

## مقایسه اثرگذاری مدل‌های رقومی ارتفاع بر دقت و بهینه‌سازی مدل WRF-Hydro جهت پیش‌بینی وقوع سیل در حوضه آبریز پل‌رود

پریسا خرسند جاهد<sup>۱\*</sup>، نیما فرید مجتهدی<sup>۲</sup>، سمانه نگاه<sup>۳</sup>، محمدامین مداح<sup>۴</sup>، پروین غفاریان<sup>۵</sup>

۱- کارشناس ارشد هواشناسی، محقق، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی.

۲- دکتری اقلیم‌شناسی، کارشناس اداره کل هواشناسی استان گیلان.

۳- دکتری هواشناسی، کارشناس اداره کل هواشناسی استان گیلان.

۴- دکتری هواشناسی، استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۵- دکتری هواشناسی، دانشیار گروه پیش‌بینی جوی، پژوهشگاه علوم جوی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی.

### چکیده

این تحقیق به پیش‌بینی سیلاب و بررسی تأثیر وضوح و نوع مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) بر شبیه‌سازی اوج سیلاب با استفاده از مدل WRF-Hydro در حوضه آبریز پل‌رود، واقع در سواحل جنوب‌غربی دریای خزر، می‌پردازد. در این مطالعه، برای سه رویداد سیلاب به تاریخ‌های ۲۷ مارس ۲۰۱۶، ۱ آوریل ۲۰۱۹، و ۲۱ مارس ۲۰۲۱، از دو مدل رقومی ارتفاع آب‌شناسی (MERIT و HYDROSHEDS) و یک مدل با کاربرد توپوگرافی و زمین‌شناسی (USGS) با وضوح ۳۰ متر به عنوان داده‌های ورودی استفاده شده است.

برای هر DEM، پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی اشباع (REFDK)، پارامتر نفوذ (REFKDT) و ضریب زبری کانال (MANN) بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان می‌دهند که MERIT DEM بهترین عملکرد را داشته و میزان خطای نسبی واسنجی مدل برای آب‌دهی رودخانه در سه رویداد به ترتیب ۲.۳- درصد، ۰.۱۵- درصد و ۵.۹۲- درصد بوده است. پس از آن، SRTM DEM با خطاهای نسبی ۰.۴۵ درصد، ۴.۴ درصد و ۱۴.۲ درصد، بهترین نتایج را ارائه داد. دو پارامتر REFDK و ضریب مانینگ بیشترین تأثیر را در بهینه‌سازی نتایج داشتند. پارامتر مانینگ بر زمان عبور جریان تأثیر قابل توجهی دارد؛ هرچه مقدار آن کمتر باشد، زمان انتقال سریع‌تر و جریان بیشتری تولید می‌شود.

این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع آب‌شناسی می‌تواند نتایج مدل WRF-Hydro را بهبود بخشد. با توجه به نتایج کالیبراسیون و تحلیل حساسیت مدل WRF-Hydro و تأثیر مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) بر دقت پیش‌بینی سیلاب، پیشنهاد می‌گردد که در توسعه سیستم‌های هشدار سیلاب در حوضه‌های سیل‌خیز کشور از ترکیب مدل WRF و مدل هیدرولوژیکی WRF-Hydro استفاده شود. انتخاب مدل‌های رقومی ارتفاع مناسب و تنظیم بهینه پارامترها می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های سیلاب را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

کلید واژه‌ها: سیلاب، مدل WRF-Hydro، مدل رقومی ارتفاع، پل‌رود، بهینه‌سازی پارامترها.

## مقدمه

سیل یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی است که می‌تواند منجر به تلفات جدی و خسارات مالی فراوان شود (Deb et al., 2018). هشدار به‌موقع و دقیق سیل یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌بینی وضع هوا است. به‌طور کلی، فراوانی و شدت رویدادهای جوی تحت تأثیر تغییر اقلیم به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است (IPCC, 2015; Dastagir, 2015). (2014) شبیه‌سازی عددی به‌عنوان یک ابزار قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی سیل شناخته می‌شود که در مدیریت ریسک سیل و کاهش خطرات و آسیب‌های ناشی از آن نقش مهمی دارد (Saksena & Merwade, 2015). بارش یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی به سامانه‌های آب‌شناسی محسوب می‌شود و مطالعه و پیش‌بینی آن اهمیت ویژه‌ای دارد (Abbas & Xuan, 2018; Sirisena et al., 2020). در حوضه‌های کوچک، استفاده از بارش‌های مشاهداتی در سامانه هشدار سیلاب می‌تواند زمان پیش‌آگاهی از سیلاب را کوتاه‌تر کند (Banihabib & Arabi, 2016).

در میان منابع مختلف عدم قطعیت، از نظر ساختار و پارامترهای مدل، داده‌های ناهمواری به‌عنوان یکی از عوامل اصلی دقت شبیه‌سازی سیل شناخته شده‌اند (Sharma & Regonda, 2021). ویژگی‌های DEM تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مدل‌های آب‌شناسی دارند (Shen & Tan, 2020). داده‌های DEM با وضوح بالا در توصیف دقیق‌تر سطح زمین و بازتولید مسیرهای جریان در مقیاس کوچک کمک می‌کنند و انتظار می‌رود شبیه‌سازی‌ها با دقت بیشتر و عدم قطعیت کمتری انجام شود (Altenau et al., 2017). مطالعات قبلی نشان داده‌اند که تفاوت در داده‌های DEM هم از نظر کیفیت و هم از نظر دقت بر عملکرد شبیه‌سازی سیل تأثیرگذار است و نقش حیاتی در محاسبه شیب مسیرها، ارتفاعات، منحنی‌های سطح و دیگر پارامترهای آب‌شناسی دارد (Yamazaki et al., 2018; Khal et al., 2018).

یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی آب‌شناسی این است که یک مدل با چه تفکیک فضایی به‌طور بهینه عمل می‌کند. مطالعات متعددی شاخص‌های فضایی مشتق‌شده از DEM های با وضوح متفاوت را مقایسه کرده و تأثیر استفاده از DEM با وضوح‌های مختلف را بر نتایج مدل‌سازی آب‌شناسی و هیدرولیکی بررسی کرده‌اند (Jiang et al., 2011; Ghaffari, 2011; Lin et al., 2010; 2022; Schoorl; Murphy et al., 2007).

(Jiang et al., 2000). به‌عنوان مثال، جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2022) در مطالعه‌ای تفکیک‌های مختلف DEM را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزایش تفکیک DEM، شبیه‌سازی سیل به نتایج مشاهداتی نزدیک‌تر می‌شود. لین و همکاران (Lin et al., 2010) در مطالعه‌ای تأثیر DEM های تولید شده از منابع داده‌های مختلف را در پیش‌بینی مدل SWAT برای رواناب بررسی کردند. این مطالعه به کاربران مدل محیطی GIS کمک می‌کند تا حساسیت‌های مدل SWAT نسبت به وضوح DEM را درک کنند و داده‌های DEM با بهترین نتیجه را برای مدل‌های محیطی انتخاب نمایند.

پیش‌بینی دقیق بارش‌های سنگین و سیل‌آسا در مناطق سیل‌خیز ایران با چالش‌های بسیاری همراه است و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی عددی برای بهبود دقت و عملکرد آنها ضروری است. در حال حاضر، استفاده از سیستم‌های مبتنی بر فیزیک و آب‌شناسی که مدل‌های آب‌شناسی را با مدل‌های جوی به‌صورت جفت‌شده یا مستقل (آفلاین) ترکیب می‌کنند، در بسیاری از مناطق جهان مرسوم است (Jiang et al., 2022; Larsen et al., 2019; Rummler et al., 2020; Liu et al., 2020; Sofokleous et al., 2016; Mascaro et al., 2022; al., 2016; 2023; Yamazaki et al., 2017; Wagner et al., 2016; Yin et al., 2020). مدل توزیعی WRF-Hydro نیز یکی از مدل‌های آب‌شناسی است که در سال ۲۰۱۳ به‌منظور ترکیب مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا با مدل‌های آب‌شناسی توسعه یافت و در سال‌های اخیر هم به‌صورت جفت‌شده با مدل (coupled) WRF و هم به‌صورت مستقل (uncoupled) مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این مدل هم‌اکنون به‌عنوان هسته اصلی مدل ملی آب در ایالات متحده آمریکا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

به‌عنوان مثال ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2020) به ارزیابی مدل WRF-Hydro در تگزاس پرداخته و نشان دادند که در میان همه عوامل موثر بر سیلاب، تخمین درست میزان بارش، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و ضریب نفوذ آب به خاک، تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی‌ها دارد. همچنین لیو و همکاران (Liu et al., 2020) نشان دادند که دو فاکتور ضریب نفوذ آب به خاک و ضریب مانینگ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی حجم سیلاب و شکل آب‌نگاشت سیلاب دارند. وهبی و همکاران (Wehbe et al., 2019) مدل WRF-

داده‌های میدانی مقایسه شده و عملکرد مدل WRF-Hydro با استفاده از سه نسخه مختلف DEM مورد ارزیابی قرار گرفته و در پایان، نتایج و نتیجه‌گیری‌های به دست آمده صحت‌سنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج این تحقیق می‌تواند کمک شایانی به کاهش خسارات جانی و مالی ساکنان پایین دست حوضه در سیلاب‌های احتمالی پیش‌رو کند.

