



همبستگی بسیار خوبی را بین سرعت رواناب برآورد شده با سرعت رواناب اندازه گیری شده نشان داده است.  
واژه های کلیدی: ضریب زبری، سرعت جریان، معادله مانینگ، معادله داریسی - ویسباخ

## بررسی کارایی برخی معادله های زبری بستر و اصلاح معادله مانینگ برای برآورد سرعت رواناب سطحی

حسن روحی پور ۱ و فرخ اسدزاده ۲

### مقدمه

مقاومت بستر یا ضریب زبری در رفتار رواناب سطحی به ویژه در زمینه مهار سرعت، فرسایندها و ظرفیت حمل رسوب تاثیر به سزایی دارد، بنابراین برآورد دقیق این ضریب به عنوان یکی از داده های ورودی در مدل سازی رواناب و فرایندهای آب شناختی در مقیاس کوچک مورد نیاز است [۹].

مقاومت بستر در مقابل جریان تحت تاثیر فرایندهای پیچیده ای از ویژگی های جریان و بستر قرار می گیرد. علاوه بر دانه بندی خاک و وجود ریز ناهمواریهای<sup>۱</sup> موجود در بستر که ناشی از طبیعت خاک های معدنی است، عوامل دیگری نیز روی آن تاثیر می گذارد. ناهمواری های با مقیاس میلی متر تا سانتیمتر حتی در شیب های تا حدودی یکنواخت نیز وجود دارند که وجود آنها سبب به وجود آمدن راه های باریک یا رشته هایی از جریان با عمق زیادتر و سرعت بیشتر است که ردیابی آنها توسط رنگ در بسیاری از آزمایش های کلاسیک امت [۵] نشان داده شده است. وی همچنین نشان داد که جریان رشته ای و غیر رشته ای تاثیر عمده ای روی ضریب اصطکاک دارد [۵].

تغییرات مکانی در سرعت جریان به دو دلیل عمده صورت می گیرد، یکی در اثر وجود ریز ناهمواریها و دیگری ناشی از موانع موجود در بستر مانند وجود سنگ های رها شده یا فرورفته در بستر و یا مواد آلی و باقیمانده های گیاهی. دانکرلی [۸ و ۱۰] در یک فلوم کوچک و با جریان کم عمق این دو پدیده را مورد بررسی قرار داده و نشان داد که تغییرات مکانی عمق جریان ناشی از موانع موجود در بستر با حجم غوطه ور موانع متناسب است. وی همچنین در پژوهش دیگری به رابطه تغییرات مکانی عمق جریان با کشش سطحی تشکیل قوس آب در اطراف لبه های موانع موجود در بستر پی برد [۹].

آبراهامز و همکاران [۳]، دانکرلی و همکاران [۷] نشان دادند که در بعضی شرایط برون زدگی های سنگی موجود در بستر خاک در مقایسه با همان نوع سنگ (ولی با استقرار آزاد آن در سطح خاک)

### چکیده:

از دیرباز معادله های متنوعی برای تعیین زبری بستر به منظور برآورد سرعت و یا دبی جریان توسط پژوهشگران ارایه شده که تعدادی از آنها دارای معروفیت جهانی بوده و کاربرد گسترده ای در علوم آب و هیدرولیک جریان دارند. در حال حاضر مقاومت بستر در مقابل جریان توسط معادله هایی مانند داریسی - ویسباخ، مانینگ و شزی بیان می شود. در پژوهش حاضر با استفاده از آمار حاصل از مطالعات شبیه سازی باران در شرایط آزمایشگاهی (شبیه ساز باران دانشگاه گریفیث)، مطالعات صحرایی و همچنین به خدمت گرفتن آمار موجود در منابع معتبر، تغییرات ضریب زبری بستر در شرایطی که اثر متقابل بین هیدرولیک جریان و ناهمواری های بستر زیاد قابل توجه نبوده مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور در این پژوهش صحت معادله های زبری بستر در بیان واقعی مقاومت بستر در مقابل جریان روان آب سطحی در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت روش مناسب جهت تعیین دقیق سرعت روان آب با استفاده از شیب زمین (S) و دبی واحد (q) با استفاده از این معادلات ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که، اگرچه هر سه نوع معادله مذکور برای تعیین ضریب زبری مفید هستند اما معادله مانینگ بسیار مناسب تر از دو معادله دیگر است. در ادامه با توجه به محدودیت هر سه نوع معادله مذکور در بیان واقعی هیدرولیک جریان رواناب سطحی که احتمالا نتیجه نارسائی آنها در تبیین تغییرات ظاهری سرعت رواناب است، یک روش مناسب برای برآورد سرعت رواناب با استفاده از معادله مانینگ پیشنهاد شده است. برای کلیه آمار مورد بررسی اعم از داده های آزمایشگاهی و صحرایی و همچنین داده های موجود در منابع، روش اصلاح شده معادله مانینگ

۱- استادیار پژوهشی موسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور  
(Email:hassanrouhipour@yahoo.com.au)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران  
(Email: farrokh-asadzadeh@yahoo.com)

سنگی مناطق بیابانی<sup>۳</sup> یکی از نمونه‌هایی است که رواناب نمی‌تواند ناهمواری‌های بستر را به طور کامل غوطه‌ور سازد. به همین دلیل آبراهامز و پارسون [۲] مقاومت بستر در مقابل جریان رواناب را به اجزایی مانند مقاومت خاکدانه، ناهمواری‌های بستر، مقاومت موجی ناشی از برخورد آب به سنگ‌های بستر و مقاومت ناشی از تلاطم رواناب در اثر برخورد قطرات باران تقسیم‌بندی نمودند. در این پژوهش به منظور پاسخ به پرسش‌های مطرح شده در زیر با انجام آزمایش‌های متنوع، کاربرد معادله‌های زبری در حالتی که رواناب به طور کامل زبری کف بستر را پوشانده و همچنین بر همکنش عمده‌ای بین هیدرولیک جریان و ناهمواری‌های بستر وجود ندارد مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش توجه ویژه‌ای به سرعت رواناب و ارایه روش مناسبی برای برآورد آن شده است، زیرا سرعت رواناب در مدل‌های جدید برآورد فرسایش که بر اساس فرآیندهای فرسایشی استوار هستند مانند مدل‌های EUROSEM، WEPP و GUEST، به عنوان یکی از ویژگی‌های اساسی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱۳، ۱۴، ۱۷، ۱۸، ۱۹]

همان‌گونه که ذکر گردید دو پرسش عمده‌ای که در این بررسی مطرح گردیده به شرح زیر است:

۱- سه معادله معروف مانینگ، داریسی و ویسباخ و شزی که بطور تحلیلی قابل تبدیل به یکدیگرند، در تعیین سرعت روان آب از چه درجه اعتباری برخوردار هستند و کدامیک از آنها به نحو بهتری معرف واقعی هیدرولیک جریان می‌باشند؟

۲- چگونه می‌توان به بهترین وجهی سرعت رواناب را برآورد نمود؟

یکی از روش‌های معمول برآورد سرعت جریان، استفاده از یک رابطه تجربی است که بین ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ (f) با عدد رینولدز وجود دارد [۲۶، ۴]. در این رابطه تجربی، ضریب اصطکاک (f) با افزایش عدد رینولدز به طور معمول کاهش پیدا می‌کند. امت [۵] با پژوهش‌های متعددی که انجام داد به وجود محدودیت‌های زیادی در کاربرد عملی این رابطه پی برد که به طور عمده ناشی از ضعف نظری این گونه معادله‌ها است. بنابراین در این بررسی تلاش شده تا محدودیت‌های نظری این معادله‌های مورد مقایسه آماری قرار گرفته و روشی جایگزین برای برآورد بهتر و دقیقتر سرعت جریان که دارای محدودیت نباشد پیشنهاد و معرفی شود.

در این بررسی، ۵ دسته آمار مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۸). سه دسته از این آمار (جدول ۲) حاصل نتایج آزمایش‌های صحرایی و شبیه‌سازی بارش در آزمایشگاه است که توسط نگارنده انجام گرفته و دو دسته دیگر (جدول ۳) مربوط به آماری است که برای تأیید نظریات مطرح شده، از آمار موجود در منابع مربوط به سایر پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. نکته دیگر اینکه برای ارایه یک روش مناسب در برآورد سرعت جریان رواناب از بین معادله‌های متداول به طور ویژه از فرمول مانینگ استفاده شده است.

