

اثر ابعاد سلول نقشه دیجیتالی ارتفاعی (DEM) بر دقت مدلسازی جریان واریزه‌ای در نرم افزار RAMMS

مجید گلوئی - استاد یار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین.
آرتمیس معتمدی* - استادیار گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا - قزوین.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

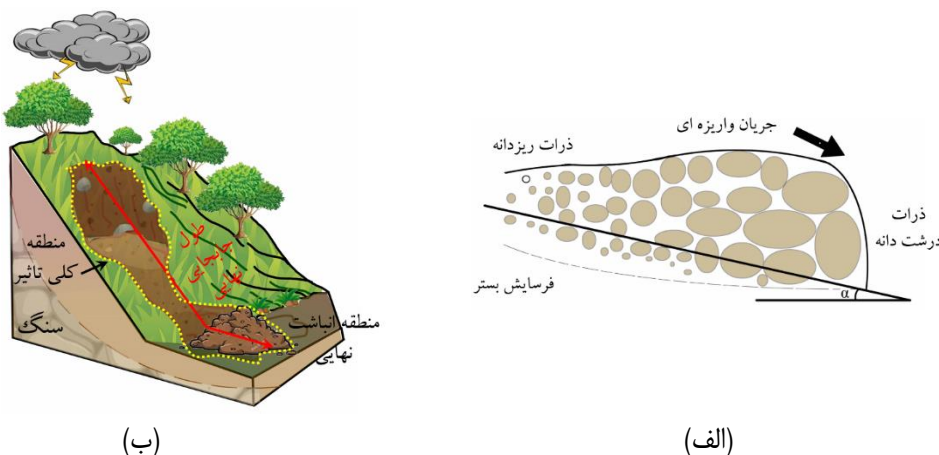
چکیده

جریان واریزه‌ای یکی از پدیده‌های مخرب طبیعی و زیست محیطی است که بدلیل ماهیت پیچیده فیزیکی آن، حل معادلات حاکم بر آن بصورت تحلیلی بسیار دشوار و در صورت عدم ساده سازی، در شرایط واقعی تقریباً غیر ممکن است. نرم‌افزار (RAMMS) یکی از مدل‌های عددی جهت شبیه سازی حرکت جریان واریزه‌ای است. در این تحقیق، اثر ابعاد سلولی نقشه DEM بر روی دقت نتایج این مدل بررسی شده است. یک نقشه DEM با ابعاد سلولی ۱ متر در یک منطقه مستعد جریان واریزه‌ای انتخاب شده و با استفاده از RAMMS، مدلسازی در آن صورت گرفته است. سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، نقشه‌هایی با ابعاد سلولی ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر از روی نقشه اصلی و به روش Bilinear ساخته شده و مجدداً در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نهایی نشان داد که مدل RAMMS حساسیت بسیار شدیدی به اندازه سلول نقشه DEM دارد بطوریکه با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، فقط تغییر سلول نقشه از ۱ متر به ۲۰ متر باعث ایجاد خطای ۵۴۸+ درصدی در پهنه کلی جریان، ۶۷- درصدی در حداکثر عمق جریان و ۱۱۲+ درصدی در جابجایی کلی جریان واریزه‌ای گردید. همچنین مشخص شد که نرخ تغییر میزان خطا در پارامترهای جریان واریزه‌ای، برای نقشه‌های با اندازه سلولی کمتر از ۵ متر تقریباً رشد کمی دارد اما برای نقشه‌های بزرگتر از ۵ متر، این میزان خطا رشد بسیار زیادی دارد. به نظر می‌رسد که نرم‌افزار RAMMS فقط برای نقشه‌های DEM با ابعاد سلولی خیلی کوچک (کمتر از ۵ متر) کارایی مناسبی داشته باشد و با افزایش ابعاد سلول، میزان خطا به مقدار بسیار زیادی افزایش می‌یابد بطوریکه دیگر خروجی مدل قابل اطمینان نیست.

واژگان کلیدی: جریان واریزه‌ای، نرم‌افزار RAMMS، نقشه دیجیتالی ارتفاعی، دقت مدل عددی.

