

روش ارزیابی نحوه توزیع سرعت متوسط و دبی جریان در رودخانه ناورد

فرناز دانشور وثوقی*

گروه مهندسی عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

Email: fdaneshvar.vousoughi@gmail.com

چکیده

بسیاری از پروژه‌های مهندسی رودخانه از جمله طراحی دبی‌های کنترل سیل، تنظیم مجدد کانال‌های رودخانه، حفاظت از ساحل و انتقال رسوب، نیازمند پیش‌بینی دقیق دبی جریان در مقطع مرکب از جمله رودخانه‌ها است. مدل شیونو-نایت (SKM) به عنوان یک ابزار توانمند برای مدل‌سازی جریان در کانال‌های منشوری مرکب شناخته شده است. این پژوهش از مدل SKM برای تخمین سرعت متوسط و دبی استفاده کرده است که بر اساس حل معادلات دو بعدی برای جریان‌های کانال باز با متوسط گیری از معادلات ناویه-استوکس حاصل شده است. مقادیر سرعت عمقی متوسط و دبی جریان، در ابتدا با مدل SKM برآورد شده و با داده‌های اندازه‌گیری در دوره زمانی ۹۲-۹۳ مقایسه گردید. در آخر رابطه بین عمق و دبی جریان (رابطه دبی-اشل) برای دوره زمانی ۹۲-۹۳ ارائه گردید. نتایج سرعت عمقی متوسط و توزیع‌های دبی جریان پیش‌بینی شده توسط مدل SKM در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که SKM می‌تواند به طور دقیق توزیع‌های سرعت پیش‌بینی کند اگر دو ضریب اصطکاک و زبری مانینگ بر اساس الگوهای دقیق انتخاب شوند. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که با داده‌های تجربی همخوانی خوبی ندارند. بطوریکه دبی و سرعت عمودی بطور متوسط به ترتیب با $3/8$ و $12/5$ درصد خطا برآورد شده است.

کلمات کلیدی: تخمین، شیونو-نایت، مقاطع مرکب، RMSE¹

¹ Root Mean square Error (RMSE)

تخمین درست سرعت و دبی جریان در رودخانه‌ها برای بیشتر طرح‌ها و پروژه‌های مهندسی به عنوان اطلاعات اولیه دارای اهمیت است. با توجه به اهمیت بسیار زیاد دبی جریان در محاسبات هیدرولیک رودخانه‌ها روش‌های زیادی وجود دارد و تا حال اصلی ترین روش محاسبه دبی جریان، اندازه‌گیری سرعت در عرض رودخانه و پس از آن انتگرال‌گیری از توزیع سرعت می باشد. اندازه‌گیری میدانی توزیع سرعت در رودخانه‌ها کاری زمان‌بر و دارای هزینه های زیاد مالی بوده و در زمان وقوع سیلاب، بسیار خطیر خواهد بود. با در نظر گرفتن ویژگی رودخانه‌ها و همچنین عدم وجود داده‌های هیدرولیکی مناسب، پیشنهاد راه‌حل و راهکارهای مناسب امری لازم و ضروری می‌باشد.

مسئله تخمین سرعت جریان در کانال‌ها به دلیل ماهیت سه بعدی جریان، به ویژه در رودخانه‌ها موضوع بسیار پیچیده‌ای است که از دیرباز مورد توجه محققین زیادی بوده است. از آن جمله می‌توان به روش‌های هیدرولیکی دو بعدی که توسط شیونو-نایت (۲۰)، وارک و همکاران (۲۲)، سلین (۱۸)، رضائی و نایت (۱۷) توسعه یافته است، اشاره نمود. فغفور مغربی و گیوه‌چی (۸) به تخمین توزیع سرعت متوسط و تنش برشی در کانال‌های باز با مدل SKM پرداختند. نتایج بدست آمده از توزیع سرعت متوسط و تنش برشی توسط مدل و اطلاعات آزمایشگاهی نشان داد اگر دو پارامتر اصطکاک و جریان ثانویه بر اساس الگوهای صحیحی انتخاب شوند، مدل SKM می‌تواند توزیع سرعت و تنش برشی را به درستی تخمین بزند. قلی‌نژاد و همکاران (۴) با استفاده از جستجوی ژنتیکی، رابطه ساده و بدون بعدی برای محاسبه سرعت جریان در عرض رودخانه استخراج کرد. از متغیرهای بدون بعد عمق نسبی جریان و میزان تشابه جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی (کوهیرنس) به عنوان پارامترهای ورودی اصلی استفاده شده است. برای انجام این کار، داده‌های توزیع سرعت در عرض مقاطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای در دو گروه واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفتند. با مقایسه آماری نتایج محاسباتی، ضریب تعیین و ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطا برای داده‌های واسنجی به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۰۶۳ و برای مرحله صحت‌سنجی به ترتیب حدود ۰/۹۱ و ۰/۱۲۷ به دست آمده است.

محسنی و همکاران (۷) جریان در کانال مرکب را با وجود پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق در سیلاب دشت به منظور معرفی مناسب‌ترین مدل برای محاسبه فاکتور سطحی، ضریب لزجت گردابه‌ای و پارامتر جریان ثانویه شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از یک مدل دوبعدی تحلیلی برای پیش‌بینی سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب استفاده کردند و به منظور صحت‌سنجی نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. با توجه به مدل‌های مختلف ارائه شده برای ضریب لزجت گردابه‌ای و پارامتر جریان ثانویه، مدل آلاوین و چو به عنوان مناسب‌ترین مدل بر اساس کمترین اختلاف میان داده‌های مشاهداتی و محاسباتی معرفی شد. مدل شیونو-نایت برای تعیین توزیع عرضی سرعت متوسط عمقی و تنش برشی نیازمند واسنجی است. کردی و همکاران (۵) سرعت جریان را در مقاطع مرکب مستقیم با روش شیونو - نایت (۱۹) و نیز روش اروین و همکاران در چند مقطع مرکب آزمایشگاهی و رودخانه‌ای مقایسه کردند. نتایج رابطه‌های پیشنهادی در همه مقاطع مرکب مراحل واسنجی و صحت‌سنجی بیانگر دقت و کارایی مناسب این روش در حل توزیع عرضی سرعت می‌باشد. دقت این روش نسبت به مدل قبلی شیونو-نایت (۲۰) بهتر است. لشکرآرا و دهقانی (۶) پارامترهای مؤثر بر واسنجی مدل شیونو-نایت از جمله لزجت گردابی، جریان ثانویه و ضریب اصطکاک کانال‌های دوزنقه‌ای روباز را شناسایی کردند. برای این منظور از نتایج آزمایشگاهی محققین پیشین برای بهینه‌سازی پارامترهای سه گانه مذکور استفاده شد و سپس با استفاده از روش بهینه سازی تکاملی، عملیات واسنجی پارامترها انجام گردید. نتایج تحقیق نشان داد که برای واسنجی مدل شیونو-نایت مقدار پارامترهای لزجت گردابی ثابت نبوده و در شرایط مختلف مقدار متناسب با شرایط مسئله را طلب می‌نماید. مقایسه نتایج تنش برشی بستر و جداره حاصل با نتایج آزمایشگاهی، حاکی از دقت مطلوب واسنجی پارامترها می باشد. ظهیری (۳) با حل عددی مدل ریاضی شبه دوبعدی شیونو-نایت به کمک روش اجزاء محدود، ابتدا توزیع عرضی سرعت در رودخانه میناب (ایستگاه برنطین) با استفاده از داده‌های صحرائی واسنجی شد. بیشینه خطای مدل در برآورد دبی جریان سیلاب حدود ۱۳ درصد به دست آمد. سپس توزیع عرضی تنش برشی برای سیلاب سال ۱۳۷۴ شبیه‌سازی شده و به کمک