سرعت متوسط جریان افزایش پیدا نموده و در نتیجه ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد [۳ و ۷]. زاپ و همکاران [۲۷] در بخشی از یک پژوهش، نقش قطعات سنگریزه موجود در نیمرخ<sup>۱</sup> خاک در میزان‌های مختلف حجمی تا ۴۰ درصد را بر ضریب زبری مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که هنگامی که در یک جریان متلاطم، سنگریزه‌ها در رواناب غوطه‌ور باشند ضریب زبری برای میزان‌های مختلف سنگریزه یکسان است. آنها همچنین نشان دادند که در آزمایش همان خاک بدون سنگریزه یا با تعداد کم سنگریزه، شیارهای کم عمق ایجاد می‌شود که میزان رسوب آن به مراتب بیشتر از خاک دارای سنگریزه است.

روحی پور و همکاران [۱] نیز تاثیر پوشش یا موانع سنگی موجود در بستر خاک، در رواناب سطحی و رسوب ناشی از آنرا با استفاده از شبیه‌سازی باران در یک فلوم کوچک مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که به رغم این تصور کلی که وجود پوشش سنگی در روی بستر خاک، موجب کاهش رسوب ناشی از فرسایش آبی می‌گردد، وجود پوشش سنگی به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد باعث افزایش رسوب شده و به تدریج که پوشش سنگی از این حد بیشتر شود مقدار رسوب نسبت به تیمار شاهد (بدون پوشش سنگی) کاهش چشمگیری نشان می‌دهد.

گاورز [۱۲]، نبرینگ و همکارانش [۲۰] دریافتند که وقتی رواناب درون شیارهایی با بستر خاکی بسیار حساس به فرسایش، جریان پیدا می‌کند مقاومت بستر در مقابل جریان به طور عمده به ناهمواری‌های کف بستر بستگی دارد. این ناهمواریها که تحت تأثیر عمل شدید فرسایش در کف بستر بوجود می‌آیند به نام Bed forms خوانده می‌شوند. در چنین شرایطی پژوهشگران مذکور ثابت کردند که مدل کلاسیک کاهش ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ (f) که با افزایش عدد رینولدز (Re) صورت می‌گیرد، صدق ننموده و به طور عملی کاربردی ندارد. این نوع محدودیت نه تنها برای ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ بلکه برای سایر معادله‌های هیدرولیکی مقاومت بستر مانند ضریب زبری مانینگ و شزی نیز صدق می‌نماید.

در شرایط طبیعی، معمولاً جریان‌های رواناب دارای عمق کمی هستند به طوری که نمی‌توانند کلیه ناهمواری‌های کف بستر یا زبری‌های موجود را به طور کامل غوطه‌ور سازند. در چنین شرایطی لارنس [۱۵] نشان داد که برای تعیین مقاومت یا ضریب اصطکاک بستر، آن بخشی از ناهمواری‌ها که رواناب نمی‌تواند آن را غوطه‌ور سازد نقش مهمی در محاسبه ضریب زبری ایفا می‌نماید. بر این اساس پژوهشگر مذکور با استفاده از داده‌های متنوعی در این زمینه نشان داد که مقاومت بستر تا حدود زیادی به درجه غوطه‌ور بودن زبری بستر<sup>۲</sup> بستگی دارد، که برابر با نسبت عمق رواناب به متوسط ارتفاع زبری است. جریان‌های کم عمق رواناب روی پوشش‌های

- 1- Profile
- 2- Inundation Ratio
- 3- Desert Pavement

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌های نگارنده شامل دو بخش است که یک بخش مربوط به آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه ثابت فرسایش و بخش دوم مربوط به آزمایش‌های صحرایی می‌باشد.

### ۱- شبیه‌سازی باران و رواناب در آزمایشگاه ثابت فرسایش

برای انجام این بخش از آزمایش‌ها، از یک دستگاه فلوم آزمایشگاهی متعلق به دانشگاه گریفیت استرالیا به نام گاتسرا<sup>۱</sup> به طول ۵/۸ متر و عرض یک متر که تا عمق ۲۰ سانتیمتر از خاک مورد بررسی پر شده بود استفاده شد (تصویر ۱). باران مورد نیاز (۱۰۰ میلی‌متر در ساعت به منظور تشدید فرآیندهای فرسایشی) توسط یک سری از پستانک‌های با قطر بزرگ که در ارتفاع ۹ متری از سطح فلوم قرار داشتند، و بارانی با قطر متوسط ۲/۳ میلی‌متر تولید می‌کردند، شبیه‌سازی گردید. خاک مورد استفاده در این آزمایش دارای بافت لوم شنی (برای به حداقل رساندن اثر متقابل بین هیدرولیک جریان و ناهمواری‌های بستر) بوده که نتایج توزیع اندازه ذرات آن به روش هیدرومتر و نیز برخی دیگر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

روی خاک مذکور سه دسته آزمایش‌های مختلف با رواناب تنها، باران تنها و رواناب همراه با باران مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌های مربوط به رواناب تنها و نیز رواناب همراه با بارندگی، آب زلال از ابتدای فلوم با یک دی‌بای ثابت، که با استفاده از یک مخزن با ارتفاع ثابت آب تامین می‌شد، بر روی بستر خاک اضافه می‌شد. برای آزمایش‌های مربوط به جریان ورقه‌ای به منظور عدم تشکیل شیار، مقادیر دی‌بای استفاده شده به عنوان روان آب و همچنین شیب

اعمال شده بر روی فلوم به ترتیب بین ۰/۶۷ - ۰/۱۶۲ لیتر در ثانیه و ۰/۰۵ تا ۳/۵ درصد، بود. برای جریان شیار که در قسمت بعد توضیح داده می‌شود شیب اعمال شده در فلوم بین ۰/۵ تا ۱۰/۵ درصد در نظر گرفته شد. جزئیات آزمایش‌ها از قبیل ترکیب‌های مختلف شیب و دی‌بای و تعداد آزمایش‌ها در جدول ۲ ذکر شده است. میانگین سرعت رواناب ( $\bar{V}$ ) در کلیه مراحل آزمایش به وسیله روش ردیابی محلول نمک کلرور سدیم<sup>۲</sup> در خروجی فلوم اندازه‌گیری می‌شد. در این روش با اضافه کردن محلول نمک طعام در یک فاصله مشخص از ابتدای مسیر فلوم ( $X_0$ ) و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) جریان به وسیله یک الکتروود در نقطه خروجی فلوم، میانگین سرعت رواناب با تعیین زمان انتشار محلول نمک از نقطه تزریق تا محل خروج از فلوم از روی نقطه اوج<sup>۳</sup>، هدایت الکتریکی یا مرکز سطح<sup>۴</sup> آن محاسبه گردید. [۱۷] شکل ۱ نیم‌رخ بستر مورد استفاده از فلوم آزمایشی را همراه با سه نوع آزمایش مورد استفاده و همچنین محل تزریق محلول نمک جهت اندازه‌گیری سرعت رواناب نشان می‌دهد.

