دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

ارائه یک رابطه تجربی برای تخمین غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای (مطالعه موردی: حوضه آبریز جیان‌جیا واقع در چین)

محمد ابراهیم بنی‌حبیب[۱] و میترا تنهاپور[۲]

۱- دانشیار گروه مهندسی آبیاری زهکشی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، (نویسنده مسوول: banihabib@ut.ac.ir)
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۱

چکیده

سیلاب واریزه‌ای به عنوان یک فاجعه شدید زمین‌شناسی، هر ساله باعث ایجاد خسارات زیادی در مناطق کوهستانی می‌شود. غلظت رسوب سیلاب واریزه‌ای بر روی دبی اوج سیلاب و زبری هیدرولیکی جریان اثر دارد لذا تخمین غلظت رسوب براساس ویژگی‌های فیزیکی حوضه، رسوب و بارش ضروری است. هدف از مطالعه حاضر، ارائه مدل تجربی برای تعیین غلظت رسوبات سیلاب‌های واریزه‌ای در منطقه مورد مطالعه با استفاده از پارامترهای بارندگی است، بنحوی‌که ضعف برآورد مقدار ثابت غلظت روابط ارائه شده توسط محققان قبل را برطرف نماید. بدین منظور روابط بین هر یک از پارامترهای بارندگی تجمعی، بارش پیشین و بارش کل (مجموع پارامترهای بارندگی پیشین و بارندگی تجمعی) با غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای با استفاده از داده‌های بارندگی و وزن مخصوص سیلاب واریزه‌ای ایستگاه تحقیقات بین‌المللی حوضه جیان‌جیا در محدوده سال‌های ۲۰۰٤-۱۹۹۹ ارزیابی شد. برای تعیین بهترین رابطه، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد و خطای روابط توسط آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، میانگین مطلق خطای نسبی (MARE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) تعیین شد. نتایج نشان داد با استفاده از مجموع پارامترهای بارندگی تجمعی و بارش پیشین (بارش کل)، برای تعیین غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای، صحت بالاتری بدست می‌آید. مقدار شاخص‌های آماری مدل ارائه شده (MARE = ۰/۰٦، R^2 =۰/۸٦ و NSE=۰/۸٤) نشانگر توانایی بالای آن در برآورد غلظت رسوبات سیلاب‌های واریزه است طوری‌که خطای برآورد غلظت رسوبات توسط محققان دیگر را به صورت میانگین تقریباً ۸۰ درصد کاهش داده است. محدوده چگالی نسبی رسوبات بین ۱/٦۳-۲/۲۳ گرم در سانتی‌متر مکعب، بارندگی تجمعی بین ۳/۳٦-۷۵/۳٦ میلی‌متر و بارش پیشین بین ۰/۷۷۲-۹۲/۵۹ میلی‌متر متغیر است. پس از واسنجی رابطه پیشنهادی این تحقیق، می‌توان آن را برای برآورد غلظت رسوبات سیلاب‌های واریزه‌ای سایر حوضه‌های مستعد رخداد سیلاب واریزه‌ای و دارای رگبارهای مشابه سیل آسا استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی متقابل، بارش پیشین، دبی اوج سیلاب، سیلاب واریزه‌ای، غلظت رسوب

مقدمه

سیلاب واریزه‌ای یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که امنیت جانی و مالی انسان را تهدید می‌کند و از مهم‌ترین نگرانی‌های بشر از گذشته تا به امروز قلمداد می‌شود. این سیلاب‌ها بر روی دامنه‌های شیب‌دار به سرعت حرکت کرده و در مسیر حرکت خود خسارات زیادی به بار می‌آورند. هم‌چنین خطرات زیاد آن‌ها در مناطق کوهستانی و شیب‌دار کشورهای مختلف از جمله ژاپن، چین، تایوان، ایالات متحده آمریکا، کانادا، نیوزیلند، فیلیپین، رشته کوه‌های آلپ اروپا، روسیه، قزاقستان و ایران، موجب توجه بیش از پیش به آن شده است (۱۰). سیلاب واریزه‌ای نوعی از سیلاب با غلظت بالای رسوب است که بیشتر از ۵۰ درصد وزن جریان، از شن، ماسه و سنگ تشکیل شده است. محدوده اندازه رسوبات بین ذرات ریز رس تا تخته سنگ‌هایی به قطر چندین متر، می‌تواند متغیر باشد. بنابراین ماهیت سیلاب‌های واریزه‌ای عمدتاً با توجه به غلظت رسوب و مشخصات اندازه رسوب تغییر می‌کند (۱۲). مطالعات اخیر نشان می‌دهد سیلاب واریزه‌ای عموماً در نواحی کوهستانی با شیب تند، نواحی نیمه خشک ویا آتشفشانی به وقوع می‌پیوندد (۱). باران‌های سنگین و طولانی‌مدت، زلزله و فعالیت‌های انسانی از دلایل اصلی وقوع این سیلاب‌ها هستند. موادی از قبیل گل و لای، تنه درخت و تخته‌سنگ باعث افزایش حجم رسوبات جریان می‌شود بطوری‌که آنچه در مسیر جریان قرار دارد، نظیر پل‌ها و جاده‌ها، خطوط راه‌آهن، خانه‌ها و سایر اموال را تخریب می‌کند. برای مثال عبور سنگ و رسوبات از روی تأسیسات و سازه‌ها نظیر سرریز سدها و حوضچه‌های آرامش، باعث ایجاد خوردگی، فرسایش، حفره و در نهایت منجر به اختلال در عملکرد سازه‌ها می‌شود (۲). بنابراین غلظت بالای رسوب باعث افزایش قدرت تخریبی این سیلاب‌ها می‌شود. برای سیلاب‌های واریزه با غلظت بسیار بالای رسوب، تعیین غلظت رسوبات، به دلیل ایجاد خسارات و تغییرات چشم‌گیر در ویژگی‌های هیدرولیکی جریان از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۸). تغییرات ویژگی‌های سیلاب واریزه‌ای را می‌توان با استفاده از روابط تجربی پیش‌بینی کرد. ریکنمن (۱۷)، اثر غلظت رس در انتقال بار بستر را بررسی کرد. او در مطالعه خود نشان داد، افزایش غلظت رس تا میزان ۱۷ درصد در جریان باعث افزایش ظرفیت انتقال رسوبات می‌شود. چنان‌چه غلظت رس بیشتر از ۱۷ درصد شود، میزان انتقال بار بستر، روند رو به کاهشی خواهد داشت. او استدلال کرد، ذرات رس باعث افزایش ویسکوزیته و زبری جریان می‌شود. به علاوه در غلظت بالای رس، رژیم جریان از نظر هیدرولیکی آرام خواهد شد. آو و میزویاما (۱۵)، به منظور تعیین متوسط غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای، آزمایشاتی بر روی فلوم انجام دادند و با توجه به شیب بستر کانال به عنوان عامل اصلی، معادله تجربی زیر را پیشنهاد دادند:

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

$$C=\frac{4.3C_*(\tan\theta)^{1.5}}{1+4.3C_*(\tan\theta)^{1.5}}$$ رابطه (۱)

در رابطه فوق، C: متوسط غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای است. C_*: حداکثر غلظت رسوب و θ: زاویه شیب بستر فلوم است.

