشت



شکل ۳- مقطع مرکب چندپله‌ای یا چند سیلاب‌دستی (شماتیک).

Figure 3. Sketch of a typical multi-stage compound channel.



(الف) (a)



(ب) (b)

شکل ۴- مقاطع مرکب چندسیلاب‌دستی: (الف) رودخانه یانگ‌تسه، چین، وهان، (ب) رودخانه آراکاوا، ژاپن، توکیو.

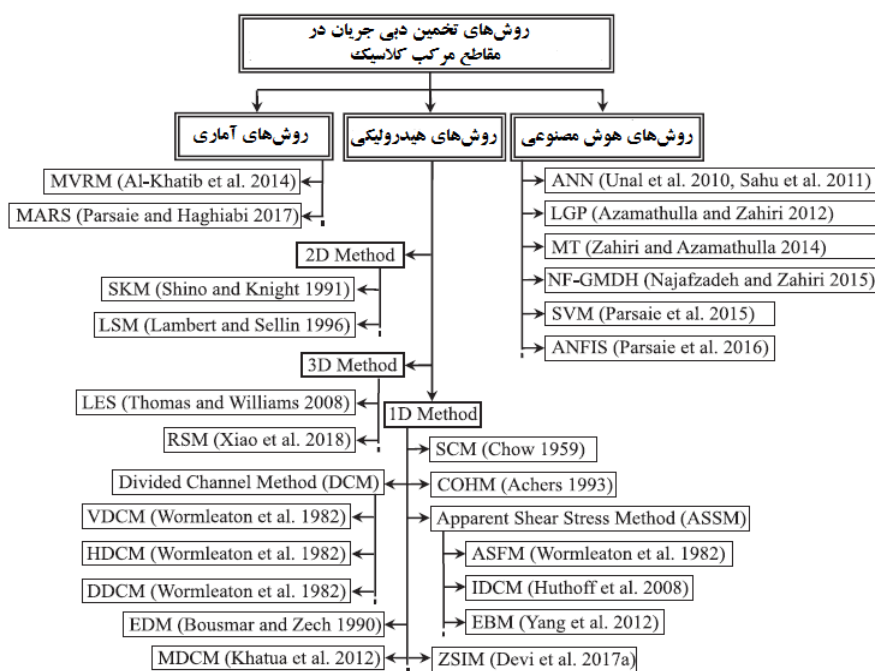
Figure 4. Multi-stage compound channels: (a) Yangtze River, China, Wuhan, (b) Arakawa River, Japan, Tokyo.

رابطه در کانال‌ها و رودخانه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار بوده و در طراحی کانال‌های پایدار، مدل‌سازی پروفیل سطح آب، محاسبات انتقال رسوب و غیره کاربرد دارد (۶، ۷).

### مواد و روش‌ها

به‌طور کلی روش‌های تخمین دبی جریان (رابطه دبی- اشل) در مقاطع مرکب کلاسیک را می‌توان به سه دسته کلی هیدرولیکی، آماری و هوش مصنوعی تقسیم‌بندی نمود (۲). این تقسیم‌بندی در شکل ۵ نشان داده شده است.

تاکنون مطالعات محدودی در خصوص مقاطع مرکب چندپله‌ای صورت گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در این زمینه یک مطالعه عددی از الگوی جریان در مقاطع مرکب چندپله‌ای (۴)، یک مطالعه تحلیلی- نظری برای استخراج رابطه دبی- اشل (۲) و یک مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی ساختار سه‌بعدی جریان در مقاطع مرکب چندسیلاب‌دستی (۳، ۵) انجام شده است. به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی کافی، تحلیل هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب چندپله‌ای با ابهامات زیادی مواجه است. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های هیدرولیکی در همه مقاطع روباز به ویژه در شرایط سیلابی، رابطه دبی- اشل است. این



شکل ۵- روش‌های تخمین رابطه دبی- اشل در مقاطع مرکب کلاسیک (۲، ۶).

Figure 5. Predictive methods for stage-discharge relation in two-stage compound channels (2, 6).

مباحث مهندسی از جمله صنعت آب، فعلاً برای تخمین دبی جریان در مقاطع مرکب چندسیلاب‌دستی دارای محدودیت ویژه‌ای هستند. دلیل این محدودیت، عدم وجود داده‌های هیدرولیکی کافی از شرایط

روش‌های آماری (یا مدل‌های رگرسیونی) و هوش مصنوعی (یا یادگیری ماشین مثل شبکه‌های عصبی، برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین‌های بردار پشتیبان) با وجود کاربرد گسترده در بسیاری از

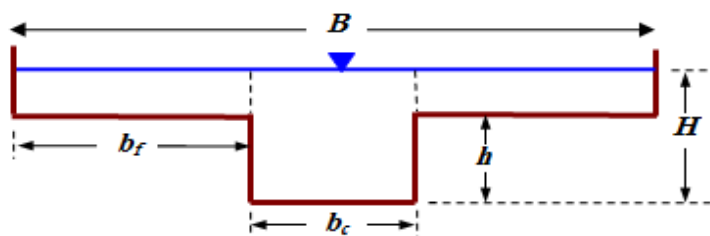
مدل یک‌بعدی تجزیه تبادلی: روش‌های یک‌بعدی به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کم‌تر، در مقایسه با مدل‌های دو و سه‌بعدی می‌توانند دارای مزیت‌های بیش‌تری باشند. اولین روش استخراج رابطه دبی-اشل در مقاطع مرکب موسوم به روش تجزیه قائم مقطع مرکب بوده و به عنوان روش سنتی<sup>۱</sup> یا متداول شناخته می‌شود. این روش هم‌اکنون نیز در بسیاری از نرم‌افزارها و مدل‌های ریاضی متداول در مباحث هیدرولیک و مهندسی رودخانه مثل HEC-RAS و ISIS مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۲). برای محاسبه دبی جریان در این روش مطابق شکل ۶، ابتدا مقطع اصلی از دشت‌های سیلابی تفکیک شده و سپس دبی جریان در هر یک از این بخش‌ها به صورت جداگانه به کمک یکی از روابط مقاومت جریان (مثل رابطه مانینگ) محاسبه می‌شود. دبی کل جریان از مجموع دبی‌های جزئی به دست خواهد آمد:

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

مقاطع جزئی با توجه به الگوی تجزیه قائم مقطع مرکب،  $S_0$  شیب طولی کانال و  $n$  ضریب زبری مانینگ ( $s \cdot m^{-1/3}$ ) می‌باشند.