### روش تحقیق

#### منطقه مورد مطالعه

از مهمترین حوضه‌های آبریز واقع در استان گیلان می‌توان به پل‌رود اشاره کرد. پل‌رود، پرآب‌ترین و بزرگ‌ترین رودخانه جاری در زیرحوضه آبریز شرق گیلان و دومین رودخانه بزرگ استان گیلان بعد از سپیدرود است. موقعیت رودخانه پل‌رود برابر است با  $33^{\circ} 36'$  تا  $37^{\circ} 05'$  عرض جغرافیایی شمالی و  $30^{\circ} 33'$  تا  $49^{\circ} 45'$  طول جغرافیایی غربی است. مساحت این حوضه  $1741/73$  کیلومترمربع و طول آبراهه اصلی آن  $83/36$  کیلومتر است. به‌طورکلی، رودخانه پل‌رود از لحاظ چشم‌انداز زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی دارای دره‌های عمیق، پرتگاه‌های سنگی و برون‌زد سازندهای دوران اول و دوم زمین‌شناسی است و منظری متفاوت با دیگر رودهای گیلان دارد. در این حوضه آبادی‌های بسیاری وجود دارد که طول‌لای یکی از آنهاست و در کنار این رودخانه واقع شده‌است. لازم به ذکر است که در طی مراحل بهینه‌سازی، ارزیابی مقادیر اوج سیلاب بر روی ایستگاه آب‌شناسی و باران‌سنجی طول‌لای انجام شده‌است. دلیل انتخاب این ایستگاه، بالا بودن مقدار اوج سیلاب در آن به دلیل واقع شدن در پایین‌دست حوضه می‌باشد. همچنین این ایستگاه از ایستگاه‌های مبنا بوده و دارای داده‌های کامل‌تری نسبت به دیگر ایستگاه‌های منطقه است. شکل ۱-الف نقشه dem در حوضه آبریز پل‌رود را نشان می‌دهد. باتوجه به نقشه ارتفاع، منطقه مورد مطالعه در ارتفاع پایین‌تری نسبت به دیگر شاخه‌های رودخانه قرار دارد.

براساس نقشه پوشش زمین (شکل ۱-ب) بیش‌ترین درصد پراکنش کاربری اراضی به ترتیب مربوط به گیاهان سرسبز و جنگل‌ها (۴۸٪)، مناطق پر ارتفاع و برفی (۳۳٪)، مناطق با زمین‌های کشاورزی و گیاهان پراکنده (۱۱٪)، مناطق انسان ساخت (۷٪) و سپس بدنه‌های آبی (۱٪) است.

Hydro را در یک حوضه آبریز در امارات متحده عربی به کار برده و به دلیل عدم وجود ایستگاه آب‌شناسی در منطقه از پارامترهای پیش فرض مدل (بدون انجام واسنجی) استفاده کردند. اگرچه نتایج تحقیق آن‌ها در حوضه مذکور رضایت بخش بود اما در تحقیق دیگری توسط سیلور و همکاران (Silver et al., 2017) نشان داده شد که واسنجی مدل می‌تواند تا حدود زیادی به بهبود پیش‌بینی‌ها کمک کند. ایمانی و همکاران (۱۳۹۹) در ایران از مدل WRF-Hydro به منظور پیش‌بینی سیلاب استفاده کردند. در این تحقیق که تنها پژوهش انجام‌شده در کشور در زمینه ارزیابی مدل WRF-Hydro است، جهت مدل‌سازی عددی بارش از داده‌های بازتحلیل NCEP/FNL استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که درصد خطای آب‌دهی اوج شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده شده کمتر از ۲۱ درصد و خطای زمان رسیدن به اوج سیلاب، کم‌تر از ۵ ساعت است. مدل‌های آب‌شناسی واسنجی شده می‌توانند میزان (نرخ) و شدت رواناب را با دقت خوب و معقولی پیش‌بینی کنند (Pennelly et al., 2014). مدل‌های آب-هواشناسی (Hydrometeorological model) مانند WRF-Hydro پتانسیل پیش‌بینی مناسب رواناب، جریان و پیش‌بینی سیل را در هنگام کار با وضوح شبکه مؤثر چند کیلومتر یا کم‌تر را دارند (Arnault et al., 2016). با این حال، دقت و اعتماد به نتایج این مدل‌ها به میزان واسنجی صحیح آن‌ها و تطبیق آن با داده‌های مشاهده شده وابسته است.

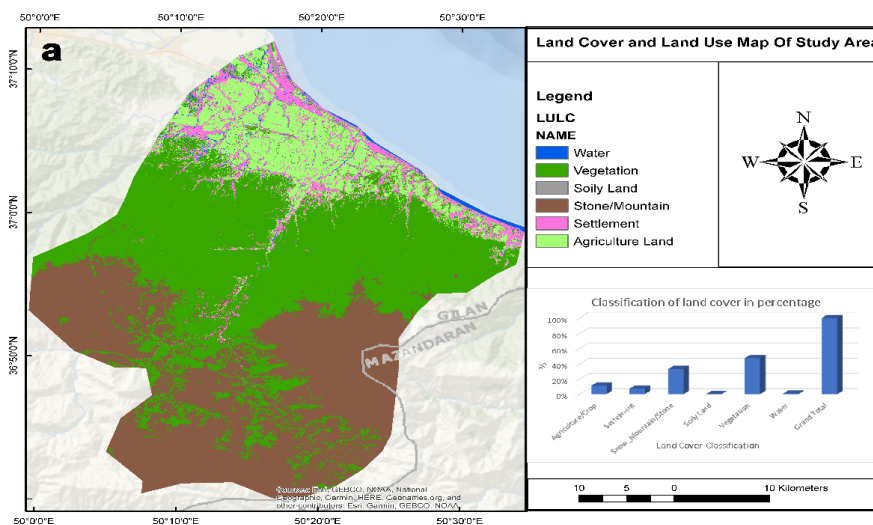
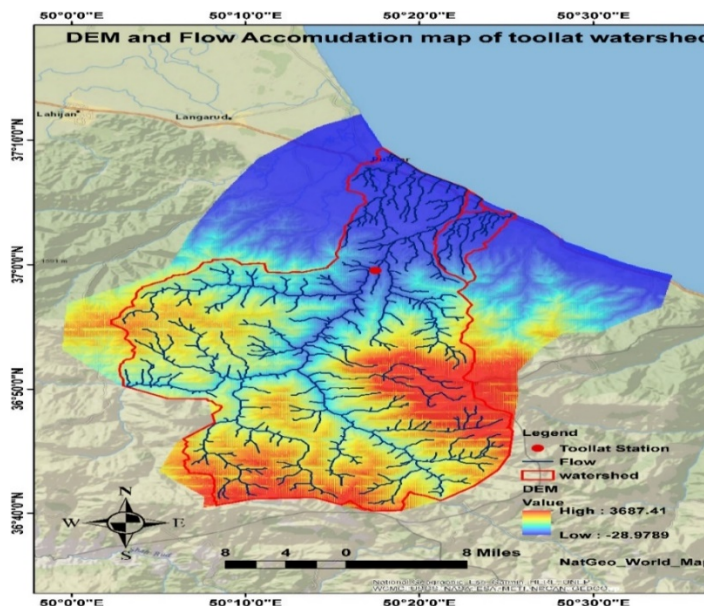
هدف اصلی این مطالعه، اجرای اولیه و واسنجی مدل WRF-Hydro در حالت مستقل از WRF با استفاده از داده‌های آب‌شناسی میدانی است. پژوهش حاضر بر روی حوضه آبریز پل‌رود صورت گرفته‌است. در طی سال‌های گذشته وقوع بارش‌های سیل‌آسا در این حوضه منجر به رخداد سیلاب و خسارت‌های هنگفتی شده‌است. در این تحقیق سعی شده است که سیلاب‌های رخ داده در تاریخ ۲۰۱۶/۰۳/۲۷، ۲۰۱۹/۰۴/۰۱ و ۲۰۲۱/۰۳/۲۱ که هدف مطالعات پیشین نبوده و منجر به خسارت جانی و مالی در این حوضه شده است شبیه‌سازی شود. به علاوه در تحقیق حاضر، اثر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بر روی سیلاب (که در تحقیقات دیگر کمتر به آن پرداخته شده است) مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

در این مطالعه، از سه نسخه مدل‌های رقومی ارتفاع به نام‌های USGS SRTM ، Hydrosheds 90m و MERIT 90m 30m استفاده شد. مقدار آب‌دهی رودخانه از خروجی مدل با

داده انتخابی

جمع‌آوری شد. باتوجه به خلاءها و محدودیت‌های موجود در داده‌های مشاهداتی، در مجموع ۳ رویداد سیل شدید در این ایستگاه انتخاب شده است که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

در این مطالعه، داده‌های آب‌شناسی اندازه‌گیری شده به‌ویژه داده‌های آب‌دهی رودخانه پل‌رود در ایستگاه آب‌سنجی طوللات از مرکز آبخیزداری استان گیلان به‌صورت ساعتی



شکل ۱- الف- نقشه DEM و جریان حوضه آبریز پل‌رود. دایره قرمز موقعیت ایستگاه آب‌شناسی ایستگاه طوللات

شکل ۱- ب- نقشه land cover تهیه شده با استفاده از داده ماهواره‌ای landsat8 و نرم افزار ArcMap

جدول ۱. اطلاعات هیدرومتری و بارش در ۳ رویداد سیل ایستگاه طوللات

ردیف	تاریخ رویداد ثبت شده	میانگین آب‌دهی ثبت شده (m <sup>3</sup> /s)	بیشینه آب‌دهی رودخانه (m <sup>3</sup> /s)
۱	۲۰۱۶/۰۳/۲۷ - ۲۰۱۶/۰۳/۲۹	۱۱۱.۵۶۳۸	۲۴۰
۲	۲۰۱۹/۰۴/۰۱ - ۲۰۱۹/۰۴/۰۳	۱۲۰.۴۰۲۹	۲۲۴
۳	۲۰۲۱/۰۳/۲۴ - ۲۰۲۱/۰۳/۲۶	۱۱۶.۷۱۸۸	۱۸۵

حساسیت مدل WRF\_Hydro استفاده شده است. این سه مدل از لحاظ وضوح فضایی با یکدیگر تفاوت دارند.