مقدمه

جریان واریزه‌ای^۱ به مخلوط آب، سنگ، خاک و شاخ و برگ گیاهان گویند که تحت اثر نیروی وزن بصورت توده‌ای به حرکت در آمده و معمولاً در دامنه کوه‌ها و با شیب نسبتاً زیاد اتفاق می‌افتد (کینگ، ۲۰۱۷). بر اساس تحلیل تئوری جریان واریزه‌ای که با مشاهدات میدانی این پدیده نیز تقریباً همخوانی دارد، حداقل شیب بستر برای وقوع این پدیده حدود ۱۵ درجه می‌باشد (آرمانینی و میچیو، ۱۹۹۷). عامل اصلی شروع این پدیده در بسیاری از موارد بارندگی‌های شدید، ذوب سریع برف، زلزله و یا عوامل انسانی (مانند جنگل‌زدایی و تغییر شیب طبیعی زمین) است. بسته به مواد تشکیل دهنده و ساختار حرکتی، جریان واریزه‌ای معمولاً به ۳ نوع طبقه‌بندی می‌شوند: جریان واریزه‌ای سنگی^۲ که درصد زیادی از مواد تشکیل دهنده آن از سنگ‌های درشت‌دانه و حتی تخته سنگها تشکیل یافته است، جریان واریزه‌ای آشفته - گلی^۳ که بیشتر مواد تشکیل دهنده آن گل و لای است و جریان واریزه‌ای لزج^۴ که شامل یک جریان غلیظ ریزدانه بوده و بصورت موج‌های متعدد جداگانه و پشت سر هم حرکت می‌نمایند (تاکاهاشی و داس، ۲۰۱۴). در جریان واریزه‌ای، عامل اولیه حرکت سنگ‌های درشت‌دانه و تخته‌سنگها، فشار و اندازه حرکت ناشی از حرکت ذرات ریزدانه و آب می‌باشد که در نتیجه آن معمولاً سنگ‌های درشت‌دانه در قسمت جلوی موج حرکت کرده و بدلیل اصطکاک شدید با سطح خاک، باعث فرسایش بیشتر مسیر در ضمن حرکت جریان می‌شوند (شکل ۱-الف). به این دلیل، ضرائب اصطکاک بستر و همچنین ذرات داخل توده نیز نقش موثری در پارامترهای مربوط به جریان واریزه‌ای دارند (از قبیل فاصله کلی جابجایی مواد از نقطه شروع تا محل انباشت نهایی^۵، پهنه تاثیر کل^۶، حداکثر عمق جریان^۷ و غیره) (شکل ۱-ب).



شکل ۱: الف- نمای کلی از شکل‌گیری موج جریان واریزه‌ای، نحوه قرارگیری ذرات در آن و فرسایش بستر ناشی از اصطکاک (تاکاهاشی و داس، ۲۰۱۴)، ب- پارامترهای مهم مربوط به شکل‌گیری نهایی جریان واریزه‌ای از قبیل فاصله کلی جابجایی مواد از نقطه شروع تا محل انباشت نهایی و پهنه تاثیر کل

با توجه به ساختار پیچیده حرکتی و مواد گوناگون تشکیل دهنده جریان واریزه‌ای که اغلب در پدیده‌های واریزه‌ای مختلف نیز با یکدیگر متفاوت هستند، بیان معادلات حاکم بر پدیده بصورت کلی و حل تحلیلی آنها بسیار دشوار و تقریباً غیر ممکن

1-Debris Flow

2-Stony

3-Turbulent muddy

4-Viscous

5- Run-out distance

6- Inundation area

7-Max. flow height

است. به همین دلیل بسیاری از محققان جهت شناخت و یا پیش‌بینی پارامترهای جریان، از روش‌های آزمایشگاهی، ایجاد معادلات تجربی مبتنی بر داده‌های آماری و یا مدلسازی عددی بهره می‌گیرند.

روش‌های آزمایشگاهی بدلیل کوچک مقیاس بودن نمونه آزمایشی و عدم امکان در نظر گرفتن شرایط واقعی (مانند توپوگرافی، شیب، پیچ و خم مسیر حرکت، جنس خاک و سنگ و غیره)، اغلب به نتایج ضعیفی منجر شده‌اند و یا اینکه با داده‌های مشاهده‌ای از این پدیده در نقاط دیگر تفاوت بسیار زیادی داشتند (کویی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ترمینی و فیشر، ۲۰۲۰). محققان بسیاری نیز تاکنون تلاش نموده‌اند که بر اساس داده‌های مشاهده‌ای واقعی از این پدیده و یا نتایج آزمایشگاهی و به کمک استفاده از تکنیک‌های آماری، روابط تجربی مختلفی برای پارامترهای مختلف جریان واریزه‌ای ارائه دهند، اما بررسی‌ها نشان داده است که اغلب این روابط بسیار ضعیف بوده و دارای خطای زیادی هستند و تنها برای همان منطقه کاربرد دارند (ژو و همکاران، ۲۰۱۹؛ جی و همکاران، ۲۰۲۰؛ دی پرنا و همکاران، ۲۰۲۲). با پیشرفت کامپیوترها و روش‌های عددی، نرم‌افزارهای مختلفی در چند سال اخیر ارائه شده‌اند که با حل معادلات پیچیده حاکم بر این پدیده، محققان را قادر می‌سازند تا جریان واریزه‌ای را در توپوگرافی‌های گوناگون شبیه‌سازی نمایند. یکی از این نرم‌افزارها، مدل RAMMS^۱ است که در مرکز تحقیقات برف و بهمن کشور سوئیس^۲ توسعه یافته است و در سال‌های اخیر بدلیل سادگی در یادگیری، کاربر پسند بودن، نیاز به داده‌های اندک ورودی و نمایش گرافیکی خروجی‌ها، بسیار مورد توجه محققین، مخصوصاً در اروپا، قرار گرفته است. البته هر مدل عددی بدلیل ساده‌سازی در حل معادلات پیچیده ریاضی و اشتباهات موجود در داده‌های ورودی، دارای خطاهای محاسباتی خواهند بود. در چند سال اخیر، محققان فراوانی به مدلسازی این پدیده با استفاده از این نرم‌افزار پرداخته‌اند و برخی از آنان گزارش نمودند که بدلیل دامنه وسیع پارامترهای ورودی مورد نیاز (از قبیل ضرایب اصطکاک)، واسنجی مدلها در این نرم‌افزار، بصورتیکه بطور همزمان همه پارامترهای مربوط به جریان واریزه‌ای با داده‌های مشاهده‌ای همخوانی داشته باشند، بسیار دشوار و گاهی غیر ممکن است (دی فینیس و همکاران، ۲۰۱۸؛ بزاک و همکاران، ۲۰۱۹؛ زیمرمان و همکاران، ۲۰۲۰). برخی دیگر از محققان چنین نتیجه‌گیری نمودند که حساسیت مدل RAMMS نسبت به داده‌های ورودی بسیار بالاست بطوریکه با تغییر اندکی در برخی از پارامترها، تغییرات شدیدی در نتایج مختلف خروجی بوجود می‌آید (فرانک و همکاران، ۲۰۱۷؛ کروشیچ و همکاران، ۲۰۱۹). هدف از تحقیق حاضر، برآورد میزان خطا و عدم قطعیت در نتایج مدل RAMMS با توجه به اندازه سلول نقشه دیجیتالی ارتفاعی^۳ به عنوان ورودی اصلی این نرم‌افزار می‌باشد. بر این اساس مشخص خواهد شد که حساسیت این مدل نسبت به اندازه سلول چقدر است و کمترین میزان خطا مربوط به چه اندازه سلولی می‌باشد.