هیدرولیکی در مقاطع مرکب چندسیلاب‌دستی است. هر دو این روش‌ها برای واسنجی یا آموزش نیازمند داده‌های آزمایشگاهی زیادی هستند. این در حالی است که روش‌های هیدرولیکی بر پایه فیزیک جریان بوده و با استفاده از مفاهیم هیدرولیکی و تعادل بین نیروهای مقاوم و مؤثر بر حرکت جریان در کانال‌ها توسعه داده شده‌اند. این روش‌ها تاکنون توسط پژوهش‌گران زیادی برای مطالعه هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب مورد استفاده قرار گرفته و ایده‌های متنوعی برای محاسبه دبی جریان رودخانه‌ها در شرایط سیلابی ارائه شده است (۲، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹). مدل‌های هیدرولیکی به سه گروه یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی قابل تفکیک هستند. همان‌طور که از شکل ۶ قابل مشاهده است، تعداد روش‌های یک‌بعدی بسیار بیش‌تر از روش‌های دو‌بعدی و سه‌بعدی است.

که،  $Q$  دبی کل جریان در مقطع مرکب ( $m^3 s^{-1}$ )،  $i$  بیان‌کننده هر یک از مقاطع جزئی (مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی)،  $A$  و  $R$  به ترتیب سطح مقطع جریان ( $m^2$ ) و شعاع هیدرولیکی ( $m$ ) هر یک از

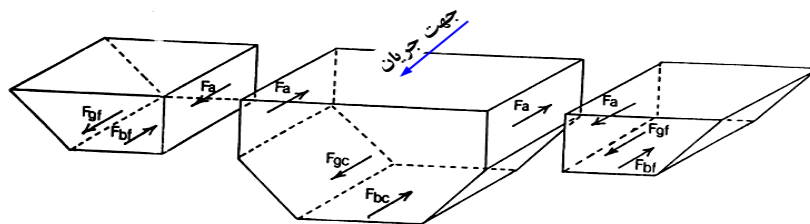


شکل ۶- تقسیم یک مقطع مرکب مستطیلی به سه بخش مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی برای محاسبه دبی کل جریان.  
Figure 6. Dividing a compound channel into three sections of main channel and floodplains for discharge prediction.



برای کانال‌های با مقطع ساده و در شرایط جریان یکنواخت، نیروی وزن سیال با نیروی اصطکاکی بستر مساوی است اما برای مقاطع مرکب این وضعیت صادق نیست. به دلیل اختلاف سرعت‌های جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، در مرز اتصال این دو مقطع یک لایه برشی تشکیل می‌شود که همراه با تلاطم جریان شدیدی بوده و گردابه‌های قوی شکل می‌گیرند. این تلاطم باعث تحمیل افت انرژی و اصطکاک شده و تنش برشی قابل ملاحظه‌ای را ایجاد می‌کند که به تنش برشی ظاهری موسوم است. نیروی برشی ظاهری باعث می‌شود که نیروهای وزن سیال و اصطکاک بستر برای دو مقطع اصلی و دشت سیلاب در تعادل نباشند (شکل ۷). در این شکل، نیروی اصطکاکی ناشی از تنش برشی ظاهری با  $F_a$  معرفی شده است.

بدیهی است که در محاسبات این روش، اثر گردابه‌های مرز تماس و یا به عبارتی اثر متقابل بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ناچیز فرض می‌شود. این درحالی است که گردابه‌های مرز تماس باعث ایجاد تبادل مومنتوم بین این دو بخش و در نتیجه ظهور تنش برشی شدید در حدفاصل این بخش‌ها می‌شوند. این تنش برشی در مقایسه با تنش‌های برشی مقطع اصلی و دشت سیلاب قابل توجه می‌باشد (۲۰). بر این اساس و به دلیل انتقال مومنتوم از مقطع اصلی به دشت‌های سیلابی، از انرژی جنبشی مقطع اصلی کاسته شده و به انرژی جریان در دشت‌های سیلابی افزوده می‌شود. برای اصلاح محاسبات فوق، ایده‌ها و روش‌های یک‌بعدی متنوعی ارائه شده است (۸، ۱۲، ۱۴، ۲۱).



شکل ۷- تعادل نیروها بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی یک کانال مرکب.

Figure 7. Streamwise force balances between the main channel and the floodplains.

یکنواخت (شتاب صفر)، روابط زیر به ترتیب برای مقطع اصلی، دشت سیلابی اول و دشت سیلابی دوم قابل ارائه می‌باشند (شکل ۸):

با استفاده از قانون دوم نیوتن یا تعادل نیروها (شامل وزن سیال در جهت جریان و نیز اصطکاک یا تنش برشی در خلاف جهت جریان) در هر یک از مقاطع اصلی و دشت‌های سیلابی و با فرض جریان

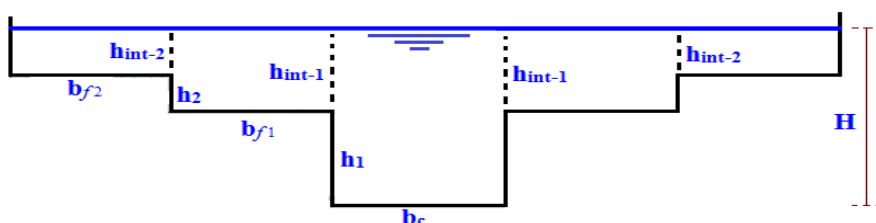
$$\rho g A_c S_0 = \rho f_c V_c^2 P_c + N_{f1} \tau_{a-1} h_{int-1} \quad (2)$$

$$\rho g A_{f1} S_0 = \rho f_{f1} V_{f1}^2 P_{f1} - \tau_{a-1} h_{int-1} + \tau_{a-2} h_{int-2} \quad (3)$$

$$\rho g A_{f2} S_0 = \rho f_{f2} V_{f2}^2 P_{f2} - \tau_{a-2} h_{int-2} \quad (4)$$

شده‌اند. در روابط فوق، جملات سمت چپ تساوی بیانگر نیروی وزن سیال در جهت جریان است. جمله اول سمت راست بیانگر نیروی اصطکاک ناشی از تنش برشی بستر و جداره‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی است. جملات دوم و سوم سمت راست تساوی بیانگر اثر تنش برشی ظاهری است. این تنش باعث انتقال مومنتوم از مقطع با سرعت بیش‌تر به سرعت کم‌تر می‌شود که موسوم به اثر متقابل است. در مقطع مرکب چندسیلابدستی، دشت سیلابی اول تحت تأثیر دو تنش برشی ظاهری متفاوت است.

که  $\rho$  جرم حجمی آب ( $\text{kg m}^{-3}$ )،  $g$  شتاب ثقل ( $\text{m s}^{-2}$ )، ضریب اصطکاک دارسی - ویسیاخ (معادل  $8gn^2/R^{1/3}$ )،  $V$  سرعت واقعی جریان ( $\text{m s}^{-1}$ )،  $P$  محیط مرطوب ( $\text{m}$ )،  $N_f$  تعداد دشت‌های سیلابی،  $\tau_a$  تنش برشی ظاهری ( $\text{Pa}$ ) و  $h_{int}$  عمق جریان ( $\text{m}$ ) در محل اتصال دو مقطع است. زیرنویس‌های  $c$  و  $f$  به ترتیب برای بیان متغیرهای هندسی و هیدرولیکی در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی است. همچنین از زیرنویس‌های ۱ و ۲ به ترتیب برای بیان این متغیرها در دشت‌های سیلابی اول و دوم استفاده



شکل ۸- نمایش مرزهای تماس در مقاطع مرکب چندسیلابدستی برای تعادل نیروها.