به منظور بررسی صحت معادلات مذکور در جریان شیار، تعدادی از آزمایش‌ها نیز بر روی یک شیار مستطیلی شکل انجام گرفت. بدین نحو که برای کاهش خطای ناشی از تشکیل شیارهای متعدد که به طور معمول در اثر رواناب و بارندگی ایجاد می‌شود، ابتدا یک خراش بر روی سطح فلوم ایجاد نموده و سپس اجازه داده

- 1- Griffith university Tilting flume Simlated Rainfall facility
- 2- salt- tracing technique
- 3- Peak
- 4- Centroid



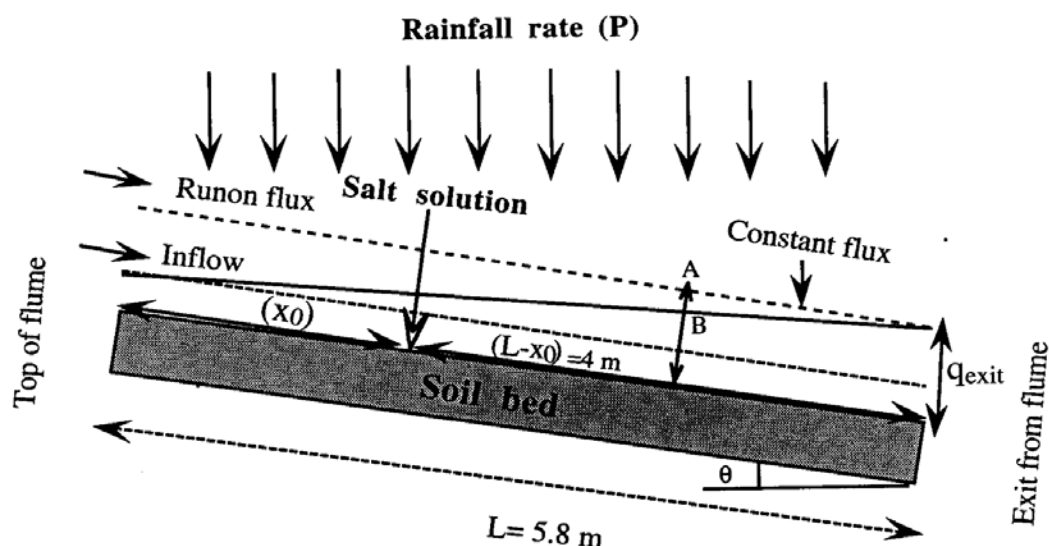
شکل ۱- نمایی از فلوم و شبیه‌ساز باران دانشگاه گریفیت

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

عمق نمونه برداری (m)	pH (1:5)	EC (dS/m)	درصد ماده آلی	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن درشت	درصد شن ریز
۰-۰/۱	۷/۱	۰/۱۷	۱/۲	۲	۵	۴۰	۵۳

جدول ۲- تعداد آزمایش های انجام شده (به وسیله شبیه سازی باران و رواناب) به همراه وضعیت شیب و دبی

منبع داده ها	نوع جریان	تعداد آزمایش ها	تغییرات شیب (%)	تغییرات دبی (%)
داده های آزمایشگاهی	ورقه ای	۵۱	۰/۰۵-۳/۵	۰/۱۶×۱۰ <sup>-۳</sup> -۰/۶۷×۱۰ <sup>-۳</sup>
	شیاری	۲۳	۰/۵-۱۰/۵	۱/۰۳×۱۰ <sup>-۳</sup> -۲/۳۹×۱۰ <sup>-۳</sup>
داده های صحرائی	شیاری	۱۹	۳/۲-۵	۰/۳۶×۱۰ <sup>-۳</sup> -۸/۲۱×۱۰ <sup>-۳</sup>



شکل ۱- نیمرخ بستر خاک مورد استفاده در فلوم آزمایشی به همراه نمایش سه نوع آزمایش انجام شده با باران با شدت ثابت (P) و رواناب تنها (خط نقطه چین فوقانی) و رواناب همراه با باران (خط پر). محل تزریق نمک سدیم برای اندازه گیری سرعت جریان نیز در شکل نشان داده شده است [۲۵].

بود استفاده شد. دبی جریان در جوی با استفاده از دستگاه فلومتر و سرعت آن نیز با استفاده از تزریق رنگ در نقطه مشخصی از جوی و ردیابی آن با تعیین مدت زمان رسیدن لبه جلویی رنگ به خروجی جوی اندازه گیری شد. در این روش برای تعیین میانگین سرعت آب از ضریب کاهش ۰/۶۷ برای تبدیل سرعت ماکزیمم سطحی (لبه جلویی رنگ) به سرعت متوسط استفاده شد [۱۶]. گرچه کمیت این ضریب خود متناسب با عدد و رینولدزهای مختلف نیز متفاوت است [۱۱].

تعداد آزمایش های انجام شده در هر مورد به همراه مقدار دبی و شیب اعمال شده برای هر آزمایش در جدول (۲) آمده است.

می شد تا فرایندهای طبیعی فرسایش بر روی این شیار انجام گیرد، و در نهایت تمام ویژگی های هیدرولیکی جریان از قبیل عمق جریان و عرض بالا و پایین شیار و همچنین سرعت جریان بر روی این تک شیار اندازه گیری شد.

#### ۲-۲- آزمایش های صحرایی:

آزمایش های صحرائی نگارنده در یک مزرعه ی آناناس واقع در شهر بریس بن ایالت کوئزلند استرالیا با طول جغرافیایی (۱۸ و ۱۵۳ شرقی و عرض جغرافیایی (۲۶ و ۳۶ جنوبی) با بافت خاک لوم شنی انجام شد. برای این منظور از تعدادی جوی و پشته این مزرعه با عرض ۰/۱۳ تا ۰/۳۳ متر که طول آنها بین ۷ تا ۸ متر متغیر

### ۳- استفاده از آزمایش های سایرین در منابع مختلف

به منظور بررسی صحت معادلات نامبرده شده در تعیین واقعی زبری بستر در شرایط مختلف از جمله نوع خاک تشکیل دهنده بستر و شرایط وجود و یا عدم وجود رسوب علاوه بر دو سری از آزمایش هایی که توسط نگارنده در آزمایشگاه و در مزرعه انجام گردید از نتایج دو دسته آمار حاصل از بررسی های موجود در منابع مختلف یکی از امریکا و دیگری از کشور کانادا که نتایج حاصل از آزمایش های آنها به طور کامل در منابع درج شده بود استفاده شد. بررسی های این پژوهشگران نیز بر روی خاک های شنی انجام شده بود با این اختلاف که آزمایش های گای و همکارانش [۱۳] همراه با بار رسوب ولی آزمایش های لی و آبراهامز [۱۶] فاقد بار رسوب بوده است. جدول ۳ برخی از ویژگی های هیدرولیکی جریان از قبیل شیب، دبی و حالت جریان و تعداد آزمایش های انجام شده را با ذکر منبع آنها نشان می دهد.

در این معادله  $L$ ، طول فلوم  $x_0$  فاصله بین ابتدای فلوم تا محل تزریق نمک سدیم و  $t$  زمان متوسط حرکت محلول نمک است که با استفاده از معادله ی زیر به دست می آید.

$$t = \int_{x_0}^L \frac{dx}{V} \quad (3)$$

سرعت جریان ( $V$ ) برای جریان ورقه ای با استفاده از معادله ی مانینگ به صورت زیر برآورد می شود:

$$V = S^{1/2} D^{2/3} n \quad (4)$$

که در این معادل  $S$  شیب و  $D$  عمق جریان و  $n$  نیز ضریب زبری مانینگ می باشد. با استفاده از رابطه ی  $q=DV$  و جایگزینی آن در معادله ی ۴، پس از حذف  $D$  و نیز با توجه به رابطه (۱) می توان نوشت:

$$V = (S^{1/2}/n)^{3/5} (q_{in} + Px)^{2/5} \quad (5)$$

جدول ۳- تعداد آزمایش های انجام شده (استفاده از منابع) به همراه وضعیت شیب و دبی

منبع داده ها	نوع جریان	تعداد آزمایش ها	تغییرات شیب (%)	تغییرات دبی (%)
گای و همکاران (۱۹۹۰)	ورقه ای	۲۰	۲-۲۰	$0.01 \times 10^{-3} - 0.24 \times 10^{-3}$
لی و آبراهام (۱۹۹۷)	ورقه ای	۱۰۵	۲-۹/۵	$0.17 \times 10^{-3} - 3.67 \times 10^{-3}$

با جایگزینی  $V$  در معادله (۳) با مقدار به دست آمده برای آن از معادله ی (۵) برای محاسبه  $t$  و سپس جایگزینی  $t$  در معادله ی (۲)

خواهیم داشت:

$$n = \frac{(3/5)^{5/3} S^{1/2} (P/\bar{V})^{5/3} (L-x_0)^{5/3}}{[(q_{in}+PL)^{3/5} - (q_{in}+Px_0)^{3/5}]} \quad (6)$$

همان گونه که در ابتدا اشاره شد، معادله ی (۶) برای برآورد ضریب زبری مانینگ در شرایطی که جریان دارای یک رواناب ورودی همراه با بارندگی و یا بارندگی تنها باشد مورد استفاده قرار می گیرد و بنابراین معادله کلاسیک اولیه بدین ترتیب اصلاح شده است [۲۵].