آن تغییرات هندسه مقطع عرضی رودخانه تحلیل شد. نتایج این تحقیق نشان داد که وضعیت فرسایش و رسوب-گذاری در عرض رودخانه براساس تنش‌های برشی به دست آمده از مدل ریاضی به واقعیت بسیار نزدیک می باشد. ظهیری و همکاران (۲۳) مدل دو بعدی SKM را برای پیش‌بینی دبی سدهای مرکب بر اساس فرضیات ساده-سازی شده جریان انجام دادند و نتایج مدل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج آشکار کرد میانگین خطای مطلق دبی محاسباتی ۳/۸ درصد با دبی واقعی دارد. لیائو و همکاران (۱۳) توزیع دو بعدی سرعت را در کانال-های روباز با استفاده از روش SKM برای جریان‌های آشفته در کانال‌ها کاربرد دارد بکار بستند. با توجه به فیزیک کانال از جمله پارامترهای هیدرولیکی از قبیل: ضریب اصطکاک، لزجت گردابه‌ای و جریان ثانویه، دبی محاسباتی تطابق خوبی با نتایج داده‌های آزمایشگاهی داشته و پارامترهای سرعت و تنش برشی هم نتایج خوبی را از خود نشان دادند. اونال و همکاران (۲۱) با روش‌های مختلف کانال تکی (SCM)، روش کانال تقسیم یافته (DCM)، روش کوهرنس (COHM) و روش شیونو-نایت، ظرفیت دبی در کانال‌های مرکب را محاسبه و با روش شبکه‌عصبی پرسپترون با الگوریتم لوبنبرگ-مارکوت مقایسه کردند. نتایج نشان داد روش شبکه‌عصبی بهتر از مدل‌های دیگر دبی را محاسبه کردند. دوی و خاتا (۹) معادله شیونو-نایترا با در نظر گرفتن یک پانل جدید در عمق لایه برشی حل تحلیلی کردند. آن‌ها با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در عمق لایه برشی برای پانل‌های جدید، برای کانال‌ها و داده‌های رودخانه طبیعی و آزمایشگاهی نتایج رضایت بخشی را فراهم کردند. لیو و همکاران (۱۴) رویکردی را برای مدلسازی سرعت متوسط-عمق و تنش برشی بستر در کانال مرکب با پوشش گیاهی ارائه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل SKM در صورت عدم توجه به جریان ثانویه منجر به خطای محاسباتی بزرگی مخصوصاً در کانال اصلی می‌شود. حمیدفر و همکاران (۱۱) روش‌های مختلف یک بعدی و دو بعدی عددی از قبیل روش کانال تکی، کانال‌های تقسیم شده و روش کوهرنس را برای پیش‌بینی دبی در کانال‌های مرکب در مسیر سیلاب دارای پوشش استفاده کردند. در پژوهش ایشان نتایج آزمایشگاهی برای کانال‌های مرکب با پوشش و بدون پوشش ارائه شده است. در مطالعات مغربی و احمدی

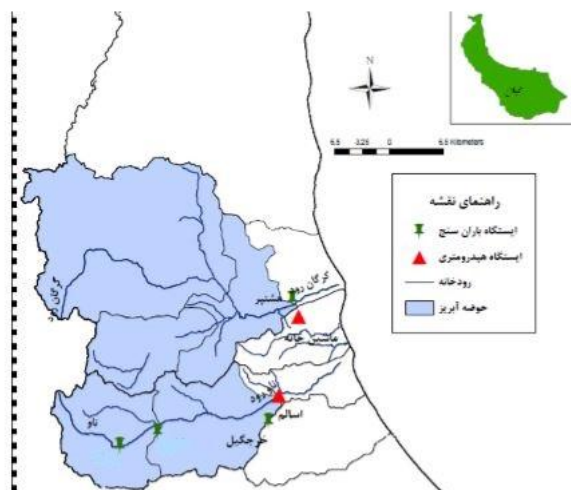
(۱۵) از رویکرد جدیدی در برآورد سرعت در دو رودخانه چین و سه رودخانه انگلستان استفاده کردند. نتایج دقت بالایی روش پیشنهادی مغربی را در برآورد سرعت بخوبی نمایش داد. مغربی و همکاران (۱۶) روش جدیدی را برای تخمین دبی در کانال‌های مرکب ارائه دادند. ایشان این رویکرد جدید را با مدل‌های مختلف SCM، DCM، WDCM، EDM و COHM مقایسه کردند. مدل پیشنهادی در مقایسه با دیگر مدل‌ها کمترین خطا را گزارش کرد. فرسوده و همکاران (۱۰) قابلیت دو مدل SKM و SPM را در برآورد سرعت متوسط عمقی کانال-های مرکب در مقابل نتایج آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج دقت بالای مدل SPM را در مقایسه با مدل SKM نشان داد. مغربی و علی (۱۶) از روش جدیدی برای پیش-بینی پروفیل سطح آب در کانال‌های مرکب استفاده کردند. نتایج نشان داد روش پیشنهادی جدید در مقایسه با مدل-های HEC-RAS و CES از دقت خوبی برخوردار است. کاووسی‌زاده و همکاران (۱۲) دبی را در کانال‌های مرکب با رویکردی جدیدی که زبری مرکب را لحاظ کرده است، بررسی کردند. نتایج نشان داد روش جدید با لحاظ زبری مرکب نسبت به روش‌های سنتی از دقت بالایی برخوردار است. احمدی و همکاران (۱) روش جدیدی را برای رسم منحنی دبی-اشل بکار بستند. آن‌ها با مینیمم کردن پارامترهای تأثیرگذار بر داده‌های مشاهداتی و تخمینی روش دقیقی را برای رابطه دبی-اشل در کانال‌های منشوری مرکب معرفی کردند.

با توجه به مطالعات بالا مدل SKM توانسته است پروفیل سرعت متوسط عمقی و تنش برشی را بخوبی در مقاطع مرکب تخمین بزند. با توجه به اینکه در اکثر مطالعات گذشته بخصوص پژوهش‌های داخلی بجای استفاده از داده‌های مقاطع مرکب واقعی (رودخانه‌ها) از داده‌های آزمایشگاهی آن‌ها در این مدل مطالعه شده است. لذا در این مطالعه از مدل SKM برای برآورد سرعت متوسط و دبی در عمق رودخانه ناورود استفاده گردیده است. در ادامه هم‌چنین، رابطه دبی-اشل در این رودخانه بررسی گردید.

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

حوضه و به موازات طول آن، در جریان است. مساحت این حوضه ۲۷۴ کیلومتر مربع است که پوشش گیاهی آن از دو تیپ جنگل و مرتع تشکیل یافته است. حداکثر ارتفاع آن از سطح دریا برابر ۳۰۰۰ متر بوده که از ۲۰۰۰ متری فاقد جنگل است و برف گیر است. شکل ۱ محدوده حوضه آبریز معرف ناورود اسالم و موقعیت ایستگاه هیدرومتری خرگیل را نشان می‌دهد. شکل ۲ نیز مقطع رودخانه را در این ایستگاه نمایش می‌دهد.