Figure 8. Vertical interfaces in a multi-stage compound channel for force balances.

کانال‌های مرکب پیشنهاد نموده‌اند. بوسمار و زخ (۱۹۹۹) و هاتوف و همکاران (۲۰۰۸) به ترتیب روابط زیر را برای تعیین تنش برشی ظاهری بین مقطع اصلی و دشت سیلابی پیشنهاد نمودند (۸، ۲۲):

اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی ظاهری در آزمایشگاه و مهم‌تر از آن در رودخانه‌های طبیعی، فرآیندی پیچیده و دشوار بوده و نیازمند دستگاه‌ها و تجهیزات خاصی است. به همین دلیل پژوهش‌گران روابط مختلفی را برای تخمین تنش برشی ظاهری در

$$\tau_a = \Psi \rho (V_c - V_f)^2 \quad (5)$$

$$\tau_a = 0.5 \gamma \rho (V_c^2 - V_f^2) \quad (6)$$

مرکب برآورد شوند. اگر از رابطه ۶ برای تخمین تنش‌های برشی ظاهری در مرزهای تماس اول و دوم استفاده شود آن‌گاه:

که،  $\Psi$  و  $\gamma$  ضرایبی هستند که به عنوان ضرایب بدون بعد انتقال مومنتوم نام‌گذاری شده‌اند. مقدار این ضرایب باید به کمک داده‌های آزمایشگاهی مقاطع

$$\tau_{a-1} = 0.5 \gamma_1 \rho (V_c^2 - V_{f1}^2) \quad (7)$$

$$\tau_{a-2} = 0.5 \gamma_2 \rho (V_{f1}^2 - V_{f2}^2) \quad (8)$$

جاگذاری روابط ۷ تا ۸ در معادلات ۲ تا ۴ می‌توان سرعت‌های جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی اول و دوم را به صورت زیر به دست آورد:

$$V_c^2 = \frac{V_{c,0}^2 + 0.5N_{f1}\gamma_1 V_{f1}^2 \varepsilon_c}{1 + 0.5\gamma_1 \varepsilon_c} \quad (9)$$

$$V_{f1}^2 = \frac{V_{f1,0}^2 + 0.5\gamma_1 V_c^2 \varepsilon_{f1} + 0.5\gamma_2 V_{f2}^2 \varepsilon_{f2}}{1 + 0.5\gamma_1 \varepsilon_{f1} + 0.5\gamma_2 \varepsilon_{f2}} \quad (10)$$

$$V_{f2}^2 = \frac{V_{f2,0}^2 + 0.5\gamma_2 V_{f1}^2 \varepsilon_{f2}}{1 + 0.5\gamma_2 \varepsilon_{f2}} \quad (11)$$

روش‌های عددی قابل حل می‌باشد. در این پژوهش، دستگاه معادله فوق در محیط اکسل و بدون نیاز به محاسبات سعی و خطا حل شده است. مدل شبه دوبعدی شیونو و نایت: با ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر- استوکس در جهت جریان برای یک آبراهه مستقیم یا پیچانرود، معادله زیر حاصل می‌شود (۸):

که  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  به ترتیب ضرایب انتقال مومنتوم در مرزهای تماس مقطع اصلی- دشت سیلابی اول و دشت سیلابی اول- دشت سیلابی دوم می‌باشند. با

در روابط فوق،  $\varepsilon_{f1} = h_{int-1} / (f_{f1} P_{f1})$  و  $\varepsilon_{f2} = h_{i n-2} / (f_{f2} P_{f2})$  هم‌چنین اندیس ۰ در متغیرهای سرعت جریان به معنی سرعت جریان به دست آمده از روش تجزیه قائم است (با فرض تنش برشی ظاهری صفر) که به کمک فرمول مانینگ قابل محاسبه است ( $V_0 = \sqrt{8gRS_0 / f}$ ). معادلات ۹ تا ۱۱ یک دستگاه معادله خطی (با تعداد مجهولات  $1+N_{f1}+N_{f2}$ ) را تشکیل می‌دهند که به کمک

$$\rho g S_0 - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho u' u') + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho u' v') + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho u' w') = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uu) + \frac{\partial}{\partial y} (uv) + \frac{\partial}{\partial z} (uw) \right) \quad (12)$$

(Pa)،  $t$  زمان (s)،  $x$  جهت طولی،  $y$  جهت عرضی و  $z$  جهت قائم می‌باشند. شیونو و نایت (۱۹۹۱) با فرض جریان ماندگار و یکنواخت، معادله دیفرانسیلی زیر را برای حل توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه‌ها ارائه نمودند (۷):

که  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب سرعت‌های متوسط زمانی در جهت طولی، عرضی و قائم ( $m s^{-1}$ )،  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  نوسانات سرعت (مازاد بر سرعت متوسط جریان) به علت تلاطم و آشفتگی جریان به ترتیب در جهت طولی، عرضی و قائم ( $m s^{-1}$ ) فشار هیدرواستاتیک

$$\rho g S_{0x} + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho u' v') + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho u' w') = \rho \left( \frac{\partial}{\partial y} (uv) + \frac{\partial}{\partial z} (uw) \right) \quad (13)$$

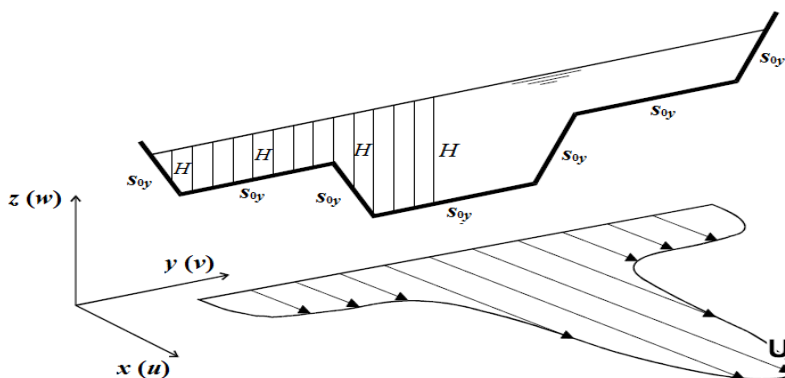
جهت قائم ( $w$ )، رابطه زیر که به معادله متوسط در عمق تنش برشی موسوم است ظاهر خواهد شد:

$$\rho g H S_0 + \frac{\partial}{\partial y} H \tau_{yx} - \tau_b \sqrt{1 + \frac{1}{S_{0y}^2}} = \frac{\partial}{\partial y} \{H(\rho u v)_d\} \quad (14)$$

سرعت‌ها در جهت عرضی ( $\tau_{yx}$ )، و تنش برشی بستر ( $\tau_b$ ) می‌باشند. جمله سمت راست تساوی نیز اثرات جریان‌های ثانویه (ناشی از سرعت جریان در جهت عرض یا مولفه  $v$ ) را نشان می‌دهد.

