

Development of conceptual hydrological FLEX-Topo model for loess watersheds influenced by piping and tunnel erosion in Golestan Province of Iran

Abdolreza Bahremand^{*1}, Mohsen Hosseinalizadeh²

1. Corresponding Author, Professor, Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: abdolreza.bahremand@yahoo.com
2. Associate Prof., Dept. of Watershed and Desert Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: alizadeh_m2001@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 03.18.2022
Revised: 05.11.2022
Accepted: 05.26.2022

Keywords:
Conceptual hydrologic
FLEX-Topo model,
Loess deposits,
Piping,
Topographic index HAND,
Tunnel erosion

ABSTRACT

Background and Objectives: More than twenty percent of Golestan Province of Iran is covered by wind-blown deposits called as loess. These deposits are silty or loamy materials with yellow to light brown colors. Special erosion phenomena such as pipe and tunnel erosion are common in loess deposits that are important in terms of studying their hydrology and the hydrologic response of the catchments influenced by these phenomena. In this direction, the main objective of this research is the development of a hydrological model for loess watersheds, which accounts for the piping and tunnel erosion impact on the hydrologic response.

Material and Methods: In this paper, with briefly describing the hydrology and erosion situation of Tamer watershed located in the Northeast of Iran with dominant cover of loess deposits, using the Height Above Nearest Drainage map (the topographic index HAND) and the slope map, three hydrologic landscapes were determined. For each of these three hydrologic landscapes (lowland, hillslope and plateau), a conceptual hydrologic model was designed and described according to the FLEX-Topo model. In the FLEX-Topo model, the spatial variation is taken into account by the zonation of the watershed based on topography in a semidistributed fashion. Considering the intense presence of piping and tunnel erosion in the region and its impact on the hydrologic response of the watershed; in particular, with some changes in structure and formulation of the common structure of FLEX-Topo, a tailor-made conceptual model was suggested and its formulation, required for programming, was described.

Results and conclusion: Likewise the FLEX model, in the FLEX-Topo model four reservoirs including the interception, the unsaturated, the fast response and the slow response reservoirs along with a time lag function play important roles. To consider the effect of piping in the proposed model (FLEX-Topo-P), a splitting parameter for the input rainfall and a shared fast reservoir between hillslope and plateau landscapes were suggested. The proposed model has to be implemented

and tested through a methodic and robust research, and its performance has to be evaluated in comparison with flow observations and benchmarked with the FLEX-Topo.

Cite this article: Bahreman, Abdolreza, Hosseinalizadeh, Mohsen. 2022. Development of conceptual hydrological FLEX-Topo model for loess watersheds influenced by piping and tunnel erosion in Golestan Province of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (1), 115-133.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2022.20050.3544

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

توسعه مدل مفهومی هیدرولوژی FLEX-Topo برای حوزه‌های آبخیز لسی متأثر از فرسایش‌های پایینگ و تونلی استان گلستان

عبدالرضا بهره‌مند*^۱، محسن حسینعلی‌زاده^۲ 

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: abdolreza.bahremand@yahoo.com
۲. دانشیار گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: alizadeh_m2001@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: بیش از بیست درصد مساحت استان گلستان پوشیده از نهشته‌های لسی است که رسوبات بادی سیلتی یا لومی سست به رنگ زرد تا قهوه‌ای کم‌رنگ هستند. پدیده‌های خاص فرسایشی از جمله فرسایش پایینگ و تونلی در لس‌ها گسترش دارد که بررسی وضعیت این عرصه‌ها از منظر هیدرولوژی و رفتار پاسخ هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز متأثر از این پدیده‌ها دارای اهمیت است. در همین راستا هدف اصلی این پژوهش توسعه یک مدل هیدرولوژیک است که در آن تأثیر هیدرولوژیکی پایپ‌ها و تونل‌های فرسایشی بر پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز در منطقه لسی در نظر گرفته شود.
تاریخ دریافت: ۰۰/۱۲/۲۷ تاریخ ویرایش: ۰۱/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۳/۰۵	
واژه‌های کلیدی: پایینگ، شاخص توپوگرافیک HAND، فرسایش تونلی، مدل مفهومی هیدرولوژیک FLEX-Topo، نهشته‌های لسی	مواد و روش‌ها: در نوشتار حاضر با شرح وضعیت مختصر هیدرولوژیکی و فرسایشی حوزه آبخیز تمر واقع در استان گلستان که اراضی آن لسی هست با استفاده از نقشه شاخص توپوگرافی ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش (HAND) و نقشه شیب، سه چشم‌انداز هیدرولوژیک تعیین گردید. این سه چشم‌انداز عبارت از اراضی پست حاشیه رودخانه، دامنه‌های پرشیب و فلات می‌باشند و در این مقاله برای هر یک بر مبنای مدل FLEX-Topo، مدل مفهومی هیدرولوژیکی ارائه شد. در مدل FLEX-Topo تغییرات مکانی با تقسیم‌بندی حوزه به چشم‌اندازهای هیدرولوژیک بر اساس توپوگرافی به صورت نیمه توزیعی لحاظ می‌گردد. با توجه به حضور گسترده فرسایش پایینگ و تونلی و تأثیر آن بر واکنش هیدرولوژی حوزه، به طور مشخص با اعمال تغییراتی در ساختار معمول مدل FLEX-Topo یک مدل مفهومی ویژه پیشنهاد و به تفصیل با ذکر فرمولاسیون مورد نیاز برای کدنویسی مدل تشریح گردید.