در این مطالعه از سه مدل رقومی ارتفاعی متفاوت به نام‌های HydroSHEDS، MERIT و SRTM جهت بررسی

استفاده می‌کنند. USGS مخفف United States Geological Survey است که در ایالات متحده آمریکا مسئول مطالعات جغرافیایی و علوم زمینی است. USGS SRTM DEM 30m نوعی مدل ارتفاعی دیجیتال است که توسط USGS ایجاد شده است. ویژگی اصلی این محصول DEM این است که ارتفاعات زمین را با فاصله ۳۰ متری نمایش می‌دهد، به این معنی که هر نقطه روی نقشه با دقت ۳۰ متری در ارتفاع اندازه‌گیری شده است. این نوع از DEM به‌عنوان یک منبع مهم در علوم زمینی، هواشناسی، مهندسی، علوم محیطی و مطالعات محیطی استفاده می‌شود. با داشتن اطلاعات ارتفاعی در این فاصله ۳۰ متری، محققان و متخصصان می‌توانند تحلیل‌های مختلفی در مورد زمین شناسی، آب‌شناسی، بیوماسه گیاهی، تغییرات آب و هوایی و... انجام دهند. این نوع DEM معمولاً در قالب فایل‌های دیجیتالی مانند GeoTIFF یا ASCII قابل دسترسی و دانلود است و می‌تواند به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی در نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مانند ArcGIS یا QGIS استفاده شود.

#### مدل رقمی ارتفاع MERIT

MERIT (Multi-Error-Removed Improved Terrain DEM) مدل بهبودیافته‌ای برای نمایش وضعیت زمین با وضوح فضایی ۹۰ متر (۳ ثانیه قوسی) است (Wu et al., 2008). MERIT تقریباً تمامی مناطق خشکی زمین را در محدوده عرضی ۹۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، به استثناء قطب جنوب، پوشش می‌دهد. در مقایسه با بیشتر مجموعه‌های داده جهانی DEM، MERIT ارتفاعات زمین را با دقت بیشتری ارائه می‌دهد. این امر به دلیل کاهش ارتفاع گیاهان (که به نام انحراف ارتفاع درختان نیز شناخته می‌شود) با استفاده از نقشه‌های تراکم و ارتفاع درختان حاصل شده است. با این وجود، در مناطق شهری، ارتفاعات MERIT ممکن است به دلیل وجود سازه‌ها دچار خطا باشد. MERIT براساس داده‌های SRTM v2.1 در جنوب عرض ۶۰ درجه، داده‌های ALOS AW3D در شمال عرض ۶۰ درجه و ارتفاعات پانوراماها (VFP-DEM) برای پر کردن مناطق خالی (مناطق که ثبت نشده‌اند) ساخته شده است. در شمال

وضوح فضایی به تعداد پیکسل‌ها در هر واحد مساحت (معمولاً مترمربع) در تصویر اشاره دارد. از نظر کیفیت ارتفاع، تفاوت‌هایی بین این مدل‌ها وجود دارد، که به وضوح فضایی و روش تولید هر مدل بازمی‌گردد. در ادامه به معرفی مختصری از هر مدل رقمی ارتفاع خواهیم پرداخت.

#### مدل رقمی ارتفاع HydroSHEDS

داده‌های DEM جهانی با وضوح بالا از داده‌های HydroSHEDS (داده‌ها و نقشه‌های آب‌شناسی بر اساس مشتقات ارتفاع شاتل در مقیاس‌های چندگانه، <https://hydrosheds.cr.usgs.gov/dataavail.php>) استخراج می‌شوند. مجموعه داده HydroSHEDS DEM بر اساس ماموریت توپوگرافی رادار با وضوح بالا (SRTM) توسعه یافته است. وضوح این مجموعه داده به سه دسته ۳" (حدود ۹۰ متر)، ۱۵" (حدود ۵۰۰ متر) و ۳۰" (حدود ۱ کیلومتر) تقسیم می‌شود (Lehner et al., 2008). در این مطالعه از وضوح ۹۰ متر استفاده شده است. HydroSHEDS محصولات داده‌های آب‌نگاشت یکپارچه از جمله مرزهای حوضه، شبکه‌های رودخانه‌ها و دریاچه‌ها را ارائه می‌دهد. هدف آن HydroSHEDS ارائه اطلاعات آب‌نگاشت با بالاترین کیفیت ممکن است. محصولات مختلف داده‌های آب‌نگاشت آن شامل مرزهای حوضه آبریز، شبکه‌های رودخانه‌ها و دریاچه‌ها را ارائه می‌دهد. داده‌های HydroSHEDS به‌صورت رایگان در قالب‌های استاندارد GIS در دسترس هستند و چارچوب جغرافیایی را برای طیف وسیعی از ارزیابی‌ها از جمله کاربردهای آب‌شناسی، زیست‌محیطی، حفاظتی، اجتماعی-اقتصادی و سلامت انسان تشکیل می‌دهند.

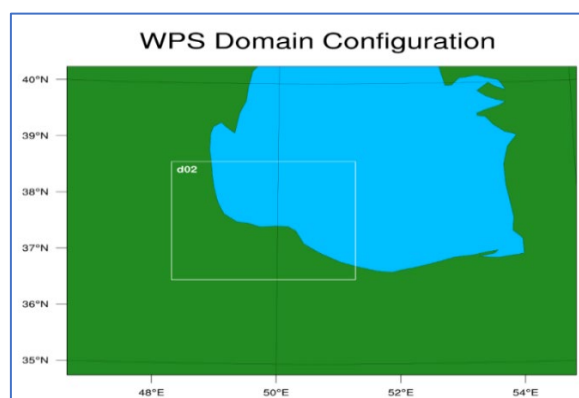
#### مدل رقمی ارتفاع USGS DEM (SRTM 30m)

این مجموعه کاشی‌کاری شده از برنامه ارتفاع سه بعدی (DEP3) است و وضوح ۱ ثانیه قوس (تقریباً ۳۰ متر) دارد. ارتفاعات در این مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) نشان‌دهنده توپوگرافی سطح زمین برهنه است. محققان و مدیران منابع از داده‌های DEP3 برای مدل‌سازی آب‌شناسی، نظارت بر منابع، نقشه‌برداری و تجسم و بسیاری از کاربردهای دیگر

عرض ۶۰ درجه، سهم VFP-DEM حدود ۳۰ درصد است، که به این معنی است که خطاهای ارتفاعی موجود در مدل SRTM به گونه‌ای کاهش یافته‌اند که ویژگی‌های واقعی زمین با وضوح بیش‌تری دیده می‌شوند.

جدول ۲- ویژگی مدل‌های رقومی ارتفاع مورد استفاده در مطالعه

ویژگی	DEM MERIT 30m	DEM HydroSHEDS	DEM USGS SRTM 30m
دقت ارتفاعی	متر 30	متر 90	متر 30
توزیع جغرافیایی	جهانی	جهانی	جهانی
منبع داده	مختص تحلیل‌های آب‌شناسی	مختص تحلیل‌های آب‌شناسی	عمومی
ابزار جمع‌آوری داده‌ها	SAR (Sentinel-1)	SRTM و داده‌های آب‌شناسی	SRTM
جزئیات تصویر	حذف انحرافات ناشی از پوشش گیاهی	تمرکز بر مناطق خشکی و شبکه‌های رودخانه‌ای	نمایش دقیق‌تر جزئیات سطح زمین
کاربردها	تحلیل‌های آب‌شناسی و مدیریت منابع آبی	تحلیل‌های آب‌شناسی و مدیریت منابع آبی	گسترده‌تر، از جمله توپوگرافی و زمین‌شناسی



شکل ۲- محدوده شبیه‌سازی اجرای مدل WRF

شد که ۶ ساعت اول آن به‌عنوان زمان spin-up مدل در نظر گرفته شد. در جدول ۳، پیکربندی‌های مختلف بکار گرفته شده در مدل براساس تحقیقات (Ghafarian, 2021؛ Ghafarian et al., 2021) نمایش داده شده است. شایان ذکر است که تنها مقادیر بارش مربوط به دامنه دوم به‌عنوان ورودی مدل آب‌شناسی استفاده شده‌است.