روش تحقیق

– معادلات حاکم بر جریان واریزه‌ای در مدل RAMMS

در نرم‌افزار RAMMS سیال واریزه‌ای بصورت یک فازی در نظر گرفته شده و جریان ذرات با استفاده از معادلات دو بعدی میانگین‌گیری شده در عمق^۴ و در فضای سه بعدی مستخرج از نقشه دیجیتالی ارتفاعی، محاسبه می‌گردند (RAMMS, 2022). معادله بقای جرم شامل متغیرهای عمق جریان $H(x, y, t)$ و سرعت جریان $U(x, y, t)$ بوده و بصورت زیر بیان می‌گردد (حوسین و همکاران، ۲۰۱۲):

$$\dot{Q}(x, y, t) = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU_x)}{\partial x} + \frac{\partial(HU_y)}{\partial y} \quad (1)$$

¹- The Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS)

²- WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF

³- DEM

⁴- 2D depth-averaged shallow water equations

در این رابطه، $\dot{Q}(x, y, t)$ بیانگر شار جرمی عبوری، U_x و U_y بترتیب نشان‌دهنده سرعت‌های میانگین‌گیری شده در عمق در دو جهت x و y می‌باشند. همچنین معادلات متوسط‌گیری شده در عمق بقای اندازه حرکت نیز توسط روابط زیر تعریف می‌شوند (فرانک و همکاران، ۲۰۱۷):

$$\frac{\partial(HU_x)}{\partial t} + \frac{\partial\left(c_x HU_x^2 + g_z k_{al/p} \frac{H^2}{2}\right)}{\partial x} + \frac{\partial(HU_x U_y)}{\partial y} = S_{gx} - S_{fx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(HU_y)}{\partial t} + \frac{\partial(HU_x U_y)}{\partial x} + \frac{\partial\left(c_y HU_y^2 + g_z k_{al/p} \frac{H^2}{2}\right)}{\partial y} = S_{gy} - S_{fy}$$

که در آنها، c_x و c_y فاکتورهای شکل در جهات x و y هستند و از نقشه DEM بدست می‌آیند، $k_{al/p}$ ضریب فشار زمین است که در صورت استفاده از مدل اصطکاکی سیال ولمی^۱، مقدار آن برابر با ۱ می‌باشد، $S_{gx} = g_x H$ و $S_{gy} = g_y H$ شتاب جاذبه موثر زمین در دو جهت x و y می‌باشند، $g(g_x, g_y, g_z)$ شتاب جاذبه زمین بوده و S_f از روابط زیر بدست می‌آید:

$$S_{fx} = U_x \left(\mu g_z H + \frac{g|U|^2}{\xi} \right) \quad (3)$$

$$S_{fy} = U_y \left(\mu g_z H + \frac{g|U|^2}{\xi} \right)$$

که در این رابطه، μ ضریب اصطکاک خشک کولمب^۲ و ξ ضریب اصطکاک آشفته - لزوج^۳ در مدل اصطکاکی سیال ولمی می‌باشند.

