

مهندسی جغرافیایی سرزمین، دوره چهارم، شماره ۷، بهار و تابستان ۱۳۹۹

شاپای چاپی ۱۴۹۰-۲۵۳۸ شاپای الکترونیکی ۳۹۲۲-۲۵۳۸

<http://JGET.ir>

صص ۱۱۶-۱۰۰

## معرفی مدل‌های تحول چشم‌انداز و کاربردهای آنها با تأکید بر مدل هیدرودینامیکی CAESAR-Lisflood

مریم آذین‌مهر: دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران  
هدی قاسمیه\*<sup>۱</sup>: دانشیار گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران  
عبدالرضا بهره‌مند: دانشیار گروه آبخیزداری دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۰۱

### چکیده

مدل‌های تحول چشم‌انداز، مدل‌های فرآیندی بر مبنای فیزیک هستند که سعی دارند فرآیندهای فعالی را که چشم‌اندازها را به‌طور قابل توجهی شکل می‌دهند، تقلید کرده و به‌صورت یک مدل درآورند. اکثر این مدل‌ها، غالباً فرآیندهای هیدرولوژیکی، رودخانه‌ای و دامنه‌ای را شبیه‌سازی می‌کنند؛ با این حال، فرآیندهای یخچالی، بادی و تکتونیک را نیز به‌خوبی دربرمی‌گیرند. مدل‌های تحول چشم‌انداز، معمولاً در تمام مقیاس‌های مکانی (۱۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر مربع) به‌صورت پیوسته و واقع‌ای اجرا می‌گردند. این مدل‌ها، با دربرگرفتن دامنه گسترده‌ای از فرآیندها، امکان مقایسه جامع بین نتایج شبیه‌سازی پاسخ حوضه آبخیز به تغییرات محیطی را فراهم می‌کنند. مدل‌های تحول چشم‌انداز انواع مختلفی دارند که یکی از مهمترین آنها مدل CAESAR-Lisflood است. مدل CAESAR-Lisflood، نسخه فعلی CAESAR، که مؤلفه جریان سطحی آن (مبتنی بر قوانین فیزیکی با راه حل عددی ساده‌سازی شده معادلات جریان‌های کم عمق) از مدل هیدرولیکی LISFLOOD-FP اقتباس شده است. علاوه بر این، مدل CL تحولات ژئومورفولوژیکی حوضه رودخانه و دشت سیلابی را در شرایط جریان ناپایدار بصورت دوبعدی شبیه‌سازی می‌کند.

واژگان کلیدی: فرآیندمحور، CAESAR-Lisflood، CAESAR، LISFLOOD-FP، معادلات جریان کم‌عمق و پیوسته و واقع‌ای.

## مقدمه

### اهمیت مدل‌سازی ژئومورفولوژیکی و تحول آن

از دیدگاه ژئومورفولوژی، رودخانه به صورت یک سیستم کنش و واکنش عمل کرده و اغلب بین اجزاء متعدد سیستم، ارتباط تنگاتنگی وجود دارد که تغییر یک قسمت آن، سایر قسمت‌های حوضه را متأثر می‌کند (معمد و مقیمی، ۱۳۷۸: ۱۲۵-۱۲۰). حوضه‌های آبخیز رودخانه و کانال‌های شبکه زهکشی موجود در آن‌ها، با توجه به پاسخ سیستم رودخانه به نیروهای خارجی، داخلی و ایجاد نوسانات در دبی و بار رسوبی رودخانه، به طور پیوسته در حال تغییر هستند.

از جمله نیروهای خارجی می‌توان به اقلیم، تکتونیک و نیروهای داخلی به تغییر کاربری اراضی / پوشش و تنظیمات خودکار درون خود سیستم اشاره کرد (Schumm & Parker, 1973: 125); (Schumm et al., 1987: 56); (Nicholas & Quine, 2007: 527-530). علاوه بر این، در حوضه‌های آبخیز رودخانه الگوهای فرسایش و رسوب در یک بازه رودخانه نسبت به بازه‌های دیگر از آن کاملاً متفاوت است؛ به طوری که تحقیقات مک‌لین<sup>۱</sup> و همکاران<sup>۲</sup> و هم‌چنین کوئارد<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۵ نشان داد که رودخانه‌ها و آبرفت‌های مورد بررسی و تحت کنترل، اغلب تکامل نیافته‌اند و دائماً در حال تغییر هستند (Macklin et al., 1992: 637; Coulthard et al., 2005: 224). در بین عوامل مؤثر در تنظیم رفتار و مدیریت رودخانه‌های حوضه آبخیز، عوامل ژئومورفولوژی - هیدرولوژی، تأثیر بیشتری دارند. از طرفی دیگر، ژئومورفولوژی و دینامیک سیستم‌های رودخانه به وسیله چندین متغیر وابسته به هم، کنترل می‌گردند، ضمن این که هم‌زمان با این متغیرهای پیوسته، انتقال رسوب و آب در کل سطح زمین و ورود به کانال‌های رودخانه، تحت تأثیر فعالیت‌های بشری و تغییرات اقلیمی (آب و هوایی) نیز خواهد بود. این عوامل، تحولات ژئومورفولوژیکی را در سطح حوضه آبخیز (در بستر، کانال رودخانه، دشت سیلابی و مخروط افکنه مربوط به آن) سبب می‌گردد.

فرآیندهای ایجادکننده عوارض (شکل‌های) زمین و چشم‌اندازها به همراه جریان آب (رودخانه‌ای و سیلابی)، شامل فرسایش، انتقال و ته‌نشست رسوبات است و شکل‌های زمین و چشم‌اندازهای مربوط به این فرآیندها می‌توانند به شکل نوارهای رسوبات (در مسیر رودخانه، کانال و نیز محل تقاطع کانال‌ها)، دلتا، دشت سیلابی، گردبند گاو، دریاچه، آبراهه، دره، آبشار، مخروط افکنه و حوضه آبخیز مربوط به آن شبکه زهکش باشد (M'otamed & Moghimi, 1998) که هرگونه تغییر و تحولات در شکل‌های مذکور از سیستم رودخانه و حوضه مربوط به آن، در جوامع علمی به عنوان تحولات ژئومورفولوژیکی معرفی می‌گردد. ارزیابی و بررسی چنین تحولات ژئومورفولوژیکی در بعد زمان و مکان، براساس شاخه‌ای از ژئومورفولوژی کاربردی به نام ژئومورفولوژی رودخانه‌ای<sup>۳</sup> صورت می‌گیرد. ژئومورفولوژی رودخانه در واقع، علم مطالعه شکل‌های زمین، چشم‌اندازها و فرآیندهایی است که آن‌ها را در سطح حوضه رودخانه ایجاد کرده‌اند.

در مطالعات ارزیابی تحولات ژئومورفولوژیکی رودخانه، بررسی تاریخچه تغییر و تحول چشم‌انداز طبیعی یک حوضه آبخیز (به عنوان مثال توپوگرافی سطح و کانال‌های قدیمی که ممکن است دوباره فعال گردند)، کاربری اراضی / پوشش و فعالیت‌های مدیریتی انسان فاکتورهای بسیار مهمی هستند (Brewer & Lewin, 1998: 990; Knighton, 1998: 413-415; Evans, 2000: 231-232; Gioia & Lazzari, 2019: 13-14; Hooper et al., 2016: 1214). آن چنان که در بالا ذکر گردید، ژئومورفولوژی علمی است که به دنبال درک چگونگی تغییر و تبدیل سطح زمین است. از یک سو این علم، ارتباط تنگاتنگی با مشاهدات میدانی تغییرات، اصول ارگانیک و هم‌چنین عملیات آزمایشگاهی دارد که اکثر نتایج مهم و پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه، مبتنی بر رویکردهای سنتی و قدیمی است و از سویی دیگر، به دلیل پیچیدگی شرایط طبیعی و دشواری مشاهدات میدانی؛ بخشی زیادی از تغییر و تحولات که در طول دوره زمانی و در کل سطح مورد مطالعه رخ می‌دهد را نمی‌توان به شیوه مذکور بررسی نمود (Coulthard & Van De Wiel, 2006: 129); (Poepl et al.,

1. Macklin

2. Coulthard

3. River or Alluvial Geomorphology

7-3؛ 2019؛ 14؛ Desjardins et al., 2018). از این رو با پیشرفت تکنولوژی (رایانه، تصاویر ماهواره‌ای و ابزارهای پردازش آن‌ها)، محققین برای بررسی و مطالعه انواع فرآیندها در سطح حوضه آبخیز (رودخانه و بازه‌ای از آن، دشت سیلابی، مخروط افکنه و دامنه) در طول دو دهه گذشته به مدل‌سازی و استفاده طیف گسترده‌ای از مدل‌ها با کاربردهای مختلف روی آورده‌اند، به طوری که اخیراً مدل‌های عددی ژئومورفولوژیکی رودخانه و تحول چشم‌انداز به‌عنوان ابزاری مهم برای تحقیق و آنالیز چگونگی شکل‌گیری چشم‌اندازهای ناشی از جریان مورد توجه قرار گرفته‌اند (Coulthard & Van De Wiel, 2007:28؛ Coulthard & Van De Wiel, 2012a: 2129).