به منظور بررسی کارایی روش SKM و بررسی دقت برنامه کدنویسی شده، از حوضه آبریز ناورود اسالم، استفاده گردیده است که در حوضه آبریز اصلی دریاچه‌ی خزر و زیر حوضه آبریز تالش و مرداب انزلی، قرار دارد. این حوضه آبریز در شمال ایران و در غرب استان گیلان، در محدوده‌ی $35^{\circ} 48'$ تا $36^{\circ} 37'$ درجه‌ی طول شرقی و $45^{\circ} 37'$ تا $48^{\circ} 37'$ درجه عرض شمالی، واقع گردیده است. حوضه ناورود، مستطیلی شکل است و رودخانه اصلی آن، در وسط



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز ناورود اسالم در شهرستان تالش، استان گیلان

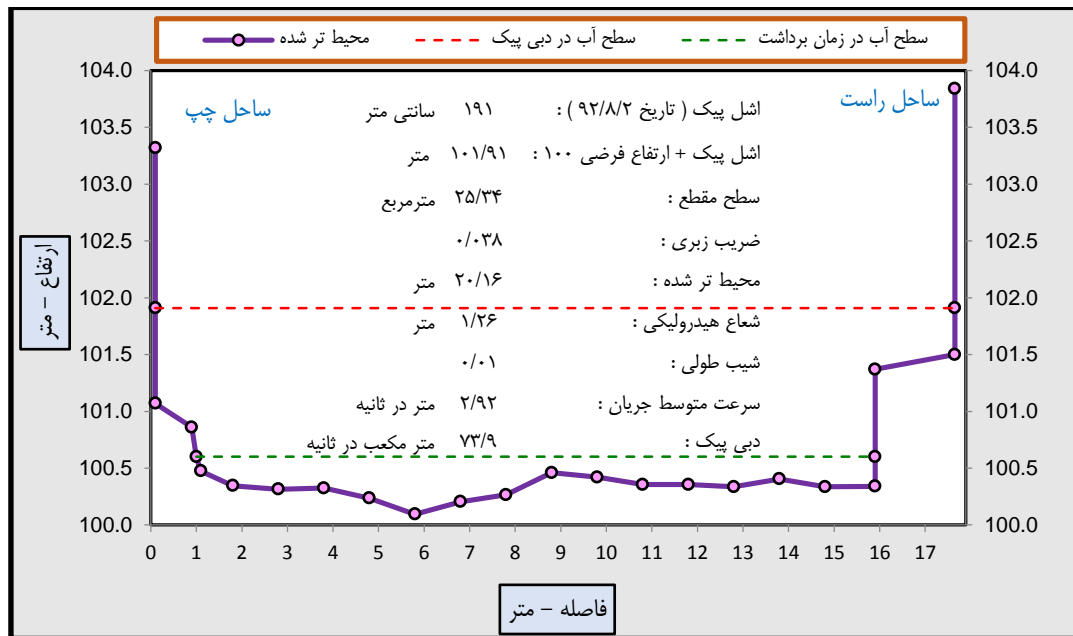


شکل (۲): ایستگاه هیدرومتری خرگیل اسالم

پیک $Q (m^3/s)$ آورده شده و هم‌چنین در جداول نیز داده‌هایی نظیر فاصله نقاط برداشت شده بستر برای اعماق مختلف سطح آب در زمان برداشت $y (m)$ ، (زیرا سرعت نقاط برداشت شده برای این مقدار از سطح آب اندازه‌گیری شده است.) عمق آب $H (m)$ ، سطح مقطع $A (cm^2)$ ، سرعت نقطه‌ای $U (m/s)$ و دبی متناظر با آن $Q (m^3/s)$

در ادامه، مقاطع مورد آزمایش و جدول‌های مربوط به آن، نمایش داده خواهد شد. در هر یک از این مقاطع اطلاعات پایه هم‌چون اشل پیک $H (m)$ ، سطح مقطع $A (cm^2)$ ، ضریب زبری n ، محیط ترشده $P (m)$ ، شعاع هیدرولیکی $R (m)$ ، شیب طولی S_0 و دبی در زمان اشل

بیان گردیده است. برای نمونه شکل ۳ و جدول ۱ اطلاعات مقطع رودخانه ناورود را برای تاریخ ۱۳۹۳/۲/۱۷ نمایش می- دهد. در این مقطع، مساحت ۹۵/۳۴ سانتی متر مربع، محیط تر شده ۲۰/۱۶ متر، ضریب زبری ۰/۰۳۸، شیب طولی ۰/۰۱، سرعت متوسط جریان ۲/۹۲ متر بر ثانیه و دبی اوج ۷۲/۹ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.



شکل (۳): مقطع رودخانه ناورود (تاریخ برداشت ۱۳۹۳/۲/۱۷)

جدول (۱): مقادیر سرعت برداشت شده از رودخانه ناورود در تاریخ ۹۳/۲/۱۷

شماره مقطع	فاصله (متر)	عمق (متر)	سرعت (متر بر ثانیه)		عمق متوسط (متر)	عرض (متر)	سطح مقطع (مترمربع)	دبی (مترمکعب در ثانیه)
			مقطع	نقطه ای				
۱	۰	۰/۱۱	۰/۲۷۱	-	-	-	-	-
۲	۱	۰/۱۴	۰/۶۴۷	۰/۴۵۹	۰/۱۳	۱/۰۰	۰/۱۳۰	۰/۰۶۰
۳	۲/۵	۰/۲۹	۰/۵۴۹	۰/۵۹۸	۰/۲۲	۱/۵۰	۰/۳۳۰	۰/۱۹۷
۴	۴	۰/۲۰	۰/۸۸۵	۰/۷۱۷	۰/۲۵	۱/۵۰	۰/۳۷۵	۰/۲۶۹
۵	۵/۵	۰/۱۹	۰/۷۳۵	۰/۸۱۰	۰/۲۰	۱/۵۰	۰/۳۰۰	۰/۲۴۳
۶	۷	۰/۳۰	۱/۰۲۷	۰/۸۸۱	۰/۲۵	۱/۵۰	۰/۳۷۵	۰/۳۳۰
۷	۸/۵	۰/۲۴	۰/۷۳۵	۰/۸۸۱	۰/۲۷	۱/۵۰	۰/۴۰۵	۰/۳۵۷
۸	۱۰	۰/۳۱	۰/۹۴۷	۰/۸۴۱	۰/۲۸	۱/۵۰	۰/۴۲۰	۰/۳۵۳
۹	۱۱/۵	۰/۳۹	۱/۲۴۸	۱/۰۹۸	۰/۳۵	۱/۵۰	۰/۵۲۵	۰/۵۷۶
۱۰	۱۳	۰/۳۳	۰/۸۹۴	۱/۰۷۱	۰/۳۶	۱/۵۰	۰/۵۴۰	۰/۵۷۸
۱۱	۱۴/۵	۰/۳۰	۰/۵۷۶	۰/۷۳۵	۰/۳۲	۱/۵۰	۰/۴۸۰	۰/۳۵۳
۱۲	۱۵/۷	۰/۳۲	۰/۲۰۴	۰/۳۹۰	۰/۳۱	۱/۲۰	۰/۳۷۲	۰/۱۴۵

در این مطالعه برای مقاطع مختلف اشاره شده در جدول ۱، ضریب اصطکاک به دست آمده از ضریب زبری (معادله ۱) به عنوان یک مقدار مبنا در نظر گرفته شده است سپس با توجه به آن، ضرایبی به طور فرضی (با توجه به هندسه مقاطع

$$f = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} \quad (1)$$

با فرض جریان ماندگار ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) و یکنواخت ($\frac{\partial}{\partial x} = 0$) و صرفه نظر از اصطکاک ناشی از لزجت ($v\nabla^2 U$) در مقایسه با تنش‌های برشی رینولدز، معادله‌ی (۱) به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial y} (UV) + \frac{\partial}{\partial z} (UW) \right) = \rho g S_0 + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho u'v') + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho u'w') \quad (۴)$$

رابطه‌ی (۴) توازن بین انتقال اندازه حرکت ناشی از جریان-های ثانویه (یعنی طرف چپ معادله) و نیروی وزن و تبادل آشفتگی ناشی از تنش‌های برشی رینولدز را، بیان می‌کند. برای به دست آوردن شکل متوسط‌گیری شده معادله‌ی (۴)، ضروری می‌باشد که از معادله فوق در جهت عمودی Z از تراز بستر Z_b تا سطح آب Z_s انتگرال‌گیری نمود. به دلیل فرضیه جریان یک بعدی در راستای حرکت سیال، فرض می‌گردد که سطح آب در راستای عرضی یا جانبی به صورت افقی باقی خواهد ماند، بنابراین $\frac{\partial z_s}{\partial y} = 0$. برای انتگرال‌گیری از جمله‌ی اول عبارت سمت چپ و جملات تنش‌های برشی رینولدز در طرف راست معادله، قانون لایبنیتز مورد نیاز می‌باشد. قانون لایبنیتز^۲ به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{d}{dt} \int_{A(t)}^{B(t)} f(x,t) dx = \int_{A(t)}^{B(t)} \frac{\partial}{\partial t} f(x,t) dx + B'(t)f(B(t),t) - A'(t)f(A(t),t) \quad (۵)$$