## روش کار

### پیکربندی مدل WRF

مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF نسخه ۴ جهت شبیه‌سازی ۳ رخداد سیل در استان گیلان مورد استفاده قرار گرفت. دو دامنه با تفکیک مکانی ۳ و ۹ کیلومتر و با نگاهت لامبرت تعریف شدند (شکل ۲). داده‌های ERA5 با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه به‌عنوان شرایط آغازین مدل استفاده شد. از آن‌جا که به‌طور میانگین نتایج اجرای مدل بعد از گذشت ۲ الی ۳ روز واگرا می‌شود (Carvalho et al., 2012)، اجرای مدل به صورت جداگانه و به مدت ۷۸ ساعت انجام

جدول ۳- پیکربندی اجرای مدل WRF

پارامترسازی فیزیکی	طرحواره انتخاب شده
خرد فیزیک	Morrison (موریسون و همکاران، ۲۰۰۹)
لایه مرزی سیاره‌ای	Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ, (یانجی، ۱۹۹۴)
همرفت	Kain-Fritsch (یانجی، ۲۰۰۱)
لایه سطحی	Eta Similarity (یانجی، ۲۰۰۱)
سطح زمین	Noah–MP (نیو و همکاران، ۲۰۱۱)
تابش طول موج بلند	RRTM (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷)
تابش طول موج کوتاه	Dudhia (دادهیا، ۱۹۸۹)

### افزونه WRF-Hydro

مدل WRF-Hydro یک مدل جامع و منبع باز است که به صورت مکمل با مدل عددی WRF و مدل تک بعدی Noah Land Surface اجرا می‌شود. افزونه آب‌شناسی WRF-Hydro شامل قابلیت‌های اضافی برای ورود داده‌های زمین‌شناسی و آب‌شناسی با دقت بالا است که به عنوان شبکه مسیریابی زمینی شناخته می‌شوند. این قابلیت‌ها به طور جامع در مطالعات (Gochis et al., 2013; Gochis et al., 2016) توصیف شده‌اند. مدل WRF-Hydro با خروجی‌های مدل WRF به دو صورت جفت شده (تعامل آنلاین با مدل WRF) و مستقل (بدون تعامل آنلاین با WRF) ترکیب می‌شود و امکان شبیه‌سازی فرآیندهای جریان سطحی، جریان زیرسطحی، روندیابی رودخانه و جریان پایه را فراهم می‌سازد. این مدل هواشناسی با ترکیب داده‌های پیش‌بینی جوی مانند سامانه جهانی پیش‌بینی (GFS) یا مرکز پیش‌بینی هوای میان مدت اروپا (ECMWF)، همراه با اطلاعات توپوگرافی و ژئومورفولوژی محلی، شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری از فرآیندهای آب‌شناسی ارائه می‌دهد و نسبت به مدل‌های تجربی و فیزیکی قبلی، بهبود یافته است.

### WRF-Hydro model calibration

جهت دستیابی به نتایج مورد قبول، مدل WRF-Hydro، مانند دیگر مدل‌ها، نیازمند واسنجی براساس داده‌های مشاهداتی است. این مدل شامل طیف وسیعی از پارامترها و ورودی‌هاست که تاثیر مستقیمی بر عملکرد مدل دارند. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مرحله پیش‌پردازش (GIS pre-processing) برای استخراج لایه‌های LSM و شبکه‌های مسیریابی WRF-Hydro به منظور تولید فایل‌های

Process geogrid مورد استفاده قرار گرفت. شبکه مسیریابی زمین WRF-Hydro (با رزولوشن ۲۰۰ متر) و شبکه کانال از طریق WRF-Hydro GIS Pre-processing Toolkit نسخه ۵.۲ و با استفاده از فایل geogrid از سیستم پیش‌پردازشی WRF و داده‌های رقومی ارتفاع از منابع و HydroSHEDS، MERIT، و SRTM 30m استخراج شدند. در پایان با توجه به داده‌های DEM ورودی، سه نوع فایل Process geogrid استخراج شد و مدل برای هر یک از این فایل‌های ورودی واسنجی شد.

مدل‌های WRF و WRF-Hydro به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ۱۲ فایل حاوی جداول مقادیر پارامترهای پیکربندی و چهار فایل "namelist" را که شامل صدها پارامتر واسنجی است، بخوانند. این پارامترها از طریق جدول‌های ورودی و شبکه‌ها مشخص شده و بسته به منطقه مورد مطالعه و رفتار آب‌شناسی حوضه تنظیم یا واسنجی می‌شوند. مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار آب‌شناسی حوضه عبارتند از: پارامتر نفوذ (REFKDF) با مقدار پیش فرض برابر با ۳، عمق نگهداشت آب سطحی (RETDEPRT) با مقدار پیش فرض برابر با ۱، ضریب زبری کانال (MANN) که متناسب با هر رده آبراهه و مطابق مقادیر پیش فرض در جدول ۴ تنظیم می‌شود. و پارامتر وابسته به هدایت هیدرولیکی اشباع (REFDK) با مقدار پیش فرض برابر با  $10^{-6}$  تا  $10^{-2}$  است. لازم به ذکر است که مقدار پیش فرض پارامتر REFDFK برای خاک "لوم-رسی-سیلتی" لحاظ شده است، زیرا این نوع خاک به دلیل خصوصیات فیزیکی خاص خود، نظیر ظرفیت نگهداشت آب و نفوذپذیری، در بسیاری از مطالعات آب‌شناسی به عنوان یک نمونه استاندارد در نظر گرفته می‌شود.

پارامتر REFDK و همچنین پارامتر نفوذ، به نوع کاربری اراضی و نوع خاک حوضه مورد مطالعه وابسته بوده و براساس جدول ۳ تعیین می‌شود (Silver et al., 2017).

انتخاب این پارامتر بر اساس نتایج تحقیقاتی است که نشان داده‌اند این مقادیر در شبیه‌سازی‌های آب‌شناسی برای مناطق با خصوصیات مشابه به خوبی عمل می‌کنند (Silver et al., 2017, 2017). شایان ذکر است که مقدار

جدول ۴: مقادیر ضریب زبری کانال در حالت پیش فرض مدل

MANN	Stream order
0.09	1
0.07	2
0.06	3
0.05	4
0.04	5
0.03	6
0.03	7
0.02	8
0.02	9
0.02	10

جدول ۵: مقادیر REFDK و REFKDT متناسب با هر نوع خاک و کاربری اراضی (Silver et al., 2017)

REFKDT (unitless)	REFDK (*10 <sup>-6</sup> m/sec)	نوع خاک و کاربری اراضی
0.8	0.5	صخره
1.8	2	خاک رسی
4	15	شن
1	1	شهری
3	3	جنگل
0	0	آب

محاسباتی اضافه شده است. سایر فراسنج‌های مدل به صورت پیش‌فرض لحاظ شدند.

### بحث و نتایج

مدل WRF بر روی دامنه‌ای که در شکل ۲ نمایش داده شده است، اجرا شد تا داده‌های ورودی جوی جهت واسنجی و اجرای مدل مکمل WRF-Hydro تولید شود. شبیه‌سازی برای سه رویداد سیل که در جدول ۱ ذکر شده است، صورت گرفت. برای هر مدل رقومی ارتفاع، سه رویداد برای تحلیل میزان حساسیت مدل و انجام واسنجی بررسی شد.

### تحلیل واسنجی مدل WRF-Hydro

مدل WRF-Hydro دارای پارامترهای آب‌شناسی پیش‌فرض بسیاری است که باتوجه به منطقه مورد مطالعه و رفتار

ابتدا هر یک از پارامترهای REFDK، REFKDT و MANN که بیشترین تاثیر را بر مقدار اوج سیلاب و شکل آب‌نگاشت سیل دارند بهینه‌سازی شدند. به دلیل زمان محاسباتی بالای مورد نیاز جهت واسنجی خودکار، واسنجی دستی (Hogue et al., 2000) به صورت گام به گام مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، ابتدا یک بازه‌احتمالی برای مقدار هر پارامتر تخمین زده شد و در مرحله بعد با مقایسه آب‌نگاشت شبیه‌سازی شده و آب‌نگاشت مشاهداتی، مقدار بهینه برای هر پارامتر به صورت مجزا برای هر سه فایل process geogrid با DEM های مختلف تعیین شد. در این مطالعه، مقدار عرض رودخانه از شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان اخذ شد. میزان ارتفاع آب رودخانه قبل از وقوع سیل برابر با صفر در نظر گرفته شده و پس از انجام شبیه‌سازی، مقدار آب‌دهی پایه رودخانه به اوج سیلاب

Refdk برای هر کدام از داده‌های DEM متفاوت است که به ترتیب برای HydroSHEDS و MERIT برابر با ۱۱m/s و USGS SRTM DEM برابر با ۱۳m/s می‌باشد. تنظیمات پیش فرض مدل اوج تمامی جریان‌ها را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی تمامی رویدادها دست کم می‌گیرد و مقادیر بهینه پارامتر Refdk برای هر سه DEM با مقدار پیش فرض اختلاف زیادی دارد. در واقع، می‌توان گفت وجود اراضی کشاورزی و پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه می‌تواند تا حد زیادی سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع گردد (Rummler et al., 2019). علاوه بر این، با توجه به اینکه بخش وسیعی از منطقه دارای پوشش گیاهی است، برآورد بیش‌تر این پارامتر در مقایسه با مقدار پیش فرض مدل منطقی به نظر می‌رسد. بافت خاک نیز در منطقه مورد مطالعه از جنس لوم است که نسبت به نوع خاک پیش فرض، هدایت هیدرولیکی بالاتری دارد.