## روش پژوهش

روش حاکم در این مقاله، کتابخانه‌ای - تحلیلی بوده و سعی شده است همزمان با تشریح ماهیت مدل‌های تحول چشم‌انداز، تاریخچه و سیر تکوینی علم مدلسازی ژئومورفولوژی و ارتباط تاریخی آن با نظریه‌های سیستمی و فرم - فرآیند ژئومورفولوژی بصورت خلاصه تبیین گردد و در این راستا نخست چارچوب تحقیق تعیین، و بعد از تحقیقات و مقالات نگاشته شده به زبان‌های فارسی و انگلیسی استفاده شده است.

## قلمرو جغرافیای پژوهش

ژئومورفولوژی به‌عنوان یک رشته علمی از سال ۱۸۸۲ با تلاش‌های موریس دیویس<sup>۱</sup> در قالب مکتب تکاملی مطرح شده است. در سال ۱۸۹۰ با ارائه نظریات پنک و بروخنر<sup>۲</sup>، دیدگاه فرایندی وارد ژئومورفولوژی شده و در نهایت با سردمداری استرالر و چورلی<sup>۳</sup> از سال ۱۹۵۰، ورود دیدگاه سیستمی به صورت یک شیوه تفکر علمی در این رشته، انقلابی پدید آورده است (Amini et al., 2016)، به گونه‌ای که، از جمله دیدگاه‌ها و نگرش‌هایی که چارچوب روش شناختی جهت تحقیق و بررسی ساخت و کارکرد یک سیستم را فراهم می‌آورد، نگرش سیستمی است. در همین رابطه نگرش سیستمی که انقلابی در شیوه‌های تفکر به شمار می‌آید، آمیزه‌ای از روش قیاسی و استقرایی است که ضمن برخورداری از محاسن هر دو روش، فاقد عیوب آنهاست. در این نگرش هم کلیت پدیده‌ها و هم ارتباط بین اجزای تشکیل دهنده آن مورد توجه قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر تنها به بررسی اجزا اکتفا نمی‌شود، زیرا کل موجود، کلیتی دارد که با تک تک اجزاء متفاوت است. در عین حال نحوه ارتباط متقابل اجزاء با یکدیگر، تغییراتی در کل آن پدید می‌آورد که توجه به آن الزامی است (M'otamed & Moghimi, 1998).

نگرش سیستمی پیشینه‌ای بسیار قدیمی دارد. از زمان‌های دور دانشمندی چون ارسطو، افلاطون، ابن خلدون، مولوی و بعدها هگل<sup>۴</sup>، هرمان هسه<sup>۵</sup> و... به مفهوم سیستم توجه داشته‌اند. این نگرش اولین بار توسط شوله<sup>۶</sup> در جغرافیای طبیعی و گیلبرت (که روابط بین نیروهای فرسایشی و مقاومت سنگ‌ها را از طریق آن در سطح زمین تشریح کرد)، در ژئومورفولوژی مطرح شد و با پیشگامی افرادی چون استرالر و چورلی از دهه ۱۹۵۰ میلادی به‌طور اصولی در ژئومورفولوژی توسعه یافت (Ramesht et al., 2010).

بخش دیگری از توسعه نظریه تحلیل سیستمی مرهون وارد شدن روش‌های کمی (ریاضیات و آمار) در تحقیقات ژئومورفولوژیک بوده است. برای مثال هورتون، در سال ۱۹۴۵، مدل‌های کمی شبکه‌های زهکشی را در حوضه‌های آبخیز مطرح و آنها را تحلیل آماری کرد. از دهه ۱۹۷۰ به بعد، روابط بین عناصر و فرآیندها در سیستم‌های ژئومورفیک (مانند سیستم دره، سیستم‌های کارست، سیستم دامنه و...) از طریق روش‌های کمی توسعه شگرفی یافت. از این دهه به بعد، دیدگاه سیستمی در ژئومورفولوژی پیشرفت کرد و ارتباط بین فرآیندها و فرم‌ها از طریق این دیدگاه تشریح می‌شد، به‌طوری‌که مدل‌سازی روابط میان

1. Morris Davis

2. Penck & Brochner

3. Strahler & Chorley

4. Hegel

5. Hermann Hesse

6. Cholet

عناصر در واحدهای ژئومورفیک متفاوت بسط یافت و مسائل نسبتاً زیادی از دهه ۱۹۸۰ در مورد سیستم‌های زمین ریخت‌شناسی مطرح شد (Alijani, 1995).

چارچوب منطقی و علمی نگرش سیستمی با سایر نگرش‌ها متفاوت است که از چند بعدی بودن آن ناشی می‌شود، لذا افرادی که قالب ذهنی خود را بر مبنای نگرش سیستمی استوار می‌سازند به شناخت کامل‌تری از محیط خود دست می‌یابند و با آگاهی از سیستم‌های گوناگون، روابط آنها و شناخت نقش و موقعیت خود در هر یک از آنها، میزان تأثیر و تأثراتشان را بر یکدیگر ارزیابی می‌کنند (Ramesht et al., 2010).

### تاریخچه اهمیت کاربرد تکنیک مدل در ژئومورفولوژی

ژئومورفولوژی که به مطالعه فرم‌ها و فرآیندهای اشکال ناهمواری سطح زمین و تغییر آنها در طول زمان که ضمن تشخیص، توصیف، تبیین و طبقه‌بندی شکل‌های طبیعی، علل پیدایش، چگونگی تغییر و تحول آنها را همراه با تفسیر نحوه پراکنش، روند استقرار اشکال فضایی و روابط موجود میان آن پدیده‌ها و تاریخ و تحول چشم‌اندازها و فرآیندهای حاکم بر آنها را مطالعه می‌کند به ابزار، روش‌ها و تکنیک‌هایی برای بررسی و ارزیابی نتایج این مطالعات به صورتی ساده و قابل فهم نیاز دارد که یکی از مهمترین این روش‌ها و تکنیک‌ها ((مدل)) است (Shaian & Sharifi, 2006).

ژئومورفولوژیست‌ها از همان زمان تکوین و پیدایش دانش ژئومورفولوژی همواره سعی داشته‌اند با استفاده از فناوری‌های در دسترس، فرم‌ها و فرآیندها را در طول زمان و در انتظام‌های فضایی خاصی به مقیاس دلخواه به نمایش بگذارند و اصولاً ژئومورفولوژی از طریق استفاده از مدل و پیش‌بینی مدل‌ها می‌تواند مدیریت بهینه محیط زیست و منابع طبیعی را به عهده بگیرد. آنها همواره می‌کوشند حوادث گذشته را در قلمرو اشکال ناهمواری زمین بازسازی کرده و با تحلیل و تفسیر وضع موجود حوادث آتی را شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمایند (Shaian & Sharifi, 2006).

### تاریخچه پیدایش مدل در ژئومورفولوژی

مدل‌ها ابزارهایی برای تحلیل واقعیت‌ها و ساده کردن پیچیدگی‌های موجود در جهان واقعی هستند. هدف مدل‌ها افزایش دریافت ما درباره پدیده‌ها و روندها در جهان خارج است که برای نیل به این هدف، تحقیقات در علم ژئومورفولوژی همانند سایر علوم نیازمند فرآیند مدلسازی است (Shaian & Sharifi, 2006).