ضریب زبری مانینگ برای آزمایش های با رواناب تنها، با استفاده از شکل کلاسیک معادله ی مانینگ برآورد گردید.

$$n = q^{2/3} S^{1/2} / V^{5/3} \quad (7)$$

که در این رابطه  $S$ ،  $q$  و  $V$  کمیت های قابل اندازه گیری هستند و قبلاً تعریف شده اند.

### ۵-۲ تعیین ضریب زبری مانینگ برای جریان شیاری

برای انجام آزمایش های فرسایش شیاری از رواناب تنها (بدون بارش) استفاده شد، در این حالت سرعت جریان به علت افزایش عرض شیار،  $W$  در قسمتهای پایین فلوم دارای تغییرات مکانی

### ۴- تعیین ضریب زبری مانینگ برای جریان ورقه ای

از آنجایی که محاسبه ضریب زبری با کاربرد معادله مانینگ در شکل کلاسیک آن برای روانابی که همراه با باران است احتمالاً با مقداری خطا همراه می باشد (بعلت غیر یکنواخت بودن جریان و تغییر عمق آب در طول شیب و همچنین تلاطم ناشی از برخورد قطره های باران بر جریان رواناب) روش زیر برای اصلاح این رابطه برای برآورد ضریب زبری، مورد استفاده قرار گرفت [۲۵].

به دلیل نفوذ ناپذیر بودن کف فلوم (بدون زهکشی) و اشباع خاک قبل از شروع هر آزمایش، بدیهی است که شدت رواناب ( $Q$ ) در واحد سطح فلوم برابر با شدت بارندگی ( $P$ ) شبیه سازی شده است. از طرفی شار حجمی جریان ( $q$ ) در واحد عرض فلوم طبق معادله زیر با افزایش فاصله ( $x$ ) از ابتدای فلوم افزایش می یابد.

$$q(x) = q_{in} + Px \quad (1)$$

که در این معادله  $q_{in}$  رواناب اضافه شده یا دبی ورودی در ابتدای فلوم است.  $q(x)$ ، مقدار دبی در مکان  $x$  و  $P$  شدت ثابت بارندگی است.

از آنجایی که سرعت جریان با افزایش فاصله از ابتدای فلوم ( $x$ ) افزایش پیدا می کند، سرعت متوسط جریان ( $\bar{V}$ ) با در دست داشتن زمان ( $t$ ) و فاصله ی محل اضافه کردن نمک از ابتدای فلوم ( $L-x_0$ )، (شکل ۱) با استفاده از معادله ی زیر به دست می آید:

$$\bar{V} = (L-x_0)/t \quad (2)$$

می باشد. بر طبق معادله مانینگ می توان نوشت:

$$V = (S^{1/2}/n) R^{2/3} \quad (8)$$

که در این معادله  $R(x)$  شعاع هیدرولیکی شیار می باشد که خود دارای تغییرات مکانی است، بنابراین سرعت متوسط جریان  $\bar{V}$  از محل تزریق محلول نمک ( $x=x_0$ ) تا انتهای فلوم برابر خواهد بود با:

$$\bar{V} = \frac{L}{x_0} \int_{x_0}^L V dx / (L-x_0) = \frac{S^{1/2}}{n(L-x_0)} \int_{x_0}^L R^{2/3} dx \quad (9)$$

بنابراین ضریب زبری مانینگ با کاربرد معادله (9) و استفاده از انتگرال به صورت عددی (Numerically) محاسبه گردید. بدیهی است که با در نظر گرفتن معادله (9) میانگین شعاع هیدرولیکی مؤثر  $R_{av}$ ، می تواند به صورت معادله زیر برای معادله مانینگ تعریف شود.

$$R_{av}^{2/3} = \int_{x_0}^L R^{2/3} dx / (L-x_0) \quad (10)$$

روابط مشابهی را نیز می توان برای برآورد سایر معادله های مقاومت بستر مانند  $f$  در فرمول دارسی- ویسباخ و  $C$  در فرمول شزی تعیین نمود.

### بحث و نتیجه گیری:

با وجود برتری معادله دارسی- ویسباخ از نقطه نظر بدون بعد بودن ضریب اصطکاک، معادله های مانینگ و شزی بطور معمول دارای کاربرد وسیعتری هستند. بنابراین در این بررسی، هر سه نوع معادله مذکور از نظر دارا بودن توانایی لازم در تشریح وضعیت هیدرولیکی جریان با استفاده از 5 دسته آمار حاصل از آزمایش های مختلف مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده شده اند. ویژگی ها و جزئیات این سه معادله و متغیرهای تشکیل دهنده آنها برای جریان ورقه ای و همچنین جریان شیاری در جدول 4 آمده است. در این جدول سرعت جریان برای جریان شیاری و ورقه ای براساس متغیرهای قابل اندازه گیری توصیف شده است. در مورد جریان شیاری در یک شیار با عرض  $W$  و شعاع هیدرولیکی  $R$ ، دبی جریان  $G$ ، جایگزین  $q$  شده است. برای بدست آوردن عمق جریان  $(D)$  نیز از رابطه  $D=G/WV$  استفاده شده است.

روشی که برای تعیین صحت معادلات زبری بستر به خدمت گرفته شده بدین ترتیب است که رابطه یا همبستگی بین سرعت اندازه گیری شده  $(V)$  از یک طرف و ترکیبی از سایر متغیرهای معادله های زبری مانند شیب بستر  $S$  و دبی جریان  $q$ ، که در سمت راست معادله های زبری نوشته شده (جدول 4) از طرف دیگر برای هر کدام از 5 گروه آمار مورد استفاده، در یک دستگاه محور مختصات مورد ارزیابی قرار می گیرد. به عبارت دیگر نحوه برازش رابطه خطی موجود بین سرعت رواناب و سایر متغیرهای معادله مانند حاصلضرب  $Sq$  ابتدا برای جریان ورقه ای در یک دستگاه محور مختصات تعیین می شود. بدیهی است که برای جریان شیاری بجای  $q$ ، عامل های تشکیل دهنده آن یعنی رابطه بین عرض شیار و عمق رواناب و یا شعاع

هیدرولیکی مقطع آن  $(R)$  در نظر گرفته می شود.

همانطور که در جدول 4 مشاهده می شود ارتباط بین  $V$  و سایر متغیرها نظیر  $S$  و  $q$  (و یا  $G$ ،  $W$ ،  $D$ ) برای معادله شزی و دارسی- ویسباخ یکسان است، بنابراین در این روش فقط یکی از این دو معادله یعنی معادله دارسی- ویسباخ با معادله مانینگ مورد مقایسه قرار گرفته است. نمونه ای از رابطه مذکور برای داده های آزمایشی لی و آبراهامز [16] و معادله ضریب اصطکاک دارسی- ویسباخ ترسیم گردیده است. که نتایج آن در شکل 2 آمده است.

اگر فرض کنیم که معادله زبری بیان کننده ی واقعی جریان هیدرولیکی و عوامل تشکیل دهنده ی آن باشد، رابطه موجود بین سرعت رواناب  $(V)$  و حاصلضرب دو عامل شیب و دبی  $(Sq)$  در طرف دیگر معادله باید بصورت خطی مستقیمی باشد که بدون عرض از مبدأ از مرکز مختصات عبور نماید.

همانگونه که در شکل 2 دیده می شود رابطه خطی موجود بین سرعت و متغیرهای ذکر شده از مبدأ مختصات عبور ننموده است. با استفاده از این روش مشخص گردید که هیچکدام از معادله های زبری (یا مقاومت بستر) دارای این شرایط ایده آل نمی باشد. به همین دلیل برای مقایسه سه نوع معادله مذکور از دو کمیت  $r^2$  ضریب همبستگی) و عامل عرض از مبدأ بعنوان معیارهای برازش روابط خطی مورد نظر، استفاده شد. به عبارت دیگر کوچک بودن مقدار عرض از مبدأ و نزدیک بودن ضریب همبستگی  $(r^2)$  به یک نشان دهنده توانایی بیشتر آن معادله در برآورد سرعت جریان خواهد بود. نتایج بررسی مقادیر ضریب همبستگی و عرض از مبدأ برای دو معادله مانینگ و دارسی- ویسباخ با استفاده از 5 دسته داده های آزمایشی به ترتیب برای جریان شیاری و جریان ورقه ای در جدول 5 و 6 آمده است. نتایج حاصله نشان می دهد که در مورد جریان ورقه ای همه داده های آزمایشی مقدار ضریب همبستگی معادله مانینگ نسبت به معادله دارسی- ویسباخ بزرگتر بوده و مقدار عرض از مبدأ آن کوچکتر است.