لین و سای (۱۲) رابطه‌ای برای شبیه‌سازی توزیع غلظت رسوب سیلاب‌های واریزه‌ای با استفاده از اصل حداکثر آنتروپی ارائه دادند. مفهوم آنتروپی یک روش جدید است که می‌توان با استفاده از آن ماهیت پدیده‌های هیدرولیکی، نظیر توزیع عمودی سرعت، تنش‌برشی و توزیع غلظت رسوب معلق در جریان کانال‌های روباز را بررسی کرد. طبق این اصل، رابطه بین غلظت رسوب در امتداد عمق مشخص می‌شود. رابطه ۲ با استفاده از اصل حداکثر آنتروپی به دست آمده است. این رابطه با استفاده از پارامتر آنتروپی E، توزیع غلظت رسوبات در سیلاب واریزه را به دست می‌آورد. هم‌چنین آن‌ها معادله ۳ را جهت برآورد توزیع غلظت رسوبات در عمق، ارائه دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد معادلات توزیع غلظت رسوبات ارائه شده در این تحقیق به خوبی با مجموعه داده‌های تجربی تاکاهاشی (۱۹۷۸) و سایر محققان تطابق دارد (۱۲).

$$\frac{C}{C_*}=\frac{1}{E}Ln[e^{E}+(e^{EC_h/C_*}-e^{E})\frac{y}{h_0}]$$ رابطه (۲)

رابطه (۳)

$$\frac{C}{C_*}=\frac{1}{2}[(1+x_3+x_4)\pm(\sqrt{(1+x_3+x_4)^2-4x_3})]$$

که در روابط فوق x_3 و x_4 به صورت زیر تعریف شده است:

$$x_3=\frac{\rho\tan\theta}{C_*(\rho_S-\rho)(\tan\varphi-\tan\theta)}$$ رابطه (۴)

$$x_4=\frac{\eta}{C_*\cos\theta(\tan\varphi-\tan\theta)}$$ رابطه (۵)

در روابط فوق، E: پارامتر آنتروپی، C_h: غلظت رسوبات در سطح جریان، y: فاصله عمودی از بستر کانال، h_0: عمق جریان، η مقدار ثابتی است که بر اساس نتایج آزمایشگاهی در این مطالعه معادل ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است (۱۲). C غلظت رسوب در سیلاب واریزه‌ای، C_* حداکثر غلظت رسوب در بستر ثابت، φ زاویه اصطکاک دینامیکی، θ: زاویه انحراف بستر کانال نسبت به افق، ρ : چگالی آب (گرم در سانتی‌متر مکعب) و ρ_s: چگالی رسوب (گرم در سانتی‌متر مکعب) است.

دونگ و همکاران (۵)، متوسط حجم رسوبات خروجی از سیلاب واریزه‌ای را با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از سیلاب واریزه‌ای توسط طوفان توراجی[1] به صورت زیر به دست آوردند:

$$V=7273A^{0.582}$$ رابطه (۶)

V: حجم کل رسوبات (مترمکعب) وA: مساحت حوضه (مترمکعب) است.

ریکنمن و کاچنی (۱۶) به منظور بررسی فرآیندهای انتقال رسوب، در اثر وقوع سیلاب واریزه‌ای در رودخانه‌های واقع در سمت شمال رشته کوه‌های آلپ در سوئیس، از روابط بار بستر نظیر پیتر و مولر واقع در منطقه مذکور استفاده کردند. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد برای کانال‌هایی با شیب کمتر از ۵ درصد، معادله محققان دیگر (نظیر پیتر و مولر) حجم بار بستر را به خوبی برآورد می‌کند درحالی‌که معادله مورد آزمایش در این مطالعه (رابطه ۷)، مقدار کمتری پیش‌بینی می‌کند. در مورد کانال‌هایی با شیب بیشتر از ۵ درصد، حجم رسوبات مشاهداتی در رودخانه بیشتر از مقدار کل بار بستر پیش‌بینی شده، توسط معادله مورد آزمایش است. برای سیلاب‌های واریزه‌ای با حجم بالای رسوب، با توجه به حجم رواناب و شیب کانال، حجم رسوب می‌تواند به میزان چشم‌گیری تغییر کند.

$$V=C_aA^{1.35}S^{1.7}$$ (۷)

V: حجم بار بستر سیلاب واریزه‌ای (مترمکعب) A: مساحت حوضه (کیلومتر مربع) و S: شیب حوضه و C_a: ضریبی است که مقدار آن به ازای بهترین برازش برابر ۶۵۰۰۰ است.

هم‌چنین مطالعات مشابه توسط محققانی نظیر تاکی (۲۰) با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از کشور ژاپن، فرانزی و بیانکو (۷)، با استفاده از داده‌های حوضه آلپ، مارچی و آگوستینو (۱۳)، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از شرق کوه‌های آلپ ایتالیا، گزارش شده است. همان‌طور که بررسی شد، محققان زیادی در سراسر جهان به روش‌های متفاوت، با استفاده از پارامترهای مختلف نظیر شیب و مساحت حوضه، حجم رواناب و... حجم رسوبات ناشی از سیلاب واریزه‌ای را برآورد کردند. بنابراین لازم است غلظت رسوب سیلاب واریزه‌ای به منظور کاهش خسارات ناشی از وقوع سیلاب و اطمینان از عملکرد صحیح سازه‌ها در مراحل مختلف طراحی و بهره‌برداری، برآورد شود. اما هنوز مطالعات کافی در زمینه بررسی تأثیر عواملی نظیر بارندگی تجمعی و بارش پیشین بر غلظت رسوبات سیلاب صورت نگرفته است. لذا هدف از این مطالعه، ارائه مدل تجربی بر اساس رابطه بین غلظت رسوب و پارامترهای بارندگی، به منظور تخمین غلظت رسوب سیلاب واریزه‌ای رخداده در ایستگاه تحقیقات بین‌المللی حوضه جیان‌جیا[2] واقع در چین است. به گونه‌ای که ضعف برآورد مقدار ثابت غلظت برای کلیه سیلاب‌های واریزه توسط رابطه‌های پیشین را اصلاح کند.