دامنه تغییرات ضرایب اصطکاکی فوق بسیار وسیع است اما بر اساس مدلسازی‌های انجام شده در نرم‌افزار RAMMS و واسنجی آنها طبق داده‌های واقعی از جریان واریزه‌ای، مشاهده شده است که ضریب اصطکاک μ معمولاً در دامنه ۰/۱ تا ۰/۵ و ضریب ξ در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ تغییر می‌نماید (RAMMS, 2022).

منطقه مطالعاتی

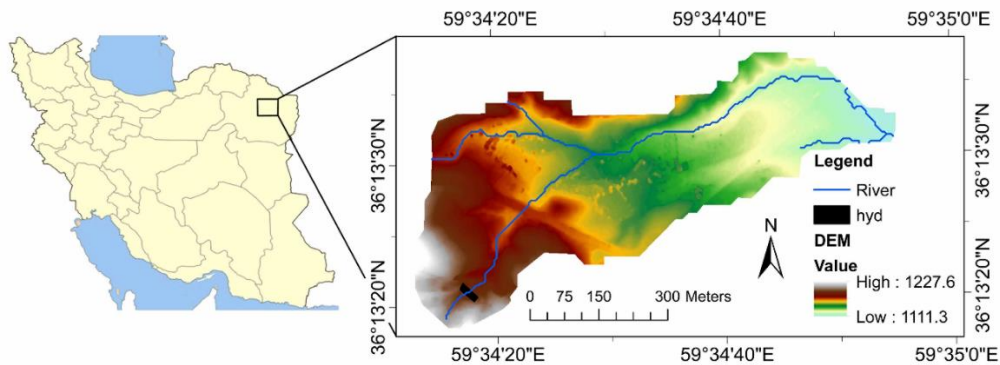
محدوده مطالعاتی در این تحقیق، یک منطقه صنعتی - مسکونی در قسمت جنوبی شهر مشهد می‌باشد که بدلیل قرارگیری در قسمت انتهایی دامنه یک کوه با شیب نسبتاً تند (۲۴/۲ درجه)، در مواقعی که بارندگی شدید بوقوع می‌پیوندد، شاهد جریان شدید سیلاب همراه با گل و لای فراوان می‌باشد. نقشه دیجیتالی ارتفاعی (DEM) این محدوده با اندازه سلول ۱ متر، به همراه مسیر جریان سیلاب‌های بارندگی در شکل (۲) نمایش داده شده است (بدلیل دقت بالای نقشه، ساختمان‌های ناحیه صنعتی - مسکونی در وسط نقشه قابل رویت هستند). لازم به ذکر است که مرز این ناحیه با استفاده از ابزار

¹ -The Voellmy-fluid friction model

² -The Dry-Coulomb type friction coefficient

³ -The viscous-turbulent friction coefficient

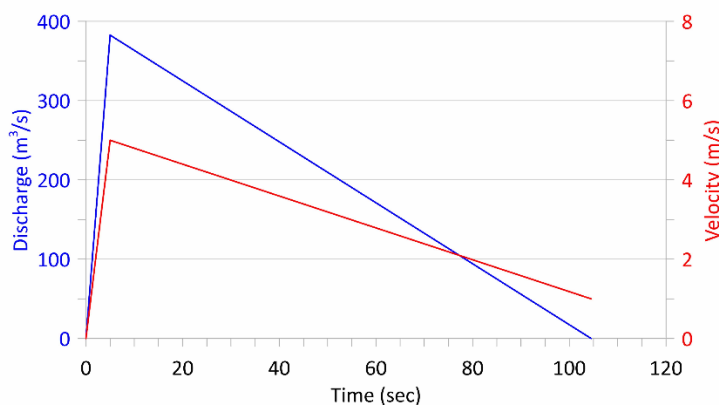
Envelope نرم افزار RAMMS و بر اساس وسیعترین پهنه سیلاب ناشی از جریان واریزه‌ای در میان همه سناریوهای مدل‌سازی، استخراج شده است.



شکل ۲: نقشه دیجیتالی ارتفاعی محدوده مطالعاتی - مستطیل سیاه کوچک در تصویر نشان‌دهنده محل آغاز جریان واریزه‌ای است.