نتایج و نتیجه‌گیری: در مدل FLEX-Topo همانند مدل یکپارچه FLEX چهار مخزن ذخیره برگابی، مخزن غیراشباع، مخزن واکنش سریع و مخزن واکنش آهسته به همراه یک تابع تأخیر نقش دارند و برای لحاظ کردن تأثیر پایپینگ در مدل پیشنهادی (FLEX-Topo-P) یک پارامتر مقسم بارش ورودی و یک مخزن سریع مشترک بین دو چشم‌انداز هیدرولوژی فلات و دامنه شیبدار پیشنهاد گردید. مدل پیشنهادی باید در قالب یک پژوهش منسجم و روشمند به مرحله اجرا و آزمایش گذاشته شود و کارایی آن نسبت به مشاهدات جریان و همچنین نسبت به مدل معمول FLEX-Topo سنجیده شود.

استناد: بهره‌مند، عبدالرضا، حسینعلی‌زاده، محسن (۱۴۰۱). توسعه مدل مفهومی هیدرولوژی FLEX-Topo برای حوزه‌های آبخیز لسی متأثر از فرسایش‌های پایپینگ و تونلی استان گلستان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۹ (۱)، ۱۳۳-۱۱۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2022.20050.3544



© نویسندگان.

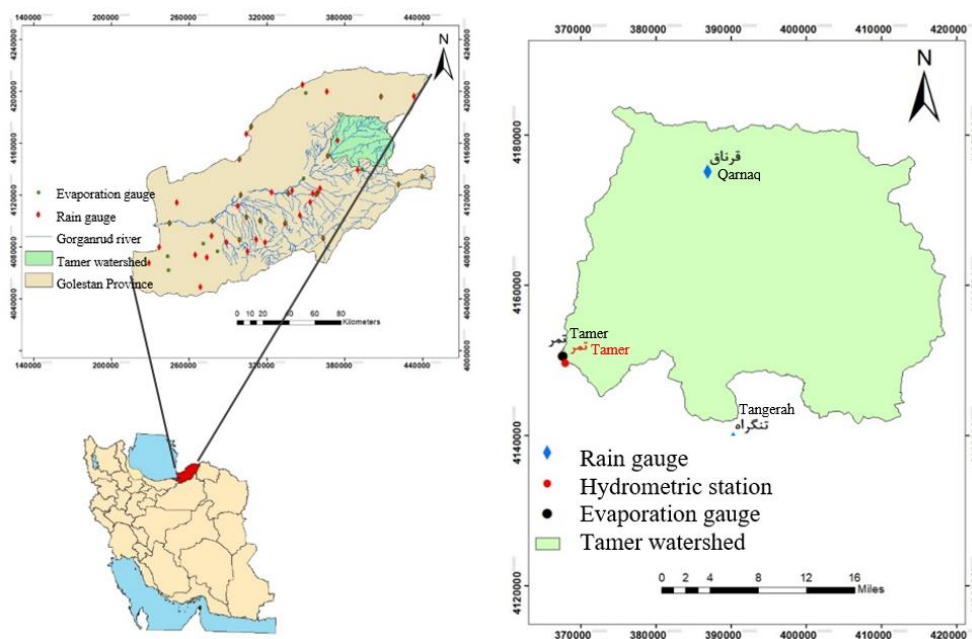
ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

طرح موضوع

محاصل فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی در نهشته‌های لسی حوزه آبخیز تمر در طی دوران‌ها منجر به ایجاد سه چشم‌انداز مشخص شده است که مشابه سه چشم‌انداز هیدرولوژی تشریح شده توسط ساونای ۲۰۱۰ می‌باشند. ایشان برای چشم‌انداز (لندسکیپ) تیبیک اروپای غربی سه چشم‌انداز زمین مرطوب حاشیه رودخانه، دامنه پرشیب و فلات را براساس شاخص توپوگرافی HAND و شیب تشریح می‌کند و برای این چشم‌اندازها مدل‌های مفهومی هیدرولوژی را بسط داده‌اند (۱). همین چشم‌اندازها در حوزه آبخیز تمر به خوبی ملاحظه می‌شوند، تفاوت اصلی موجود فعالیت شدید فرایندهای فرسایشی آبکند، پایپینگ و تونلی در حوزه تمر است. فرایندهای مذکور منجر به افزایش تراکم زهکشی حوزه در طی دوران‌های متمادی شده و هم‌چنان این مسأله ادامه دارد و در واقع خروج جریان از حوزه آبخیز یا واکنش هیدرولوژی حوزه در طی زمان مرتباً تسریع شده و می‌شود. هدف از این مقاله ارائه و تشریح یک مدل

مفهومی هیدرولوژی برای نهشته‌های لسی متأثر از فرسایش پایپینگ و تونلی استان گلستان به‌ویژه حوزه آبخیز تمر است.