با انتگرال‌گیری از معادله دیفرانسیلی فوق در عمق جریان و نیز صرف‌نظر کردن از سرعت جریان در

که  $H$  عمق جریان در هر نقطه از عرض رودخانه (شکل ۹)،  $S_{0y}$  شیب جانبی رودخانه (افقی به قائم) و زیرنویس  $d$  در جمله سمت راست معادله بیانگر متوسط عمقی است. جملات اول تا سوم در معادله فوق به ترتیب بیانگر مولفه وزن سیال در جهت جریان، تنش برشی رینولدزی ناشی از گردان



شکل ۹- توزیع عرضی سرعت در جهت جریان در یک رودخانه سیلابی.

Figure 9. Lateral distribution of streamwise velocity in a flooded river.

جریان تبدیل می‌شوند:

$$\tau_b = \gamma R S_f = \rho \frac{f}{8} u_d^2; \quad \tau_{yx} = \rho v_t \frac{du_d}{dy} \quad (15)$$

نوسانات سرعت ( $u'$  و  $v'$ ) به کار رفته است. لزجت گردابه‌ای در جریان‌های کم عمق مثل رودخانه‌ها و سواحل، طبق قانون بوسینسک از رابطه زیر قابل محاسبه است:

برای سادگی کاربرد، جملات تنش برشی در معادله فوق به کمک روابط زیر به جملات سرعت

که،  $\gamma$  وزن مخصوص سیال ( $N m^{-3}$ )،  $S_f$  شیب انرژی،  $u_d$  سرعت جریان به صورت متوسط در عمق ( $m s^{-1}$ ) و  $U_t$  لزجت گردابه‌ای یا تلاطمی ( $m^2 s^{-1}$ ) است که به منظور دخالت اثر تبادل مومنتوم ناشی از

$$v_t = \lambda H u^* = \lambda H \left( \sqrt{\frac{f}{8}} u_d \right) \quad (16)$$

رودخانه‌های طبیعی حدود  $3-0.07$  (۱۸، ۲۴) برآورد شده است. با جاگذاری روابط ۱۵ و ۱۶ در معادله دیفرانسیلی ۱۴ معادله مهم زیر به دست می‌آید (۷):

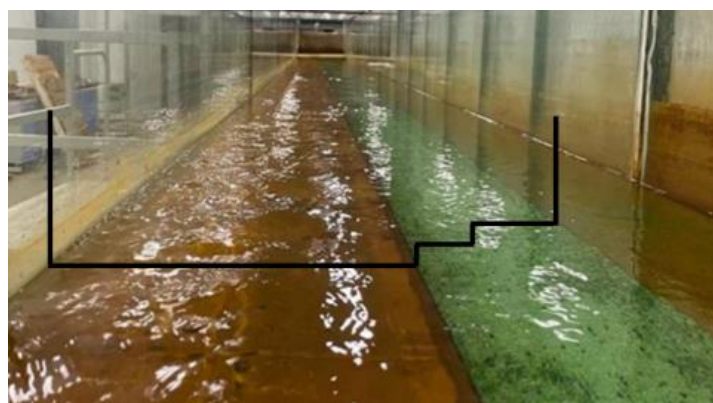
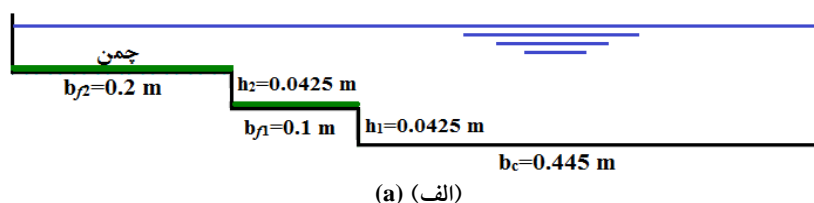
$$\rho g H S_{0x} - \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s_{0y}^2}} + \frac{d}{dy} \left\{ \rho \lambda H^2 \left( \frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{du_d}{dy} \right\} = \beta_s \rho g H S_{0x} \quad (17)$$

مقطع اصلی انجام شده است (شکل ۱۰). طول این کانال ۲۰ متر، شیب طولی آن  $0.003$ ، و ارتفاع و عرض کل آن به ترتیب  $0.50$  و  $0.745$  متر می‌باشند. دبی جریان این کانال نیز در محدوده  $60-20$  لیتر بر ثانیه بوده است. برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت در جهت جریان، عرضی و قائم از سرعت‌سنج‌های پره‌ای NHRI و ADV استفاده شده است. مقطع اصلی این کانال از شیشه (با ضریب زبری مانینگ حدود  $0.01$ ) بوده و دشت‌های سیلابی اول و دوم با لایه‌ای از چمن مصنوعی (با ضریب زبری مانینگ حدود  $0.025$ ) زبر شده است.

که،  $u^*$  سرعت برشی یا اصطکاکی ( $m s^{-1}$ ) و  $\lambda$  ضریب بدون بعد لزجت تلاطمی است. این ضریب برای کانال‌های عریض حدود  $0.135$  (۲۳)، برای کانال‌های آزمایشگاهی حدود  $0.16$  (۲۲) و برای

در معادله فوق،  $\beta_s$  ضریب جریان ثانویه است. جریان‌های ثانویه در قوس رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی دارای اهمیت بوده و حتماً باید در نظر گرفته شوند (۱۰). برای حل عددی معادله فوق از روش تفاضل‌های محدود استفاده شده است.

**داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده:** در این پژوهش برای بهینه‌سازی (واسنجی) ضرایب بدون بعد انتقال مومتوم در روش پیشنهادی از داده‌های آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱) استفاده شد. این مطالعه در دانشگاه لیورپول و در یک کانال آزمایشگاهی با مقطع مرکب مستطیلی نامتقارن با دو دشت سیلابی در یک طرف



شکل ۱۰- کانال آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱)، (الف) نمای جانبی، (ج) نمای جلویی از پایین دست با پوشش گیاهی در سیلابدشت‌ها.  
Figure 10. Experimental flume (Singh, 2021), (a) cross section view, (b) pictorial view from the downstream end with synthetic grass turf used for the floodplains.