شرایط اولیه

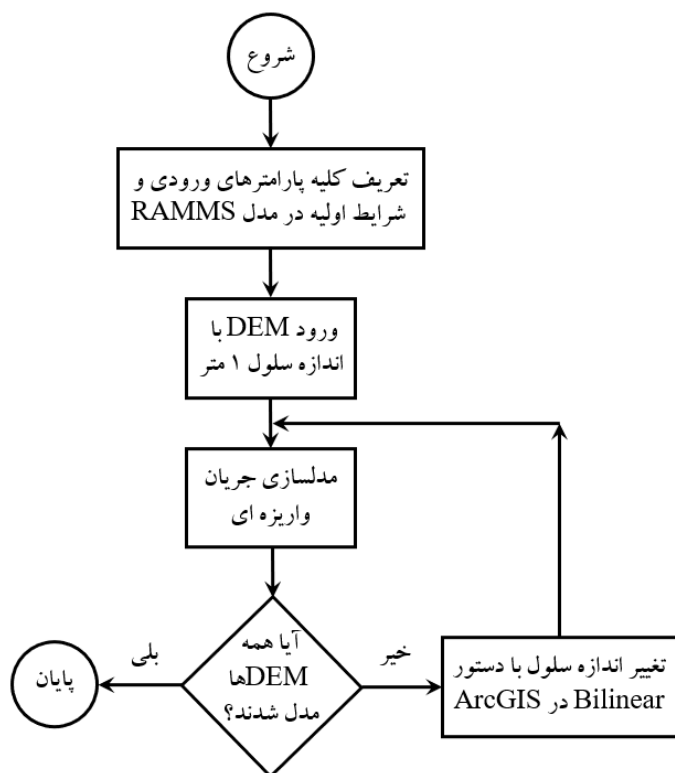
در این تحقیق برای مدل‌سازی جریان واریزه‌ای از روش هیدروگراف استفاده شده است. بر اساس داده‌های مشاهده‌ای فراوان از پدیده‌های جریان واریزه‌ای در نقاط مختلف دنیا، هیدروگراف جریان ورودی معمولاً بصورت ۳ و یا ۴ نقطه‌ای تعریف می‌گردد که روش ۳ نقطه‌ای آن معمولتر است (RAMMS, 2022). هیدروگراف جریان واریزه‌ای استفاده شده در این تحقیق، در شکل (۳) نمایش داده شده است. این هیدروگراف بر اساس حجم کل جریان سیلاب واریزه‌ای توسط نرم‌افزار RAMMS محاسبه و ترسیم می‌گردد که این حجم کلی با توجه به حوضه آبریز مورد مطالعه برابر با ۲۰۰۰۰ متر مکعب در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: هیدروگراف ۳ نقطه‌ای جریان واریزه‌ای جهت شروع مدل‌سازی

علاوه بر هیدروگراف، ضرایب اصطکاک نیز بایستی تعریف گردند. در شروع عملیات مدل‌سازی، معمولاً این ضرایب با یک فرض اولیه و بر اساس قضاوت مهندسی و میدانی انتخاب شده و سپس در فرآیند واسنجی مقدار واقعی آنها برآورد می‌شوند، اما در صورتیکه داده مشاهده‌ای در دسترس نباشد، پیشنهاد شده است که مقادیر این ضرایب برابر با $\mu = 0.2$ و $\xi = 200$ در نظر گرفته شوند که طیف وسیعی از جریان‌های واریزه‌ای مشاهده‌ای را شامل می‌شوند. در این تحقیق نیز چون هدف مقایسه نتایج مدل RAMMS بر اساس اندازه‌های مختلف سلول نقشه DEM می‌باشد، این مقادیر برای DEM-1 m به عنوان نقشه مبنا انتخاب شده و در ادامه برای مقایسه با سایر نقشه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

مدت زمان مدلسازی برای همه مدلها برابر با ۱۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است زیرا در تمامی حالات، جریان واریزه‌ای در زمانی کمتر از ۱۵۰۰ ثانیه، بدلیل صفر شدن اندازه حرکت، متوقف گردید. همچنین، جرم حجمی سیال نیز در همه حالاتها برابر با ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. به طور کلی روند انجام تحقیق بصورت نمودار گردش در شکل (۴) خلاصه و نمایش داده شده است.