معرفی حوزه آبخیز تمر: حوزه آبخیز تمر یکی از زیرحوزه‌های حوزه آبخیز گرگانرود واقع در شرق استان گلستان و در بالادست سدهای بوستان و گلستان، با مساحت ۱۵۶۱٫۸ کیلومترمربع و بین طول‌های $55^{\circ}26'30''$ تا $56^{\circ}04'35''$ شرقی و عرض‌های $37^{\circ}25'05''$ تا $37^{\circ}47'33''$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). میانگین بارندگی سالانه در این حوزه، حدود ۵۰۶ میلی‌متر است. متوسط دمای سالانه و رطوبت نسبی آن نیز، به ترتیب برابر ۱۶/۵۸ درجه سانتی‌گراد و ۶۸/۵ درصد می‌باشد. حداکثر ارتفاع این حوزه در منطقه خوش ییلاق در جنوب حوزه با ارتفاع ۲۱۷۸ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۱۱ متر از سطح دریا است. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز تمر را در ایران (زون ۴۰ شبکه UTM)، استان گلستان و در رودخانه گرگانرود نشان می‌دهد.

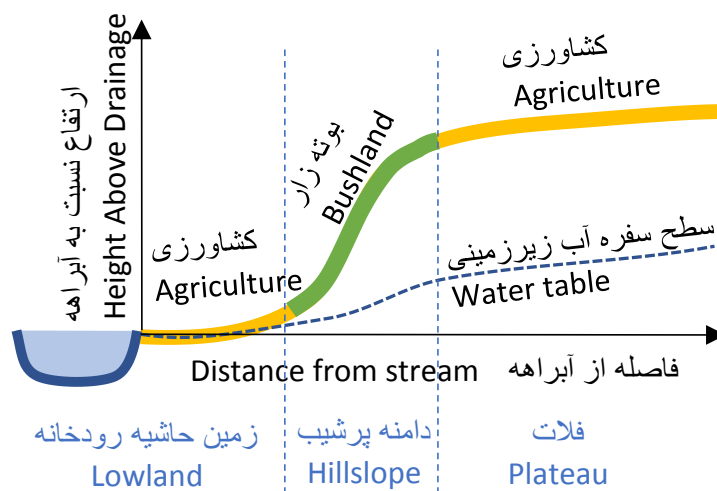


شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز تمر در رودخانه گرگانرود، استان گلستان و ایران.

Figure 1. Tamer watershed as a subbasin of Gorganrud River basin located in Gorgan Province, Iran.

دره به بالای دره قابل تشخیص است. چشم‌اندازهای مذکور در تصویر شماتیک زیر آورده شده‌اند:

معرفی چشم‌اندازهای هیدرولوژی حوزه تمر: اگر مقطع عرضی حوزه را در نظر بگیریم با فاصله گرفتن از رودخانه و شاخه‌های آن سه چشم‌انداز از پایین



شکل ۲- شماتیک چشم‌اندازهای هیدرولوژی قابل تشخیص در حوزه تمر.

Figure 2. The schematic of hydrologic landscapes recognized in Tamer watershed.

چشم‌انداز دامنه‌های پرشیب: این چشم‌انداز بین چشم‌انداز اراضی پست حاشیه رودخانه و چشم‌انداز دشت‌های مرتفع یا فلات قرار می‌گیرد. اراضی این چشم‌انداز بسیار پرشیب می‌باشند. اغلب شیب آنها بمراتب بیش از ۱۰۰ درصد است. این اراضی پوشیده از درختچه‌های طبیعی (غالباً سیاه تلو، نی، عرعر و انار) با تراکم خوب و یا شیب تند با خروجی پایینی می‌باشند (شکل ۴). مکانیسم غالب تولید رواناب در این اراضی مکانیسم زیرقشری است.

چشم‌انداز اراضی پست حاشیه رودخانه: منظور اراضی کم‌شیب، حاشیه رودخانه هستند که به‌خصوص در پایین‌دست حوزه این اراضی مئاندرهای رودخانه را احاطه کرده‌اند و مرطوب هستند و اغلب در قالب زمین‌های کشاورزی شخم‌خورده‌اند. مکانیسم تولید رواناب این چشم‌انداز در پایین‌دست در اغلب اوقات سال مکانیسم اشباع (مکانیسم مازاد بر اشباع) است. اما در بالادست در جاهایی که عمق سفره پایین‌تر از بستر رودخانه قرار می‌گیرد، مکانیسم تولید رواناب آنها از نوع مکانیسم هورتنی (مکانیسم مازاد بر نفوذ) می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳- عکس‌هایی از چشم‌اندازهای اراضی پست حاشیه رودخانه در نهشته‌های لسی ایران.

Figure 3. Photos of the lowland landscape in Iran's loess deposits.



شکل ۴- چشم‌انداز دامنه‌های پرشیب پوشیده از درختان بومی و خروجی تونل در نهشته‌های لسی ایران.