نتیجه های بررسی جریان شیاری در آزمایش های نگارنده نشان می دهد که مقدار ضریب همبستگی معادله مانینگ نسبت به معادله دارسی- ویسباخ بزرگتر است. ولی مقدار عرض از مبدأ معادله مانینگ فقط در آزمایش های مزرعه ای کوچکتر است و در مورد آزمایش های فلوم مقدار عرض از مبدأ معادله دارسی- ویسباخ نسبت به معادله معادله مانینگ کوچکتر است.

به طور کلی هیچکدام از معادله های زبری بطور کامل از نقطه نظر دو عامل مورد آزمایش (ضریب همبستگی و عرض از مبدأ) نماینده واقعی داده های مختلف آزمایشی نبودند ولی نتایج بررسی داده های آزمایشی نشان داد که معادله مانینگ با داشتن  $r^2$  بیشتر و عرض از مبدأ کمتر نسبت به معادله دارسی- ویسباخ (و همچنین معادله شزی) برتری نسبی دارد.

جدول ۴- تشریح سه معادله معروف مقاومت جریان همراه با متغیرهای معادله

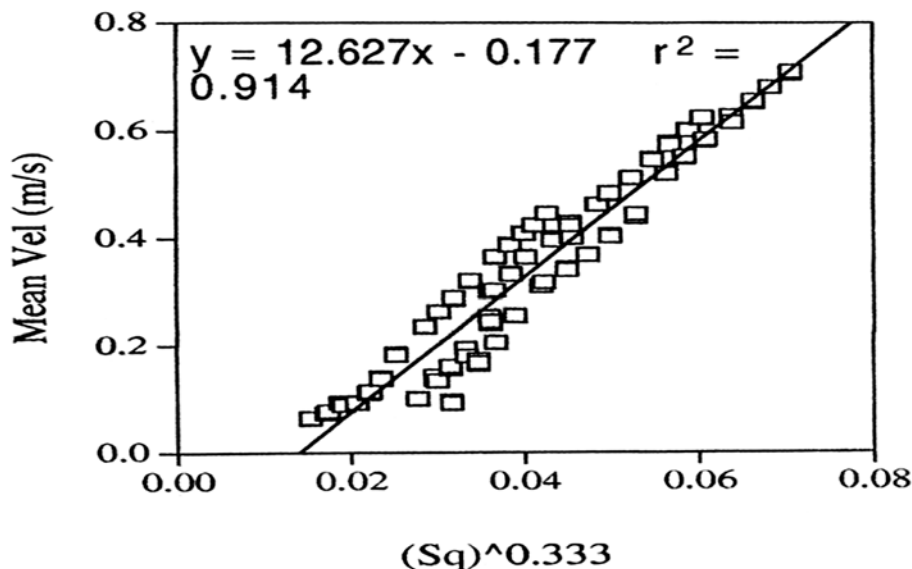
نوع معادله	نوع جریان	فرمول ضریب زبری	معادل سرعت (V) براساس سایر عملهای قابل اندازه گیری
مانینگ	ورقه ای	$n = \frac{S^{1/2} D^{2/3}}{V}$	$V = \frac{q^{0.4} S^{0.3}}{n^{0.6}}$
	شیاری	$n = \frac{S^{1/2} R^{2/3}}{V}$	$V = \frac{S^{0.3}}{n^{0.6}} \left( \frac{G}{W + 2D} \right)^{0.4}$
دارسی - ویسباخ	ورقه ای	$f = \frac{8gDS}{V^2}$	$V = \left( \frac{8gqS}{f} \right)^{0.333}$
	شیاری	$f = \frac{8gRS}{V^2}$	$V = \left[ \frac{8g}{f} \left( \frac{SG}{W + 2D} \right) \right]^{0.333}$
شزی	ورقه ای	$C = \frac{V}{(DS)^{1/2}}$	$V = C^{0.667} (qS)^{0.333}$
	شیاری	$C = \frac{V}{(RS)^{1/2}}$	$V = C^{0.667} \left( \frac{SG}{W + 2D} \right)^{0.333}$

جدول ۵- بررسی آماری دو معادله مانینگ و دارسی - ویسباخ با استفاده از ۵ دسته داده های آزمایشی برای جریان ورقه ای.

منبع داده ها (تعداد آزمایشهای انجام شده = N)						نوع معادله
گای و همکاران (۱۹۹۰) (N=20)		روحی پور (۱۹۹۷) (N=51)		لی و آبراهامز (۱۹۹۷) (N=105)		
R <sup>2</sup>	عرض از مبدا	R <sup>2</sup>	عرض از مبدا	R <sup>2</sup>	عرض از مبدا	
۰/۹۵۴	۰/۱۲	۰/۸۸۹	۰/۱۷۶	۰/۹۶۱	۰/۱۸	مانینگ
۰/۹۰۸	۰/۱۴۵	۰/۸۱۸	۰/۱۴۷	۰/۹۱۴	۰/۲۱۲	دارسی - ویسباخ

جدول شماره ۶- بررسی آماری دو معادله مانینگ و دارسی - ویسباخ با استفاده از داده های آزمایشی نگارنده برای جریان شیاری.

منبع داده ها (تعداد آزمایشهای انجام شده = N)				نوع معادله
روحی پور (۱۹۹۷) (آزمایشهای صحرائی) (N=19)		روحی پور (۱۹۹۷) (آزمایشهای فلوم) (N=26)		
R <sup>2</sup>	عرض از مبدا	R <sup>2</sup>	عرض از مبدا	
۰/۹۲۸	۰/۰۸۵	۰/۸۷۲	۰/۲۰۶	مانینگ
۰/۹۲۱	۰/۱۶۲	۰/۸۳۲	۰/۱۶۵	دارسی - ویسباخ



شکل ۲ - آزمون معادله‌ی داریسی - ویسباخ برای داده‌های لی و آبراهامز (۱۹۹۷)

می‌دهد از نظر ماهیت بیان‌کننده واقعی جریان ورقه‌ای باشد ( $\lambda=0$ ) رابطه بین سرعت رواناب ( $V$ ) و حاصلضرب دو عامل ( $S^{0.3}q^{0.4}$ ) باید بصورت خطی مستقیم باشد که با شیب  $B$  از مرکز مختصات عبور نماید.

$$n=B \frac{-5}{3} \quad (16)$$

حال داده‌های لی و آبراهامز [۱۶] که آزمایش آنها دارای دامنه بسیار وسیعی از عدد رینولدز است را انتخاب نموده و ارتباط بین سرعت رواناب ( $V$ ) اندازه‌گیری شده با کمیت ( $S^{0.3}q^{0.4}$ ) در یک دستگاه محور مختصات مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۳).

همان‌گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد، یک گسستگی بین داده‌های سرعت در سرعت‌های بالا و پایین وجود دارد. به عبارت دیگر، شیب خطی که از مبدا می‌گذرد، در سرعت‌ها یا دبی‌های پایین، کمتر است. بنابراین ضریب زبری مانینگ در سرعت‌ها یا دبی‌های پایین بیشتر خواهد بود (معادله ۱۶)، ولی در سرعت‌ها یا دبی‌های بیشتر حالت عکس اتفاق می‌افتد. در صورتی که ماهیت سطح جریان بدون در نظر گرفتن مقادیر  $V$  یا  $q$  مشابه با آنچه در بالا ذکر شد باشد (مانند آنچه که در تمام داده‌های مورد استفاده در این پژوهش وجود دارد)، مقدار ضریب زبری مانینگ باید ثابت بماند. بنابراین افزایش در ضریب زبری مانینگ برای سرعت‌ها و یا دبی‌های کم و یا کاهش ضریب زبری مانینگ برای سرعت‌ها و یا دبی‌های زیاد می‌تواند نشان‌دهنده‌ی خطای جزئی در معادله مانینگ باشد، که این نوع محدودیت همچنین در مورد معادله‌های شزی و داریسی - ویسباخ هم صادق است.