شکل ۴: نمودار گردش روند انجام تحقیق در مدل RAMMS

بحث و یافته‌ها

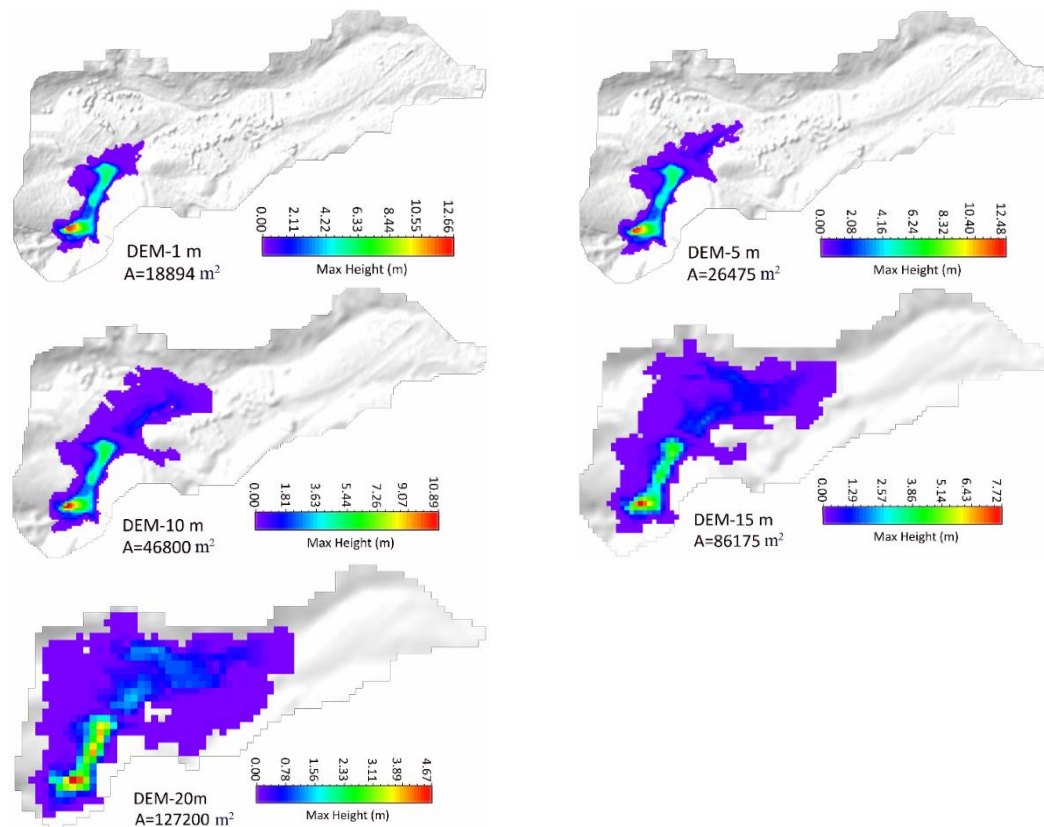
با استفاده از نرم‌افزار RAMMS و شرایط اولیه که به آنها اشاره شد، مدلسازی جریان واریزه‌ای بر روی نقشه‌های DEM با اندازه سلول‌های متفاوت انجام شد. برای این منظور، در همه مدلسازی‌ها، پارامترهای فیزیکی مربوط به مدلسازی به غیر از نقشه DEM، یکسان در نظر گرفته شدند تا بدین وسیله تغییرات در نتایج نسبت به حالت دقیق‌ترین نقشه، یعنی DEM-1 m، برآورد گردند. در مدلسازی جریان واریزه‌ای همانطور که در شکل (۱) هم نشان داده شد، پارامترهای فاصله کلی جابجایی مواد از نقطه شروع تا محل انباشت نهایی، پهنه تاثیر کل، حداکثر سرعت و حداکثر عمق جریان مهم هستند و دلیل آن خسارتهایی است که بر طبق مشاهدات از پدیده‌های واریزه‌ای واقعی، مستقیماً به این پارامترها مربوط هستند (RAMMS, 2022).

شکل (۵) نتایج خروجی جریان واریزه‌ای را به صورت پهنه تاثیر کل و حداکثر عمق جریان نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، فقط تغییر در اندازه سلول نقشه DEM باعث ایجاد تغییرات شدید در پارامترهای خروجی مربوط به یک جریان واریزه‌ای یکسان شده است.

جهت درک بهتر میزان تغییرات پارامترهای جریان واریزه‌ای در نقشه‌های مختلف نسبت به نقشه مبنای ۱ متری (با فرض اینکه این نقشه با داشتن کوچکترین اندازه سلولی در بین همه نقشه‌های استفاده شده در این مدل‌سازی، بهترین نتایج خروجی را داشته باشد)، از رابطه درصد تغییرات بصورت زیر استفاده می‌شود:

$$R = \left(\frac{P_n - P_1}{P_1} \right) \times 100 \quad (۴)$$

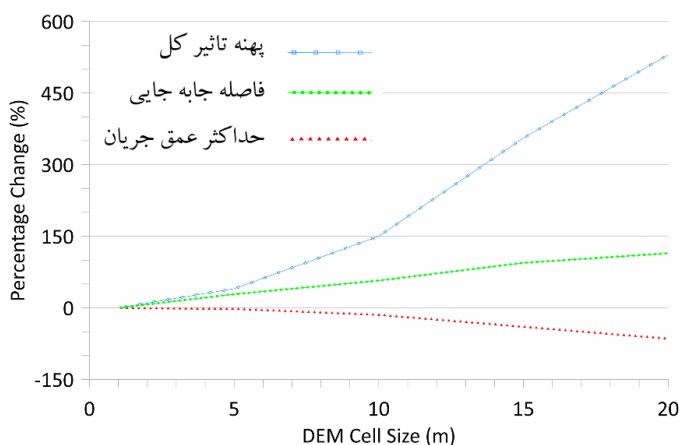
که در آن R درصد تغییرات، P_n و P_1 بترتیب مقدار یک پارامتر یکسان در خروجی مربوط به نقشه ۱ و n متری است. شکل (۶) درصد تغییرات پهنه تاثیر کل، حداکثر فاصله جابجایی و حداکثر عمق جریان را در نقشه‌های با اندازه سلولی مختلف نسبت به نقشه با اندازه سلولی ۱ متر نمایش می‌دهد. بر این اساس، فقط با تغییر اندازه سلول نقشه DEM از ۱ متر به ۲۰ متر و با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای موثر، وسعت پهنه تاثیر کل جریان واریزه‌ای به میزان ۵۴۸٪ رشد داشته است که این مقدار، خطای بسیار زیادی در مدل‌سازی محسوب می‌گردد. در یک نقشه با اندازه سلول بزرگتر از ۱ متر، به دلیل پهن شدن جریان در یک سطح وسیع، عمق حداکثر جریان نیز کاهش یافته است بطوریکه این عمق در نقشه ۲۰ متری حدود ۶۷٪ کمتر از حداکثر عمق جریان در نقشه ۱ متری است. علاوه بر این، بدلیل افزایش وسعت ناحیه تاثیر جریان در نقشه‌های بزرگتر از ۱ متر، فاصله جابجایی مواد از نقطه آغاز تا محل انباشت (توقف نهایی) نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای نموده است بطوریکه میزان آن در نقشه ۲۰ متری ۱۱۲٪ بیشتر از نقشه ۱ متری است.