Figure 4. Photos of the steep slopes covered with native trees and the exit of the tunnel in Iran's loess deposits.

مکانیسم تولید رواناب در این چشم‌انداز، به غیر از نفوذ عمیق جریان، مکانیسم هورتنی (مکانیسم مازاد بر نفوذ) است.

چشم‌انداز فلات یا دشت‌های مرتفع: اراضی این چشم‌انداز کم‌شیب می‌باشند و در بالادست دو چشم‌انداز دیگر نسبت به شبکه رودخانه قرار گرفته‌اند. کاربری این اراضی، کشاورزی است (شکل ۵).



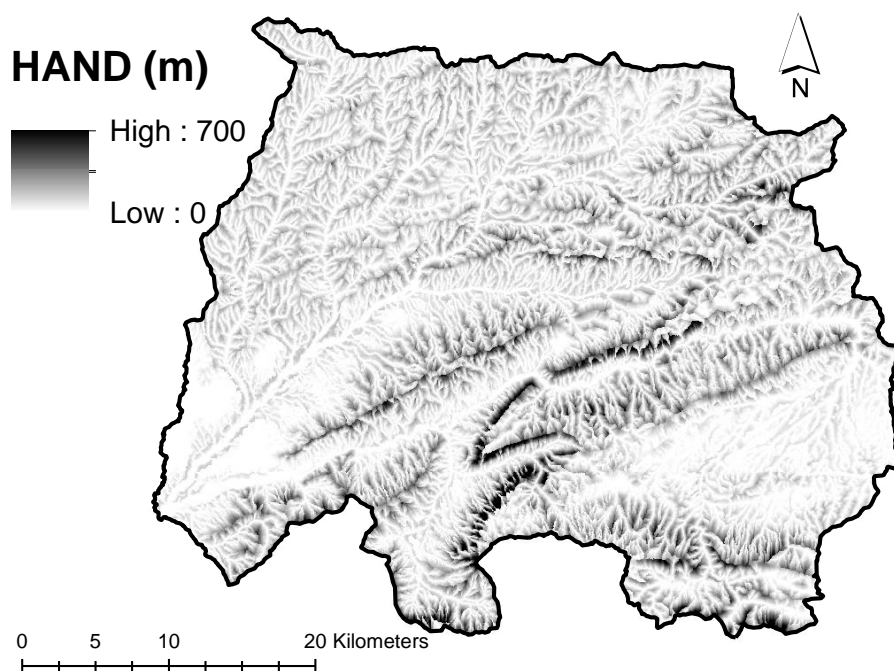
شکل ۵- چشم‌انداز فلات لسی کشاورزی به همراه رخساره‌های توأم پایپینگ و تونلی.

Figure 5. Plateau landscape with piping and tunnel erosion features.

می‌شود و این فاصله یک فاصله اقلیدسی نبوده بلکه به شیب منطقه و جهت جریان بستگی دارد. بنابراین به یک نقشه الگو نیاز است که تعیین کند ارتفاع هر سلول در نقشه مدل رقومی ارتفاع باید از ارتفاع کدام سلول از آبراهه کم شود. بدین منظور در این مقاله ابتدا زیرحوزه هر سلول از آبراهه با دستور **Watershed** در نرم‌افزار **ArcGIS** تهیه شد. در این دستور با معرفی نقشه جهت جریان و ارتفاع سلول‌های آبراهه، نقشه‌ای تولید خواهد شد که در آن ارتفاع هر سلول از آبراهه به تمام سلول‌های زیرحوزه آن تعمیم داده می‌شود. با کم کردن این نقشه رستری زیرحوزه‌ها از نقشه مدل رقومی ارتفاع اولیه (پایه)، نقشه شاخص **HAND** تهیه می‌گردد (۳). شکل ۶ نقشه این شاخص را برای حوزه آبخیز تمر نشان می‌دهد.

نحوه منطقه‌بندی یا بخش‌بندی چشم‌انداز هیدرولوژی حوزه: در این پژوهش از شاخص توپوگرافی **HAND** و نقشه شیب مطابق روش تشریح شده (۲) در مقاله قراری ۲۰۱۱ با استفاده از نقشه مدل رقومی زمین با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر اقدام به کلاس‌بندی یا منطقه‌بندی یا بخش‌بندی چشم‌انداز می‌گردد.