دومین پارامتر ارزیابی شده از پارامترهای کنترل کننده حجم کل آب، Refkdt است. باتوجه به جدول ۵، مقدار اولیه پارامتر Refkdt در بازه ۲ تا ۳/۴ با فواصل ۰/۲ واحدی برای هر ۳ مدل رقومی ارتفاعی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). در واقع Refkdt نفوذ آب سطحی را کنترل می‌کند و مقدار آن باید کاهش یابد تا بسیاری از نفوذها غیر فعال شود. مقدار بهینه Refkdt به ترتیب برای مدل‌های رقومی ارتفاعی HydroSHEDS، MERIT و SRTM 30m برابر با ۳ و ۲/۸ و ۳/۲ می‌باشد. باتوجه به شکل‌های خروجی، روند نمودار مدل رقومی ارتفاعی MERIT بهتر از دیگر DEM‌های مورد بررسی است.

با توجه به شکل‌های خروجی، روند نمودار مدل رقومی ارتفاعی MERIT بهتر از دیگر DEM‌های مورد بررسی است. باتوجه به شکل‌ها، افزایش مقادیر Refkdt موجب کاهش آب‌دهی می‌شود. تحقیقات پیشین (Zhang et al., 2020; Verri et al., 2017) نشان می‌دهند که Refkdt حساس‌ترین پارامتر در کنترل رواناب به رویدادهای بارندگی شدید است و افزایش آن موجب کاهش آب‌دهی می‌شود. آب‌دهی‌ها نتایج ما نشان می‌دهد که Refdk تأثیر بیش‌تری در کنترل حجم رواناب در منطقه مورد مطالعه داشته است که می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. از جمله این دلایل

آب‌شناسی مختص آن ممکن است تنظیم یا واسنجی شوند. واسنجی مدل WRF-Hydro در حالت آفلاین با سه پارامتر (Mann, Refdk, Refkdt) برای سه مدل رقومی ارتفاع که در بخش قبل توضیح داده شد، انجام گرفت. فرآیند واسنجی و تحلیل حساسیت مدل WRF-Hydro برای منطقه مطالعاتی به دو بخش کلی تقسیم شد که شامل پارامترهای کنترل کننده حجم کل آب و شکل آب‌نگاشت است.

واسنجی مدل WRF-Hydro به صورت دستی بر روی سه سیلاب رخ داده، که در جدول ۱ معرفی شده‌اند، انجام شد و بهترین تنظیمات برای منطقه مورد مطالعه تعیین گردید. اولین پارامتر ارزیابی شده در این مطالعه، یکی از پارامترهای کنترل کننده حجم آب (Refdk) است. این پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع جریان را در مدل کنترل می‌کند. مقدار پیش فرض این پارامتر در مدل ۶-۲×۱۰ است که مربوط به خاک لوم-رسی-سیلتی است. در این مطالعه مقادیر واسنجی از ۶-۲×۱۰ تا ۶-۱×۱۰ و با گام دوتایی مورد بررسی قرار گرفت، زیرا منطقه مورد مطالعه دارای خاک با بافت لوم است و باتوجه به شکل کاربری اراضی، عمدتاً دارای پوشش گیاهی می‌باشد.

شکل ۳ واسنجی مدل با پارامتر Refdk را برای سه مدل رقومی ارتفاع نشان می‌دهد. ردیف اول مربوط به مدل رقومی ارتفاع HydroSHEDS، ردیف دوم مربوط به MERIT و سومین ردیف USGS SRTM DEM را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳، شبیه‌سازی سیلاب با پارامترهای پیش فرض مدل، مقدار اوج سیلاب را به مقدار قابل توجهی کم‌تر از مقدار مشاهداتی برآورد می‌کند. از جمله دلایل آن می‌توان به بالا بودن میزان ضریب نفوذ و کم بودن مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در حالت پیش فرض نسبت به منطقه مورد مطالعه اشاره کرد. بنابراین، بر خلاف نتایج وهبی و همکاران (Wehbe et al., 2019) که نشان دادند مدل WRF-Hydro با تنظیمات پیش فرض، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد، تنظیمات پیش فرض مدل در حوضه طول لات از دقت پایینی برخوردار است. لذا ضروری است که پارامترهای موجود در مدل بر مبنای شرایط حوضه مورد مطالعه بهینه‌سازی گردد.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقدار بهینه پارامتر

می‌توان به جنس خاک و هم چنین شیب حوضه اشاره کرد (میزان شیب طولی برابر ۱/۳ درصد). از سوی دیگر، مقدار این پارامتر برای حوضه جنگلی برابر با ۳ پیشنهاد شده است. باتوجه به اینکه جنگل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه هم از نوع سبز و اندوه و هم از نوع تنک و مزارع کشاورزی است، بنابراین مقادیر برآورد شده برای هر کدام از پارامترها به نظر منطقی می‌باشد.

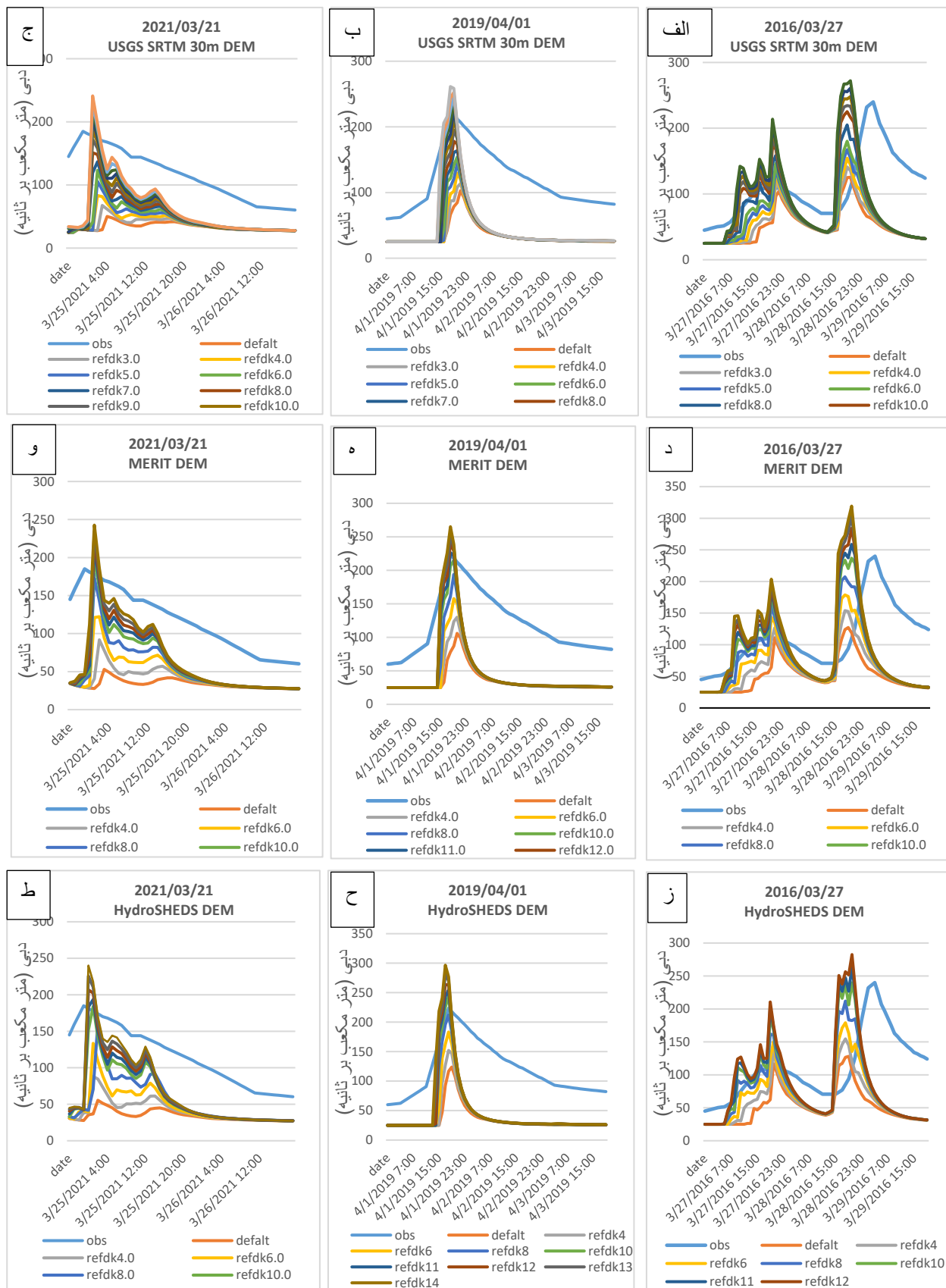
نحوه انتقال آب در رودخانه نیز بر شکل آب‌نگاشت اثر می‌گذارد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر نحوه انتقال آب در رودخانه ضریب زبری مانینگ است که مقادیر آن بر اساس رودخانه تعیین می‌شود. شکل ۵ آب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده تست‌های حساسیت پارامتر MANN را نشان می‌دهد. در این مطالعه حداکثر رده رودخانه‌ای ۵ می‌باشد. باتوجه به هدف مطالعه در شبیه‌سازی سیلاب، پارامتر Hlink در تمامی رده‌های رودخانه صفر در نظر گرفته شد. در واقع هیچ جریان پایه‌ای در ابتدای مدلسازی لحاظ نگردید و پس از انجام شبیه‌سازی، مقدار آب‌دهی پایه رودخانه به اوج سیلاب محاسباتی اضافه شده است. پارامتر MANN با ضرب مقادیر اولیه (جدول ۴) کانال‌های رودخانه در یک ثابت عددی تنظیم شده است که در برخی رویدادها این ثابت برای برخی DEM ها اندکی متفاوت در نظر گرفته شده است.