شکل (۵): نتایج خروجی جریان واریزه‌ای مدل شده در RAMMS به صورت پهنه تاثیر کل و حداکثر عمق جریان. بغیر از اندازه سلولی نقشه‌های DEM، سایر پارامترها در همه مدل‌ها یکسان هستند.

البته بایستی اشاره گردد که یکی از علت‌های عریض شدن و افزایش وسعت جریان در نقشه دیجیتالی ارتفاعی ۲۰ متری نسبت به ۱ متری، علاوه بر وجود خطا در نرم‌افزار، بدلیل اینست که طبق مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف، با

افزایش اندازه سلول نقشه DEM به روش Bilinear در نرم‌افزار ArcGIS، میانگین شیب حوضه کاهش می‌یابد (فن و همکاران، ۲۰۲۱؛ گلوئی و معتمدی، ۲۰۲۱).



شکل (۶): درصد تغییرات پارامترهای مختلف مدل‌سازی شده (حداکثر فاصله جابجایی مواد، حداکثر عمق جریان و پهنه تاثیر کل) در نقشه‌های با اندازه سلولی مختلف نسبت به نقشه با اندازه سلولی ۱ متر.

همچنین از نمودارهای شکل (۶) مشخص است که میزان تغییرات در پارامترهای جریان واریزه‌ای، برای نقشه‌های با اندازه سلولی کمتر از ۵ متر تقریباً رشد کمی دارد (برای حداکثر عمق جریان $-2/3\%$ ، برای حداکثر فاصله جابجایی $+31\%$ و برای پهنه تاثیر کل $+37\%$ نسبت به نقشه ۱ متری) اما برای نقشه‌های بزرگتر از ۵ متر، این میزان تغییرات رشد بسیار زیادی دارد (مخصوصاً در پهنه تاثیر کل). بنابراین به نظر می‌رسد که نرم‌افزار RAMMS فقط برای نقشه‌های DEM با ابعاد سلولی خیلی کوچک (کمتر از ۵ متر) کارایی مناسبی داشته باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر اندازه سلولی نقشه دیجیتال ارتفاعی بر نتایج خروجی این نرم‌افزار بررسی شده است. نتایج نهایی نشان داد که تغییر در اندازه سلول نقشه DEM تغییرات شدیدی بر روی بسیاری از پارامترهای خروجی ایجاد می‌نماید. حداکثر این تغییرات در پهنه تاثیر جریان واریزه‌ای مشاهده گردید بطوریکه با افزایش اندازه سلول از ۱ متر به ۲۰ متر، بیش از 548% رشد در سطح کل بوجود آمده است. نظیر این تغییرات، اما با مقدار کمتر، در سایر پارامترهای خروجی نیز دیده شده است که نشان می‌دهد این نرم‌افزار حساسیت شدیدی نسبت به اندازه سلول نقشه DEM دارد. البته به این نکته بایستی توجه نمود که همگام با افزایش اندازه سلول، می‌توان تغییراتی در سایر پارامترهای ورودی (نظیر ضرایب اصطکاک) ایجاد نمود تا خطا در نتایج خروجی کمتر گردد، اما با این روش تغییرات ایجاد شده برای همه پارامترها یکسان نخواهد بود و خطاهایی در سایر متغیرها ایجاد خواهد کرد. بررسی تغییرات پارامترهای خروجی و مقایسه آنها با نتایج مربوط به دقیق‌ترین نقشه (در این تحقیق، نقشه ۱ متری) نشان می‌دهد که روند افزایشی تغییرات تا زمانیکه اندازه سلول نقشه کمتر از ۵ متر است بسیار کند و در نواحی محاسباتی بزرگ تقریباً قابل صرف‌نظر کردن است، اما برای نقشه‌های با اندازه سلول بزرگتر از ۵ متر، این تغییرات قابل ملاحظه و روند رو به رشد شدیدی دارد. بنابراین توصیه می‌گردد برای مدل‌سازی با این نرم‌افزار از نقشه‌های با دقت کمتر از ۵ متر استفاده گردد تا میزان انتشار خطا در نتایج به حداقل ممکن برسد.