اولین مدل ژئومورفولوژیک را ویلیام موریس دیویس (۱۸۵۰-۱۹۳۴) با عنوان چرخه فرسایش عرضه کرد. تکامل از دیدگاه او یعنی فرآیند تغییر اجتناب ناپذیر، مداوم و برگشت ناپذیری که توالی منظم دگرگونی شکل زمین را به وجود می‌آورد. والتر پنک آلمانی از مخالفان مدل دیویس بود و اعتقاد داشت که اشکال ناهمواری زمین به فرآیندهای فرسایشی (با منشا خارجی) و فرآیندهای دیاستروفیک (با منشا داخلی) قابل تفسیر است. بعدها کینگ مدل را برای نحوه تکامل زمین ارایه کرد، در ادامه برای ارایه تکامل شکل زمین از مدل‌های شبیه‌سازی که امروزه نیز کاربرد وسیع‌تری در ژئومورفولوژی دارند استفاده شد که تأثیرات ژئومورفیک یا جانشین‌های معمول آنها و شرایط کنترل‌کننده را سرعت می‌بخشید (M'otamed & Moghimi, 1998).

### یافته‌ها و بحث

#### معرفی مدل‌های تحول چشم‌انداز (LEMs) و کاربردهای آن

مدل‌های تحول چشم‌انداز، مجموعه مدل‌های فرآیند محور با پایه قوانین فیزیکی هستند که فرآیندهای متحول‌کننده چشم‌اندازها را شبیه‌سازی می‌کنند. اکثر این مدل‌ها، اغلب فرآیندهای هیدرولوژیکی، رودخانه‌ای و دامنه‌ای را شبیه‌سازی می‌کنند؛ با این وجود برخی فرآیندهای یخچالی، بادی و تکتونیک را نیز به خوبی دربرمی‌گیرند. این مدل‌ها، معمولاً در تمام مقیاس‌های مکانی

(۱۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر مربع) (Howard, 1994: 2270-; Willgoose & Rodriguez-Iturbe, 1994: 278; Braun & Sambridge, 1997: 28-; Tucker & Slingerland, 1994: 12232-12238; Brown & Pasternack, 3-4; Temme et al., 2009: 50-52; Van De Wiel et al., 2007: 284; 30



در ادامه سعی شد به منظور آشنایی بیشتر استفاده از نتایج شبیه‌سازی این مدل‌ها در حیطه مدیریت جامع حوضه آبخیز و حوضه رودخانه، به کاربردهای نتایج مدل‌های تحول چشم‌انداز به صورت کلی اشاره شود.

از کاربردهای مهم بررسی ژئومورفولوژی رودخانه‌ای می‌توان به ۱- به‌عنوان ابزار و استراتژی برای مدیریت دشت سیلابی، ۲- راهبردهای مدیریت ریسک سیل و طرح‌های کاهش سیل ۳- راهبردهای مدیریت رسوب رودخانه (از جمله فرسایش و رسوب در کانال) ۴- به‌عنوان یک پیش‌بینی‌کننده از پرشدن مخازن سد و میزان رسوب ورودی به دریاچه سد (تلفیق مدل CAESAR-Lisflood و مدل‌های پیش‌بینی هشدار سیل) ۵- اصلاح مسیر جریان ۶- طرح‌ها یا برنامه‌های مدیریت حوضه آبخیز ۷- بازسازی رودخانه و دشت سیلابی ۸- نظارت و مانیتورینگ سیستم‌های رودخانه ۹- ارزیابی اثرات زیست محیطی و ارزیابی استراتژیکی محیطی قابل ذکر است که امروزه مطالعات مختلفی در رابطه با بررسی ژئومورفولوژی رودخانه صورت می‌گیرد و در ایران نیز در حال حاضر جهت انجام این گونه تحقیقات از روش‌هایی چون مقایسه زمانی و مکانی تغییرات بستر رودخانه با استفاده از عکس هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و محاسبه پارامترهای هندسی رودخانه صورت می‌گیرند که اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه در راستای مهندسی رودخانه و مسائل فرسایش و تغییرات و جابه‌جایی رودخانه بوده است. اما در سطح جهانی روش‌های بروز و کارآمدتری در این زمینه دنبال می‌گردد همچون مدل‌سازی عددی تحول چشم‌انداز که تا به حال در ایران تحقیقی در زمینه شبیه‌سازی تحولات ژئومورفولوژی رودخانه و حوضه آبخیز، دشت سیلابی و مخروط‌افکنه و ارزیابی تغییرات آن‌ها با مدل‌سازی عددی صورت نگرفته است.

### معرفی مدل هیدرودینامیکی CAESAR-Lisflood

مدل CAESAR-Lisflood، در واقع با توسعه مدل اصلی CAESAR (یکی از مجموعه مدل‌های تحول چشم‌انداز (LEM)) ایجاد شده است (Coulthard et al., 1996: 2501-253; Coulthard et al., 2000: 2038; Hooper et al., 2016: 1213-; Poepl et al., 2019: 11; Coulthard et al., 2005: 227; 1226; 51-56; Milan et al. 2018: 1-51; Lowry et al., 2018). مدل اصلی CAESAR، یک مدل خودکار سلولی است که عبور جریان آب در چشم‌انداز، فرسایش رودخانه‌ای، ته‌نشست رسوب و فرآیندهای دامنه‌ای (فرسایش‌های خندقی، شیاری، لغزش، خزش و...) را شبیه‌سازی می‌کند. مدل CAESAR-Lisflood، نسخه فعلی CAESAR که توسط کوئارد و همکارانش در سال ۲۰۱۳ توسعه پیدا کرده است. نسخه فعلی، برای مؤلفه جریان آب سطحی مبتنی بر قوانین فیزیکی از یک راه حل عددی ساده‌سازی شده معادلات جریان‌های کم عمق از مدل هیدرولیکی LISFLOOD-FP استفاده می‌کند (Bates et al., 2010: 35). بنابراین از اینجا می‌توان چنین برداشت کرد که مدل CAESAR-Lisflood، تحولات ژئومورفولوژیکی حوضه رودخانه و دشت سیلابی را در شرایط جریان ناپایدار و با در نظر گرفتن دوبعد هیدرولیکی شبیه‌سازی می‌کند. این مؤلفه ناپایدار هیدرولویکی امکان ارائه اثراتی چون جریان‌های جزر و مدی، پرشدن دریاچه، مسدود شدن کف آبراهه‌ها یا رودخانه‌های موجود در مخروط‌افکنه در مدل‌های تحول چشم‌انداز را فراهم می‌کند (Lowry et al., 2013b: 670; Coulthard et al., 2019.: 1-4; al., 2018: 27-32).

همچنین مدل CAESAR-Lisflood جهت شبیه‌سازی کل شبکه زهکشی در داخل حوضه آبخیز (در مد آبخیز مدل) یا بخش‌هایی از کانال رودخانه (در مد بازه مدل) طراحی شده است. از جمله مطالعات استفاده در گستره بازه‌ای از رودخانه می‌توان به Coulthard & Van De Wiel et al., 2011: 168; Coulthard & Van De Wiel, 2017: 265-281; CAESAR-Lisflood مدل همچنین Yu, W et al., 2018: 2-13; Skinner, 2016: 757-771 اشاره کرد. یکی از ابزار مناسبی برای تغییر دادن مقیاس زمانی به منظور مدل‌سازی اثرات یک واقعه بارشی یا رگباری در طول چند ساعت، فصلی، سالانه و چندین هزار سال از مقیاس‌های زمانی تحول چشم‌انداز است. در ابتدا مدل CAESAR-Lisflood بر ارائه فرآیند هیدرودینامیکی و انتقال رسوب که در برگرفته کسری از ابعاد مختلف اندازه ذرات است، تمرکز دارد. گرچه از لحاظ نظری هیچ حد

بالایی برای دوره‌های زمانی که مدل CAESAR-Lisflood می‌تواند برای شبیه‌سازی داشته باشد وجود ندارد، اما در رابطه با فرآیندهایی با مقیاس‌های کوچک، مطالعاتی موجود هستند که بر روی مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر از دهه‌ها تا هزاران سال متمرکز شده‌اند، مانند شبیه‌سازی خروجی رسوبات یک حوضه کوچک تحت پیش‌بینی‌های کوتاه مدت آب و هوایی (Coulthard & Skinner, 2012a: 2125)، شبیه‌سازی دینامیک طوفان و موج‌های جزر و مدی در محیط‌های ساحلی (Skinner et al., 2015: 12-20)، پیش‌بینی کوتاه‌مدت ژئومورفیک ناشی از توسعه و کاوش‌های سابق در معادن (Pasculli & Audisio, 2015: 2-10)، اما آنچه که این مدل را خاص و متمایز کرده است پیاده‌سازی یک مؤلفه هیدرولوژیکی ناپایدار جریان است که مدل با استفاده از آن می‌تواند اثرات هیدروژئومورفیک وقایع سیل را شبیه‌سازی کند (Bates et al., 2010: 38).