1- Toraji typhoon

2- Jiangjia Gully

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه مطالعاتی جیان‌جیا یک ایستگاه تحقیقات بین‌المللی است که داده‌های آن می‌تواند به عنوان معیار اصلی در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گیرد. این حوضه یکی از حوضه‌های رودخانه شوجنگ[1] است که دارای ۵ زیرحوضه دیگر است (۴). این حوضه با طولی معادل ۱۳/۹ کیلومتر و مساحتی برابر ۴۸/۶ کیلومتر مربع در شمال شرق استان یونان و جنوب غرب چین و در محدوده طول جغرافیایی ′ ۶ °۱۰۳ تا ′ ۱۳ °۱۰۳ شرقی و عرض جغرافیایی ″۱۳ °۲۳ تا ″۱۷ °۲۳ شمالی واقع شده است. حداکثر ارتفاع در این حوضه ۳۱۷۷/۲ متر و حداقل ارتفاع ۱۲۵۹/۱ متر است. شیب‌های تندتر از ۲۵ درجه ۵۵ درصد از مساحت حوضه را با اختلاف ارتفاع ۵۰۰ متر تشکیل می‌دهد. هم‌چنین در طول هر فصل آبی حدود ۸۵ درصد از بارندگی‌های سالانه باعث رخداد ۱۲ تا ۲۰ واقعه سیلاب واریزه ای می‌شوند. این رکورد در سال ۱۹۶۵ با تعداد ۲۸ واقعه به حداکثر خود می‌رسد. متوسط رسوب سالانه در این آبراهه به ۲ میلیون مترمکعب می‌رسد در حالی‌که حداکثر آن به ۶/۶ میلیون مترمکعب (در سال ۱۹۹۱ با توجه به وقوع سیلاب واریزه ای سنگین) رسیده است (۲۲). عمده سنگ‌های این حوضه از نوع سنگ‌های دگرگونی پروتروزوییک هستند و تقریباً ۸۰ درصد از رخنمون این سنگ‌ها به راحتی تحت تأثیر تغییرات آب و هوا قرار می‌گیرند در نتیجه حجم عمده‌ای از مواد حوضه ساختار سستی دارند. ماسه‌سنگ و تخته‌سنگ به طور گسترده در مناطقی که مستعد سیلاب‌های واریزه هستند، توزیع شده است (۸). ۴/۲ درصد از مساحت حوضه را جنگل، ۸/۴ درصد بوته‌زار، ۲۶/۹ درصد مرتع، ۲۶/۳ درصد زمین‌های بایر و ۳۴/۲ درصد شامل سطوح آبرفتی، زمین‌های کشاورزی و زمین‌های دیگر است (۴). بارندگی متوسط سالانه ۸۰۰ میلی‌متر، با حدکثر ۱۱۳۰ میلی‌متر و حداقل ۵۱۴ میلی‌متر در طول سال‌های ۱۹۵۳ تا ۲۰۱۰ رخ داده است. بارندگی‌های شدید با مدت کوتاه ۱۰ تا ۲۰ دقیقه‌ای می‌تواند باعث وقوع سیلاب شود. وقایع بارندگی توسط باران‌سنج‌هایی ثبت می‌شود که داده‌های بارش را با دقت و کیفیت بالایی اندازه‌گیری می‌کنند. مطالعات پیشین (وو و همکاران (۲۱)، گوا و همکاران (۸)، نشان داده است عمدتاً بارندگی‌های حوضه منکیان منجر به وقوع سیلاب واریزه‌ای در حوضه جیان‌جیا می‌شود. به همین دلیل داده‌های باران‌سنج این حوضه، به عنوان منبع اصلی داده‌ها استفاده شده است. بارندگی‌هایی که در این حوضه باعث راه‌اندازی لغزش زمین و در نهایت سیلاب واریزه‌ای می‌شوند، از مقدار شدت بارش حداقل ۰/۰۸۴ تا مقدار حداکثر ۰/۰۴۸ میلی‌متر در دقیقه متغیر هستند (۲۲). بنابراین با توجه به رخداد مکرر سیلاب واریزه‌ای و اندازه‌گیری‌های گسترده پارامترهای سیلاب واریزه‌ای در این ایستگاه بین‌المللی و در دسترس بودن اطلاعات کامل، جامع و دقیق برای این حوضه، داده‌های آن می‌تواند به عنوان یک منبع اصلی در تحقیقات بین المللی به کار رود. لازم به ذکر است، استخراج رابطه جهت تخمین غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای بر اساس پارامترهای بارندگی، نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای سیلاب واریزه‌ای از جمله وزن مخصوص سیلاب واریزه‌ای و قطر رسوبات دارد. از آنجا که این اندازه‌گیری‌ها در حوضه‌های ایران انجام نمی‌شود، ناچاراً از این ایستگاه بین‌المللی استفاده شده است تا بتوان نتایج حاصل را در مورد حوضه‌هایی در ایران که دارای رگبارهای مشابه با حوضه مورد مطالعه هستند نیز به کار برد.

تحلیل تئوری مسئله

برآورد غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای با استفاده از رابطه تاکاهاشی

تاکاهاشی در سال ۱۹۷۷ آزمایشی با استفاده از یک فلوم فولادی که عرض آن ۲۰ سانتی‌متر، عمق ۴۰ سانتی‌متر و طول ۷ متر انجام داد که شیب آن بین صفر تا ۳۰ درجه تغییر می‌کرد. قبل از شروع آزمایش، موادی با ضخامت یکنواخت ۱۰ سانتی‌متر روی بستر فلوم قرار داده شد. با تغییر ناگهانی دبی آب، در انتهای بالادست کانال، حفره‌ای از ترکیب آب و شن در اثر فرسایش بستر به وجود می‌آید که به سمت پایین‌دست حرکت می‌کرد. با افزایش شیب بستر ابتدا ارتفاع حفره ناشی از فرسایش به سرعت افزایش یافته و به تدریج به ارتفاع متعادلی می‌رسد. ذرات جریان در این مرحله در سراسر عمق پراکنده می‌شوند و شرایط برای وقوع سیلاب واریزه‌ای مساعد می‌شود. قطر ذرات مورد استفاده در آزمایش او بین ۵/۸–۳ میلی‌متر، حداکثر غلظت ذرات با مشخصه‌های مختلف بین ۰/۷۵–۰/۶ و زاویه اصطکاک داخلی ذرات بین ۴۰/۱۲ تا ۵۸/۴۷ درجه متغیر است. دبی و غلظت رسوب در انتهای پایین‌دست فلوم اندازه‌گیری می‌شود.

تاکاهاشی آزمایشات متعددی تحت مقادیر مختلف دبی در واحد عرض انجام داد و به این نتیجه رسید که غلظت رسوبات، وابسته به شیب بستر و مستقل از دبی جریان است. به این ترتیب او با فرض توزیع یکنواخت غلظت رسوب در عمق، معادله زیر را استخراج کرد (۱۹):

$$C=\frac{\rho\tan\theta}{(\sigma-\rho)(\tan\varphi-\tan\theta)}=C_{\infty} \qquad (۸)$$

در رابطه فوق، ρ وزن مخصوص آب (معادل ۱ گرم بر سانی‌مترمکعب)، θ زاویه شیب بستر، φ زاویه اصطکاک داخلی، σ وزن مخصوص ذرات رسوب (برابر ۲/۶۵ گرم بر سانی‌مترمکعب) و C غلظت رسوبات است.

جهت استفاده از رابطه تاکاهاشی برای برآورد غلظت رسوب عوامل رودخانه جیان‌جیا استخراج گردید. با توجه به این‌که بیشتر سنگ‌ها در این حوضه درشت‌دانه و تیزگوشه هستند مقدار زاویه φ معادل ۴۲ درجه و حداکثر شیب حوضه برابر ۳۱/۸ درجه است. بنابراین با جایگذاری مقادیر ذکر شده حداکثر مقدار عددی غلظت رسوبات از رابطه تاکاهاشی برآورد می‌گردد.