### نتایج

است. در این الگوریتم، ابتدا تابع هدف و تمامی محدودیت‌ها یا قیدها که غیرخطی هستند، خطی شده و سپس به کمک روش برنامه‌ریزی خطی حل خواهند شد. مزیت الگوریتم پیشنهادی این است که کاربرد آن بسیار ساده بوده و زمان اجرای آن نیز بسیار کم است. به این منظور ابتدا از ۵ عمق جریان موجود (۰/۰۹۱، ۰/۱۰۰، ۰/۱۱۱، ۰/۱۳۵ و ۰/۱۶۲ متر)، ۲ عمق میانی (شامل ۰/۱۱۱ و ۰/۱۳۵ متر) به عنوان داده‌های واسنجی انتخاب شدند. سپس براساس حداقل‌سازی درصد خطای دبی جریان برای این دو عمق به عنوان تابع هدف (رابطه ۱۸)، مقادیر ضرایب  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  به کمک بهینه‌سازی در محیط اکسل استخراج شدند:

$$E_Q = \left| \frac{Q_m - Q_c}{Q_m} \right| \times 100 \quad (18)$$

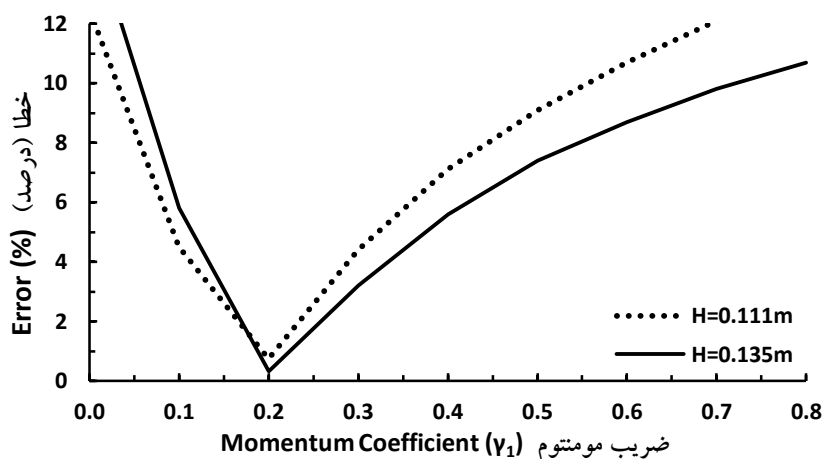
مومنتوم  $\gamma_1$  را به شدت افزایش می‌دهد. این در حالی است که در مرز تماس دو دشت سیلاب اول و دوم شرایط هندسی و هیدرولیکی تقریباً یکسان بوده و انتقال مومنتوم قابل توجهی بین این دو بخش اتفاق نخواهد افتاد. به این دلیل مقدار ضریب مومنتوم  $\gamma_2$  تقریباً ناچیز است. با توجه به این که در بعضی از رودخانه‌های سیلابی طبیعی تقریباً همین وضعیت حاکم است، احتمالاً مقادیر ضرایب مومنتوم فوق، کاربردی و قابل استفاده می‌باشند.

بهینه‌سازی ضرایب انتقال مومنتوم  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$ : بر اساس داده‌ها و اطلاعات کانال آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱)، محاسبات روش تجزیه قائم و نیز روش تجزیه تبدیلی انجام شد. برای انجام محاسبات روش تجزیه تبدیلی، مطابق روابط ۹ تا ۱۱ باید مقادیر بهینه ضرایب انتقال مومنتوم در مرزهای تماس مقطع اصلی-دشت سیلاب اول ( $\gamma_1$ ) و دشت سیلاب اول-دشت سیلاب دوم ( $\gamma_2$ ) تعیین گردند. برای تعیین این ضرایب، باید از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود که این روش‌ها از تنوع فراوانی برخوردار هستند. در این پژوهش از الگوریتم گرادینان کاهش‌یافته غیرخطی<sup>۱</sup> که در بسته نرم‌افزاری اکسل موجود است، استفاده شده

که،  $E_Q$  درصد خطای تخمین دبی جریان و  $Q_m$  و  $Q_c$  به ترتیب دبی‌های واقعی و محاسباتی هستند.

تغییرات درصد خطای دبی جریان به ازای مقادیر مختلف ضریب  $\gamma_1$  برای هر دو عمق موردنظر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار بهینه این ضریب برای هر دو عمق فوق در کانال سینگ (۲۰۲۱) حدود ۰/۲ است. بر خلاف ضریب  $\gamma_1$ ، ضریب  $\gamma_2$  تأثیر بسیار کمی بر دقت مدل‌سازی دبی جریان داشته و مقدار بهینه آن حدود ۰/۰۲ به دست آمد. دلیل این موضوع و نیز ناچیز بودن مقدار این ضریب به شرایط هندسی و هیدرولیکی کانال مورد مطالعه مرتبط است. در مرز تماس مقطع اصلی و دشت سیلابی اول، به دلیل عرض زیاد مقطع اصلی و زبری کم آن نسبت به دشت سیلابی اول، انتقال مومنتوم قابل توجهی اتفاق افتاده و ضریب

1- Nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG)



شکل ۱۱- بهینه‌سازی ضریب انتقال مومنتوم  $\gamma_1$  به ازای عمق‌های میانی ۰/۱۱۱ و ۰/۱۳۵ متر.

Figure 11. Optimization of momentum coefficient ( $\gamma_1$ ) for intermediate flow depths of 0.111 and 0.135 m.

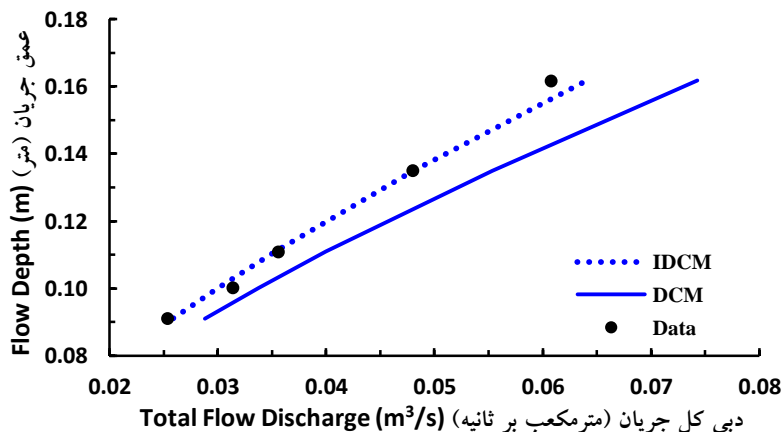
خطای متوسط این روش حدود ۹/۱ درصد و حداکثر این خطا حدود ۱۷/۴ درصد و در عمق جریان ۰/۱۶ متر به دست آمده است. بر خلاف روش تجزیه قائم، روش تجزیه تبادلی پیشنهاد شده در این پژوهش در تمامی عمق‌های جریان دارای عملکرد نسبتاً خوبی بوده و دبی جریان را به‌خوبی برآورد نموده است. متوسط خطای این روش حدود ۲/۶ درصد و حداکثر این خطا حدود ۴/۹ درصد به دست آمده است.