متوسط‌گیری از عمق، برای جمله‌ی اول معادله‌ی (۱) با استفاده از قانون لایبنیتز، به شرح زیر می‌باشد:

$$\int_{z_b}^{z_s} \rho \frac{\partial}{\partial y} (UV) dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{z_s} \rho UV dz - \rho(UV)_{z_s} \frac{\partial z_s}{\partial y} + \rho(UV)_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (۶)$$

دو جمله‌ی آخر معادله‌ی (۶) برابر صفر هستند: زیرا فرض می‌گردد که سرعت در بستر صفر می‌باشد و بنابراین $U = V = 0$. فرض می‌گردد که سطح آب در راستای y افقی باقی خواهد ماند، بنابراین $\partial z_s / \partial y = 0$. جمله‌ی دوم طرف چپ، به صورت زیر متوسط‌گیری عمق می‌گردد:

$$\int_{z_b}^{z_s} \frac{\partial}{\partial z} (UW) dz = (UW)_{z_s} - (UW)_{z_b} = 0 \quad (۷)$$

رابطه‌ی ۷ برابر با صفر می‌باشد: زیرا مولفه‌ی عمودی سرعت W در بستر و سطح آب، به دلیل فرض‌هایی که پیش‌تر در نظر گرفته شد صفر است (۱۹).

سپس سرعت متوسط عمقی و دبی توسط مدل SKM محاسبه می‌گردد. معیار ارزیابی بین مقادیر تخمینی توسط مدل SKM و مقادیر مشاهداتی رودخانه ناورود RMSE (جذر میانگین مجذور مربعات خطا) می‌باشد که در زیر معرفی گردیده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G_{com_i} - G_{obs_i})^2}{N}} \quad (۲)$$

N تعداد مقادیر مشاهداتی، G_{com_i} مقادیر تخمینی و G_{obs_i} مقادیر مشاهداتی برای متغیرهای سرعت متوسط عمقی و دبی می‌باشد.

روش شیونو-نایت^۱ (SKM)

در این قسمت از پژوهش به فرضیات و مفاهیم روش شیونو-نایت (SKM) که یک مدل تئوری بر مبنای معادلات اندازه حرکت ناویه-استوکس متوسط‌گیری شده در عمق برای جریان یکنواخت می‌باشد، پرداخته می‌شود. روش شیونو-نایت (SKM) که بر پایه متوسط عمقی معادله اندازه حرکت، بنا گردیده توانایی مناسب برای مدل‌سازی ساختارهای پیچیده جریان‌های ثانویه، در کانال‌های باز را دارا می‌باشد. SKM به عنوان یک مدل دو بعدی شناخته شده، مدل تک‌بعدی را بهبود بخشیده و مانند مدل سه‌بعدی پیچیده نیست (۱۹).

معادلات حاکم بر SKM

معادله اندازه حرکت ناویه-استوکس در امتداد جریان، به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} U^2 + \frac{\partial}{\partial y} (UV) + \frac{\partial}{\partial z} (UW) \right) = \rho X - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho v \nabla^2 U - \rho \left(\frac{\partial}{\partial x} u'u' + \frac{\partial}{\partial y} u'v' + \frac{\partial}{\partial z} u'w' \right) \quad (۳)$$

که در آن U, V و W به ترتیب مولفه‌های سرعت متوسط در امتداد جریان، در امتداد عرضی و در امتداد عمود بر بستر می‌باشند. ρ چگالی آب، X مولفه‌ی نیروی حجمی در راستای جریان (نیروی وزن)، P فشار، v لزجت سینماتیکی و $-\rho u'u'$ ، $-\rho u'v'$ و $-\rho u'w'$ تنش‌های برشی رینولدز ناشی از آشفتگی می‌باشند.

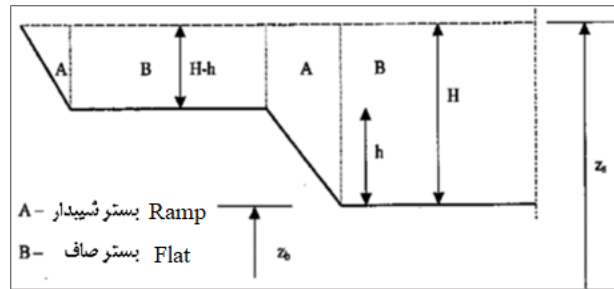
^۲Leibniz

^۱The Shiono and Knight Method

راه حل تحلیلی روش شیونو-نایت

دوزنقه‌ای به چهار زیر ناحیه، می‌توان حداقل دو ناحیه‌ی متفاوت که با تغییرات شیب بستر کانال، مرتبط هستند، شناسایی نمود (شکل ۴). باید توجه داشت که در یک کانال مرکب مستطیلی، سطح مقطع، می‌تواند حداقل، به سه زیر ناحیه تقسیم گردد (یک زیر ناحیه در کانال اصلی و دو زیر ناحیه در سیلاب دشت‌ها).

در این بخش، مقدمه‌ای مختصر درمورد مفهوم و فرضیات حل تحلیلی روش شیونو-نایت ارائه گردیده است. شیونو و نایت (۲۰) با این فرض که هر سطح مقطع را می‌توان به زیر ناحیه‌هایی با بستر صاف و بستر شیبدار، تقسیم نمود؛ با تقسیم نصف یک کانال مرکب با مقطع



شکل (۴): مشخصه‌های هندسی کانال

پس از تقسیم شدن سطح مقطع به تعدادی زیر ناحیه مجزا که در آن سه ضریب اصطکاک (f)، لزجت چرخشی (λ) و جریان ثانویه (Γ) مشخص گردیدند، مقادیر U_d و τ_b براساس توابعی بر حسب y ، محاسبه می‌گردند. پس از آن که سطح مقطع، به تعدادی زیر ناحیه متفاوت تقسیم گشت، با اعمال شرایط مرزی، مجموعه‌ای از معادلات خطی حاصل می‌گردد که در آن‌ها، ضرایب A نامشخص می‌باشند (معادلات ۷ و ۸). این معادلات سپس باید حل گردد تا توزیع سرعت متوسط در عمق، U_d ، به دست آمده از طریق آن، توزیع جانبی تنش برشی مرزی، τ_b ، و دبی جریان، محاسبه گردند.

نتایج و بحث

به علت تاثیر ناچیز ضریب متغیر جریان ثانویه Γ و همچنین در دست نبودن مقادیر درست ضریب اصطکاک f ، برای هر پنل به طور مجزا به مقدار ثابت در نظر گرفته شده‌اند. ضریب اصطکاک به دست آمده از ضریب زبری (معادله ۱) به عنوان یک مقدار مینا در نظر گرفته شده است. در تمامی این مقاطع به علت نداشتن سیلاب‌دشت ضریب λ برای تمامی زیر ناحیه‌ها مقدار استاندارد ۰/۰۷ منظور گردید. برای محاسبه منحنی دبی اشل و سرعت متوسط از مجموعه داده‌های مربوط به سال (۹۳-۹۲) استفاده گردیده است.

مقادیر ضریب همبستگی و میانگین جذر مربعات خطا بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی پارامترهای سرعت و دبی

مطابق نظر شیونو-نایت (۲۰) حل تحلیلی بین یک ناحیه با عمق ثابت (بستر صاف) و یک ناحیه با بستر شیبدار، متفاوت است (شکل ۳).