برآورد غلظت رسوبات با استفاده از مدل پیشنهادی

همان‌گونه که اشاره شد، تاکاهاشی اظهار داشت که توزیع غلظت رسوبات در عمق، در یک واقعه سیلاب واریزه‌ای تنها تابع شیب بستر و زاویه اصطکاک داخلی رسوب بوده مستقل از حجم بارش و رواناب ناشی از آن است. بنابراین می‌توان مقداری واحد برای غلظت رسوب به ازای همه بارش‌ها به دست آورد درحالی‌که با استفاده از مدل ارائه شده در این تحقیق

1- Xiaojiang River

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

می‌توان نشان داد غلظت رسوبات در سیلاب واریزه‌ای ثابت نبوده و با توجه به عواملی نظیر بارش تغییر می‌کند. لذا از داده‌های دانسیته سیلاب واریزه‌ای[1] در حوضه جیان‌جیا، در محدوده سال‌های ۱۹۹۹– ۲۰۰۴ به منظور تعیین غلظت رسوبات سیلاب، به صورت زیر استفاده شده است:

$$\gamma_d=\frac{w_s+w_w}{v_s+v_w} \quad (۹)$$

$$\gamma_d=\frac{v_s\gamma_s}{v_s+v_w}+\frac{v_w\gamma_w}{v_s+v_w} \quad (۱۰)$$

$$C=\frac{v_s}{v_s+v_w} \quad (۱۱)$$

با جایگذاری رابطه ۱۱ در رابطه ۱۰ خواهیم داشت:

$$\gamma_d=C\gamma_s+(1-C)\gamma_w \quad (۱۲)$$

پس از ساده کردن معادله ۱۲ رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C=\frac{\gamma_d-\gamma_w}{\gamma_s-\gamma_w} \quad (۱۳)$$

در روابط فوق، γ_d وزن مخصوص سیلاب واریزه‌ای (گرم در سانتی‌مترمکعب)، W_s وزن رسوب، W_w وزن آب، V_s حجم رسوب، V_w حجم آب، C غلظت حجمی رسوب (بی بعد)، γ_w وزن مخصوص آب (۱ گرم در سانتی‌مترمکعب) و γ_s وزن مخصوص رسوب (۲/۶۵ گرم در سانتی‌مترمکعب) است. بنابراین با جایگذاری مقادیر وزن مخصوص سیلاب برای هر واقعه سیلاب در هر زمان، یک مقدار برای غلظت رسوبات به دست می‌آید.

تأثیر عوامل بارندگی تجمعی و بارش پیشین بر غلظت رسوب

۳ باران‌سنج در حوضه جیان‌جیا در سال ۱۹۹۳ در سه منطقه شامل منکیان[2]، جیوشا و دونجوان[3] نصب شد. در سال ۲۰۰۲، شش باران سنج نصب شده است. ۳ باران‌سنج در محل‌های اشاره شده و ۳ باران‌سنج دیگر در آبراهه منکیان اضافه شد.

به منظور بررسی ارتباط بین پارامترهای بارندگی و غلظت رسوبات، از داده‌های بارندگی تجمعی و بارش پیشین در سال‌های ۲۰۰۴–۱۹۹۹استفاده شده است. بارش پیشین در این مطالعه به صورت اثر واقعی بارش قبلی بر میزان رطوبت خاک، در یک بارندگی مؤثر در وقوع سیلاب واریزه ای تعریف می‌شود که در این تحقیق به مدت ۱۵ الی ۲۰ روز قبل در نظر گرفته شده است (۲۲). وقوع سیلاب واریزه‌ای تا حد زیادی وابسته به بارش است و نیروی حرکت رسوبات، به مقدار بارش بستگی دارد. نرخ انتقال رسوب بدون بعد، در سیلاب‌هایی با غلظت بالای رسوب، مطابق رابطه ذیل به صورت تابعی از عمق نسبی و تنش برشی بدون بعد در نظر گرفته می‌شود (۱):

$$\frac{q_s}{\sqrt{gs{d_{50}}^3}}=0.8\left(\frac{h}{d}\right)^{0.65}\tau_*^{1.5} \quad (۱۴)$$

q_s نرخ انتقال رسوب، s وزن مخصوص مستغرق، g شتاب گرانش، d قطر رسوب، h بارندگی تجمعی و τ_* تنش برشی بدون بعد است. طبق رابطه ۱۴ حداکثر ظرفیّت انتقال رسوب تابعی از ارتفاع رواناب (ناشی بارندگی) به قطر متوسط ذرات $(\frac{h}{d})$ است. بنابراین عواملی نظیر بارندگی تجمعی، بارش پیشین و مجموع پارامترهای بارندگی تجمعی و بارش پیشین در مقدار کل رواناب تأثیرگذار هستند. لذا در تحقیق حاضر با استفاده از تحلیل ابعادی پای باکینگهام و ۳ پارامتر بارندگی (P)، بارش پیشین (AR) و قطر متوسط رسوبات (d50)، ۲ پارامتر بی‌بعد به صورت بارش بی‌بعد (Π_1)، بارش پیشین بی‌بعد (Π_2) به دست آمده است و بارش کل بی‌بعد نیز به صورت مجموع دو پارامتر بی‌بعد Π_1 و Π_2 در نظر گرفته شده است. طبق این اصل تعداد پارامترهای بی‌بعد، برابر اختلاف تعداد پارامترهای دخیل در مسئله با تعداد ابعاد پایه (طول، جرم و زمان) می‌باشد که در این مطالعه از ۳ متغیر مستقل و یک بعد استفاده شده است. بدین ترتیب، مطابق این اصل ۲ پارامترهای بی‌بعد، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Pi_1=\frac{P}{d_{50}} \quad (۱۵)$$

$$\Pi_2=\frac{AR}{d_{50}} \quad (۱۶)$$

هم‌چنین با توجه به این‌که تاکاهاشی تنها غلظت رسوبات را تابعی از شیب بستر در نظر گرفته و مقدار ثابتی برای آن برآورد کرده است، در این مطالعه برای اصلاح برآورد مقدار ثابت رسوبات سیلاب واریزه‌ای از تأثیر عوامل وابسته به بارش نیز استفاده شده است و ضریب α برای در نظر گرفتن این اصلاح، به صورت زیر تعریف شده است:

$$C=C_{max}\times\alpha \quad (۱۷)$$

C غلظت رسوبات محاسبه شده از رابطه ۱۳ بر اساس داده‌های مشاهداتی تعیین شده و C_{max} حداکثر غلظت رسوب محاسبه شده از رابطه تاکاهاشی و α ضریب اصلاحی می‌باشد. بنابراین در این تحقیق، رابطه تجربی بین متغیر α که تابع غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای است با پارامترهای Π_1 و Π_2 و بارش کل بی‌بعد بررسی گردیده است. به منظور استخراج قطر متوسط ذرات، از منحنی دانه‌بندی ذرات رسوب حوضه جیان‌جیا که تغییرات قطر ذرات در برابر چگالی آن‌ها را نشان می‌دهد، استفاده شده است. به ازای مقادیر چگالی موجود در منحنی، قطر متوسط ذرات، مطابق جدول ۱ استخراج شده است. قطر متوسط ذرات به ازای بقیه مقادیر چگالی رسوبات، با استفاده از درونیاب درجه ۲ مطابق رابطه ۱۸ به دست آمده است. بدین ترتیب به ازای کلیه مقادیر چگالی سیلاب واریزه‌ای رخداده در حوضه، مقادیر قطر متوسط ذرات حاصل می‌شود.

$$\rho=ad_{50}^2+bd_{50}+c \quad (۱۸)$$

1- Debris flow density (D_e) 2- Menqian Gully 3- Duozhao Gully

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

در رابطه فوق، ضرایب a، b و c با استفاده از ۳ نقطه متوالی اطراف نقطه مورد نظر تعیین گردید.