یکی از ضعف‌ها و محدودیت‌های مهم مدل‌های یک‌بعدی تحلیل جریان در مقاطع مرکب، دقت کم آن‌ها در تخمین دبی‌های جزئی (دبی مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی) است (۱۲، ۲۱). این در حالی است که دبی‌های جزئی و به‌ویژه دبی مقطع اصلی اهمیت زیادی در مباحثی مثل محاسبه دبی بار معلق و بستر رودخانه در زمان سیلاب و نیز طراحی مقطع پایدار رودخانه‌ها دارند. بر این اساس، قابلیت روش پیشنهادی در تخمین دبی مقطع اصلی و دشت سیلابی به‌کمک روابط ۱۲ تا ۱۴ بررسی شد. نتایج این بررسی در شکل ۱۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی تجزیه تبادلی، دبی مقطع اصلی را با دقت مناسبی (خطای متوسط حدود ۴/۹ درصد)

بعد از واسنجی ضرایب انتقال مومنتوم  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$ ، محاسبات روش تجزیه تبادلی برای عمق‌های جریان دلخواه با توجه به مقدار ثابت این دو ضریب انجام شد. نتایج منحنی‌های دبی- اشل کانال آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱) با هر دو روش تجزیه قائم و تبادلی به همراه مقادیر آزمایشگاهی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش تجزیه قائم در تمامی عمق‌های جریان دارای خطای زیادی است و با افزایش عمق جریان، خطای این روش تا حدودی افزایش می‌یابد. این موضوع با یافته‌های اثبات شده پژوهش‌گران مختلف در مقاطع مرکب کلاسیک و نیز رودخانه‌های طبیعی با دشت‌های سیلابی زیر همخوانی دارد (۲۱). در کانال آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱) به‌دلیل عرض زیاد مقطع اصلی نسبت به عرض دشت‌های سیلابی اول و دوم، گرادیان سرعت جریان حتی در عمق‌های بالا نیز زیاد بوده و باعث ایجاد اصطکاک و تنش برش ظاهری شده و نهایتاً خطای روش تجزیه قائم در تخمین دبی جریان کانال را افزایش می‌دهد. این در حالی است که در رودخانه‌ها و در شرایط وقوع سیل، معمولاً عرض دشت‌های سیلابی بیش‌تر از عرض مقطع اصلی است.

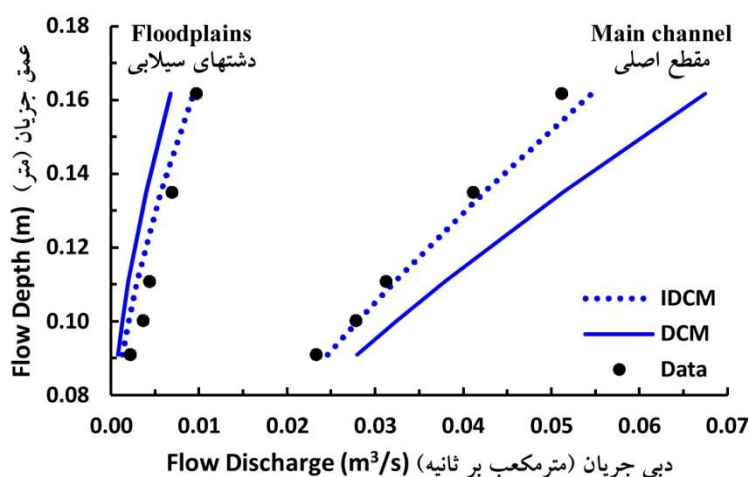
کارایی روش تجزیه تبدیلی بهتر از روش تجزیه قائم است.

برآورد نموده است. برای روش تجزیه قائم این خطا حدود ۱۷/۴ درصد است. برای دشت سیلاب نیز



شکل ۱۲- مقایسه روابط دبی-اشل محاسباتی و مشاهداتی برای دبی کل جریان.

Figure 12. Comparison of computed and measured stage-discharge curves for total flow.



شکل ۱۳- مقایسه روابط دبی-اشل محاسباتی و مشاهداتی برای دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی.

Figure 13. Comparison of computed and measured stage-discharge curves for main channel and floodplains.

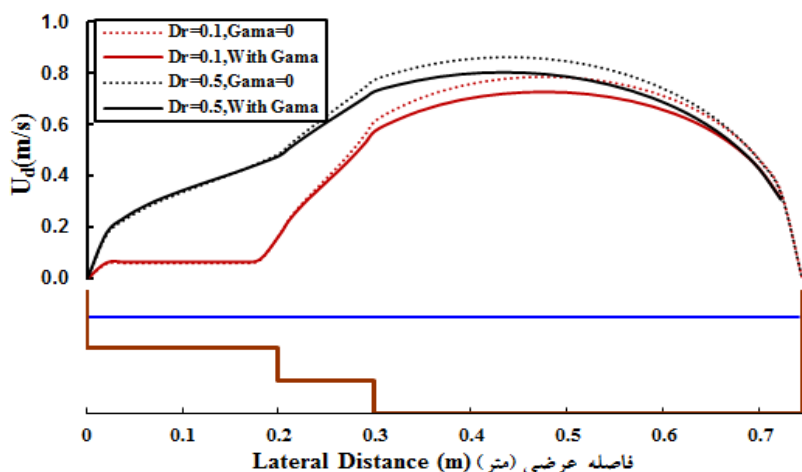
آیند. برای واسنجی مدل باید از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. به این منظور از تابع هدف حداقل‌سازی خطای دبی جریان استفاده شده و مقادیر این ضریب به صورت هم‌زمان به دست می‌آیند. ضریب اصطکاک  $f$  با ضریب زبری مانینگ مرتبط است و در کانال آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱) قابل برآورد است. برای ضریب لزجت گردابه‌ای ( $\lambda$ ) معمولاً از یک ضریب

واسنجی مدل شبه دوبعدی شیونو و نایت: برای حل معادله ۲۱ باید ۳ ضریب  $f$ ،  $\lambda$  و  $\beta_s$  معلوم باشند، این در حالی است که مقدار این ضرایب در مجاری روباز با توجه به شرایط خاص هندسی و هیدرولیکی متغیر است. بنابراین باید به کمک واسنجی مدل ریاضی بر اساس دبی جریان و یا داده‌های پروفیل عرضی سرعت مشاهداتی، مقادیر بهینه این ضرایب به دست



نسبت به این ضریب حساسیت بسیار زیادی نشان داد. مقدار بهینه ضرایب جریان‌های ثانویه نیز برای مقطع اصلی ۰/۱۵ و برای دشت‌های سیلابی اول و دوم ۰/۲۵- به دست آمد. در شکل ۱۴ اثر جریان‌های ثانویه در محاسبه توزیع عرضی سرعت به‌ازای دو عمق نسبی ۰/۱ و ۰/۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با لحاظ جریان‌های ثانویه، سرعت در مقطع اصلی کاهش یافته اما در دشت‌های سیلابی اول و دوم تغییر چندانی اتفاق نیفتاده است.