در صورتی که بر روی داده‌های شکل ۳ خطی برازش داده شود که لازم نباشد از مبدا مختصات بگذرد شیب خط حاصل  $16/8$  ( $B=16/8$ ) خواهد بود همچنین خط مذکور دارای عرض از مبدا نیز می‌باشد. در صورتی که خط برازش داده شده برای همان

#### ۴- روش جدید برای برآورد سرعت رواناب

همان‌گونه که ذکر گردید به علت برتری نسبی معادله مانینگ نسبت به سایر معادله‌های مورد مقایسه، در ادامه برای پیشنهاد یک روش جدید برآورد سرعت رواناب از معادله مانینگ استفاده شده است.

شکل کلی معادله مانینگ برای برآورد سرعت رواناب در جریان ورقه‌ای و جریان شیاری به صورت زیر است:

$$V = \frac{S^{1/2}}{n} R^{2/3} \quad (11)$$

که در این معادله برای جریان ورقه‌ای بجای  $R$  یا شعاع هیدرولیکی می‌توان عمق آب ( $D$ ) را منظور نمود. دبی واحد ( $q$ ) برای هر دو حالت جریان ورقه‌ای و جریان شیاری با مقطع مستطیل شکل برابر است با:

$$q=DV \quad (12)$$

با جانشین کردن  $R = \frac{WD}{W+2D}$  در معادله (۱۱) و بکار بردن معادله (۱۲) داریم:

$$V = \frac{S^{0.3}}{n^{0.6}} \left[ \frac{q}{1+\lambda} \right]^{0.4} \quad (13)$$

در رابطه‌ی اخیر برای ساده کردن فرمول حاصله به جای نسبت  $2D/W$ ، که از بسط رابطه بدست می‌آید، از عامل  $\lambda$  استفاده شده است. به عبارت دیگر  $\lambda$  برابر است با:

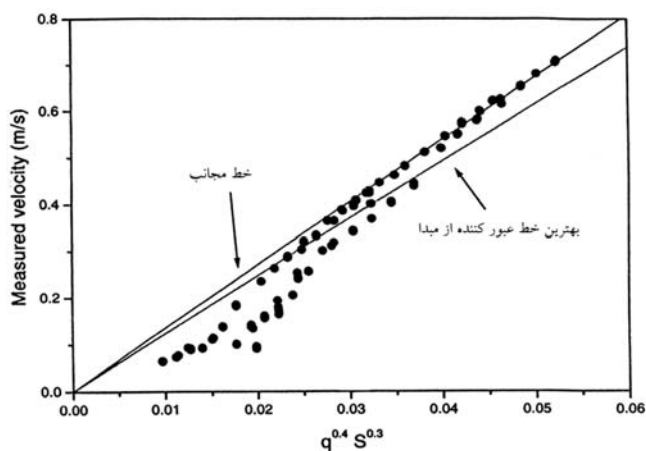
$$\lambda = 2D/W \quad (14)$$

برای جریان ورقه‌ای کم عمق که عمق رواناب نسبت به عرض بستر بسیار کم است این نسبت را می‌توان صفر فرض نمود بنابراین داریم:

$$V = \frac{S^{0.3}q^{0.4}}{n^{0.6}} \quad (15)$$

اگر معادله (۱۳) که شکل دیگری از معادله مانینگ را نمایش





شکل ۳ - رابطه ی بین سرعت اندازه گیری شده و عامل  $(q^{0.4} S^{0.3})$  برای داده های لی و آبراهامز (۱۹۹۷)

رینولدز است که از تابعی با معادله زیر تبعیت می نماید.  
(۱۷)

$$\alpha \left[ 1 - \exp\left(-\frac{Re}{Re_0}\right) \right]$$

همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده مقدار بسیار نزدیک به واحد

است بنابراین برای اصلاح معادله مانینگ کافی است که تابع معرف این انحرافات در سرعت محاسبه شده با استفاده از فرمول اصلی مانینگ، ضرب شود. در این صورت محصول نهایی بصورت معادله زیر خواهد بود:

$$v = \frac{\left[ 1 - \exp\left(-\frac{Re}{Re_0}\right) \right]}{n_0^{0.6}} \left( \frac{q}{1+\lambda} \right)^{0.4} S^{0.3}$$

(۱۸)

جدول ۷- خلاصه نتایج آماری بدست آمده با استفاده از سه مدل برای داده های لی و آبراهامز (۱۹۹۷)

کارایی	RMSE(m/s) (PM%)(1)	عامل ها		نوع مدل
$R^2 = 0.96$	0.035 (%9/7)	$A = -0.146 **$	$B = 16/8$	خط مستقیم
$R^2 = 0.96$	0.061 (%16/9)	$B = 12/31$	$(n = 0.0152)$	خط مستقیم گذر از مبدا مختصات
$E^{(1)} = 0.99$	0.01515 (%4/5)	$n_0 = 0.0131$	$Re_0 = 1827$	معادله ۱۸ (بهینه سازی شده به روش دو گام)
$E = 0.99$	0.01512 (%4/4)	$n_0 = 0.0130$	$Re_0 = 1851$	معادله ۱۸ (بهینه سازی شده به روش downhill simplex)

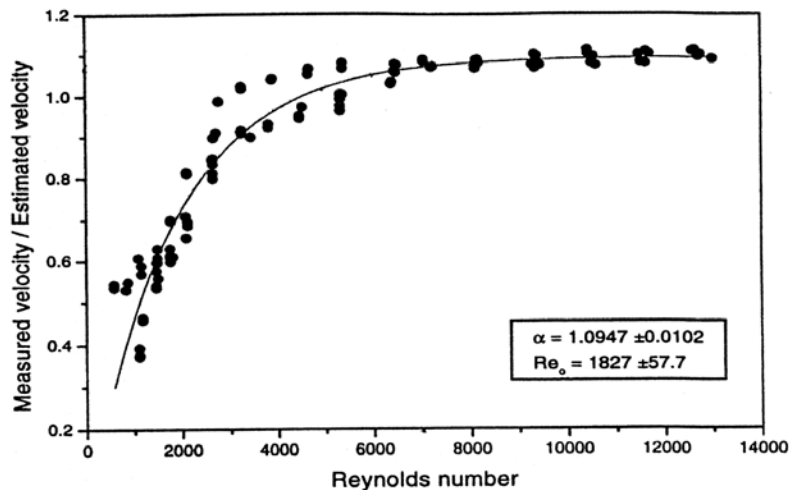
۱- نشان دهنده ی کارایی روش های بهینه سازی شده (downhill Simplex , two step method) در مدل های مورد استفاده است. در صورتی که مقدار آن برابر با یک باشد حداکثر تطابق بین مدل و داده های آزمایشی وجود دارد.  
\*\* معنی دار (P-Value < 0.0001)

داده های آزمایشی را به طور جبری از مبدا مختصات عبور دهیم خط حاصل دارای شیبی برابر با ۱۲/۳۱ خواهد داشت که براساس رابطه ی ۱۶ ضریب زبری مانینگ آن برابر ۰/۰۱۵۲ است (جدول ۷). جدول ۷ همچنین RMSE و  $R^2$  حاصل از برازش این داده ها را با استفاده از روش های مختلف نشان می دهد.