جدول ۱- مقادیر قطر متوسط در برابر چگالی مخلوط رسوب حوضه جیان‌جیا (۱۱)

Table 1. The amount of average diameter against density of sediment mixture

ρ (گرم در سانتی‌متر مکعب)	۱/۵۷	۱/۸۳	۲	۲/۰۹	۲/۱۷	۲/۲۱
D_{50} (میلی‌متر)	۰/۶	۰/۹۸	۱/۹۸	۳/۱	۵	۵/۹۵

معمولا قطر رسوبات محدوده تغییراتی بین اندازه رس تا قلوه‌سنگ دارد که تأثیر چشمگیری روی وزن دانه‌های رسوب دارد. درحالی‌که جنس مواد حوضه محدوده تغییرات وزن مخصوصی بین ۲/۵۶ (رس) تا ۲/۶۵ (شن و ماسه) بوده و تقریباً تغییرات آن، ۳ درصد می‌تواند بر وزن مخصوص مصالح تأثیرگذار باشد که بسیار ناچیز است. بنابراین اثر جنس مواد در مقایسه با قطر ذرات، قابل چشم‌پوشی است. به همین دلیل قطر ذرات نسبت به جنس سنگ‌ها تأثیر بیشتری در وزن مخصوص مواد دارد، اثر قطر رسوبات در این تحقیق لحاظ شده است.

اعتبارسنجی متقابل

به منظور استخراج مدل از روش اعتبارسنجی متقابل[1] استفاده شده است. براساس این روش، داده‌ها به دو مجموعه آموزش و آزمون به روش تصادفی تقسیم می‌شوند. با استفاده از مجموعه داده‌های آموزش، یک تابع برازش داده می‌شود سپس از تابع برازش داده شده به منظور پیش‌بینی مقادیر خروجی مجموعه داده‌های آزمون استفاده می‌شود. یکی از مزیت‌های این روش این است که برخلاف سایر روش‌های اعتبارسنجی که اغلب نیازمند تفکیک داده‌ها به صورت ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد تست هستند، قادر است در زمانی‌که تعداد داده کافی برای ساخت دو مجموعه مجزا (تست و آموزش) در دسترس نیست، بدون از دست دادن قابلیت آزمون و مدلسازی، اعتبارسنجی صورت گیرد (۹). در این پژوهش، هر بار یک داده از میان مجموعه داده‌ها حذف گردیده و آموزش بر اساس $N-1$ داده باقی‌مانده صورت گرفته است. سپس یک رابطه بر اساس $N-1$ داده آموزش، برازش داده شده و از داده حذف شده برای آزمون استفاده شده است این مرحله برای تک تک داده‌ها تکرار شده و ازمتوسط معیارهای میانگین مطلق خطای نسبی (MARE) و ضریب تبیین (R^2) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) برای برآورد خطا استفاده شده است. روابط مورد استفاده برای این سه معیار به صورت زیر است:

$$R^2=\frac{\sum((x_C-\bar{x}_C)\times(x_O-\bar{x}_O)}{(\sum(x_C-\bar{x}_C)^2)\times(\sum(x_O-\bar{x}_O)^2)} \quad (۱۹)$$

$$MARE=\sum(\frac{|x_C-x_O|/x_O}{N}) \quad (۲۰)$$

$$NSE=1-\frac{MSE}{\sigma_0^2} \quad (۲۱)$$

$$MSE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(x_C-x_O)^2 \quad (۲۲)$$

x_C مقدار محاسباتی، x_O مقدار مشاهداتی، N تعداد کل داده‌ها، MSE خطای میانگین مربعات و σ_0^2 واریانس داده‌های مشاهداتی است. محاسبه معیارهای فوق، براساس داده حذف شده صورت می‌گیرد. بدین صورت که در هر بار تکرار، با در دست داشتن مقدار مشاهداتی داده حذف شده، مقدار محاسباتی آن از طریق رابطه برازش داده شده توسط داده‌های جدید (N-۱ داده) برآورد شده و مقدار خطا توسط روابط فوق محاسبه می‌گردد. این عمل برای کلیه داده‌ها تکرار می‌شود و در انتها متوسط هریک از معیارهای فوق، به عنوان مقادیر نهایی آن‌ها گزارش می‌شود. بدیهی است هرچه مقدار عددی R^2 به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی بیشتر است. هم‌چنین هر چه مقدار ضیب NSE به ۱ نزدیکتر باشد، نشان می‌دهد مدل به واقعیت نزدیک‌تر است و هر چه مقدار MARE به صفر نزدیک‌تر باشد، نتایج صحت بالاتری دارد.