ثابت برای مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی استفاده می‌شود. همچنین شیونو و نایت (۱۹۹۱) و نایت و آبریل (۲۰۰۴) ضریب جریان‌های ثانویه برای مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی در مقاطع مرکب آزمایشگاهی را به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۲۵- به دست آورده‌اند. با حل متعدد معادله ۱۷ به‌ازای مقادیر مختلف ضریب  $\lambda$  در محدوده مجاز، مقدار بهینه این ضریب در کانال سینگ (۲۰۲۱) حدود ۰/۳ به دست آمد. قابل ذکر است که نتایج توزیع عرضی سرعت

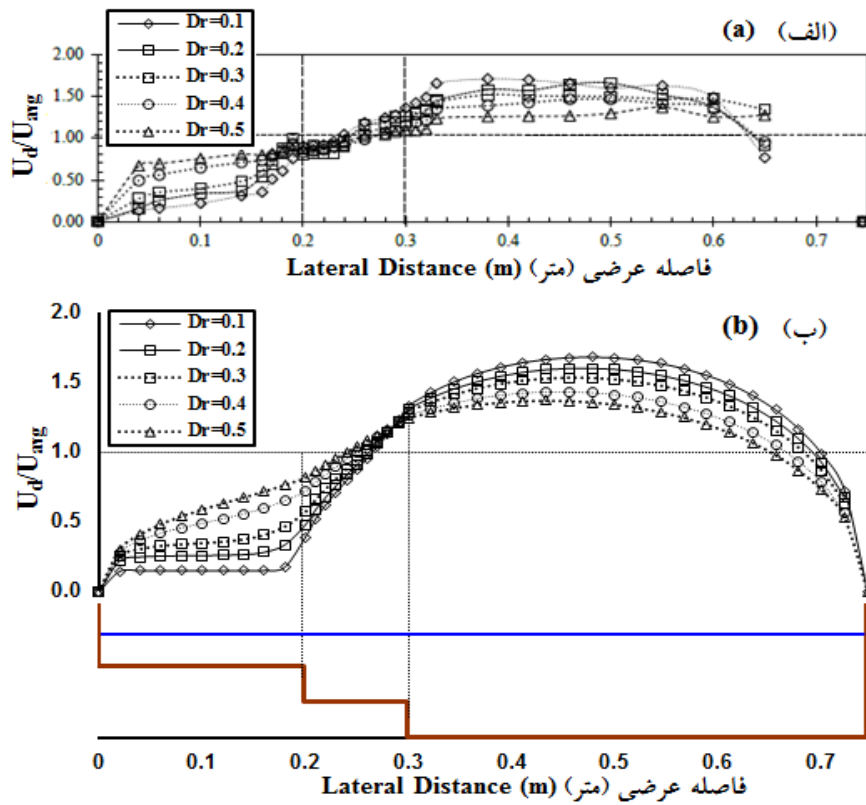


شکل ۱۴- تأثیر جریان‌های ثانویه بر توزیع عرضی سرعت در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی.

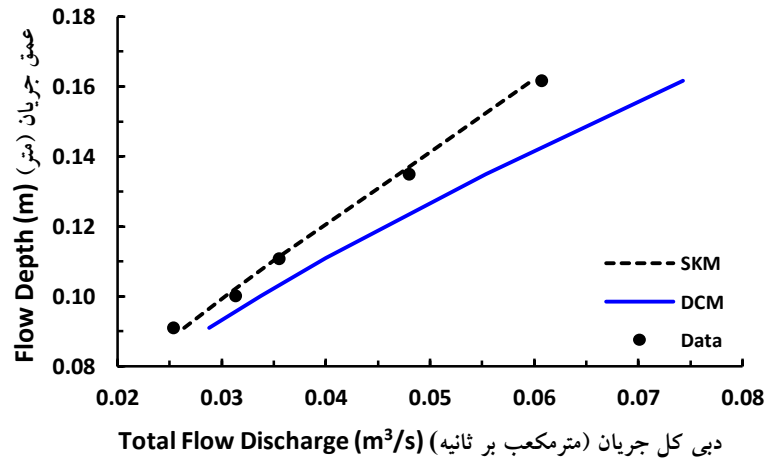
Figure 14. Secondary flow impact on lateral velocity distribution in main channel and floodplains.

در شکل ۱۵ نتایج محاسباتی توزیع عرضی سرعت به‌ازای عمق‌های نسبی ۰/۱-۰/۵ با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است ( $Dr = h_{int-2}/H$ ). روند کلی نتایج محاسباتی در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی با مقادیر مشاهداتی همخوانی مناسبی دارد. این مطابقت در لایه‌های برشی نیز تا حدود زیادی قابل مشاهده است. برای ارزیابی بهتر کارایی مدل شیونو و نایت، ابتدا با انتگرال‌گیری از توزیع عرضی سرعت، دبی کل و نیز دبی‌های جزئی جریان محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی سینگ (۲۰۲۱) مقایسه شد (شکل‌های

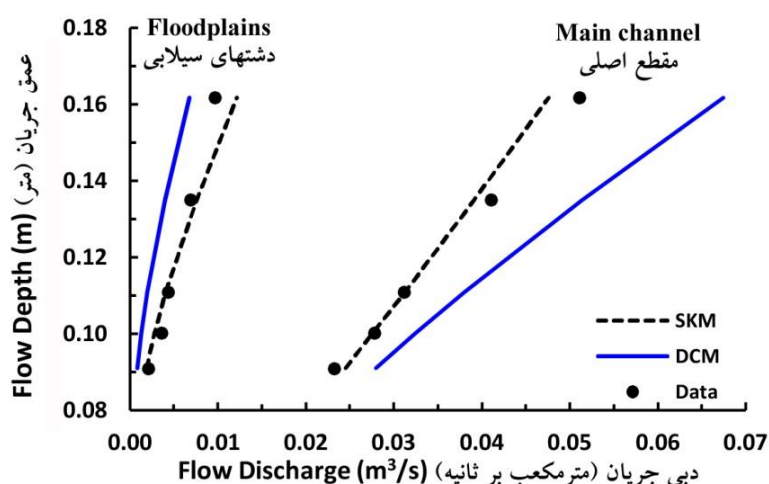
۱۶ و ۱۷). شکل ۱۶ نشان می‌دهد که نتایج مدل شیونو و نایت انطباق بسیار خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دبی کل دارد. میانگین و حداکثر خطای مدل شیونو و نایت در برآورد دبی کل جریان به ترتیب حدود ۲/۴ و ۴/۱ درصد است که از مدل‌های یک‌بعدی تجزیه مقطع و تجزیه تبادلی بهتر است. دقت این مدل در برآورد دبی‌های جزئی (شکل ۱۷) نیز مناسب است. میانگین و حداکثر خطای این مدل در تخمین دبی مقطع اصلی به ترتیب ۳/۶ و ۶/۹ درصد است که بیانگر دقت مناسبی است.