برای ناحیه‌ی با بستر مسطح، عبارت تحلیلی U_d به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$U_d = [A_1 e^{\gamma y} + A_2 e^{-\gamma y} + k]^{1/2} \quad (7)$$

که در آن:

$$\beta = \frac{\Gamma}{\rho g H S_0} \quad \text{و} \quad k = \frac{8 g S_0 H}{f} (1 - \beta) \gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \left(\frac{f}{8}\right)^{1/4} \frac{1}{H}$$

هم‌چنین، عبارت تحلیلی U_d برای ناحیه با شیب جانبی (بستر شیبدار) به صورت زیر می‌باشد:

$$U_d = [A_3 \xi^\alpha + A_4 \xi^{-\alpha-1} + \omega \xi + \eta]^{1/2} \quad (8)$$

که پارامترهای آن طبق معادلات زیر بیان می‌گردد:

$$\omega = \frac{g S_0}{\frac{(1+s^2)^{1/2}}{s} \left(\frac{f}{8}\right) - \frac{\lambda}{s^2} \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}} \alpha = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s(1+s^2)^{1/2}}{\lambda} (8f)^{1/2}}$$

$$\eta = \frac{\Gamma}{\frac{(1+s^2)^{1/2}}{s} \rho \left(\frac{f}{8}\right)}; \quad \omega \xi = H + \frac{y+b}{s} \xi = H - \frac{y-b}{s}$$

برای ۱۱ تاریخ برداشت مربوط به سال (۹۲-۹۳) در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): مقادیر مشاهداتی و محاسباتی پارامترهای سرعت و دبی

RMSE		R		Γ	λ	f	n	تاریخ برداشت
Q (m ³ /s)	U _d (m/s)	Q (m ³ /s)	U _d (m/s)					
۰/۱۰۱۳۱۲	۰/۳۲۷۶۵۴	۰/۹۴۴۰۹۹	۰/۴۷۸۶۹۱	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۲۲۱۸	۰/۰۴۰	۹۲/۷/۴
۰/۰۱۵۴۶۵	۰/۱۵۹۰۸۰	۰/۹۱۸۵۸۰	۰/۸۲۴۵۹۶	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۴۸۸	۰/۰۳۲	۹۲/۸/۱
۰/۱۳۴۲۳۲	۰/۳۴۵۸۳۲	۰/۸۹۹۷۰۷	۰/۸۶۵۶۹۸	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۴۸۸	۰/۰۳۲	۹۲/۹/۶
۰/۱۴۱۱۵۶	۰/۳۴۷۳۹۱	۰/۹۲۳۷۸۱	۰/۸۵۳۷۸۴	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۶۹۶	۰/۰۳۸	۹۲/۱۰/۴
۰/۱۲۴۶۹۱	۰/۳۲۵۰۲۶	۰/۹۱۷۹۲۹	۰/۷۹۶۹۶۹	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۹۲۸	۰/۰۴۰	۹۲/۱۱/۳
۰/۱۷۷۸۷۲	۰/۳۹۹۴۵۵	۰/۹۴۸۷۸۴	۰/۸۷۸۳۲۷	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۷۷۱	۰/۰۴۰	۹۲/۱۲/۷
۰/۱۹۸۵۳۶	۰/۴۰۱۹۹۷	۰/۹۳۵۶۳۳	۰/۸۶۵۷۰۲	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۶۵۱	۰/۰۴۰	۹۳/۱/۲
۰/۰۸۸۵۰۳	۰/۲۸۹۳۴۱	۰/۹۲۷۶۴۱	۰/۸۵۱۷۴۵	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۸۸۸	۰/۰۴۰	۹۳/۲/۲
۰/۱۱۲۲۰۳	۰/۳۳۵۲۰۵	۰/۹۳۷۷۰۷	۰/۷۴۲۹۳۳	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۸۵۶	۰/۰۳۹	۹۳/۳/۱
۰/۰۵۱۴۹۸	۰/۲۷۳۱۱۸	۰/۹۵۱۴۹۹	۰/۷۵۴۹۰۲	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۱۹۴۲	۰/۰۳۹	۹۳/۴/۱۱
۰/۰۶۶۶۰۷	۰/۲۸۵۰۳۱	۰/۹۳۸۱۴۵	۰/۶۳۰۱۵۳	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۲۰۰۰	۰/۰۳۸	۹۳/۵/۱

مقادیر سرعت و دبی مشاهداتی و محاسباتی را در تاریخ برداشت ۹۲/۱۲/۷ نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۷ و ۸ مقادیر سرعت و دبی مشاهداتی و محاسباتی را در تاریخ برداشت ۹۳/۴/۱۱ نشان می‌دهد. در این اشکال y (m)، اعماق مختلف سطح آب در زمان برداشت می‌باشد.

به دلیل تفسیرهای مشابه برای اجتناب از تکرار، از تفسیر شکل‌های سرعت و دبی برای تمام تاریخ‌ها خودداری گردیده است. برای نمونه مقادیر سرعت و دبی مشاهداتی و محاسباتی برای تاریخ‌های برداشت ۹۲/۱۲/۷ و ۹۳/۴/۱۱ در جداول ۳ و ۴ نمایش داده شده است. شکل‌های ۵ و ۶

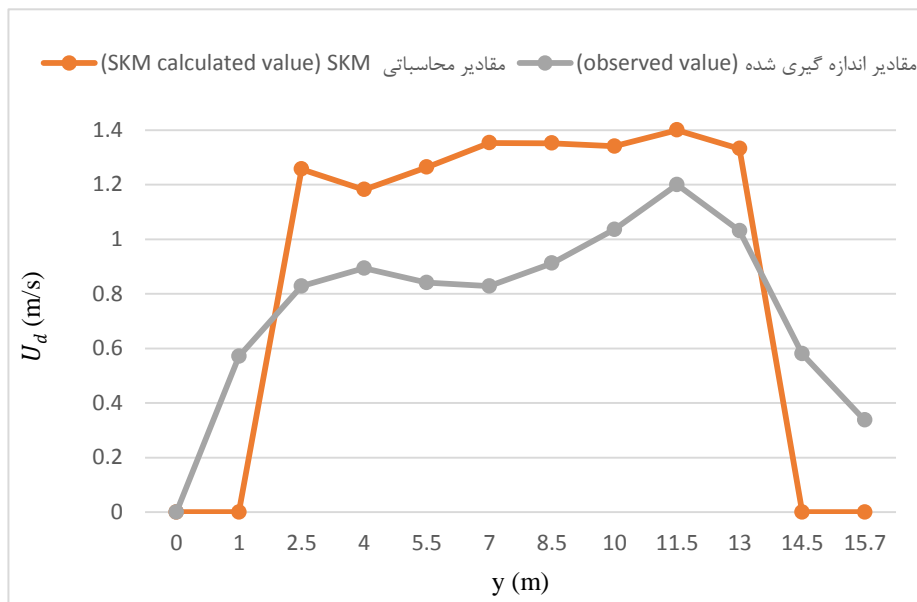
جدول (۳): مقادیر سرعت و دبی محاسباتی و مقادیر اندازه‌گیری شده روش SKM (تاریخ برداشت ۹۲/۱۲/۷)

measurement		SKM		y (m)	ردیف
Q (m ³ /s)	U _d (m/s)	(m ³ /s)Q	U _d (m/s)		
	۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۰	۱
۰/۱۲۰	۰/۵۷۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱	۲
۰/۳۶۰	۰/۸۲۸	۰/۲۷۳	۱/۲۵۷	۲/۵	۳
۰/۴۵۶	۰/۸۹۴	۰/۶۲۲	۱/۱۸۲	۴	۴
۰/۴۲۹	۰/۸۴۱	۰/۶۱۵	۱/۲۶۴	۵/۵	۵
۰/۴۸۴	۰/۸۲۸	۰/۷۶۵	۱/۳۵۳	۷	۶
۰/۵۷۵	۰/۹۱۲	۰/۸۴۲	۱/۳۵۲	۸/۵	۷
۰/۶۳۷	۱/۰۳۶	۰/۸۱۸	۱/۳۴۱	۱۰	۸
۰/۷۷۴	۱/۲۰۰	۰/۸۷۴	۱/۴۰۰	۱۱/۵	۹
۰/۶۶۵	۱/۰۳۱	۰/۸۷۱	۱/۳۳۲	۱۳	۱۰
۰/۳۴۸	۰/۵۸۰	۰/۳۹۵	۰/۰۰۰	۱۴/۵	۱۱