شاخص توپوگرافیک **HAND**: شاخص توپوگرافی **HAND** یا ارتفاع از سطح نزدیک‌ترین زهکش، ارتفاع نسبی هر نقطه از حوزه را نسبت به نزدیک‌ترین زهکش نشان می‌دهد (۳). در واقع پتانسیل نسبی ثقلی خاک یا پتانسیل زهکشی محلی را نشان می‌دهد (۴) و یک نوع ارتفاع هیدرولوژیک تعبیر می‌شود (۲). نقشه **HAND** از اختلاف ارتفاع سلول‌های نقشه مدل رقومی ارتفاع از نزدیک‌ترین سلول آبراهه حاصل

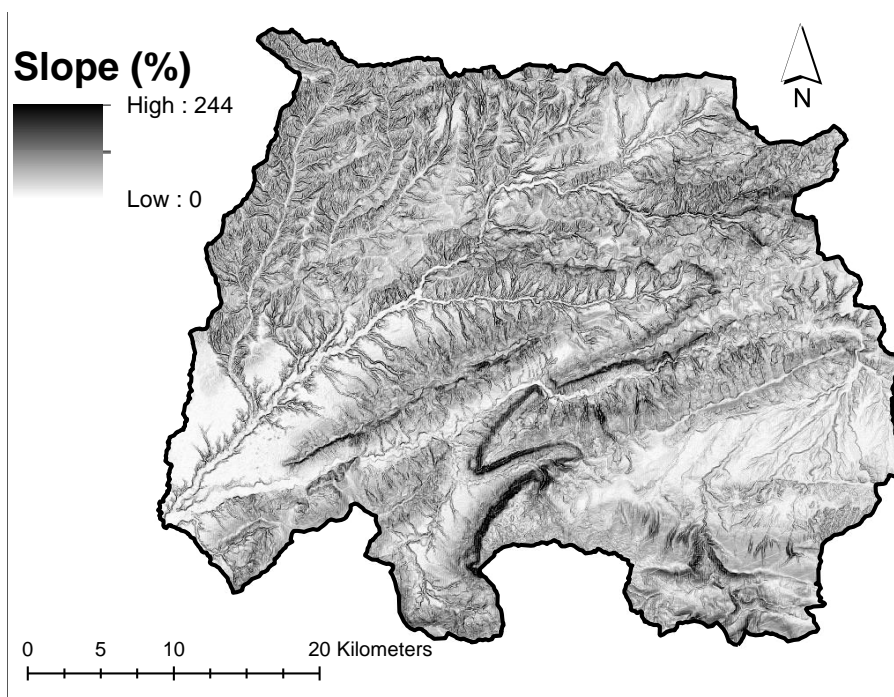


شکل ۶- نقشه شاخص توپوگرافی HAND حوزه آبخیز تمر.

Figure 6. The topographic index HAND of the Tamer watershed.

گردید که دامنه تغییرات شیب در حوزه مورد مطالعه از صفر تا ۲۴۴ درصد است (شکل ۷).

نقشه شیب: نقشه شیب حوزه با استفاده از نقشه توپوگرافی با قدرت تفکیک ۳۰ متر در GIS تهیه



شکل ۷- نقشه شیب حوزه آبخیز تمر.

Figure 7. The slope map of the Tamer watershed.

شاخص توپوگرافی بالا چشم‌انداز فلات را تفکیک می‌کند و مناطق با شیب زیاد چشم‌انداز دامنه‌های پرشیب را مشخص می‌کنند. برای تعیین مناطق کم‌شیب هم به نتیجه طبقه‌بندی شیب قراری ۲۰۱۱ و هم به شکست شیب توجه شد.

نقشه چشم‌اندازهای هیدرولوژی حوزه: برای چشم‌اندازبندی جدول ۱ ملاک تفکیک چشم‌اندازها قرار می‌گیرد. بر طبق این جدول مناطق کم‌شیب با شاخص توپوگرافی کم چشم‌انداز اراضی پست حاشیه رودخانه را تفکیک می‌کنند. مناطق با شیب کم اما

جدول ۱- مبنای تفکیک چشم‌اندازهای هیدرولوژی (۲).

Table 1. Criteria for land classification using HAND and slope (2).

کم HAND Low HAND	زیاد HAND High HAND
شیب کم Low slope	فلات‌ها Plateau
شیب زیاد High slope	دامنه‌های پرشیب Hillslope

فراوانی سلول‌های این دو نقشه مرز تفکیک کم و زیاد برای نقشه شیب ۲۶ درصد و برای نقشه HAND عدد ۷/۵ متر تعیین گردید. بنابراین جدول مورد استفاده در منطقه‌بندی نقشه چشم‌انداز به صورت زیر است:

در حوزه آبخیز تمر با توجه به نقشه HAND و نقشه شیب حوزه که هر دو بر مبنای نقشه رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شده‌اند و با بررسی دقیق هر یک از نقشه‌های مذکور و مقایسه چشمی با تصاویر گوگل ارث و بررسی هیستوگرام