به عنوان مثال، USGS SRTM DEM در تاریخ ۲۰۲۱/۰۳/۲۱ با کاهش ضریب ثابت از ۰/۷، مقدار اوج آب‌دهی تغییری نکرده و در عوض نمودار به سمت راست منتقل شده است، به طوری که در این شرایط ساعت به اوج رسیدن آب‌دهی شبیه‌سازی شده با مشاهداتی همخوانی خوبی را نشان می‌دهد. این شرایط برای دیگر رویدادها صدق نمی‌کند و با افزایش ضریب ثابت، آب‌دهی افزایش یافته و زمان اوج آب‌دهی مدل‌سازی شده از مشاهداتی فاصله می‌گیرد. لازم به ذکر است که ثابت تنظیم، پارامترهای مدل نیستند. به عنوان مثال اگر MANN دارای ضریب تنظیم ۱/۲ باشد، مقدار اولیه MANN در ۱/۲ برای تمام کانال‌های رودخانه ضرب می‌شود تا پارامترهای جدید محاسبه شود. باتوجه به خروجی مدل، مقدار بهینه MANN در بازه ۰/۹-۱ برای HydroSHEDS، بازه ۰/۹-۱/۱ برای MERIT و بازه ۰/۸-۱ برای SRTM می‌باشد. باتوجه به شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که پارامتر MANN تأثیر قابل توجه‌ای بر زمان عبور جریان دارد. هر چه مقدار MANN کم‌تر باشد، زمان انتقال سریع‌تر و مقدار جریان تولید شده نیز افزایش می‌یابد. اوج جریان با کم‌ترین مقدار MANN برای هر سه DEM بزرگ‌ترین آب‌دهی را در شکل نشان می‌دهد. براساس مقادیر بهینه فرض می‌شود که کانال‌ها نسبت به مقادیر پیش فرض داخل شبکه جریان اولیه مدل، زبری کم‌تری داشته و اصطکاک جریان، کم‌تر از مقادیر پیش فرض مدل است.

می‌توان به جنس خاک و هم چنین شیب حوضه اشاره کرد (میزان شیب طولی برابر ۱/۳ درصد). از سوی دیگر، مقدار این پارامتر برای حوضه جنگلی برابر با ۳ پیشنهاد شده است. باتوجه به اینکه جنگل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه هم از نوع سبز و اندوه و هم از نوع تنک و مزارع کشاورزی است، بنابراین مقادیر برآورد شده برای هر کدام از پارامترها به نظر منطقی می‌باشد.

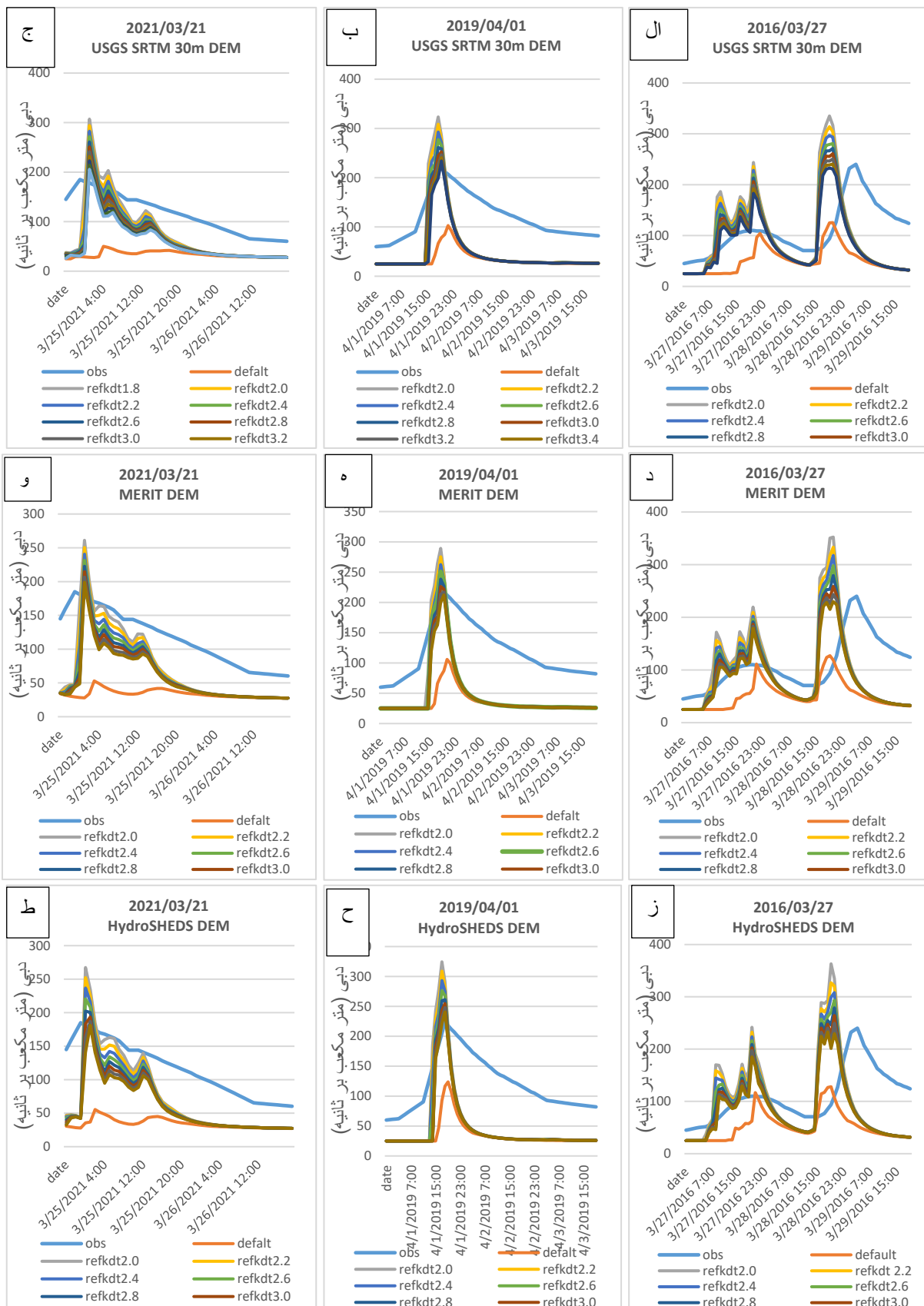
نحوه انتقال آب در رودخانه نیز بر شکل آب‌نگاشت اثر می‌گذارد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر نحوه انتقال آب در رودخانه ضریب زبری مانینگ است که مقادیر آن بر اساس رودخانه تعیین می‌شود. شکل ۵ آب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده تست‌های حساسیت پارامتر MANN را نشان می‌دهد. در این مطالعه حداکثر رده رودخانه‌ای ۵ می‌باشد. باتوجه به هدف مطالعه در شبیه‌سازی سیلاب، پارامتر Hlink در تمامی رده‌های رودخانه صفر در نظر گرفته شد. در واقع هیچ جریان پایه‌ای در ابتدای مدلسازی لحاظ نگردید و پس از انجام شبیه‌سازی، مقدار آب‌دهی پایه رودخانه به اوج سیلاب محاسباتی اضافه شده است. پارامتر MANN با ضرب مقادیر اولیه (جدول ۴) کانال‌های رودخانه در یک ثابت عددی تنظیم شده است که در برخی رویدادها این ثابت برای برخی DEM ها اندکی متفاوت در نظر گرفته شده است.