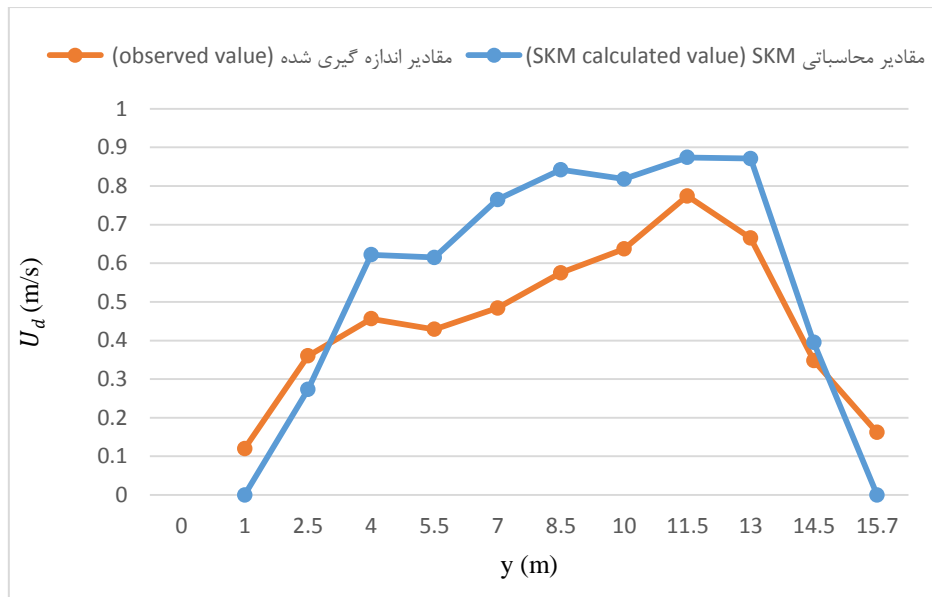
۰/۱۶۲	۰/۳۳۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۵/۷	۱۲
-------	-------	-------	-------	------	----

جدول (۴): مقادیر سرعت و دبی مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی روش SKM (تاریخ برداشت ۹۳/۴/۱۱)

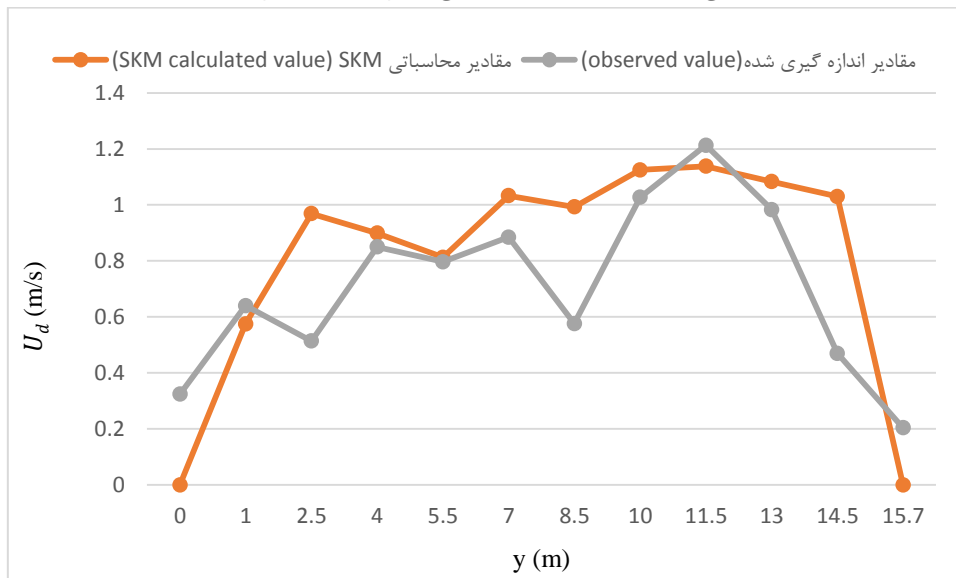
measurement		SKM		y (m)	ردیف
Q (m ³ /s)	U _d (m/s)	(m ³ /s)Q	U _d (m/s)		
	۰/۳۲۴		۰/۰۰۰	۰	۱
۰/۰۵۳	۰/۶۴۰	۰/۰۲۲	۰/۵۷۵	۱	۲
۰/۱۷۳	۰/۵۱۴	۰/۱۸۵	۰/۹۶۹	۲/۵	۳
۰/۲۶۶	۰/۸۵۰	۰/۳۰۸	۰/۸۹۹	۴	۴
۰/۲۶۰	۰/۷۹۷	۰/۲۳۱	۰/۸۱۳	۵/۵	۵
۰/۳۱۵	۰/۸۸۵	۰/۲۹۸	۱/۰۳۳	۷	۶
۰/۳۱۸	۰/۵۷۶	۰/۳۸۷	۰/۹۹۳	۸/۵	۷
۰/۳۸۴	۱/۰۲۷	۰/۴۴۵	۱/۱۲۵	۱۰	۸
۰/۶۰۵	۱/۲۱۳	۰/۵۵۲	۱/۱۳۸	۱۱/۵	۹
۰/۵۹۳	۰/۹۸۳	۰/۵۱۶	۱/۰۸۳	۱۳	۱۰
۰/۳۵۹	۰/۴۷۰	۰/۴۳۶	۱/۰۳۰	۱۴/۵	۱۱
۰/۱۲۵	۰/۲۰۴	۰/۱۷۰	۰/۰۰۰	۱۵/۷	۱۲



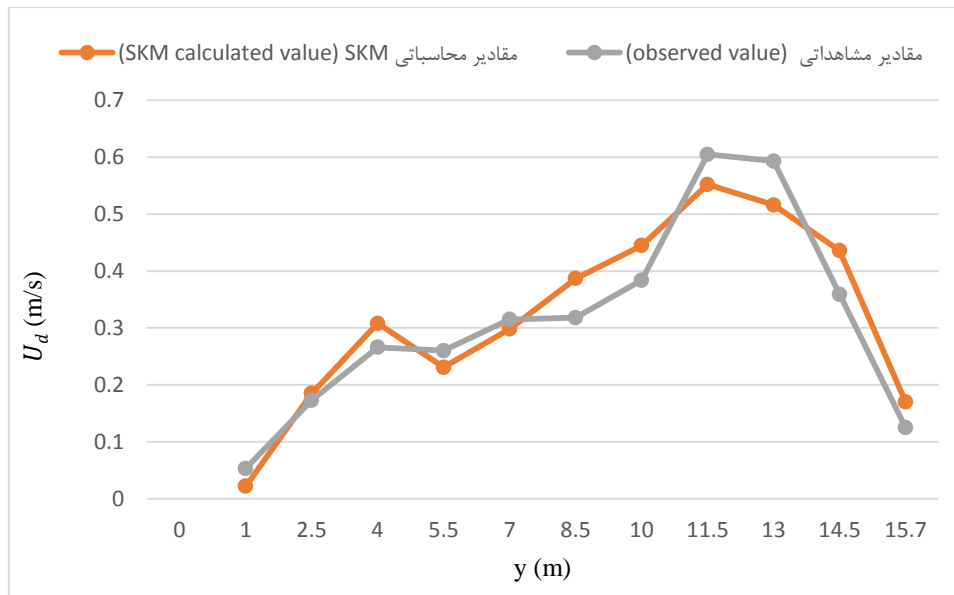
شکل (۵): مقادیر سرعت متوسط U_d اندازه‌گیری شده و محاسباتی روش SKM (تاریخ برداشت ۹۲/۱۲/۷)