### ماهیت مدل‌های تحول چشم‌انداز (LEMs) و تشریح رویکرد ساخت مدل تلفیقی CAESAR-Lisflood

در اواخر سال ۱۹۷۰، محققین مدل‌های عددی را بر مبنای کار با رایانه (محاسباتی کار) به منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها و اثر متقابل چشم‌انداز در مقیاس‌های بزرگ زمانی توسعه دادند که بعداً با عنوان مدل‌های تحول چشم‌انداز معرفی شدند، این مدل‌ها جریان سطحی و کانالی را به عنوان یکی از عوامل اصلی حرکت و انتقال رسوب مورد توجه قرار می‌دهند.

این فرایند با هدایت جریان از سرتاسر سلول‌های شبکه (نمایش دهنده چشم‌انداز)، فرساینده‌گی و ته‌نشست رسوب مرتبط با جریان و شیب موجود در سلول‌ها را به صورت یکپارچه ارائه می‌دهد (Ahnert, 1976: 33-40). از دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، این مدل‌ها به دلیل وجود رایانه‌های قدرتمند محاسباتی و قابل دسترس، به طور قابل توجهی توسعه یافتند که امکان نمایش بسیار پیچیده‌تر و واقع‌بینانه‌تری از فرایندهای جریان رودخانه و دامنه‌ای را فراهم می‌کردند. مثال‌های در بر گیرنده این نوع کارها شامل Kirkby, 1987: 1-10، Howard, 1994: 2262-2275، استفاده از مدل SIBERIA توسط Willgoose et al., 1991: 1677-1679، و مدل GOLEM توسط Tucker & Slingerland, 1994: 12233.

مدل‌سازی فرایندهای جریان سطحی و کانالی به طور ایده‌آل نیاز به حل معادلات جریان کم عمق دارد؛ که از نظر عددی ممکن است پیچیده و در نتیجه از نظر محاسباتی بسیار زمان‌بر است؛ بنابراین در مدل‌های تحول چشم‌انداز رودخانه و حوضه آبخیز بدلیل انجام شبیه‌سازی در مقیاس زمانی و مکانی بزرگ (زمان ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ سال و سطح ۱۰۰ کیلومتر مربع) و نمایش جریان سطحی و کانالی به شکل معنی‌داری ساده‌سازی صورت گرفته است. این ساده‌سازی، شرایطی فراهم می‌سازد تا مدل‌های تحول چشم‌انداز با گام‌های زمانی طولانی‌تری (ساعت‌ها تا سال‌ها) قادر باشند شبیه‌سازی سریع‌تری از توسعه چشم‌انداز را ایجاد کنند.

در بسیاری مدل‌های تحول چشم‌انداز، فرآیند جریان رودخانه از طریق روندیابی دبی سلول‌ها در سرتا سر شبکه سلولی (به سمت پایین‌ترین سلول مجاور در شبکه سلول‌ها و متمرکزکننده جریان در طول سلول منفرد کانال‌ها) زهکش می‌شود، اما از شکل‌های جریان واگرا که برای شبیه‌سازی توسعه مخروط‌افکنه یا آبرفت و رودخانه‌های گیسویی و منقطع نیاز است جلوگیری می‌کند (Van De Wiel, et al., 2011: 170-176; Coulthard et al., 2012b: 1049-1050).

تحقیقات بسیاری، اهمیت وجود مدل‌های جریان در مدل‌های تحول چشم‌انداز را مطالعه کرده‌اند از جمله اثر روندیابی جریان متفاوت بر توسعه چشم‌انداز و مسائل پیرامون شیب دامنه، نقطه انتقالی کانال و قدرت تفکیک مکانی مدل را مورد بررسی قرار دادند (Tucker & Bras, 2000: 1955-1959).

در ابتدا، موج تقریب سینماتیکی که در بسیاری از مدل‌های تحول چشم‌انداز استفاده گردید، در تلاش‌ها و مطالعات اولیه منجر به یکسری مشکلات بر روی آنالیز اولیه پایداری کانال‌ها گردید (Smith & Bretherton, 1972: 1508-1518); Parker & Izumi, 2000: 342-348; Loewenherz, 1991: 8455-8460 و Smith et al., 1997a: 205-210)، در تلاشی به منظور حل این مسئله، Murray & Paola, 1997: 1011-1020، نیز الگوریتمی را به منظور مدل‌سازی انتقال رسوب و جریان برای کانال مستقیم رودخانه (با اقتباس از مطالعات (Coulthard et al., 2013b: 1899-1900)، بعنوان

ابزاری کارآمد در مدل‌سازی جریان متغیر دو بعدی سطحی بدون در نظر گرفتن حل عددی سنتی معادلات جریان کم عمق، ایجاد کردند.

جزئیات بیشتری از مدل‌های تحول چشم‌انداز در مطالعات Coulthard et al., Tucker & Hancock, 2010: 30-36 در سال ۲۰۱۰ در مطالعات مروری خود نقش تغییرپذیری دبی بواسطه زمان بر روی فرسایش و تحول چشم‌انداز را مورد بررسی قرار دادند (Tucker & Bras, 2000: 1959-1964؛ Lague et al., 2013a: 694-710؛ Huang & Niemann, 2006: 1-17؛ Molnar et al., 2006: 1-10). این مطالعات نشان داد که چگونه دوره بازگشت واقعه (و در نتیجه شدت واقعه) به طور سیستماتیکی در سرتاسر شبکه کانالی تغییر کرده است (Huang & Niemann, 2006: 12) و چگونه تغییرپذیری بارش (و دبی ناشی از آن) بصورت متغیر می‌تواند یک اثر فرسایندهگی یکسان یا بزرگتری از مقدار بارش داشته باشد (Tucker & Bras, 2000: 1956-1960). Tucker & Hancock, 2010: 40 اشاره کردند اگر چه جزئیات این مطالعات متفاوت بوده است، اما موضوع مشترک میان همه آنها در واقع میزان نرخ افزایشی فرسایش و انتقال رسوب با افزایش تغییرپذیری جریان است.

در نهایت آنها نتیجه گرفتند، بسیاری از برنامه‌های کاربردی برای فرضیه یک واقعه مؤثر، منطقی و بدیهی است که تغییرات هیدرودینامیکی می‌تواند بر دینامیک چشم‌انداز تأثیر داشته باشد که در نتیجه باید به طور معمول در مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Tucker & Hancock, 2010: 35).

با وجود این مزیت‌ها، اکثر مدل‌های جریان استفاده شده در مدل‌های تحول چشم‌انداز، جریان را به حالت پایدار فرض می‌کنند (برای ساده‌سازی) که در این مدل‌های ساده جریان، دبی جریان بطور پیوسته از طریق سطح زهکش بصورت دوره‌ای از گام زمانی مدل، روندیابی می‌گردد. با اقتباس این مفهوم نسبتاً ساده‌سازی شده فیزیک انتشار جریان، اثرات عمق و سرعت متفاوت جریان ناشی از گذر موج سیل در طول زمان (و فرسایش و رسوبی که پس از آن اتفاق می‌افتد) نمی‌تواند به درستی مدل‌سازی شود. به عنوان مثال یک سیل بزرگ ممکن است تا زمانی که به قسمت‌های پایین‌تر از حوضه زهکشی برسد تقلیل یابد که به دنبال آن کاهش سطح در معرض آب گرفتگی و در نتیجه کاهش سطح فرسایش و رسوب اتفاق خواهد افتاد. علاوه بر این، استفاده از مدل‌های حالت پایدار در حوضه‌های با زهکش بزرگ تناسب کمتری ایجاد می‌کنند، در این حوضه‌ها زمان تمرکز جریان از بالا به پایین حوضه فراتر از گام زمانی مدل است. تأثیر جریان‌های پایدار و ناپایدار در مدل‌های تحول چشم‌انداز با تلفیق یک مدل جریان ناپایدار در مدل تحول چشم‌انداز CHILD مورد بررسی قرار گرفته است (Sólyom & Tucker, 2004: 1-13). که این موارد در واقع نشان دهنده کاهش تراکم زهکشی و توسعه کمتر پروفیل مقعر کانال برای مدل با جریان ناپایدار است و این اثر با افزایش یافتن سطح حوضه زهکشی، قطعاً بزرگتر نشان داده می‌شود. با این حال، Sólyom & Tucker, 2004: 8-10، در اجرا با جریان ناپایدار، جریان با سرعت‌های پایدار و ثابت را بین سلول‌ها و اجزای مدل در نظر گرفتند که با روندیابی شدیداً نزولی جریان، مبنای فیزیکی رویکردشان را کاهش می‌دهد. پر واضح است که با اضافه کردن یک مدل جریان ناپایدار با مبنای فیزیکی‌تر به مدل‌های تحول چشم‌انداز می‌توان آشکارسازی و نمایش فرآیند جریان را افزایش داد. این تبدیل قادر خواهد بود محاسبات بهتری از توزیع زمانی و مکانی پارامترهای جریان مدل (سرعت و عمق) داشته باشد - که این کار با جایگزینی معادلات انتقال رسوب و سپس برآورد فرسایش و رسوب در داخل مدل صورت گرفته است. اما معمولاً هیدرودینامیک در مدل‌های جریان ناپایدار در گام‌های زمانی بسیار کوتاه‌تری عمل می‌کند (اغلب گام زمانی به ثانیه یا کسری از ثانیه است). این گام‌های زمانی کوتاه‌تر برای جلوگیری از ناپایداری عددی در مدل جریان ناپایدار ضروری است.