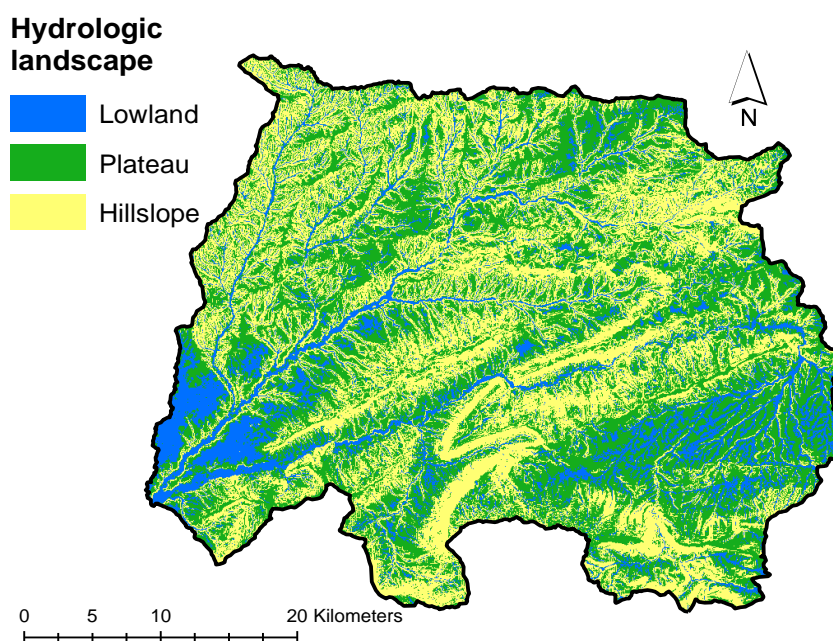
جدول ۲- نحوه منطقه‌بندی چشم‌اندازهای هیدرولوژی در حوزه آبخیز تمر.

Table 2. The classification of hydrologic landscapes in the Tamer watershed.

کم HAND (۰-۷/۵ متر) Low HAND (<7.5 m)	زیاد (بیش از ۷/۵ متر) HAND High HAND (>7.5 m)
شیب کم (۰-۲۶٪) Low slope (0-26%)	فلات‌ها Plateau
شیب زیاد (بیش از ۲۶٪) High slope (>26%)	دامنه‌های پرشیب Hillslope

می‌توان با درجه اطمینان بالا ادعا کرد که اراضی با شیب بیش از ۲۶ درصد همان دامنه‌های پرشیب با پوشش طبیعی درختچه‌زار یا بوته‌زار یا بدون پوشش می‌باشند. شکل ۸ نقشه چشم‌انداز هیدرولوژی حوزه تمر را نشان می‌دهد.

چون مرز تفکیک شیب نسبتاً زیاد در نظر گرفته شد، هیچ اراضی شیب‌دار حاشیه رودخانه در طبقه‌بندی دیده نشد. دلیل بالا در نظر گرفتن مرز تفکیک شیب لحاظ کردن همه اراضی زراعی در یکی از دو چشم‌انداز حاشیه رودخانه و فلات است. بنابراین



شکل ۸- نقشه چشم‌اندازهای هیدرولوژی حوزه آبخیز تمر.

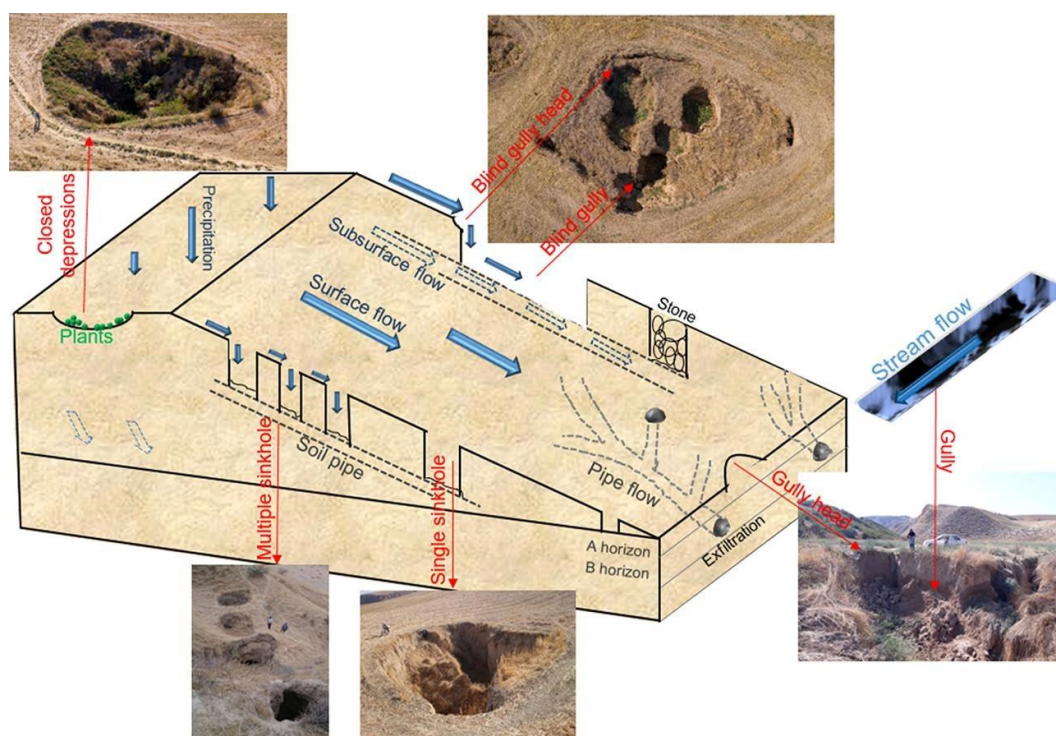
Figure 8. The hydrologic landscape map of the Tamer watershed.