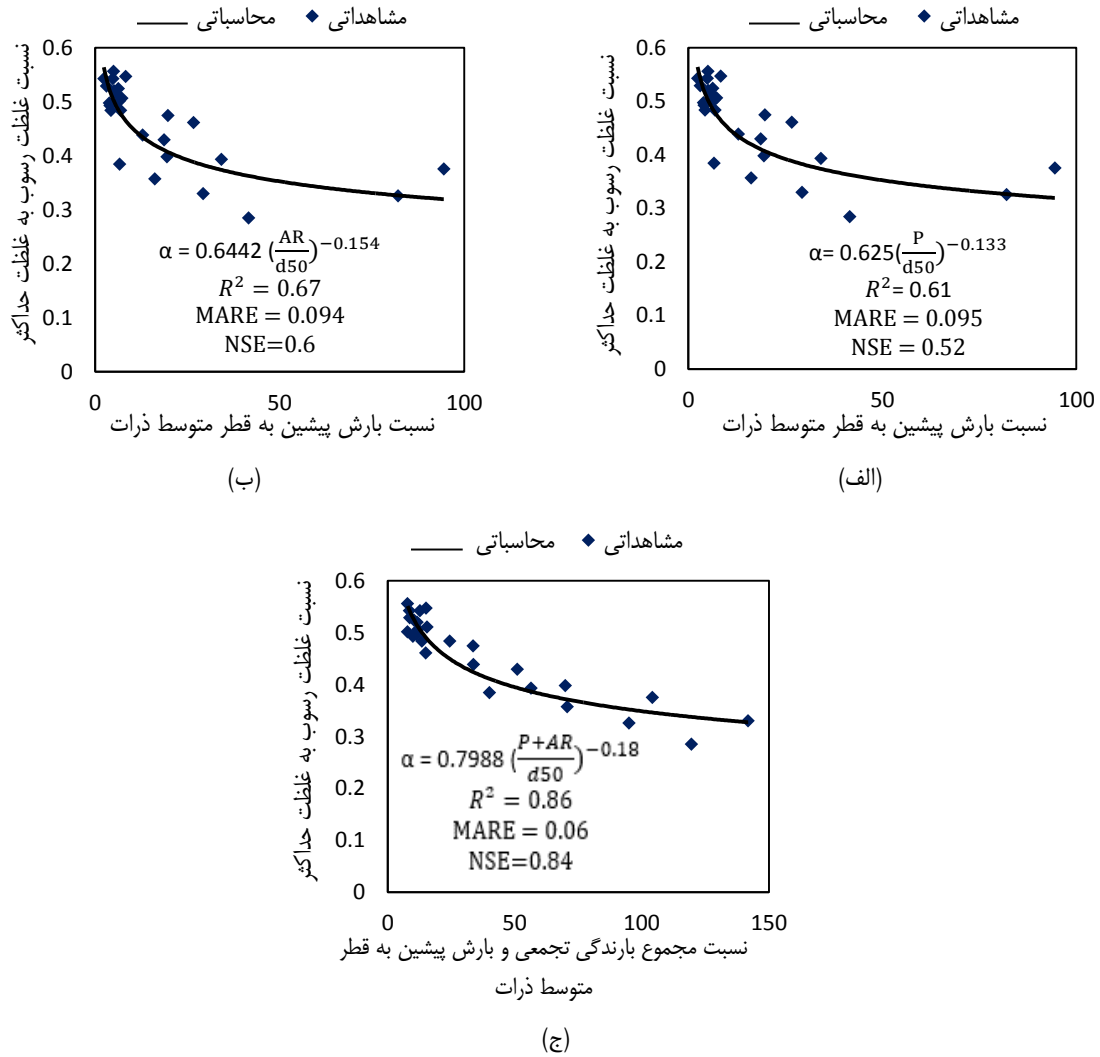
نتایج و بحث

در این بخش، ارتباط بین پارامترهای بارندگی و غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای ارزیابی شده است. پس از اعمال صحت‌سنجی، به منظور مقایسه نتایج، مدل بهینه با استفاده از معیارهای R^2، MARE و NSE مشخص شده و در پایان بهترین مدل با مدل تاکاهاشی و محققان دیگر مقایسه شده است.

نمودار شکل ۱ قسمت (الف) رابطه تجربی بین پارامتر Π_1 و غلظت رسوب را نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل مقادیر متوسط پارامترهای مدل توانی و معیارهای R^2، MARE و NSE پس از اعتبارسنجی نشان داده شده است. مقدار عددی شاخص R^2 نشان می‌دهدکه همبستگی مناسبی بین مقادیر مشاهداتی و محاسبه شده برقرار نیست. اگرچه پارامتر بارندگی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر غلظت رسوب است، اما به تنهایی قادر به بهبود برآورد مقدار رسوب نیست. در واقع بایستی اثر رطوبتی که از بارش قبل در خاک باقی مانده نیز لحاظ شود و با لحاظ اثر هر یک از پارامترهای بی بعد یادشده (پارامتر بارندگی و بارش پیشین)، به تنهایی، نتیجه خوبی به دست نمی‌آید. با توجه به این‌که داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری نشده است، از پارامتر بارش مؤثر پیشین به عنوان عاملی که به طور غیرمستقیم در رطوبت خاک مؤثر است، استفاده شده است.

1- Leave-one-out cross-validation method

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]



شکل ۱- تغییرات غلظت رسوب در برابر الف) بارندگی تجمعی ب) بارش پیشین ج) مجموع بارندگی تجمعی و بارش پیشین
Figure 1. The variations of sediment concentration against a) cumulative rainfall b) Antecedent rainfall c) the sum of cumulative rainfall and antecedent rainfall

در واقع فرسایش و زمین‌لغزش‌های سطحی ناشی از اثر بارش بر روی دامنه‌های شیب‌دار حوضه، باعث ورود مقدار زیادی رسوب به جریان شده و شرایط را برای وقوع سیلاب واریزه‌ای مهیا می‌کند. بنابراین بارش از طریق ایجاد فرسایش بر غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای تأثیرگذار است (۱۴،۳). لازم به ذکر است در سیلاب واریزه‌ای پس از وقوع زمین‌لغزش، تا مقدار مشخصی غلظت رسوب افزایش پیدا کرده، و به میزان تقریباً ثابتی می‌رسد پس از آن با افزایش بارش، بعلت ثابت بودن منبع رسوب و افزایش مقدار رواناب، غلظت رسوبات کاهش می‌یابد. به همین علت در نمودار شکل فوق، با افزایش بارش، غلظت رسوب روند نزولی دارد. معمولاً در یک رودخانه با افزایش دبی، غلظت نیز افزایش پیدا می‌کند. اما بر اساس آنچه در این شکل برمی‌آید، با افزایش بارش، غلظت کاهش یافته که دلیل آن این است که معمولا، منبع رسوب رخداد سیلاب واریزه‌ای در یک حوضه، لغزش در سطح حوضه بوده و لذا حجم رسوب ناشی از لغزش، تقریباً ثابت بوده و حجم رواناب بستگی به عمق بارش داشته و با افزایش حجم رواناب و ثابت بودن حجم رسوب (حاصل از لغزش)، غلظت کاهش می‌یابد.

شکل ۱ قسمت (ب)، رابطه بین پارامتر Π_2 و غلظت رسوبات را نشان می‌دهد. همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسبه شده نسبت به قسمت (الف) تفاوت چندانی ندارد و نشان می‌دهد همبستگی مناسبی میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از اثر بارش پیشین وجود ندارد. اگر فاصله بین دو بارندگی افزایش یابد، نقش بارش پیشین، در اثر نفوذ آب در خاک کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار آب نفوذ کرده در یک بازه زمانی، در طول بارندگی قبلی یک واقعه زمین لغزش، به بارندگی پیشین برای سیلاب مربوط می‌شود. یک مطالعه بر روی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

خاک‌های گرمسیری هنگ‌کنگ نشان داد که بارش پیشین در هر مدت زمانی نمی‌تواند روی راه‌اندازی سیلاب مؤثر باشد. از سوی دیگر یک مطالعه مشابه در ولینگتون[1] در نیوزیلند، نشان داد که بارش در مدت دوره‌های قبل تا ۱۰ روز، بر روی تعادل رطوبت خاک در ارتباط با راه‌اندازی زمین‌لغزش عمیق، تأثیرگذار بوده است. اثر رطوبت قبل ممکن است به آب و هوای منطقه، خواص نفوذپذیری خاک و عامل راه‌اندازی سیلاب واریزه‌ای (زمین‌لغزش یا رواناب) وابسته باشد. در حوضه جیان‌جیا، باتوجه به مطالعه دیگر محققین بارندگی پیشین به عنوان عامل مهمی در راه‌اندازی سیلاب واریزه‌ای در نظر گرفته شده است. در این حوضه طول مدت زمانی که بارندگی پیشین، مؤثر واقع می‌شود، ۱۵ تا ۲۰ روز است. به عبارتی منظور از بارش پیشین این است که از داده‌های بارندگی در این حوضه در روزهای قبل از وقوع سیلاب (۱۵ تا ۲۰ روز قبل) استفاده شده است (۲۲).