این شرایط در شکل‌های ضمنی حل سیستم‌های هایدروبولیک مانند معادلات جریان‌های کم عمق، توسط معیار کورانت - فریدریچ - لوی (CFL1) کنترل می‌شود، که به موجب آن موج نتواند در بیش از یک سلول در هر گام زمانی انتشار یابد.

بنابراین، یک عدم تطابقی بین نیاز به گام‌های زمانی کوتاه مدت در مدل‌های جریان و گام زمانی طولانی مدت در مدل‌های تحول چشم‌انداز وجود دارد، و یک مانع مهمی در یکپارچه کردن کدهای جریان دو بعدی مهم و اصلی در مدل‌های تحول چشم‌انداز ایجاد

می‌کند که به‌طور قابل توجهی با ارائه فرایندهای فیزیکی آنها و واقعیت‌گرایی بهبود خواهد یافت. همچنین هم‌زمان با بهبود مدل‌های تحول چشم‌انداز، پیشرفت‌های مناسبی در مدل‌سازی جریان کانال باز نیز صورت گرفته است. با چنین شرایطی، مشاهده می‌گردد که روش‌های یک بعدی موجود (مانند HEC-RAS و ISIS) به‌طور فزاینده‌ای با استفاده از کدهای دو بعدی برای مدل‌سازی پهنه‌بندی سیل، جایگزین شده‌اند. با این وجود، حل پیچیدگی معادلات کامل جریان کم عمق به منظور مدل کردن جریان در ایجاد حالت دو بعدی، باعث ایجاد بیش محاسباتی قابل توجهی می‌شود. این امر سبب توسعه کاهش پیچیدگی‌های مدل‌های جریان دو بعدی شده است (به عنوان مثال LISFLOOD-FP؛ Bates & De Roo, 2000: 56-65) که دشت سیلابی را به داخل سلول‌ها تفکیک می‌کند و شار جریان را در سرتاسر مرز دکارتی سلول‌ها (جهت X و Y) با توجه به معادله مانینگ (یا تغییرات آن) با در نظر گرفتن برآوردی از موج پختی محاسبه می‌کند. در پی تحقیقات بعدی و مباحث مذکور، برنامه تلفیق مدل تحول چشم‌انداز CAESAR را با مدل جریان LISFLOOD-FP به‌منظور ساخت مدل هیدرودینامیکی تحول چشم‌انداز CAESAR-Lisflood (CL) در دستور کار قرار گرفت و در سال ۲۰۱۳ این دو مدل تلفیق گردید (Coulthard, et al., 2013a: 1899- و Van De Wiel et al., 2007: 283-301).

## فرمولاسیون مدل تحول چشم‌انداز CAESAR-Lisflood

### فرمولاسیون بخش LISFLOOD-FP از مدل CL

مدل هیدرولیکی LISFLOOD-FP به‌کارگیری معادلات کامل جریان‌های کم عمق در جهت‌های X و Y، جریان دو بعدی بر روی سطح شبکه رستری شبیه‌سازی می‌شود و به دنبال آن دبی را از معادله (۱) محاسبه می‌کند.

$$Q = \frac{q - gh_{\text{flow}} \Delta t \frac{\Delta (h+z)}{\Delta x}}{(1 + gh_{\text{flow}} \Delta t n^2 |q| / h_{\text{flow}}^{10/3}) \Delta x} \quad (1)$$

در این معادله، Q: جریان بین سلول‌ها از تکرار قبلی (مترمکعب بر ثانیه)، g: گرانش زمین (متر بر ثانیه)، n: ضریب زبری مانینگ (مجذور واحد طول بر ثانیه)، h: عمق (متر)، Z: ارتفاع (متر)، hflow: ماکزیمم عمق جریان بین سلول‌ها، X: عرض سلول شبکه (متر) و t: زمان (ثانیه).

جریان آب در یک سلول از شبکه با توجه به بررسی چهار مرز یک سلول (منظور سلول مبدأ و در برگرنده جریان آب) و مشخص شدن سلول مجاوری با ویژگی شیب بیشتر و ارتفاع کمتر نسبت به سلول مبدأ، عمق جریان در هر سلول با معادله (۲) بروزسانی می‌شود.

$$\frac{\Delta h^{i,j}}{\Delta t} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x^2} \quad (2)$$

در معادله (۲)، i و j مختصات سلول هستند. بخش نهایی فرمولاسیون LISFLOOD-FP، گام زمانی (t) است که از طریق شرایط CFL جریان کم عمق کنترل می‌شود (معادله (۳)).

$$\Delta t_{\text{max}} = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

در معادله (۳)، ضریب  $\alpha$  به‌طور معمول بین  $0/3$  و  $0/7$  بر اساس منابع تعریف شده است (Bates et al., 2010: 36). این ضریب پایداری مدل را افزایش می‌دهد، همانگونه که شرایط CFL ضروری است اما شرایط برای پایداری سیستم‌های غیرخطی کافی نیست. همانطور که معادله ۳ نشان داده شده است این امر به شدت تحت تأثیر اندازه سلول در شبکه و عمق جریان است. به‌طور گسترده LISFLOOD-FP از نظر مقایسه کارایی با سایر مدل‌های جریان در مطالعات Neal et al., 2012: 1-16 و از نظر پایداری کلی در مطالعات Bates et al., 2010: 39 و همچنین در مطالعات جدیدی مثل Sosa et al., 2020: 1-22؛ O'Loughlin et al., 2020: 1-51؛ Zhao et al., 2020: 1-5 استفاده و مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور قابل ملاحظه‌ای راه حل عددی در شرایط اصطکاک کم (مقدار اصطکاک کمتر از  $0/03$ ) توسط de Almeida et al., 2012: 10 بهبود یافته است. بیتس و همکاران و همچنین نیل و همکاران در تحقیقاتشان نشان دادند که این مدل قادر به شبیه‌سازی عمق و سرعت جریان در ۱۰ درصد طیف گسترده‌ای از کدهای ساخته شده مربوط به جریان کامل کم عمق است. علاوه بر این، مشخص گردید که عملکرد مدل به‌طور قابل توجهی سریعتر از یک مدل جریان کم عمق ضمنی است (Neal et al., 2012: 10؛ Bates et al., 2010: 34). با این حال، مدل جریان LISFLOOD-FP همانند سایر مدل‌ها دارای محدودیت‌هایی است و از آن جمله این که مدل یک مدل ساده ذخیره‌ای (مبتنی بر معادله ذخیره) است که اصطکاک را نیز در بر می‌گیرد، اما این وضعیت تنها بر اساس یک سلول دنبال می‌گردد. بنابراین نمی‌تواند اثرات کامل را مدل کند، به‌عنوان مثال، جریانی که به سمت خمیدگی و انحنای مائل خارج می‌شود می‌توانست بوسیله راه حل کاملاً دوبعدی تعیین شود. علاوه بر این، در مطالعات (O'Loughlin et al., 2020: 1-22؛ Neal & Bates et al., 2010: 30؛ Sosa et al., 2020: 1-22؛ Zhao et al., 2020: 1-5؛ Neal et al., 2012: 1-16) مشخص گردید که مدل جریان فقط باید در شرایط جریان زیر بحرانی و جریان متغیر تدریجی به کار برده شود. در مدل‌سازی تحول چشم‌انداز، سطوح زهکشی حوضه که جریان در اراضی با شیب زیاد و عمق‌های کم وجود دارد، در این سطوح فرضیه جریان زیر بحرانی بعید است که عملی شود، و نتایج CAESAR-Lisflood باید تنها به‌عنوان یک تخمین اولیه برای این مشکل در نظر گرفته شود.