شکل (۶): مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و محاسباتی روش SKM (تاریخ برداشت ۹۲/۱۲/۷)



شکل (۷): مقادیر سرعت متوسط U_d اندازه‌گیری شده و محاسباتی روش SKM (تاریخ برداشت ۹۳/۴/۱۱)



شکل (۸): مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و محاسباتی روش SKM (تاریخ برداشت ۹۳/۴/۱۱)

زیادی خواهد داشت و در بعضی از مقاطع اعمال این تغییرات منجر به بهبود مقادیر توزیع سرعت متوسط و دبی در عمق حاصل از مدل SKM می‌شود. هنگامی که ضریب اصطکاک مینا افزایش پیدا کرد و به تبع آن ضرایب اصطکاک پنل‌ها نیز تغییر نمود، نتایج نشان می‌داد انطباق کامل مقادیر سرعت متوسط در عمق و دبی مدل SKM، با مقادیر مشاهداتی برقرار است. این امر نشانگر تاثیر زیاد ضریب اصطکاک f ، بر روی مدل دو بعدی شیونو-نایت می‌باشد. در کل می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت مدل SKM، با برخورداری از مقادیر درست ضرایب اصطکاک برای هر پنل نسبت به برآورد دقیق مقادیر سرعت متوسط در عمق U_d و دبی در عمق، توانا می‌باشد. فاکتور اصطکاک از طریق ضریب مانینگ محاسبه می‌گردد. بنابراین می‌شود گفت که فاکتور اصطکاک مستقیماً تحت تاثیر ضریب مانینگ می‌باشد. از این رو تعیین مقدار دقیق ضریب زبری برای رسیدن به نتایجی منطقی‌تر نافذ می‌باشد.

براساس مقادیر سرعت به‌دست آمده از تاریخ‌های برداشت انجام شده در سال‌های ۹۳-۹۲ جدول ۵ مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی را برحسب عمق‌های مختلف بیان می‌کند. این جدول، مقایسه بین دو منحنی دبی-اشل مدل SKM و مقادیر برداشت شده از رودخانه ناورود را نشان می‌دهد. از جدول می‌توان دریافت دبی‌های حاصل از سرعت‌های به-دست آمده از مدل SKM الگوی دبی‌های به دست آمده از مقادیر اندازه‌گیری شده را درست دنبال کرده است. نکته

همان‌طور که از مقایسه شکل‌های ۵ با ۷ و همچنین شکل‌های ۶ با ۸ مشاهده می‌شود، در بسیاری از نقاط به ویژه در قسمت‌های میانی، مقادیر سرعت و دبی به‌دست آمده با استفاده از مدل SKM، نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در اکثر آن‌ها الگوی توزیع سرعت متوسط در عمق و دبی به‌درستی دنبال شده است. با این وجود، خطای موجود بین دو مقدار اندازه‌گیری و محاسباتی مدل در این بخش قابل توجه است. با توجه به شکل‌ها و مقادیر خطاهای محاسبه شده، تعیین کردن درست مقدار ضریب مانینگ دارای اهمیت زیادی می‌باشد. همچنین با توجه به این‌که اندازه‌گیری‌ها به وسیله تلفریک ساحلی انجام گرفته‌اند و دستگاه مولینه به کابلی وصل بوده که بدون شک کابل در زمان اندازه‌گیری با نوساناتی همراه بوده است، و این امر نیز می‌تواند عاملی برای افزایش خطا بوده باشد. بدلیل سرعت زیاد در زمان سیلاب، کابل در امتداد قائم قرار نداشته و در نتیجه مولینه در تراز بالتر از موقعیت مورد نظر قرار خواهد گرفت که این موضوع در موقع اندازه‌گیری سرعت باید مد نظر قرار بگیرد. این پراکندگی مقادیر همچنین می‌تواند ناشی از زمان اندازه‌گیری (برداشت مقادیر در روزهای بارانی صورت گرفته‌است) باشد. زیرا در زمان بارندگی جریان دارای حالت غیردائمی بوده، حال آنکه فرض SKM، بر دائمی بودن جریان استوار می‌باشد.

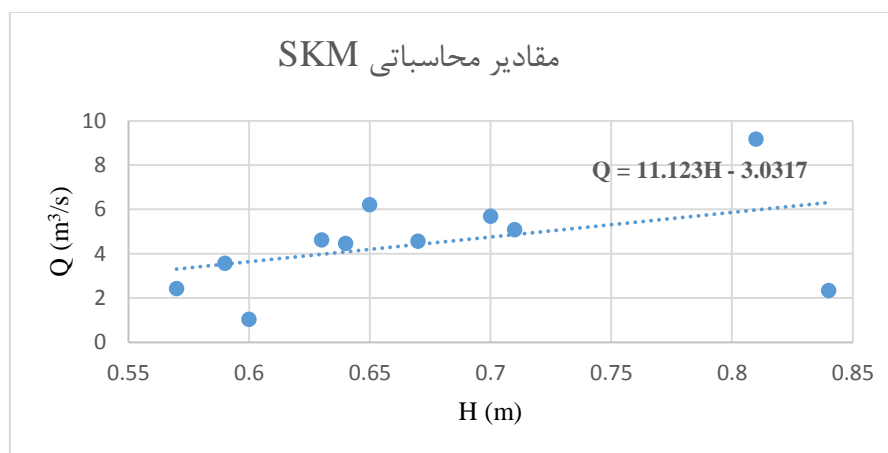
از نتایج به‌دست آمده می‌توان پی برد که با افزایش یا کاهش ضریب اصطکاک به‌مقدار ثابت برای تمام پهنه، مقادیر سرعت متوسط در عمق و دبی، تغییرات

قابل توجه توانایی مناسب مدل SKM، در برآورد میزان دبی برای محاسبه دبی، میزان خطای میانگین نشان دهنده حدود می‌باشد. طوریکه با توجه به دو بعدی بودن مدل SKM، ۲۱/۲۸ درصد می‌باشد.

جدول (۵): مقادیر اندازه‌گیری شده و دبی محاسباتی روش SKM

ردیف	H (m)	SKM measurement Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
۱	۰/۵۷	۱/۹۳۵	۲/۴۱۶
۲	۰/۵۹	۲/۳۴۴	۳/۵۵۰
۳	۰/۶۰	۱/۱۰۳	۱/۰۳۵
۴	۰/۶۳	۳/۴۷۸	۴/۶۰۶
۵	۰/۶۴	۳/۴۵۲	۴/۴۵۷
۶	۰/۶۵	۴/۱۵۷	۶/۱۹۶
۷	۰/۶۷	۴/۲۹	۴/۵۶۰
۸	۰/۷۰	۵/۳۱۷	۵/۶۸۳
۹	۰/۷۱	۵/۰۱	۵/۰۷۴
۱۰	۰/۸۱	۸/۲۳۹	۹/۱۶۸
۱۱	۰/۸۴	۱/۶۵۶	۲/۳۳۱

شکل ۹ منحنی دبی_اشل رودخانه ناورود را در بین سال‌های ۹۲ تا ۹۳ نشان می‌دهد.



شکل (۹): مقادیر دبی محاسباتی SKM.