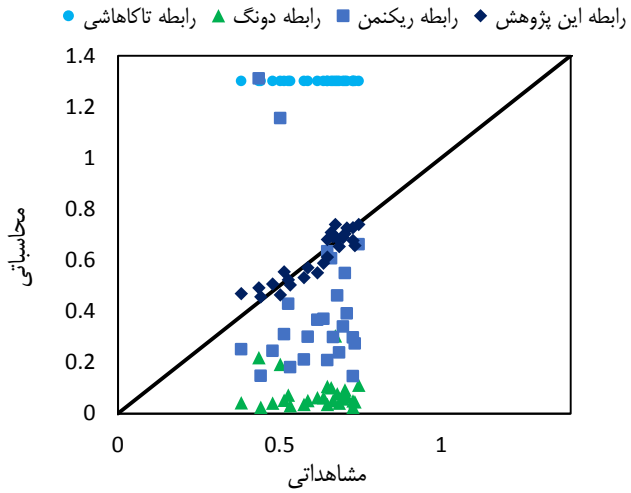
در نمودار شکل ۱ قسمت (ج)، اثر بارش کل (مجموع بارندگی تجمعی و بارش پیشین) بر غلظت رسوب نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار شاخص R^2 نسبت به دو رابطه قبل، افزایش چشم‌گیری داشته است (تقریباً ۲۰ درصد) و همبستگی خوبی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد. هم‌چنین مقدار خطا توسط مدل پیشنهادی حدوداً ۲۲ درصد، نسبت به قسمت (الف) و (ب) کاهش یافته است. بنابراین، نتایج حاصل از مقایسه این اشکال نشان می‌دهد، این مدل با استفاده از اثر مجموع بارش و بارش پیشین می‌تواند به خوبی و با دقت بالاتری نسبت به دو رابطه قبل، غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای را برآورد کند. اگرچه مقدار بارش نقش اصلی در رخداد سیلاب ایفا می‌کند، اما تأثیر آن بر میزان غلظت رسوب برای هر حوضه با توجه به عواملی نظیر قطر ذرات خاک، شیب زمین و وضعیت توپوگرافی منطقه، پوشش گیاهی، فاصله بین وقایع بارندگی، شدت و مدت بارش می‌تواند متفاوت باشد (۶). به طور کلی مجموع اثر مقدار بارش و بارش پیشین با تأثیری که بر فرسایش خاک و تولید رواناب دارد با دقت بالایی قادر به برآورد غلظت رسوب سیلاب واریزه‌ای است. بنابراین رابطه پیشنهادی این تحقیق رابطه ۲۳ می‌باشد که با نمونه‌گیری از خاک و در نهایت استخراج قطر متوسط رسوبات حوضه و با استفاده از داده‌های بارندگی تجمعی و بارش پیشین، می‌توان این رابطه را برای برآورد غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای، با دقت خوبی برای حوضه‌های واقع در ایران به کار برد.

$$\alpha=0.7988\left(\frac{P+AR}{d_{50}}\right)^{-0.18} \qquad (۲۳)$$

رابطه فوق، با روابط محققین دیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از مقایسه مدل بهینه ارائه شده در این مطالعه با رابطه تاکاهاشی و دیگر پژوهشگران از جمله ریکنمن (۱۶) و دونگ (۵) در شکل ۲ نشان داده شده است. هم‌چنین روابط رگرسیونی و ضریب R^2 مربوط به هریک از محققان مذکور نیز در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول C_C بیانگر غلظت رسوب محاسباتی و C_O غلظت رسوب مشاهداتی است. همان‌طور که دیده می‌شود، مقادیر حاصل از رابطه تاکاهاشی (۲۰۰۷) مقدار ثابتی برای غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای نشان می‌دهد که همگی در بالای خط مطلوب یک به یک قرار گرفته و غلظت رسوبات را بیشتر برآورد کرده است. هم‌چنین روابط محققان دیگر نظیر ریکنمن (۱۶) و دونگ (۵) هم پراکندگی مناسبی اطراف خط مطلوب نداشته و در قسمت پایین خط متمرکز و عمدتاً غلظت سیلاب واریزه‌ای را کم برآورد کرده‌اند. این در حالی است که توزیع مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی این تحقیق پیرامون خط مطلوب، گویای تطابق خوب بین داده‌های مشاهداتی و محاسبه شده است. هم‌چنین این مدل خطای برآورد غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای روابط ارائه شده توسط محققان دیگر را حدوداً ۸۰ درصد کاهش داده است.

1- Wellington

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]



شکل ۲- مقایسه مدل پیشنهاد شده در این تحقیق با مدل سایر محققان
Figure 2. The comparison of proposed model in this study with other researchers' model

جدول ۲- روابط رگرسیونی و ضریب R^2 مربوط به رابطه هر محقق
Table 2. Regression equations and coefficient R2 related to the equation of each researcher

محقق	رابطه رگرسیونی	ضریب R^2
تاکاهاشی	$C_C=1.3C_O^{3E-15}$	$R^2=-3E-15$
ریکنمن و کاچنی	$C_C=0.405C_O^{0.165}$	$R^2=0.0023$
دونگ	$C_C=0.067C_O^{0.165}$	$R^2=0.0023$
این پژوهش	$C_C=0.905C_O^{0.804}$	$R^2=0.832$

به طور کلی نتایج نشان داد، بهترین مدل تجربی از بین پارامترهای Π_1 و Π_2 و بارش کل، با استفاده از تأثیر بارش کل به دست آمد. معیارهای آماری این مدل ($MARE=0.06$، $R^2=0.86$ و $NSE=0.8$) بیانگر دقت بالای مدل، در برآورد غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای است و نشان می‌دهد همبستگی قابل قبولی بین داده‌های مشاهداتی و برآوردی وجود دارد.

با مقایسه نتایج حاصل از رابطه ارائه شده در این تحقیق با محققان دیگر، چنین استنباط می‌شود این رابطه با دقت بالاتری قادر به تخمین غلظت رسوبات سیلاب واریزه‌ای است.