به عنوان مثال، USGS SRTM DEM در تاریخ



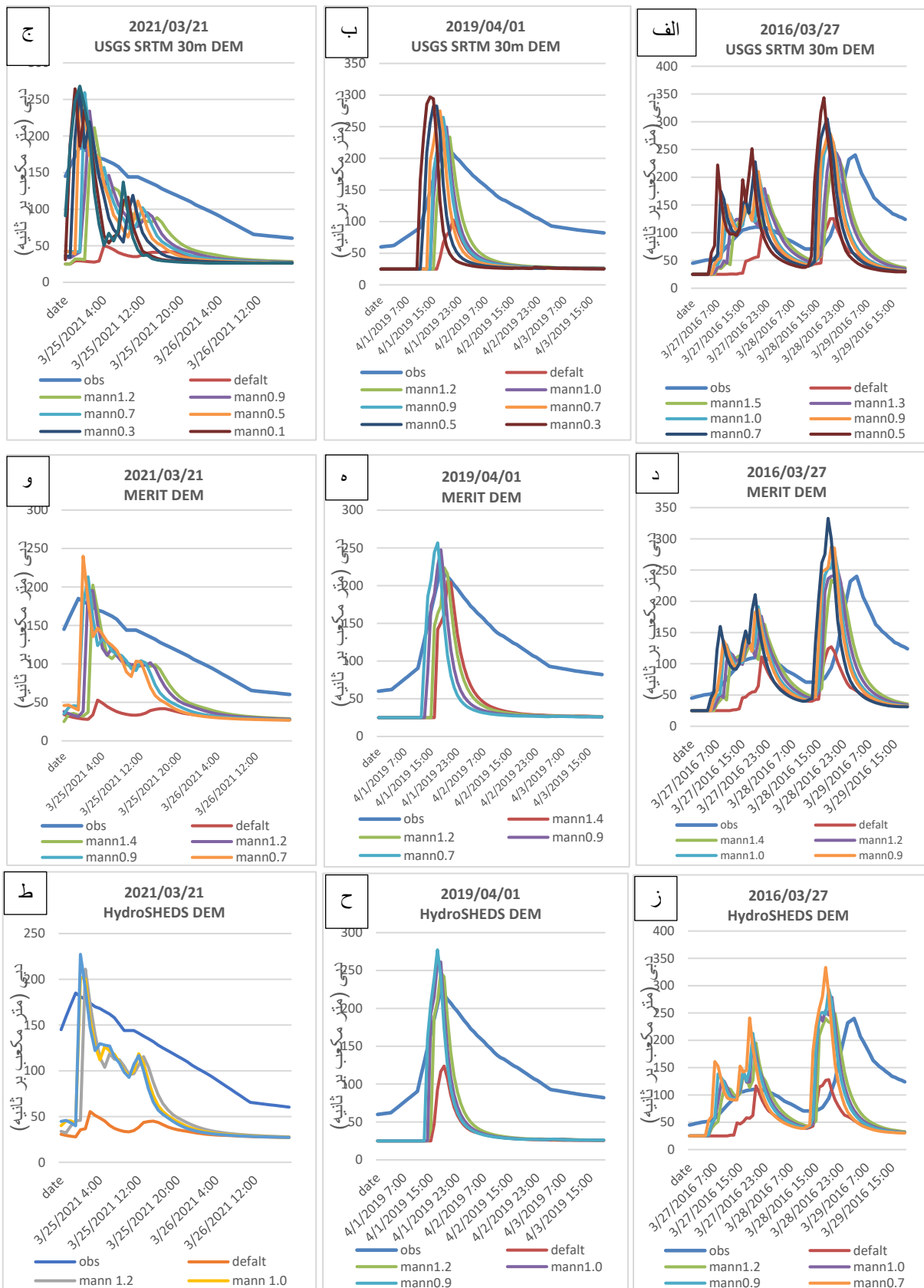
شکل ۳. بهینه‌سازی پارامتر REF DK برای مجموعه مدل‌های رقومی SRTM30m (الف-ج)، Merit (د-ه) و Hydrosheds (ز-ح).

(ز-ط) در سه تاریخ متمایز (۲۰۱۶/۰۳/۲۷، ۲۰۱۹/۰۴/۰۱، ۲۰۲۱/۰۳/۲۱).



شکل ۴. بهینه‌سازی پارامتر REFKDT برای مجموعه مدل‌های رقومی SRTM30m (الف-ج)، Merit (د-و) و Hydrosheds

(ز-ط) در سه تاریخ متمایز (۲۰۱۶/۰۳/۲۷، ۲۰۱۹/۰۴/۰۱، ۲۰۲۱/۰۳/۲۱).



شکل ۵. بهینه‌سازی پارامتر MANN برای مجموعه مدل‌های رقومی SRTM30m (الف-ج)، Merit (د-و) و Hydrosheds (ز)-

(ط) در سه تاریخ متمایز (۲۰۱۶/۰۳/۲۷، ۲۰۱۹/۰۴/۰۱، ۲۰۲۱/۰۳/۲۱)

استفاده از معیارهای RMSE و PBIAS برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته (Naabil et al., 2017) و نتایج آن نشان داده است که این معیارها ابزارهای مناسبی برای تحلیل و بهبود دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان‌های سیلابی و پارامترهای آب‌شناسی هستند. در ادامه، درصد خطای نسبی و RMSE برای اوج سیلاب هر سه مدل رقومی ارتفاع (DEM) در جدول ۶ ارائه شده است. براساس جدول ۶، مدل رقومی ارتفاع MERIT، کم‌ترین خطا را نشان می‌دهد. با این حال، خروجی مدل WRF-Hydro با استفاده از MERIT DEM، در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، اوج سیلاب را کم‌تر برآورد می‌کند. به‌طورکلی، تفاوت‌ها در پاسخ‌های حوضه‌های آبریز به شرایط محلی مانند توزیع رطوبت خاک، مساحت، توپوگرافی، و نوع پوشش گیاهی بستگی دارد و بارش نیز می‌تواند در ایجاد پاسخ‌های متفاوت نقش مهمی ایفا کند. با توجه به نتایج به دست آمده و تغییرات اندک REFKDT و هم‌چنین عدم حساسیت این پارامتر به تنهایی در تغییر خروجی مدل، می‌توان از این پارامتر در فرآیند واسنجی مدل صرف‌نظر کرده و از سایر پارامترها برای بهبود عملکرد مدل استفاده کرد.

در این مطالعه، برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل از شاخص‌های PBIAS و RMSE استفاده شده است. PBIAS درصد بایاس یا انحراف نسبی میانگین نتایج مدل از مقادیر مشاهده‌ای را نشان می‌دهد و میزان بالای PBIAS بیانگر انحراف بیشتر مدل از مقدار مشاهده‌ای است PBIAS. به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$$

که در این فرمول  $O_i$  مقدار مشاهده‌شده و  $S_i$  مقدار شبیه‌سازی شده است. مقادیر مثبت PBIAS نشان‌دهنده دست‌کم گرفتن توسط مدل و مقادیر منفی بیانگر بیش‌برآوردی است (Yapo et al., 1996).

RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) نیز به عنوان معیاری از میزان انحراف کلی مدل از داده‌های مشاهده‌ای استفاده شده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$

که  $n$  تعداد مشاهدات است RMSE بیانگر اندازه خطاهای میانگین مدل در شبیه‌سازی پارامتر مورد بررسی است و مقدار کمتر RMSE دقت بیشتر مدل را نشان می‌دهد (Willmott & Matsuura, 2005).

جدول ۳. نتایج صحت‌سنجی مدل WRF-hydro برای هر سه فایل process geogrid تولید شده با مدل‌های dem متفاوت در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ایستگاه مورد مطالعه

PBIAS			RMSE			تاریخ رخداد سیلاب
SRTM DEM	MERIT DEM	HYDROSHeds DEM	SRTM DEM	MERIT DEM	HYDROSHeds DEM	
%+۰.۴۵	%-۲.۳	%۶.۳+	۱.۰۸	۵.۵۸	۸.۸۴	2016/3/27
%+۴.۴۰	%-۰.۱۵	%+۱۰.۳۴	۹.۸۷	۰.۳۳	۲۳.۱۷	2019/01/04
%+۱۴.۲	%-۵.۹۲	+۹.۳۴	۲۶.۳	۱۰.۹۵	۱۷۰.۲۸	2021/03/21

بهتری را ارائه داده و در مدل‌سازی آب‌شناسی به‌عنوان منبع اطلاعات معتبر مطرح شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد درصد خطای نسبی مدل رقومی ارتفاع HYDROSHEDS بین ۳.۶٪- تا ۱۰.۳٪ متغیر است، در حالی که SRTM DEM با درصد خطای بین ۰.۴۵٪- تا ۱۴.۲٪ اختلافات گسترده‌تری را نشان داده است. در این تحقیق، دو پارامتر REFDK و Mann بر بهینه‌سازی دقت مکانی مدل WRF-Hydro مؤثر بوده و مدل رقومی ارتفاع MERIT به عنوان یک ابزار

## نتیجه‌گیری

دو پارامتر REFDK و ضریب مانینگ در بهینه‌سازی مدل، نقش مهمی در بهبود عملکرد مدل و ارائه نتایج دقیق داشته‌اند. این دو پارامتر به تفسیر بهتر مدل در مقیاس کوچک از حوضه‌های آبریز کمک کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد برتر MERIT DEM نسبت به دیگر مدل‌های رقومی ارتفاع (HYDROSHEDS و MERIT) است؛ به گونه‌ای که با درصد خطای نسبی بین ۲.۳٪- تا ۵.۹٪، نتایج