### فرمولاسیون مدل CL در بخش مدل CAESAR

مدل تحول چشم‌انداز CAESAR توسعه چشم‌انداز را از طریق حرکت آب در سرتاسر شبکه منظمی از سلول‌ها شبیه‌سازی می‌کند و ارتفاع‌های سلول را مطابق با فرآیند فرسایش و رسوب رودخانه و دامنه تغییر می‌دهد. مدل CAESAR چهار بخش اصلی دارد: مدل هیدرولوژیکی، مدل جریان سیل، مدل فرسایش و رسوب و مدل فرآیند دامنه‌ای. این مدل می‌تواند در دو حالت، حوزه آبخیز و بازه عمل کند (Coulthard & Van De Wiel, 2007: 230؛ Van De Wiel et al., 2011: 290). در بخش حوزه، مدل CAESAR با ورودی بارش، رواناب را در کل سطح زهکش حوزه با اقتباس از TOPMODEL<sup>1</sup> ایجاد می‌کند (Beven & Kirkby, 1979: 51) و سپس با استفاده از مدل جریان روندیابی می‌گردد. در مدیا حالت بازه، منابع دبی (هر دو جریان و رسوب) را می‌توان در نقاط مشخص شده‌ای توسط کاربر اضافه کرد. مدل جریان CAESAR از یک الگوریتم 'flow-sweeping' استفاده کرده و در یک وضعیت پایدار، جریان یکنواخت تقریبی را برای حوضه محاسبه می‌کند. دبی (جریان آب) از داخل سلول‌ها به سمت دو تا پنج سلول جلویی با توجه به اختلاف ارتفاع یا عمق آب سلول‌های شرکت کننده و ارتفاع بستر سلول‌های دریافت کننده توزیع می‌شود. در صورت عدم وجود سلول‌های گیرنده مناسب در جهت رفت و حرکت جریان، به‌عنوان مثال اگر انسدادی وجود داشته باشد، دبی در

<sup>1</sup> TOPography based hydrological MODEL

سلول مشارکتی باقی می‌ماند تا در جهات یا شیب‌های بعدی (احتمالاً در جهات مختلف) در همان زمان توزیع شود.

عمق و سرعت دبی جریان با استفاده از معادله مانینگ محاسبه می‌شود. عمق‌ها و جریان‌های محاسبه شده سلول در ادامه برای محاسبه تنش شیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نتیجه این اطلاعات نیز به منظور محاسبه جریان فرسایشی و رسوب استفاده می‌شود. این امر با استفاده از معادله انتقال یا ویلکوک و کرو<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد (Wilcock & Einstein, 1950: 30-35; Crowe, 2003: 125). همچنین مدل CAESAR این اجازه را دارد تا نه کلاس اندازه ذرات را مدل‌سازی کند، و این اندازه ذرات ممکن است بصورت بار بستر و یا بارمعلق انتقال داده شود. بین تنشست رسوب بار بستر و بار معلق تفاوت وجود دارد، بار بستر به صورت مستقیم سلول به سلول حرکت می‌کند، در حالی که حرکت بارمعلق وابسته به سرعت‌های سقوط ذرات و غلظت رسوب معلق داخل سلول است.

یکی از ویژگی‌های مهم مدل CAESAR، توزیع مکانی اندازه ذرات از طریق ذرات با اندازه مختلف و کسری از آنها که در فرآیند فرسایش، انتقال و رسوب شرکت می‌کنند مدل‌سازی می‌شوند.

از آنجایی که تغییرات اندازه ذرات به صورت عمودی و افقی بیان می‌شود، به یک روشی به منظور ذخیره اطلاعات رسوب زیر سطحی نیاز است که این امر با استفاده از سیستم با چند لایه فعال شامل لایه فعال سطح (دربرگیرنده بستر رودخانه)، چند لایه فعال، یک لایه پایه؛ و اگر نیاز باشد یک لایه بستر ثابت (یا لایه سنگ بستر) (Van De Wiel et al., 2011: 180) مرتفع می‌شود. فرآیندهای دامنه‌ای نیز با حرکت‌های توده‌ای که در حال وقوع است زمانیکه آستانه شیب بحرانی فراتر رفته یا افزایش یافته است و خزش خاک است بعنوان تابعی از دامنه مدل‌سازی می‌شوند.

این فرآیندهای دامنه‌ای توانایی انتقال مواد از شیب‌ها به داخل سیستم رودخانه‌ای همانند یک لند اسلاید و یا لغزشی که اتفاق می‌افتد را دارند (در هر دو مقیاس بزرگ و کوچک - بعنوان مثال فروریختگی کناره‌ها).

به طور کلی بر اساس مطالب ذکر شده تلفیق مدل‌های CAESAR و LISFLOOD-FP در سه سطح اصلی متمرکز شده است: الف- اضافه کردن مدل جریان ب- تلفیق مدل فرسایش و رسوب CAESAR با مدل جدید جریان؛ و پ- ایجاد همگامی زمانی بین فرآیندهای مختلف تحت شبیه‌سازی در مدل مانند جریان، فرسایش و رسوب

تلفیق و جایگذاری مدل جریان LISFLOOD-FP در داخل مدل CAESAR در قالب مدل CAESAR-Lisflood با الگوریتم flow sweeping از طریق قراردادن معادلات شماره یک تا سه در داخل مدل CAESAR صورت گرفته است. تفاوت مهم بین این روش‌ها وقوع روندیابی جریان در CAESAR از سلول در هشت جهت و در LISFLOOD-FP در چهار جهت است.

## بحث

یکی از مزیت‌های مهم مدل‌های تحول چشم‌انداز مبنای فرآیند محوری در آنها است که در امر مدل‌سازی ضروری است چرا که هر پدیده‌ای مثل سیل و انواع فرسایش، ناشی از اندرکنش بسیاری از عوامل است که با شرایط غیرخطی شبیه‌سازی پیچیده‌ای خواهد داشت و این مسئله در مدل‌های تحول چشم‌انداز به خوبی دیده شده است. اما از آنجایی که این مدل‌ها به سمت فیزیکی و توزیعی‌تر شدن پیش می‌روند در این مقاله سعی گردید مدل تحول چشم‌انداز CAESAR و روند پیشرفت و توسعه آن با مدل هیدرولیکی LISFLOOD-FP مورد بررسی قرار گیرد که عمل تلفیق این دو مدل، علاوه بر حل مسئله روندیابی کلی جریان و تبدیل آن به یک وضعیت توزیعی در مدل‌های تحول چشم‌انداز، مزایایی بسیاری را نیز در بر می‌گیرد که از آن جمله: کمک به روند رو به جلو در توسعه مدل‌سازی تحول چشم‌انداز و ژئومورفیک، کاهش پارامترهای مورد واسنجی با حرکت به سوی فیزیکی‌تر شدن، کاهش پیچیدگی حل معادلات جریان‌های کم عمق، امکان اجرای موازی کد مدل تلفیقی CAESAR-Lisflood در راستای حل مسئله محاسبات سنگین و زمانبر در این مدل و همچنین شبیه‌سازی فرآیندهایی مانند جریان آلودگی‌ها و عناصر که امکان شبیه‌سازی آنها در شرایط جریان پایدار فراهم نبوده است را می‌توان ذکر کرد.