رابطه ی خط مستقیمی که هم از مبدا مختصات عبور نموده (شکل ۳) و هم با پوشش حداکثر نقاط دارای بهترین ضریب همبستگی  $R^2$  باشد را اولین برآورد تقریبی سرعت رواناب نامیده و به عنوان مدل پایه ای<sup>۱</sup> در نظر گرفته می شود. مشاهده می شود که برآورد حاصل از این رابطه خطی، نقاط با سرعت کمتر یا دبی کمتر را بیش برآورد<sup>۲</sup> و نقاط دارای سرعت یا دبی بالاتر را کم برآورد<sup>۳</sup> پیش بینی می کند. طبیعی است که پراکندگی تعدادی از نقاط در اطراف این مدل پایه ای که دارای انحراف بیشتری نسبت به این خط هستند شاید معلول تغییرات موجود در شرایط مختلف هیدرولیکی رواناب با دبی های متفاوت است. به همین دلیل تلاش شد تا در ادامه این بررسی چگونگی پراکندگی این نقاط نسبت به مدل پایه ای و ارتباط آن با سایر عامل های هیدرولیکی جریان مورد مقایسه و بررسی قرار گیرد. این مقایسه نشان داد که از بین عوامل هیدرولیکی مورد بررسی، عدد رینولدز دارای رابطه ای دقیقتر و بسیار همگن با پراکندگی حاصل از انحراف نقاط نسبت به مدل پایه ای است (شکل ۴).

همان طور که در این شکل دیده می شود نسبت سرعت اندازه گیری شده به سرعت برآورد شده (میزان پراکندگی) که با استفاده از مدل اصلی برآورد شده دارای یک رابطه نمایی با عدد

- 1 - Basic model
- 2 - Overestimate
- 3 - Under estimate



شکل ۴ - رابطه‌ی بین نسبت سرعت اندازه‌گیری شده بر گرفته از شکل ۳ به سرعت برآورد شده (با استفاده از مدل خطی گذر از مبدا) به عنوان تابعی از عدد رینولدز جریان

در این معادله  $n_0$  را میتوان ضریب زبری پایه نامید. ضریب زبری پایه عبارتست از کمیتی از  $n$  که در عدد رینولدزهای بالا تا حدودی ثابت است. بررسی داده‌های مختلف نیز نشان داد که کمیت  $Re_0$  مربوط به حالت خاصی از رواناب است که بین حالت ورقه‌ای و متلاطم<sup>۱</sup> جریان دارد یا به عبارتی دیگر  $Re_0$ ، عدد رینولدز مربوط به حالت انتقالی<sup>۲</sup> جریان است. نتایج معادله‌ی اصلاح شده مانینگ (معادله‌ی ۱۸) برای داده‌های لی و آبراهامز [۱۶] و نیز عامل‌های

آن که به روش دو گام<sup>۳</sup> بهینه‌سازی شده‌اند در جدول ۷ ارائه شده است. عامل‌های  $n_0$  و  $Re_0$  علاوه بر روش دو گام، باروش دان هیل سیمپلکس<sup>۴</sup> [۲۱، ۲۲] نیز بهینه‌سازی شدند که نتایج حاصله تا حدودی بهتر از روش دوگام بود. به عبارت دیگر مقدار

- 1-Turbulent
- 2-Transitional
- 3-Two step method
- 4-Downhill simplex method

جدول ۸ - خلاصه نتایج آماری آزمایش مدل اصلاح شده با استفاده از ۵ دسته داده‌های مورد بررسی

گای و همکاران (۱۹۹۰)	آبراهامز (۱۹۹۷)	لی و	روحی پور (۱۹۹۷) (آزمایشهای جریان ورقه‌ای)	روحی پور (۱۹۹۷) (آزمایشهای جریان شیاری)	روحی پور (۱۹۹۷) (آزمایشهای مزرعه‌ای)
۲۰	۱۰۵	۵۱	۲۳	۱۹	تعداد آزمایش‌ها
۱۱-۲۳۹	۵۸۳-۱۳۰۰۰	۶۴۸-۲۶۸۰	۳۷۸۹-۹۵۴۱	۳۶۷-۶۹۷۵	دامنه تغییرات (Re)
۰/۱۳۸	۰/۳۴۰	۰/۰۹۴	۰/۱۹۳	۰/۲۸۸	مدل
۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۴۰	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۵۷	سرعت متوسط (m/s)
۱۴۱	۱۸۵۱	۷۹۴	۲۸۵۷	۱۳۶۰	$n_0$
۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۸۳	۰/۹۲	$Re_0$
۰/۰۲۱	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۳۷	۰/۰۳۷	E
٪۱۴/۹	٪۴/۴	٪۱۶/۵	٪۱۸/۹	٪۱۲/۸	RMSE in m/s (% of the mean)
۰/۰۱۱	۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۸۹	۰/۰۲۸۲	۰/۰۲۶۳	n
۰/۰۳۵	۰/۰۶۱	۰/۰۲۴	۰/۰۴۰	۰/۰۳۸	خط مستقیم عبور کننده از مبدا مختصات
٪۲۵/۳	٪۱۶/۹	٪۲۶/۵	٪۲۱/۰	٪۱۳/۳	RMSE in m/s (% of the mean)

ناهمواری‌های موجود در کف بستر توسط رواناب تا حدودی پوشیده بوده و پدیده‌های فرسایشی بستر نیز بین کم تا متوسط متغیر بوده است. در یک دسته از آمار مورد بررسی رواناب بدون بار رسوب و در سایر دسته‌ها، رواناب دارای بار رسوب با غلظت متوسط بوده است. این نتایج نشان داد که بار رسوب تأثیر بسیار محدودی در  $\pi_0$  یا ضریب زبری مانینگ پایه داشته است. همچنین تأثیر برخورد قطرات باران روی رواناب نیز تأثیر قابل توجهی روی ضریب زبری نداشته است. تجزیه و تحلیل آمار کلیه منابع مورد بررسی که در جدول‌های قبلی ارائه گردید حاکی از این است که هر سه معادله معروف مربوط به مقاومت بستر که از آنها نام برده شد، به طور کلی توانایی محاسبه عامل‌های هیدرولیکی مورد نیاز را دارا بوده ولی معادله ضریب زبری مانینگ دارای توانایی بیشتری است و ضریب همبستگی آن نسبت به سایر معادله‌های مورد بررسی بیشتر بوده است.

بررسی خطوط برازش داده شده سه معادله مذکور نشان داد که هیچ کدام از آنها از مرکز مختصات عبور ننموده و به عبارتی دارای عرض از مبدا می باشند. ولی به طور کلی مقدار ضریب زبری با تغییرات جریان رواناب از نظر حجمی تغییر می نماید، بدین معنی که به طور معمول با افزایش سرعت رواناب، ضریب زبری در معادله‌های مذکور، (مانینگ، دارسی- ویسباخ و شزی) کاهش پیدا می کند. از آنجایی که ناهمواری‌های فیزیکی موجود در کلیه آزمایش‌های مذکور توسط رواناب پوشیده بوده، بنابراین احتمال دارد که تغییرات ضریب زبری با مقدار رواناب از نظر مفهوم بیشتر ظاهری بوده تا اینکه واقعیت داشته باشد. بررسی‌های مذکور نشان داد که این محدودیت در کاربرد هر سه نوع معادله وجود دارد، بنابراین به نظر می رسد که جایگزینی و کاربرد معادله اصلاح شده

RMSE بدست آمده از این روش نسبت به روش دو گام کمتر است. برای بهینه‌سازی عامل‌های  $Re_0$  و  $\pi_0$  در معادله اصلاح شده مانینگ به روش فوق، با استفاده از نتایج ۵ دسته آمار مورد نظر و همچنین کاربرد روش آماری دان هیل سیمپلکس مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۸ آمده است.