- change impact on water resources in Thailand. *Model. Earth Syst. Environ.*, 4(2), 825–839.
- 8- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the atmospheric sciences*, 46(20), 3077-3107.
  - 9- Ghafarian, P. (2021). Impact of physical parameterizations on simulation of the Caspian Sea lake-effect snow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 94, 101219.
  - 10- Ghafarian, P., Delju, A. H., Tajbakhsh, S., & Penchah, M. M. (2021). Simulation of the role of Caspian Sea surface temperature and air temperature on precipitation intensity in lake-effect snow. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 225, 105777.
  - 11- Ghaffari, G. (2011). The impact of DEM resolution on runoff and sediment modelling results. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(8), 691–702. DOI
  - 12- Gochis, D. J., Dugger, A., Barlage, M., Fitzgerald, K., Karsten, L., McAllister, M., & Yu, W. (2018). The NCAR WRF-Hydro Modeling System Technical Description.
  - 13- Gochis, D. J., Yu, W., & Yates, D. N. (2013). The WRF-Hydro Model Technical Description and User's Guide, Version 1.0. NCAR Technical Document. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA.
  - 14- Hogue, T. S., Sorooshian, S., Gupta, H., Holz, A., & Braatz, D. (2000). A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models. *Journal of Hydrometeorology*, 1(6), 524–542.
  - 15- Imani, S., Hasanli, S. A. M., Farokhnia, A., Javadi, F., & Najafi, M. S. (1399). Evaluation of the performance of the Hydro-WRF model in the development of flood forecasting and warning systems. *Journal of Iran Water Resources Research*, 4, 225–240. (In Persian)
  - 16- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
  - 17- Janjić, Z. I. (2001). Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model.
  - 18- Janjić, Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927-945.
  - 19- Jiang, W., Yu, J., Wang, Q., & Yue, Q. (2022). Understanding the effects of digital elevation
- قدرتمند با دقت مکانی بالا در مدل‌سازی آب‌شناسی اثرگذار بوده‌است.
- باتوجه به نتایج، پیشنهاد می‌شود تأثیر وضوح بالاتر Geogrid نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. اجرای مدل با وضوح بالاتر، امکان بررسی دقت مدل در توصیف پدیده‌های هواشناسی و آب‌شناسی را فراهم می‌کند. مقایسه نتایج وضوح ۳۰۰۰ متر با نتایج وضوح بالاتر می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در خصوص بهینه‌سازی وضوح مکانی مدل و توانایی آن در پیش‌بینی دقیق پدیده‌های هواشناسی و آب‌شناسی ارائه دهد. ادامه تحقیقات در این زمینه می‌تواند به توسعه مدل‌های هواشناسی و آب‌شناسی و بهبود دقت در پیش‌بینی هواشناسی کمک کند.
- ### منابع
- 1- Abbas, S. A., & Xuan, Y. (2020). Impact of Precipitation Pre-Processing Methods on Hydrological Model Performance using High-Resolution Gridded Dataset. *Water*, 12(3), 840. DOI
  - 2- Altenau, E. H., Pavelsky, T., Bates, P., & Neal, J. (2017). The effects of spatial resolution and dimensionality on modeling regional-scale hydraulics in a multichannel river. *Water Resources Research*, 53(2), 1683–1701. DOI
  - 3- Arnault, J., Wagner, S., Rummler, T., Fersch, B., Blieffericht, J., Andresen, S., & Kunstmann, H. (2015). Role of runoff-infiltration partitioning and additionally resolved overland flow on land-atmosphere feedbacks: a case study with the WRF-Hydro coupled modeling system for West Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 17, 1489–1516. DOI
  - 4- Banihabib, M. E., & Arabi, A. (2016). The impact of catchment management on emergency management of flash-flood. *Inter. J. Emer. Manage.*, 12(2), 185-195.
  - 5- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Santos, C. (2012). A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environ. Modell. Software.*, 33, 23-34.
  - 6- Dastagir, M. R. (2015). Modeling recent climate change induced extreme events in Bangladesh: A review. *Weather and Climate Extremes*, 7, 49–60. DOI
  - 7- Deb, P., Babel, M. S., & Denis, A. F. (2018). Multi-GCMs approach for assessing climate

- schemes. Monthly weather review, 137(3), 991-1007.
- 30- Murphy, P. N. C., Ogilvie, J., Meng, F. R., & Arp, P. (2008). Stream network modeling using lidar and photogrammetric digital elevation models: A comparison and field verification. *Hydrol. Process.*, 22, 1747-1754.
- 31- Naabil, E., Lamptey, B., Arnault, J., Olufayo, A., & Kunstmann, H. (2017). Water resources management using the WRF-Hydro modelling system: Case-study of the Tono dam in West Africa. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 12, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.010>
- 32- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., ... & Tewari, M. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- 33- Pennelly, C., Reuter, G., & Flesch, T. (2014). Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmos. Res.* 135e136, 172e192. [DOI](<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.09.004>)
- 34- Rummeler, T., Arnault, J., Gochis, D., & Kunstmann, H. (2019). Role of lateral terrestrial water flow on the regional water cycle in a complex terrain region: Investigation with a fully coupled model system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(2), 507-529.
- 35- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180–194. DOI
- 36- Schoorl, J. M., Sonneveld, M. P. W., & Veldkamp, A. (2000). Three-dimensional landscape process modeling: The effect of DEM resolution. *Earth Surf. Processes Landforms*, 25, 1025-1034.
- 37- Sharma, V., & Regonda, S. K. (2021). Two-Dimensional flood inundation modeling in the Godavari River Basin, India—Insights on model output uncertainty. *Water*, 13(2), 191. DOI
- 38- Shen, J., & Tan, F. (2020). Effects of DEM resolution and resampling technique on building treatment for urban inundation modeling: a case study for the 2016 flooding of the HUST campus in Wuhan. *Natural Hazards*, 104(1), 927–957. DOI
- 39- Silver, M., Karnieli, A., Ginat, H., Meiri, E., & Fredj, E. (2017). An innovative method for determining hydrological calibration model resolution and building treatment for urban flood modelling. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101122. DOI
- 20- Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of applied meteorology*, 43(1), 170-181.
- 21- Khal, M., Abdelah, A., & Ahmed, A. (2018). Modeling-of-Water-Erosion-in-the-MGoun-Watershed-Using-OpenGIS-Software. ResearchGate. DOI
- 22- Lahmers, T. M., Gupta, H. V., Castro, C. L., Gochis, D., Yates, D., Dugger, A., Goodrich, D. C., & Hazenberg, P. (2019). Enhancing the Structure of the WRF-Hydro Hydrologic Model for Semiarid Environments. *Journal of Hydrometeorology*, 20(4), 691–714. DOI
- 23- Larsen, M. A. D., et al. (2016). Calibration of a distributed hydrology and land surface model using energy flux measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 217, 74–88.
- 24- Lehner, B., Verdin, K. L., & Jarvis, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(10), 93–94. DOI
- 25- Lin, S., Jing, C., Chaplot, V., Yu, X., Zhang, Z., Moore, N., & Wu, J. (2010). Effect of DEM resolution on SWAT outputs of runoff, sediment and nutrients. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7, 4411-4435.
- 26- Liu, Y., Liu, J., Li, C., Yu, F., Wang, W., & Qiu, Q. (2020). Parameter Sensitivity Analysis of the WRF-Hydro Modeling System for Streamflow Simulation: A Case Study in Semi-Humid and Semi-Arid Catchments of Northern China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 1-16.
- 27- Mascaro, G., Hussein, A., Dugger, A., & Gochis, D. J. (2022). Process-based calibration of WRF-Hydro in a mountainous basin in southwestern U.S. *Journal of the American Water Resources Association*, 59(1), 49–70. DOI
- 28- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- 29- Morrison, H., Thompson, G., & Tatarskii, V. (2009). Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment

- 49- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., ... & Bates, P. D. (2017). A high accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*. DOI
- 50- Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*, 181(1-4), 23-48. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02918-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02918-4)
- 51- Yin, D., Xue, Z., Gochis, D., Yu, W., Morales, M., & Rafieeiniasab, A. (2020). A Process-Based, Fully Distributed Soil Erosion and Sediment Transport Model for WRF-Hydro. *Water*, 12(6), 1840. DOI
- 52- Zhang, J., Lin, P., Gao, S., & Fang, Z. (2020). Understanding the re-infiltration process to simulating streamflow in North Central Texas using the WRF-hydro modeling system. *Journal of Hydrology*, 587, 124902.
- parameters for the WRF-Hydro model in arid regions. *Environmental modelling & software*, 91, 47-69.
- 40- Sirisena, T. A. J. G., Maskey, S., Ranasinghe, R., & Babel, M. S. (2018). Effects of different precipitation inputs on streamflow simulation in the Irrawaddy River Basin, Myanmar. *J Hydrol Reg Stud*, 19, 265-278. DOI
- 41- Sofokleous, I., Bruggeman, A., Camera, C., & Eliades, M. (2023). Grid-based calibration of the WRF-Hydro with Noah-MP model with improved groundwater and transpiration process equations. *Journal of Hydrology*, 617, 128991. DOI
- 42- Talchabhadel, R., Nakagawa, H., Kawaike, K., Yamanoi, K., & Thapa, B. R. (2021). Assessment of vertical accuracy of open source 30m resolution space-borne digital elevation models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 939-960. DOI
- 43- Verma, K., & J, I. (2023). Applicability of SWOT data in calibrating WRF-Hydro hydrological model over the Tawa River basin. *Geocarto International*, 38(1). DOI
- 44- Verri, G., Pinardi, N., Gochis, D., Tribbia, J., Navarra, A., Coppini, G., & Vukicevic, T. (2017). A meteo-hydrological modelling system for the reconstruction of river runoff: the case of the Ofanto river catchment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17(10), 1741. DOI
- 45- Wagner, S., Fersch, B., Yuan, F., Yu, Z., & Kunstmann, H. (2016). Fully coupled atmospheric-hydrological modeling at regional and long-term scales: development, application, and analysis of WRF-HMS. *AGU Publ*, 52(4). DOI
- 46- Wehbe, Y., Temimi, M., Weston, M., Chaouch, N., Branch, O., Schwitalla, T., ... & Mandous, A. A. (2019). Analysis of an extreme weather event in a hyper-arid region using WRF-Hydro coupling, station, and satellite data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(6), 1129-1149.
- 47- Willmott, C., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- 48- Wu, S. J., Li, J., & Huang, G. (2008). A study on DEM-derived primary topographic attributes for. DOI