شکل ۱۵- مقایسه نتایج مشاهداتی (الف) و محاسباتی (ب) توزیع عرضی سرعت به‌ازای عمق‌های نسبی مختلف.  
Figure 15. Comparison of measured and computed lateral velocity distributions for different relative depths.



شکل ۱۶- مقایسه روابط دبی- اشل مشاهداتی و محاسباتی (از مدل شیونو و نایت) برای دبی کل جریان.  
Figure 16. Comparison of measured and computed (from SKM) stage-discharge curves for total flow.



شکل ۱۷- مقایسه روابط دبی-اشل مشاهداتی و محاسباتی (از مدل شیونو و نایت) برای دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی.

Figure 17. Comparison of measured and computed (from SKM) stage-discharge curves for main channel and floodplains.

#### داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

تمامی داده‌های این مقاله از رساله دکتری سینگ (۲۰۲۱) استخراج شده است. این داده‌ها تاکنون در چندین مقاله نیز منتشر شده و به راحتی قابل دسترس است.

#### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

#### مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:  
 نویسنده اول: استخراج داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله  
 نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، نظارت تحقیق و بازبینی مقاله،  
 نویسنده سوم: کدنویسی مدل‌ها در محیط اکسل، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل نتایج.

#### نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله بر مبنای قوانین فیزیک و مکانیک سیالات، دو مدل یک‌بعدی و دوبعدی برای تخمین دبی جریان در مقاطع مرکب چندسیلاب‌دستی که نمونه‌ای از رودخانه‌های سیلابی و نیز کانال‌های شهری هستند، توسعه داده شد. بعد از واسنجی این دو مدل بر اساس داده‌های آزمایشگاهی موجود، مشخص شد که کارایی این دو مدل برای استخراج رابطه دبی-اشل این مقاطع برای دبی کل جریان و نیز دبی مقطع اصلی دارای دقتی قابل قبول در محدوده طرح‌های مهندسی رودخانه است. این در حالی است که روش تجزیه قائم مقطع مرکب که هم‌اکنون دارای کاربرد گسترده‌ای در محاسبات پروفیل سطح آب، ساماندهی رودخانه و مدیریت سیلاب است، دارای خطای قابل توجهی می‌باشد. دقت مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی پیشنهادی این پژوهش برای تخمین دبی دشت‌های سیلابی چندان رضایت‌بخش نبود که دلیل عمده آن، بسیار کوچک بودن این دبی‌ها در کانال آزمایشگاهی است.

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

### حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است.

### منابع

- Vastilla, K. (2015). Flow-plant-sediment interactions: Vegetative resistance modeling and cohesive sediment processes. PhD thesis for School of Engineering, Aalto University.
- Chen, G., Zhao, S., Huai, W., & Gu. S. (2019). General model for stage-discharge prediction in multi-stage compound channels. *J. Hydraulic Research*, 57 (4), 517-533.
- Singh, P. K. (2021). Experimental study on the flow structure of asymmetric compound channels. PhD Dissertation, School of Civil Engineering, University of Liverpool, China.
- Wang, W., Huai, W., & Gao, M. (2014). Numerical investigation of flow through vegetated multi-stage compound channel. *J. Hydrodynamics*, Ser. B. 26 (3), 467-473.
- Singh, P. K., Tang, X., & Rahimi, H. (2023). Large-eddy simulation of compound channels with staged floodplains: flow interactions and turbulent structures. *Water*, 15, 983, <https://doi.org/10.3390/w15050983>.
- Ackers, P. (1992). Hydraulic design of two-stage channels. *J. Water and Maritime Engineering*, 96, 247-257.
- Shiono, K., & Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *J. Fluid Mechanics*, 222, 617-646.
- Bousmar, D., & Zech, Y. (1999). Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *J. Hydraulic Engineering*, 125 (7), 696-706.
- Devi, K., Khatua, K. K., & Khuntia, J. R. (2017). Discharge assessment in an asymmetric compound channel by zero shear interface method. *ISH J. Hydraulic Engineering*, 23 (2), 126-134.
- Ervine, D. A., Babaeyan-Koopaei, K., & Sellin, R. H. J. (2000). Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *J. Hydraulic Engineering*, 126, 653-669.
- Fernandes, J. N., Leal, J. B., & Cardoso, A. H. (2015). Assessment of stage-discharge predictors for compound open-channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 62-67.
- Huthoff, F., Roos, P. C., Augustijn, D. C. M., & Hulscher, S. J. M. H. (2008). Interacting divided channel method for compound channel flow. *J. Hydraulic Engineering*, 134 (8), 1158-1165.
- Kordi, H., Amini, R., Zahiri, A., & Kordi, E. (2015). Improved Shiono and Knight method for overflow modeling. *J. Hydrologic Engineering*, 20 (12), 04015041.
- Lambert, M. F., & Myers, R. C. (1998). Estimating the discharge capacity in straight compound channels. *Water, Maritime and Energy*, 130, 84-94.
- Lambert, M. F., & Sellin, R. H. J. (1996). Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. *J. Hydraulic Research*, 34 (3), 381-394.
- Singh, P. K., & Tang, X. (2020). Zonal and overall discharge prediction using momentum exchange in smooth and rough asymmetric compound channel flows. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 146 (9), DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001493.
- Singh, P. K., Tang, X., & Rahimi, H. (2021). Linear-scale models for discharge estimation: Asymmetric compound open channel flows. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, DOI:10.1680/jwama.20.00091.

18. Wark, J. B., James, C. S., & Ackers, P. (1994). Design of straight and meandering compound channels. Interim Guidelines on Hand Calculation Methodology, R & D Report 13, UK.
19. Wormleaton, P. R., & Merrett, D. J. (1990). An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/floodplain sections. *J. Hydraulic Research*, 28: 157-174.
20. Van Prooijen, B. C., Battjes, J. A., & Uijttewaal, W. S. J. (2005). Momentum exchange in straight uniform compound channel flow. *J. Hydraulic Engineering*, 131 (3), 175-183.
21. Ackers, P. (1993). Flow formulae for straight two-stage channels. *J. Hydraulic Research*, 31 (4), 509-531.
22. Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, H., & Zech, Y. (2004). Overbank flow in symmetrically narrowing floodplains. *J. Hydraulic Engineering*, 130 (4), 305-312.
23. Rodi, W. (1980). Turbulence models and their application in hydraulics-A state-of-the-art. IAHR Publication, DELFT, the Netherlands.
24. Abril, J., & Knight, D. W. (2004). Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model. *J. Hydraulic Research*, 42, 616-629.