فرصت به شمار می‌آید (۶). با وجود کمیاب بودن این رخساره فرسایشی در مقابل سایر رخساره‌های فرسایشی، بالا بودن نرخ فرسایش ناشی از آن نسبت به فرسایش‌های سطحی و شیاری (۷)، دخیل بودن در توسعه آبکند (۸)، اندرکنش آن با سر آبکند (۹)، اختصاص ۱۰ درصد از تولید رواناب به این رخساره فرسایشی در فلات لسی چین (۱۰)، غالب بودن آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به سایر اقلیم‌ها (۱۰)، تراکم بالای آن‌ها در برخی از چشم‌اندازها در فلات لسی ایران- به صورت تقریبی یک عدد در هکتار (۵)- و هم‌چنین مطالعات اندک صورت گرفته در این خصوص و پیچیده بودن نحوه تشکیل و رفتار آن به‌ویژه پاسخ هیدرولوژی آن، روز به روز بر اهمیت آن افزوده می‌شود. فلات لسی ایران نسبت به فرسایش پایینگ بسیار حساس است. به‌نحوی که در محدوده‌های با وسعت اندک، اکثر آن‌ها قابل‌دیدن هستند که به‌صورت یک چارچوب مفهومی در پژوهش کریمی‌نژاد و همکاران (۱۱) ارائه شده است (شکل ۹).

مطابق نقشه بالا چشم‌انداز هیدرولوژی زمین پست حاشیه رودخانه ۱۷ درصد، چشم‌انداز هیدرولوژی فلات ۴۴ درصد و چشم‌انداز هیدرولوژی دامنه پرشیب ۳۹ درصد حوزه را پوشش می‌دهد.

نقش فرسایش پایینگ و تونلی در حوزه تمر: اراضی لسی بیش از ۹۰ درصد حوزه آبخیز تمر را دربر گرفته است. به لحاظ ویژگی‌های لسی، فرسایش‌های پایینگ، تونلی، سرآبکند و حرکت‌های توده‌ای در حوزه مورد مطالعه بسیار فعال می‌باشند (۵). یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر بررسی نقش اشکال فرسایشی مذکور در هیدرولوژی حوزه و ارائه مدل مفهومی هیدرولوژی برای اراضی لسی مملو از حفرات فرسایش پایینگ و تونلی است.

فرسایش پایینگ از جمله فرسایش‌های آبی، انحلالی و تشدیدشونده است که تشکیل و توسعه و آن علاوه بر تخریب سرزمین، تغییرات چشمگیر در چشم‌اندازها را در گذر زمان به دنبال داشته و توسعه شبکه زهکشی و افزایش اتصال شبکه‌های انتقال رسوب را منجر می‌شود. از طرفی هم تهدید و هم



شکل ۹- چارچوب مفهومی فرسایش پایپینگ در نهشته‌های لسی ایران (۱۱).

Figure 9. Conceptualization of piping erosion in the loess deposition of Iran (11).

این سه چشم‌انداز بر اساس مکانیسم‌های غالب تولید رواناب در هر چشم‌انداز هیدرولوژیک، مدل FLEX با چیدمان مخازن مربوط به فرایندهای هیدرولوژیک ویژه هر چشم‌انداز طراحی می‌گردد. در اینجا قبل از ارائه مدل FLEX برای هر چشم‌انداز هیدرولوژی ابتدا مدل یکپارچه FLEX برای کل حوزه با شماتیک ساختار مدل و معادلات و پارامترهای موردنیاز ارائه می‌گردد. این مدل یکپارچه می‌تواند به‌عنوان پایه ارزیابی (benchmark) برای مدل FLEX-Topo و مدل پیشنهادی در این مقاله نقش ایفا کند.

مدل یکپارچه FLEX: مدل یکپارچه FLEX پیشنهادی برای حوزه تمر (شکل ۱۰) ساختاری مشابه مدل FLEX به‌کار گرفته‌شده در تحقیق فینیشیا و همکاران (۱۳) و هم‌چنین پژوهش گائو و همکاران (۱۲) است و آن شامل ۴ مخزن می‌باشد: مخزن برگابی یا ایترسپشن (S_i)، مخزن غیراشباع (S_u).

مدلسازی مفهومی هیدرولوژیک برای حوزه مورد مطالعه: با توجه به ویژگی‌های خاص هیدرولوژیکی توصیف‌شده (که عمدتاً به‌خاطر شکل خاص فرسایشی اراضی لسی این منطقه است) یک مدل اختصاصی (tailor-made) ویژه این حوزه، الگو گرفته از استراتژی مدلسازی مبتنی بر توپوگرافی (FLEX-Topo) ارائه‌شده توسط ساوانای ۲۰۱۰ و پژوهش انجام‌شده توسط گائو و همکاران ۲۰۱۴ در اینجا پیشنهاد می‌گردد (۱ و ۱۲). نوآوری این کار لحاظ سیستم پایپینگ گسترده موجود در حوزه به‌صورت یک مخزن مجزا است با ویژگی‌هایی که در ادامه خواهد آمد.