<sup>1</sup>. Wilcock & Crowe

## نتیجه‌گیری

آنچه که از مطالعه و مرور تحقیقات در رابطه با مدل‌سازی در علم ژئومورفولوژی استنتاج می‌گردد این است که یکی از موضوعات محوری در مطالعات ژئومورفولوژیک، بررسی چگونگی روند تغییرات در اشکال سطح زمین است. امروزه ماهیت مطالعات ژئومورفولوژی را تبیین و تحلیل فرم و فرایندهای ژئومورفیک موجود در سطح زمین تشکیل می‌دهد. در دیدگاه سیستمی، تحلیل‌های ژئومورفیک بر اساس رابطه میان فرم و فرایند صورت می‌گیرد، که در حال حاضر مدل‌های ریاضی و آماری ارزش و اهمیت زیادی در ژئومورفولوژی و کارهای آزمایشگاهی برای بررسی فرایندهای مؤثر در تغییر یا ایجاد فرم ژئومورفولوژیکی سطح زمین دارند. برای ساختن مدل‌های ژئومورفولوژیکی (فرآیند- فرم) و تحولات آنها از نرم‌افزارهای کامپیوتری، آنالیز عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای و به علاوه روی هم‌گذاری و رقومی کردن نقشه‌های مینا با کمک نرم‌افزارهای جغرافیایی استفاده‌های فراوانی می‌شود، باید توجه داشت که به دلیل پیچیدگی شرایط طبیعی و دشواری مشاهدات میدانی؛ بخشی زیادی از تغییر و تحولات که در طول دوره زمانی و در کل سطح مورد مطالعه رخ می‌دهد را نمی‌توان به شیوه مذکور بررسی نمود؛ اما آنچه که این مقاله بیان می‌دارد بر اساس پایه‌های تئوری سیستمی و فرآیند- فرم که دانشمندان علم ژئومورفولوژی متذکر شده‌اند و نباید فراموش شود که در مطالعات تحولات ژئومورفولوژیکی نه تنها ساختار اشکال و تغییرات آنها در سطح سیستم باید مد نظر قرار گیرد بلکه قطعاً مهمتر از همه گنجانیدن مجموعه فرایندهای ایجادکننده ساختار اشکال و تغییرات آنها از مطالعات شبیه‌سازی تحولات ژئومورفولوژیکی است. به طور کلی تمرکز بر شبیه‌سازی فرآیند شکل‌گیری فرم‌ها در سطح زمین، بشر را در برنامه‌ریزی و مدیریت پیرامون خود در راستای توسعه پایدار کمک شایانی خواهد کرد بر همین منوال معرفی رویکرد جدید فرآیند محور در حیطه مدل‌سازی تحولات ژئومورفولوژیکی در قالب مدل‌های تحول چشم‌انداز و بالاخص مدل CAESAR-Lisflood در این مقاله دنبال شده است.

## منابع

- امینی مصطفی؛ قهرودی تالی منیژه؛ سرور هوشنگ؛ ۱۳۹۵، **سیر تکوینی نظریه‌های ژئومورفولوژی**، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. ۴: ۹۳-۱۱۵.
  - جعفری غلامحسین جعفری؛ بختیاری فاطمه؛ ۱۳۹۶، **آستانه‌های ژئومورفیک حوضه آبی قزل‌اوزن**، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۶: ۱۵۲-۱۲۷.
  - رامشت محمد حسین؛ احمدی عبدالمجید؛ آراء هاید؛ ۱۳۸۹، **حوضه‌های آبخیز از دیدگاه سیستمی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رود گاماسیاب)**، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای. ۱: ۱۴۵-۱۲۷.
  - شایان سیاوش؛ شریفی، محمد؛ ۱۳۸۵، **مدل به عنوان تکنیکی در ژئومورفولوژی**، نشریه تحقیقات جغرافیایی. ۱: ۱۲۰-۱۰۲.
  - علیجانی، بهلول، ۱۳۷۴، آب و هوای ایران، چاپ اول، تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور.
  - معتمد، احمد؛ مقیمی، ابراهیم؛ ۱۳۷۸، **کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی**، تهران: انتشارات سمت.
- Ahnert F. (1976). Brief description of a comprehensive three dimensional process-response model of landform development. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 25: 29 – 49.
- Bates, P. D., & De Roo, A. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, 236 (1-2), 54-77.
- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of hydrology*, 387(1-2), 33-45.

- Beven KJ, Kirkby MJ. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d ' appel variable de l ' hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24: 43 – 69. DOI: 10.1080/02626667909491834.
- Braun, J., & Sambridge, M. (1997). Modelling landscape evolution on geological time scales: a new method based on irregular spatial discretization. *Basin Research*, 9(1), 27-52.
- Brewer, P., & Lewin, J. (1998). Planform cyclicity in an unstable reach: complex fluvial response to environmental change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(11), 989-1008.
- Brown, R. .A., & Pasternack, G.B. (2019). How to build a digital river. *Earth-Science Reviews*. 194 ,283–305.
- Bastola, S., Dialynas, Y. G., Bras, R. L., Noto, L. V., & Istanbuluoglu, E. (2018). The role of vegetation on gully erosion stabilization at a severely degraded landscape: A case study from Calhoun Experimental Critical Zone Observatory. *Geomorphology*, 308, 25-39.
- Barkwith, A., Hurst, M. D., Jackson, C. R., Wang, L., Ellis, M. A., & Coulthard, T. J. (2015). Simulating the influences of groundwater on regional geomorphology using a distributed, dynamic, landscape evolution modelling platform. *Environmental Modelling & Software*, 74, 1-20.
- Coulthard, T., Kirkby, M., & Macklin, M. (1996). A cellular automaton landscape evolution model. In *Proceedings of the first international conference on GeoComputation (Vol. 1, pp. 248-81)*. School of Geography, University of Leeds.
- Coulthard, T. J & . Macklin, M. (2001). How sensitive are river systems to climate and land-use changes? A model-based evaluation. *Journal of Quaternary Science*, 16(4), 347-351.
- Coulthard, T. J., Kirkby, M., & Macklin, M. (2000). Modelling geomorphic response to environmental change in an upland catchment. *Hydrological processes*, 14(11-12), 2031-2045.
- Coulthard, T. J., Macklin, M., & Kirkby, M. (2002). A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(3), 269-288 .
- Coulthard, T. J., Lewin, J., & Macklin, M. (2005). Modelling differential catchment response to environmental change. *Geomorphology*, 69(1-4), 222-241.
- Coulthard, T. J., & Van De Wiel, M. J. (2006). A cellular model of river meandering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(1), 123-132 .
- Coulthard, T.J., Van De Wiel, M.J., (2007). Quantifying fluvial non-linearity and finding self organized criticality? Insights from simulations of river basin evolution. *Geomorphology*, 91, 216–235.
- Coulthard, T. J., & Van De Wiel, M. J. (2012a). Modelling river history and evolution. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 370(1966), 2123-2142.

- Coulthard, T. J., Hancock, G. R., & Lowry, J. B. (2012b). Modelling soil erosion with a downscaled landscape evolution model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(10), 1046-1055.
- Coulthard, T. J., Neal, J. C., Bates, P. D., Ramirez, J., Almeida, G. A., & Hancock, G. R. (2013a). Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(15), 1897-1906.
- Coulthard, T. J., & Van De Wiel, M. J. (2013b). 9.34 Numerical Modeling in Fluvial Geomorphology. In J. Schroder & E. Wohl (Eds.), *Treatise on Geomorphology*, (pp. 694-710): Elsevier.
- Coulthard, T.J.; van de Wiel, M.J. (2017). Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes. *Geomorphology*. 277, 265–281.
- Coulthard, T., Skinner, C. J. (2016). The sensitivity of landscape evolution models to spatial and temporal rainfall resolution. *Earth Surf. Dynam.*, 4, 757–771.
- Einstein HA. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. In *Technical Bulletin No. 1026, USDA Soil Conservation Service. US Department of Agriculture.*
- Evans, K. G. (2000). Methods for assessing mine site rehabilitation design for erosion impact. *Soil Research*, 38, 231-248, (2) .doi:<https://doi.org/10.1071/SR99036>.
- de Almeida GAM, Bates P, Freer JE, Souvignet M. 2012. Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. *Water Resources Research* 48: 1 – 14. DOI: 10.1029/2011WR011570
- Desjardins, E, Van De Wiel, M & Rousseau, Y. (2018). 'Predicting, explaining and exploring with computer simulations in fluvial geomorphology' *Earth-Science Reviews*, vol (In-Press), pp:1533-1544
- Gioia, D., Lazzari, M. (2019). Testing the Prediction Ability of LEM-Derived Sedimentary Budget in an Upland Catchment of the Southern Apennines, Italy: A Source to Sink Approach. *Water*, 11, 911; doi:10.3390/w11050911. <http://dx.doi.org/10.3390/w11050911>.
- Hancock, G. R., Duque, J. M., & Willgoose, G. R. (2019). Geomorphic design and modelling at catchment scale for best mine rehabilitation–The Drayton mine example (New South Wales, Australia). *Environmental modelling & software*, 114, 140-151.
- Hooper, D., Svoray, T., CohenEarth, S. (2017). Using a landform evolution model to study ephemeral gullying in agricultural fields: the effects of rainfall patterns on ephemeral gully dynamics *Earth Surf. Process. Landforms* 42, 1213–1226.
- Howard, A. D. (1994). A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research*, 30(7), 2261-2285.
- Huang X, Niemann JD. (2006). An evaluation of the geomorphically effective event for fluvial processes over long periods. *Journal of Geophysical Research*, 111 (F3): F03015. DOI: 10.1029/2006JF000477
- Izumi N, Parker G. (1995). Inception of channelization and drainage basin formation: upstream-driven theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 283: 341 – 363. DOI: 10.1017/S0022112095002357
- Kirkby MJ. (1987). Modelling some influences of soil erosion, landslides and valley gradient on drainage density and hollow development. *Catena Supplement*, 10: 1 – 11.