هم‌چنین این مدل نه تنها مشکل رابطه تاکاهاشی در برآورد مقدار ثابت غلظت را برطرف کرده است، بلکه خطای روابط قبل را حدود ۸۰ درصد کاهش داده است. به طور کلی اثر عوامل وابسته به بارش، بر میزان رسوبات هر حوضه در سیلاب واریزه‌ای با توجه به عواملی نظیر قطر ذرات رسوب حوضه، پوشش گیاهی، خصوصیّات فیزیوگرافی حوضه و سایر خصوصیات منطقه متفاوت است. بنابراین با کمک رابطه پیشنهادی این مطالعه می‌توان تأثیر غلظت رسوبات سیلاب‌های واریزه‌ای را تعیین نمود.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

منابع

1. Banihabib, M.E. 1999. Sediment Transport of Mud Flow, 1st Iranian Hydraulic Conference, Iranian Hydraulic Association, 1-13 pp, Tehran, Iran (In Persian).
2. Banihabib, M.E. and M. Elahi. 2009. Empirical Equation for Abrasion of Stilling Basin Caused by Impact of Sediment. In World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers, 1-10.
3. Banihabib, M.E. and A. Masumi. 2008. Effect of High-Concentrated Sediment Transport on Inundation of Rivers: Case Study Masuleh Flood. 2nd Iranian Hydraulic Conference, Iranian Hydraulic Association, 1-8 pp, Tehran, Iran (In Persian).
4. Cui, P., X. Chen, Y. Waqng, K. Hu and Y. Li. 2005. Jiangjia Ravine debris flows in south-western China. In Debris-flow hazards and related phenomena. Springer Berlin Heidelberg, 565-594.
5. Dong, J.J., C.T. Lee, Y.H. Tung, C.N. Liu, K.P. Lin, and J.F. Lee. 2009. The role of the sediment budget in understanding debris flow susceptibility. Earth Surface Processes and Landforms, 34(12): 1612-1624.
6. Fathizad, H., H. Karimi and M. Tavakoli. 2016. Role of sensitivity of erosion the geological formations at erosion rate and sediment yield (case study: sub-basins of Doviraj river, Ilam province). Journal of watershed management research, 7(13): 193-208 (In Persian).
7. Franzi, L. and G. Bianco. 2001. A statistical method to predict debris flow deposited volumes on a debris fan. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science, 26(9): 683-688.
8. Guo, X.J., P. Cui and Y. Li. 2013. Debris flow warning threshold based on antecedent rainfall: A case study in Jiangjia Ravine, Yunnan, China. Journal of Mountain Science, 10(2): 305-314.
9. Hashemy dovin, M. 2014. Assessment effect of ENSO multivariate index on winter precipitation in North Khorasan. Journal of Research of Climatology, 32-44 (In Persian).
10. Hassan-Esfahani, L. and M.E. Banihabib. 2016. The impact of slit and detention dams on debris flow control using GSTARS 3.0. Environmental Earth Sciences, 75(4): 1-11.
11. Li, Y., B.L. Wang, X.J. Zhou and W.C. Gou. 2015. Variation in grain size distribution in debris flow. Journal of Mountain Science, 12(3): 682-688.
12. Lien, H.P. and F.W. Tsai. 2003. Sediment concentration distribution of debris flow. Journal of Hydraulic Engineering, 129(12): 995-1000.
13. Marchi, L. and V. D'Agostino. 2004. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. Earth Surface Processes and Landforms, 29(2): 207-220.
14. Mostafazadeh, R., Kh. Haji, A. Esmali-Ouri and H. Nazarnejad. 2017. Prioritization the critical sub-watersheds based on soil erosion and sediment using watershed erosion response model (WERM) and morphometric analysis (case study: Rozechai watershed, west Azerbaijan province). Journal of Watershed Management Research, 8(16): 142-156 (In Persian).
15. Ou, G. and T. Mizuyama. 1994. Predicting the average sediment concentration of debris flows. J. Jpn Erosion Control Eng Soc, 47(4): 9-13.
16. Rickenmann, D. and A. Koschni. 2010. Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland. Hydrological Processes, 24(8): 993-1007.
17. Rickenmann, D. 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. Journal of Hydraulic Engineering, 117(11): 1419-1439.
18. Singh, V.P. and H. Cui. 2015. Modeling sediment concentration in debris flow by Tsallis entropy. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 420: 49-58.
19. Takahashi, T. 2007. Debris flow Mechanics, Prediction and Countermeasures. 2nd edn, Taylor and Francis, Singapore, London, 572 pp.
20. Takei, A. 1984. Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. In International Symposium Interpraevent, 35-48 pp, Villach, Austria.
21. Wu, J., Z. Wang, L. Tian and S. Zhang. 1990. Observation and research of debris flow in Jiangjiagou Ravine, Yunnan Province. Science Pressing, Beijing, 67-145.
22. Zhuang, J., P. Cui, G. Wang, X. Chen, J. Iqbal and X. Guo. 2015. Rainfall thresholds for the occurrence of debris flows in the Jiangjia Gully, Yunnan Province, China. Engineering Geology, 195: 335-346.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

Proposing an Empirical Equation for Estimation of the Sediment Concentration of Debris Flow (Case Study: Jiangjia Gully in China)

Mohammad Ebrahim Banihabib[1] and Mitra Tanhapour[2]

1- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, University of Tehran, University College of Abouraihan, (Corresponding author: banihabib@ut.ac.ir)
2- M.Sc. Student Hydraulic Structure, University of Tehran, University College of Abouraihan
Received: January 13, 2018 Accepted: June 11, 2018

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.26.0]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.70]

Abstract

Debris flow, as a severe geological disaster, causes huge damages in the mountainous areas every year. The peak discharge of flood and the hydraulic roughness of flow are affected by sediment concentration of debris flow. Therefore, the estimation of sediment concentration based on physical characteristics of basin, sediment and precipitation are necessary. The aim of this study is proposing an empirical equation for the determination of the sediment concentration of the debris flows in the study area using the rainfall parameters, so that the weakness of applying the fixed value for the debris flow concentration proposed by previous researchers can be removed. For this purpose, the relations between each of the parameters including cumulative rainfall, antecedent rainfall and the total rainfall (sum of cumulative and antecedent rainfalls) parameters with sediment concentration of the debris flows were investigated by using of the rainfall and the debris flow density recorded in the international research station, Jiangjia Gully, for the period of 1999-2004 years. To derive the best equation, cross validation method was used and the relations error were determined by statistical indicators including coefficient of determination, R^2, Mean Absolute Relative Error (MARE) and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient. Results showed that higher correctness was obtained using the sum of cumulative rainfall and antecedent rainfall parameters (total rainfall) for determining of the sediment concentration of debris flow. The statistical indices of the proposed model (MARE=0.06, R^2=0.86 and NSE=0.84) represent the high ability of the proposed equation in the estimation of the sediment concentration of debris flows where the estimation error of the sediment concentration was reduced on average about 80% comparing to other researchers' equations. The range of the relative density of sediment is between 1.63-2.23 gr/cm^3. Moreover, the range for the cumulative rainfall and the antecedent rainfall are varied between 3.36-75.36 and 0.772-92.59 mm, respectively. After calibration of the proposed equation of this research, it can be used for estimation of the sediment concentration of debris flow in the other prone basins, which have the similar storms.

Keywords: Cross validation, Antecedent rainfall, Peak discharge of flood, Debris flow, Sediment concentration