سپاسگزاری

این تحقیق، بر اساس قسمتی از یک پروژه مطالعاتی در زمینه مدلسازی و کنترل خطرات ناشی از جریان واریزه‌ای می‌باشد که در موسسه تحقیقات مخاطرات کوهستانی و محیط زیست^۱ در کشور چین انجام شده است و جهت مقایسه نتایج، بخشی از آن نیز بصورت تحقیق حاضر در یکی از حوضه‌های ایران صورت گرفته است. از این رو، از زحمات، راهنمایی‌ها و کمک‌های تیم تحقیق بخصوص آقای پروفیسور Jihui Fan و همچنین مرکز کامپیوتر موسسه تحقیقات فوق بدلیل فراهم نمودن لایسنس نرم‌افزار و نقشه‌های DEM مورد نیاز، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- Armanini, A. and Michiue, M., 1997. *Recent developments on debris flows (Vol. 64)*. Springer.
- Bezak, N., Sodnik, J. and Mikoš, M., 2019. *Impact of a random sequence of debris flows on torrential fan formation*. *Geosciences*, 9(2), p.64. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020064>
- Cui, P., Zeng, C. and Lei, Y., 2015. *Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), pp.1644-1655. <https://doi.org/10.1002/esp.3744>
- De Finis, E., Gattinoni, P., Marchi, L. and Scesi, L., 2018. *Anomalous Alpine fans: from the genesis to the present hazard*. *Landslides*, 15, pp.683-694. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0894-8>
- Di Perna, A., Cuomo, S. and Martinelli, M., 2022. *The empirical formulation for debris flow impact and energy release*. *Geoenvironmental Disasters*, 9(1), pp.1-17. <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00210-9>
- Fan, J., Galoie, M., Motamedi, A. and Huang, J., 2021. *Assessment of land cover resolution impact on flood modeling uncertainty*. *Hydrology Research*, 52(1), pp.78-90. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.043>
- Fan, J., Motamedi, A. and Galoie, M., 2021. *Impact of C factor of USLE technique on the accuracy of soil erosion modeling in an elevated mountainous area (case study: the Tibetan plateau)*. *Environment, Development and Sustainability*, 23(8), pp.12615-12630. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01133-x>
- Frank, F., McArdell, B.W., Oggier, N., Baer, P., Christen, M. and Vieli, A., 2017. *Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model*. *Natural hazards and earth system sciences*, 17(5), pp.801-815. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-801-2017>
- Galoie, M. and Motamedi, A., 2021. *Optimization of Export Coefficient Model Based on Precipitation and Terrain Impact Factors*. *Geographical Researches*, 36(4), pp.337-346. doi: 10.29252/geores.36.4.337
- Hussin, H. Y., Quan Luna, B., van Westen, C. J., Christen, M., Malet, J.-P., and van Asch, Th. W. J.: *Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: a case study of the Faucon catchment, Southern French Alps*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3075–3090, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3075-2012>, 2012.
- Ji, F., Dai, Z. and Li, R., 2020. *A multivariate statistical method for susceptibility analysis of debris flow in southwestern China*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), pp.1321-1334. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1321-2020>, 2020.

¹- Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS

- King, H.M., 2018. *What is a debris flow?* *Geoscience News and Information*. Available at: <https://geology.com/articles/debris-flow/>
- Krušić, J., Abolmasov, B. and Samardžić-Petrović, M., 2019, October. *Influence of DEM resolution on numerical modeling of debris flows in RAMMS-Selanac case study. In Proceedings of the 4th Regional symposium on in the Adriatic—balkan region (pp. 23-25)*. Available at: <http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005131>; doi: 10.35123/ReSyLAB_2019
- RAMMS, 2022 “RAMMS Debris Flow User’s Manual 1.8.0” WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. P. 120.
- Takahashi, T., & Das, D. K. 2014. *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*. CRC press.
- Termini, D. and Fichera, A., 2020. *Experimental analysis of velocity distribution in a coarse-grained debris flow: A modified Bagnold’s equation*. *Water*, 12(5), p.1415. <https://doi.org/10.3390/w12051415>
- Zhao, H., Yao, L., You, Y., Wang, B. and Zhang, C., 2018. *Experimental study of the debris flow slurry impact and distribution*. *Shock and Vibration*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5460362>
- Zhou, W., Fang, J., Tang, C. and Yang, G., 2019. *Empirical relationships for the estimation of debris flow runout distances on depositional fans in the Wenchuan earthquake zone*. *Journal of Hydrology*, 577, p.123932. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123932>
- Zimmermann, F., McArdell, B.W., Rickli, C. and Scheidl, C., 2020. *2D runout modeling of hillslope debris flows, based on well-documented events in Switzerland*. *Geosciences*, 10 (2), p.70. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020070>