- Knighton, AD, 1998. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, Arnold, London., 383 p., ill., tabl, pl., 15, 5 x 23, 5 cm. ISBN 0 340 66313 8. *Géographie physique et Quaternaire*, 53(3), 413-414.
- Loewenherz ,DS. (1991). Stability and the Initiation of Channelized Surface Drainage: A Reassessment of the Short Wavelength Limit. *Journal of Geophysical Research*, 96 (B5): 8453 – 8464. DOI:10.1029/90JB02704
- Lowry, J.B.C., Narayan, M., Hancock, G.R., Evans , K.G. (2018). Understanding post-mining landforms: Utilising pre-mine geomorphology to improve rehabilitation outcomes. *Geomor*, 11.027. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph>.
- Lague D, Hovius N, Davy P. (2005). Discharge, discharge variability, and the bedrock channel profile. *Journal of Geophysical Research*, 110 (F4): 1 – 17. DOI: 10.1029/2004JF000259
- Macklin, M. G., Rumsby, B. T., & Heap, T. (1992). Flood alluviation and entrenchment: Holocene valley-floor development and transformation in the British uplands. *Geological Society of America Bulletin*, 104(6), 631-643.
- Murray AB, Paola C. (1997). Properties of a cellular braided stream model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22: 1001 – 1025. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837.
- Molnar P, Anderson RS, Kier G, Rose J. (2006). Relationships among probability distributions of stream discharges in floods, climate, bedload transport, and river incision. *Journal of Geophysical Research*, 111 (F2): 1 – 10. DOI: 10.1029/2005JF000310
- Neal, J., Schumann, G., & Bates, P. (2012). A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resources Research*, 48(11).
- Nicholas, A. P., & Quine, T. A. (2007). Modeling alluvial landform change in the absence of external environmental forcing. *Geology*, 35(6), 527-530.
- O'Loughlin, F. E., Neal, J., Schumann, G. J. P., Beighley, E., & Bates, P. D. (2020). A LISFLOOD-FP hydraulic model of the middle reach of the Congo. *Journal of Hydrology*, 580, 124203.
- Parker G, Izumi N. (2000). Purely erosional cyclic and solitary steps created by flow over a cohesive bed. *Journal of Fluid Mechanics*, 419: 203 – 238. DOI: 10.1017/S0022112000001403
- Peeters, I., Rommens, T., Verstraeten, G., Govers, G., Van Rompaey, A., Poesen, J., & Van Oost, K. (2006). Reconstructing ancient topography through erosion modelling. *Geomorphology*, 78(3-4), 250-264.
- Pasculli A, Audisio C. (2015). Cellular Automata Modelling of Fluvial Evolution: Real and Parametric Numerical Results Comparison Along River Pellice (NW Italy). *Environmental Modeling & Assessment*: 1–17.
- Poepl R.E., Coulthard T., Keesstra S.D. & Keiler M. (2019). Modeling the impact of dam removal on channel evolution and sediment delivery in a multiple dam setting, *International Journal of Sediment Research*, S1001-6279(18)30344-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.06.001>
- Schumann, G P., Neal, J. C., Voisin, N., Andreadis, K. M., Pappenberger, F., Phanthuwongpakdee, N., . . . Bates, P. D. (2013). A first large-scale flood inundation forecasting model. *Water Resources Research*, 49(10), 6248-6257.

- Schumm, S. A., Mosley, M. P., & Weaver, W. (1987). Experimental fluvial geomorphology.
- Schumm, S. A., & Parker, R. S. (1973). Implications of complex response of drainage systems for Quaternary alluvial stratigraphy. *Nature Physical Science*, 243(128), 99.
- Skinner, C. J., Coulthard, T. J., Parsons, D. R., Ramirez, J. A., Mullen, L., & Manson, S. (2015). Simulating tidal and storm surge hydraulics with a simple 2D inertia based model, in the Humber Estuary, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 155, 126-136.
- Sólyom PB, Tucker GE. (2004). Effect of limited storm duration on landscape evolution, drainage basin geometry, and hydrograph shapes. *Journal of Geophysical Research*, 109: F03012. DOI: 10.1029/2003JF000032
- Smith TR, Bretherton FP. (1972). Stability and the conservation of mass in drainage basin evolution. *Water Resources Research*, 8: 1506 – 1529. DOI: 10.1029/WR008i006p01506
- Smith TR, Birnir B, Merchant GE. (1997a). Towards an elementary theory of drainage basin evolution. I. The theoretical basis. *Computers and Geosciences*, 23: 811 – 822. DOI: 10.1016/S0098-3004(97)00068-X
- Smith TR, Merchant GE, Birnir B. (1997b). Towards an elementary theory of drainage basin evolution. II. A computational evaluation. *Computers and Geosciences*, 23: 823 – 849. DOI: 10.1016/S0098-3004(97)00067-8.
- Slingerland, N, Beier, NA & Wilson, GW. (2019). 'Stress testing geomorphic and traditional tailings dam designs for closure using a landscape evolution model', in AB Fourie & M Tibbett (eds), *Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1533-154. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1915\\_120\\_Slingerland](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_120_Slingerland)
- Sosa, J., Sampson, C., Smith, A., Neal, J., & Bates, P. (2020). A toolbox to quickly prepare flood inundation models for LISFLOOD-FP simulations. *Environmental Modelling & Software*, 123, 104561.
- Temme, A., Baartman, J & Schoorl, J. (2009). Can uncertain landscape evolution models discriminate between landscape responses to stable and changing future climate? A millennial-scale test. *Global and Planetary Change*, 69(1-2), 48-58.
- Temme, A., & Veldkamp, A. (2009). Multi-process Late Quaternary landscape evolution modelling reveals lags in climate response over small spatial scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(4), 573-589. doi:doi:10.1002/esp.1758.
- Tucker, G. E. (2004). Drainage basin sensitivity to tectonic and climatic forcing: implications of a stochastic model for the role of entrainment and erosion thresholds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(2), 185-205. doi:doi:10.1002/esp.1020.
- Tucker, G. E., & Slingerland, R. L. (1994). Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: A numerical modeling study. *Journal of Geophysical Research*, *Solid Earth*, 99(B6), 12229-12243.
- Tucker GE, Hancock GR. (2010). Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 28 – 50. DOI: 10.1002/esp.1952.
- Tucker GE, Bras RL. (2000). A stochastic approach to modeling the role of rainfall variability in drainage basin evolution. *Water Resources Research*, 36 (7): 1953 – 1964. DOI: 10.1029/2000WR900065

- Van De Wiel, M. J., Coulthard, T. J., Macklin, M. G., & Lewin, J. (2007). Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology*, 90(3), 283-301. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.024>.
- Van De Wiel, M. J., Coulthard, T. J., Macklin, M. G., & Lewin, J. (2011). Modelling the response of river systems to environmental change: Progress, problems and prospects for palaeo-environmental reconstructions. *Earth Science Reviews*, 104(1), 167-185. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.10.004>.
- Valters, D. A. (2016). 5.6. 12 Modelling Geomorphic Systems: Landscape Evolution.1-20.
- Wilcock PR, Crowe JC. (2003). Surface-based transport model for mixed size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129: 120 – 128. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(120)
- Willgoose G, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I. 1991. A coupled channel network growth and hillslope evolution Model 1. Theory. *Water Resources Research*, 27: 1671 – 1684. DOI: 10.1029/91WR00935
- Willgoose, G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1994) Hydrogeomorphology modelling with a physically based river basin evolution model. *Process models and theoretical geomorphology*, 271-294.
- Yu, W., Kima, Y., Leeb, D., Lee, G. (2018). Hydrological assessment of basin development scenarios: Impacts on the Tonle Sap Lake in Cambodia. *j.quaint.2018.09.023*
- Zhao, G., Bates, P., & Neal, J. (2020). The impact of dams on design floods in the Conterminous US. *Water Resources Research*, 56(3), e2019WR025380.