عمق و همچنین میزان دبی تخلیه ارائه نماید به شرطی که اطلاعات اولیه هیدرولیکی نظیر ضریب مانینگ، شیب طولی، مختصات مقطع و... بصورت دقیق برداشت گردند. همچنین قابل ذکر است که بایستی اندازه‌گیری مقادیر سرعت در شرایط ایده‌آل انجام گرفته باشد تا مقایسه درستی میان مقادیر محاسباتی مدل و مقادیر مشاهداتی صورت پذیرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با مدل کردن روش دو بعدی SKM، سعی شده است توزیع سرعت متوسط U_d و دبی در عمق رودخانه برآورد گردد، و در ادامه با محاسبه مقادیر دبی با استفاده از مقادیر سرعت، منحنی دبی_اشل رسم گردید. بطور کلی این گونه نتیجه‌گیری می‌گردد که روش SKM، می‌تواند نتایج قابل قبولی از تخمین توزیع سرعت متوسط در

۵. کردی، ح. امینی، ر. ظهیری، ع. و م. نکویان‌فر. ۱۳۹۲. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. شماره ۳: ۹۱-۷۳.
۶. لشکرآرا، ب. و ا. دهقانی. ۱۳۹۴. واسنجی پارامترهای حاکم بر مدل شیونو و نایت بمنظور تخمین تنش برشی در کانال‌های دوزنقه‌ای. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۴)، ۲۰۱-۱۸۹.
۷. محسنی، م. سامانی، ج م و. و ع. ایوب زاده. ۱۳۹۲. توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب دشت. مجله علمی - پژوهشی هیدرولیک. ۳(۸): ۷۵-۶۳.
۸. مغربی، م. ف. و گیوه‌چی، م. ۱۳۸۹. تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال مثلی باز، آب و فاضلاب. ۲: ۸۰-۷۱.

9. Devil K. and K. Khatua. 2016. Prediction of depth averaged velocity and boundary shear distribution of a compound channel based on the mixing layer theory. *Flow Measurement and Instrumentation*. 50: 147-157.
10. Farsoudeh M. and M.F. Maghrebi. 2018. Impact of Mean Velocity Accuracy on the Estimation of Rating Curves in Compound Channels. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*. 64: 242-251.
11. Hamidifar H. Keshavarzi A. and M.H. Omid. 2016. Evaluation of 1-D and 2-D models for discharge prediction in straight compound channels with smooth and rough floodplain. *Measurement and Instrumentation*. 49: 63-69.
12. Kavousizadeh A. Maghrebi M.F. and A. Ahmadi. 2019. Stage-discharge estimation in straight compound channels using isovel contours. *Journal of Hydrology Research*. 503: 809-824.

با توجه به تحقیقات انجام شده و نتایج به دست آمده از مدل SKM برای تخمین سرعت متوسط در عمق و به دنبال آنها رسم منحنی دبی-اشل در ادامه این پژوهش، تحقیقات زیر پیشنهاد می‌گردد.

الف- برای هر یک از زیر ناحیه‌ها یک ضریب مانینگ مجزا تعریف گردد و به دنبال آن برای هر زیر ناحیه ضریب اصطکاک جداگانه‌ای اعمال و اثر آنها بررسی گردد.

ب- بررسی امکان استفاده از روش SKM در کانال‌های مرکب مارپیچی.

ج- شیب طولی یکی دیگر از عوامل موثر بر پارامتر سرعت متوسط می‌باشد، طوری که اگر از شیب خط انرژی و یا شیب سطح آب به جای شیب بستر استفاده گردد، می‌تواند منجر به بهبود نتایج گردد.

د- مدل SKM، با برخورداری از مقادیر درست ضرایب اصطکاک برای هر پنل نسبت به برآورد دقیق مقادیر سرعت متوسط در عمق U_d ، توانا می‌باشد.

منابع

۱. احمدی، آ. فغفور مغربی، م. و ک. اسماعیلی. ۱۳۹۸. تعیین منحنی دبی-اشل در مقاطع مرکب نامتقارن. هیدرولیک. ۱۴(۱): ۷۷-۶۵.
۲. امیدی، ز. یونسی، ح. حقی آبی، ا. ح. و ح. ترابی پوده. ۱۳۹۴. بررسی کارایی و دقت مدل شبه دو بعدی در تعیین دبی اشل رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه‌های حوضه کرخه). دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، ۲۹ دی الی ۱ بهمن، اهواز دانشگاه شهید چمران.
۳. ظهیری، ع. ۱۳۹۲. تعیین توزیع سرعت در عرض مقاطع مرکب با استفاده از جستجوی ژنتیکی، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. (۵) ۲۰: ۷۹-۶۱.
۴. قلی‌نژاد، ج. ظهیری، ع. و ا. دهقانی. ۱۳۹۱. شبیه سازی یک و شبه دوبعدی جریان‌های سیلابی در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه گرگان رود ایستگاه هیدرومتری آق قلا)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. (۴) ۱۹: ۱۱۹-۱۰۳.

19. Shiono K. and Knight D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of fluid mechanics*. 222: 617-646.
20. Shiono K. and D.W. Knight 1988. Two-dimensional analytical solution for a compound channel. *Proc., 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Tokyo, Japan*, 503-510.
21. Unal B. Mamak M. Seckin G. and M. Cobaner. 2010. Comparison of an ANN approach with 1-D and 2-D methods for estimating discharge capacity of straight compound channels. *Advances in Engineering Software*. 41(2): 120-129.
22. Wark J. B. Samuels P.G. and D.A. Ervine. 1990. A Practical method of estimating velocity and discharge in compound channels. *Proceedings of the International Conference on River Flood Hydraulics, Wiley and Sons, UK*: 163-172.
23. Zahiri A. Tang X. and H. Md. Azamathullac. 2014. Mathematical modeling of flow discharge over compound sharp-crested weirs. *Journal of Hydro-Environment Research*. 8(3): 194-199.
13. Liao H. and D.W. Knight. 2007. Analytic stage–discharge formulae for flow in straight trapezoidal open channels. *Advances in Water Resources*. 30(11): 2283-2295.
14. Liu C. Luo X. and K. Yang. 2013. Modeling depth-averaged velocity and bed shear stress in compound channels with emergent and submerged vegetation. *Advances in Water Resources*. 60: 148-159.
15. Maghrebi M.F. and A. Ahmadi. 2017. Stage-discharge prediction in natural rivers using an innovative approach. *Journal of Hydrology*, 545: 172-181.
16. Maghrebi M.F. and G. Ali. 2019. Estimation of water surface profiles using rating curves. *The International Journal of River Basin Management*. 545: 172-181.
17. Rezaei B. and D.W. Knight. 2009. Application of the Shiono and Knight Method in compound channel with non-prismatic floodplains. *Journal of hydraulic research*. 47(6): 716-726.
18. Sellin R.H.J. 1964. A Laboratory Investigation into the Interaction between Flow in the Channel of a River and that of its Flood Plain. *La. Houille Blanche*, 7:793-801.

The method of evaluating the distribution of average velocity and discharge in Navrood River

Abstract

A large number of river engineering projects, e.g. design of flood-control discharges, realignment of river channels, bank protection and sediment transport, requires accurate estimation of discharge in the compound channels such as rivers. Shiono-Knight method (SKM) is known as a capable tool to modeling discharge in prismatic compound channels. This research used the SKM, which is based on solving two-dimensional equations for flows in open channel by averaging the Navier-Stokes equations. Firstly, the values of depth-averaged velocities and discharge were calculated, then those compared with measurement data in 92-93 time period. Finally, the relation between depth and discharge flow have been established for 92-93 time period. The results of predicted depth-averaged velocity and discharge obtained from SKM compared with measured values indicate that SKM can accurately predict the velocity distributions if the two coefficients of friction factor and Roaring manning are chosen based on accurate patterns. The results of model shows to be not good agreement with experimental data. The discharge and depth-averaged velocity were estimated with 3.8 and 12.5 percent error.

Keyword: Estimation, the Shiono and Knight Method, Compound cross sections, RMSE