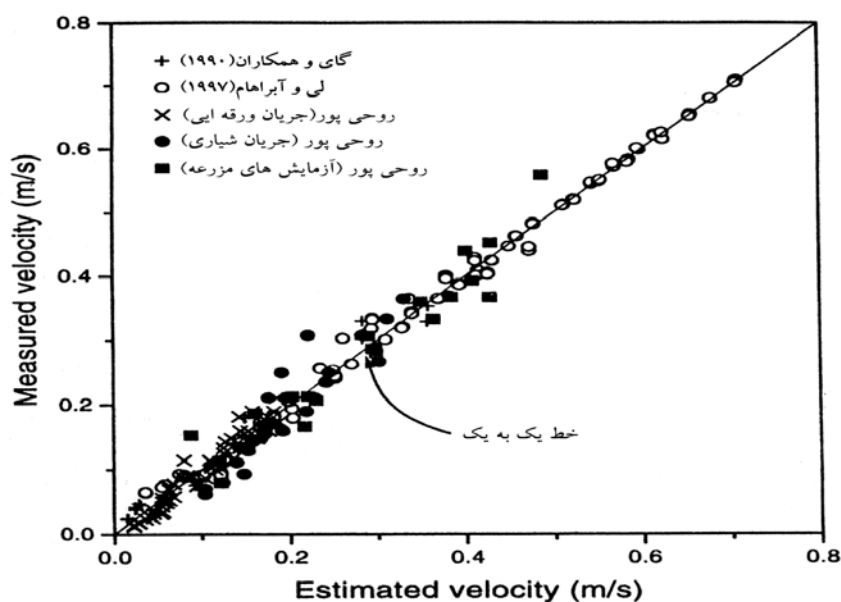
این جدول نشان می دهد که مقدار  $Re_0$  در ۵ دسته از آمار مورد استفاده بیشتر تحت تأثیر دامنه تغییرات عدد رینولدز قرار گرفته و مقدار آن حتی در شرایط جریان شیری با بیشینه عدد رینولدز (۹۵۴۱) از ۳۰۰۰ کمتر است و تا حدودی در کلیه آمار مورد استفاده مقدار آن در حد عدد رینولدز انتقالی است. ضریب زبری پایه ( $\pi_0$ ) در جریان ورقه‌ای تا حدودی ثابت بوده و مقدار آن در جریان‌های شیری ۲ تا ۳ برابر بیشتر از جریان ورقه‌ای است.

کاربرد معادله اصلاح شده مانینگ برای برآورد سرعت رواناب بر روی ۵ دسته از داده‌های فوق الذکر مورد آزمایش قرار گرفت و سرعت برآورد شده با این معادله با مقدار اندازه گیری شده آن مقایسه گردید که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.

همان طوری که در این شکل دیده می شود وجود همبستگی بسیار زیاد بین سرعت برآورد شده توسط معادله جدید و سرعت اندازه گیری شده، نشان دهنده توانایی مدل اصلاح شده برای برآورد رواناب در شرایط مختلف می باشد.

### جمع‌بندی نتایج:

کلیه آمار مورد بررسی در این پژوهش که از ۵ منبع مختلف انتخاب گردیده بود (سه دسته آزمایش‌های نگارنده و دو دسته دیگر از منابع قابل اعتماد) همگی در شرایطی از جریان رواناب بدست آمده‌اند که



شکل ۵- مقایسه سرعت برآورد شده با استفاده از معادله اصلاح شده مانینگ و سرعت اندازه گیری شده

165-175.

9- Dunkerley, D.L. 2002b. Surface tension and friction coefficients in shallow, laminar overland flows through organic litter. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 45-58.

10- Dunkerley, D.L. 2003a. Determining friction coefficients for interrill flows: the significance of flow filaments and backwater effects. *Earth Surface Processes and Landforms Volume* 28: 475-491.

11- Dunkerley DL. 2003b. An optical tachometer for short-path, measurement of flow speeds in shallow overland flows: improved alternative to dye timing. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 777-786.

12- Govers, G. 1992. 'Relationships between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials', *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 515-528.

13- Guy, B. T, Dickinson, W. T, Rudra, R. P. and Wall, G. 1990. 'Hydraulics of sediment-laden sheet flow and the influence of simulated rainfall', *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 101-118.

14- Laflen, J. M., Lane, L. J. and Foster, G. R. 1991. 'WEPP: A new generation of erosion prediction technology', *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 34-38.

15- Lawrence, D. S. L. 1997. 'Macroscale surface roughness and frictional resistance in overland flow', *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 365-382.

16- Li, G. and Abrahams, A. D. 1997. 'Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow', *Water Resources Research*, 33, 341-347.

17- Luk, S. H. and Merz, W. 1992. 'Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow', *Soil Technology*, 5, 289-301. 'minimization', *Computer Journal*. 7,308-313.

18- Misra, R. K. and Rose, C. W. 1996. 'Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST, *European Journal of Soil Science*, 47, 593-604.

مانینگ (معادله شماره ۱۸) یک راه حل بهتری برای برآورد رواناب محسوب می شود زیرا دارای محدودیت های ذکر شده فوق نمی باشد. برای استفاده از این روش در برآورد سرعت رواناب در شرایطی که مقدار دبی واحد و شیب زمین معلوم است، هنوز لازم است که دو عامل تعریف شده در این معادله یعنی  $n_0$  و  $Re_0$  نیز برآورد شوند. این دو عامل لازم است که از قبل توسط آزمایش های مربوطه در مقیاس پلات تعیین گردد. همان گونه که پیشتر اشاره گردید  $Re_0$  مربوط به عدد رینولدز جریان انتقالی بوده که بین ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متغیر است و نیز ضریب زبری پایه است که کمیت آن برای عددهای رینولدز بالا تا حدودی ثابت می باشد. در این آزمایش ها برای جریان لایه ای در حدود  $0.1 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  و برای جریان های شیاری دو تا سه برابر افزایش پیدا کرده است

### منابع

۱- روحی پور، ح.، جوادی پ. و محبوبی، ع. ۱۳۸۴. تأثیر سنگریزه بر روی فرسایش و رسوب دو نوع خاک با استفاده از فلوم و شبیه سازی باران. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۶-۹ شهریور. تهران. ۷۱۶-۷۲۱.

2- Abrahams, A. D. and Parsons, A. J. 1994. 'Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces', *Catena*, 23,111-140

3- Abrahams, A.D., Gao P, Aebly FA. 2000. Relation of sediment transport capacity to stone cover and size in rain-impacted interrill flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 25:497-504.

4- Chow, V. T. 1959. *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.

5- Emmett, W. W. 1970. *The hydraulics of overlandflow on hillslopes*, US Geological Survey Professional Paper 662-A, 68 pp.

6- Dunkerley, D.L. 2001. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection - uncertainty on rough surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 363-374.

7- Dunkerley, D.L. Domelow P, Tooth D. 2001. Frictional retardation of laminar flow by plant litter and surface stones on dryland surfaces: a laboratory study. *Water Resources Research* 37 1417-1424.

8- Dunkerley, D.L. 2002a. Volumetric displacement of flow depth by obstacles, and the determination of friction factors in shallow overland flows. *Earth Surface Processes and Landforms* 27:

University Press, Cambridge, 301-343.

24- Rose, C. W., Coughlan, K. J., Ciesiolka, C. A. A. and Fentie, B. 1997. 'Programe GUEST (Griffith University Erosion System Template)', in Coughlan, K. J. and Rose, C. W. (Eds), A New Soil Conservation Methodology and Application to Cropping Systems in Tropical Steeplands, ACIAR Technical Report 40, 35-58.

25- Rouhipour, H. H. Ghadiri, and C. W. Calvin. 2005. Investigation of the interaction between fow-driven and rainfall-driven erosion processes. Australian Journal of Soil Research, 44, 503-514.

26- Savat, J. 1980. 'Resistance to flow in rough supercritical sheet flow', Earth Surface Processes, 5, 103-122.

27- Zapp, R. Poesen, J. and Nearing, M.A. 2007. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. Earth Surface Processes and Lanforms, 32, 1063-1076.

19- Morgan, R. P. c., Quenton, J. N. and Rickson, 12- R. J. 1992. EUROSEM: Documentation Manual, Silsoe College, Solsoe, UK.

20- Nearing, M. A., Norton, L. D., Bulgakov, D. A., Larionov, G. A., West, L. T and Dontsova, K. M. 1997. 'Hydraulics and erosion in eroding rills', Water Resources Research, 33, 865-876.

21- Nelder, J. A. and Mead, R. 1965. 'A simplex method for function Press, W. H., Teukolsky, S. 15-A., Vetterling, W. T and Flannery, B. P. 1992. Numerical Recipes, Cambridge University Press, Cambridge.

22- Press, W. H., Teukolsky, S. 15-A., Vetterling, W. T and Flannery, B. P. 1992. Numerical Recipes, Cambridge University Press, Cambridge

23- Rose, C. W. 1993. 'Erosion and sedimentation', in Bonnell, M., Hufschmidt, M. M. and Gladwell, J. S. (Eds), Hydrology and Water Management in the Humid Tropics, Cambridge