مطابق مدلسازی مبتنی بر توپوگرافی FLEX-Topo که بر پایه شاخص HAND استوار است در حوزه مورد مطالعه سه چشم‌انداز هیدرولوژی مشخص، تشخیص و مرزبندی گردید. سپس برای هر یک از

پارامتر مقسم نفوذ عمقی از جریان ترجیحی است. در معادله ۹، R_S جریان ورودی به مخزن آب زیرزمینی به شمار می‌آید. در معادله ۵، S_u و S_{uMax} و E_p برای تعیین تبخیر واقعی (E_a) استفاده می‌شوند. C_e کسری از S_{uMax} را مشخص می‌کند که بالاتر از آن تبخیر واقعی مساوی با تبخیر پتانسیل در نظر گرفته می‌شود که در اینجا مطابق پیشنهاد ساوانای (۱۵) عدد ۰/۵ توصیه می‌شود و گرنه مقدار تبخیر واقعی به مقدار آب در دسترس در S_u محدود می‌شود.

معادلات ۱۰ و ۱۱ برای لحاظ زمان تأخیر بین رگبار و حداکثر جریان به کار گرفته می‌شوند. $R_f(t-i+1)$ رواناب سریع تولیدشده در منطقه غیراشباع در زمان $t-i+1$ می‌باشد. T_{lag} پارامتری است که زمان تأخیر بین رگبار و تولید جریان سریع را نمایندگی می‌کند. $c(i)$ وزن جریان در $i-1$ روز قبل و $R_{fl}(t)$ دبی ورودی به مخزن پاسخ-سریع بعد از کونولوشن (تجمیع) است.

مخازن خطی - پاسخ که نماینده یک رابطه خطی بین ذخیره و دبی تخلیه می‌باشند، برای مفهوم‌سازی دبی خروجی از مخزن رواناب سطحی، مخازن سریع-پاسخ و مخازن آهسته-پاسخ به کار می‌روند. در معادله ۱۳، Q_{ff} رواناب سطحی با پارامتر مقیاس زمانی K_{ff} است که وقتی ذخیره مخزن سریع-پاسخ بیش‌تر از آستانه S_{ffr} می‌شود، فعال می‌گردد. در معادلات ۱۴ و ۱۶، Q_f و Q_s رواناب سریع و آهسته را، S_f و S_s وضعیت ذخیره مخازن سریع و آب زیرزمینی را معرفی می‌کنند، و K_f و K_s پارامترهای مقیاس زمانی، به ترتیب، رواناب سریع و آهسته می‌باشند، در حالی که Q_m کل رواناب مدل شده از سه مؤلفه ذکر شده است.

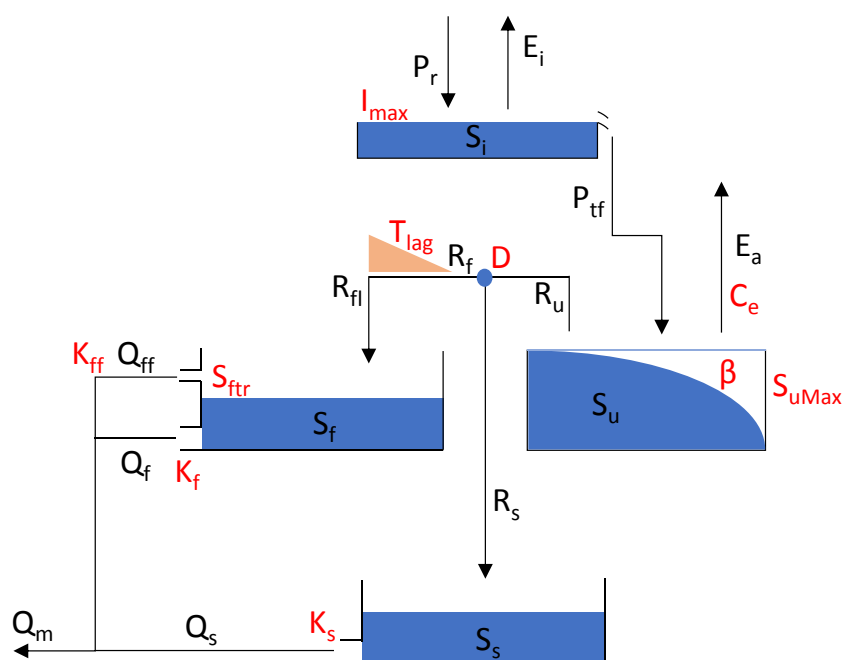
مخزن واکنش سریع (S_f) و مخزن واکنش آهسته (S_s). یک تابع تأخیر، زمان تأخیر بین رگبار و اوج سیل را نمایندگی می‌کند. در پژوهش‌های ذکر شده مخزن برف نیز در نظر گرفته شده است که در این پژوهش به دلیل وقوع خیلی کم برف در حوزه تمر از لحاظ آن در مدلسازی صرف نظر می‌شود. در مدل یکپارچه هیچ‌گونه طبقه‌بندی مکانی در حوزه آبخیز صورت نمی‌گیرد و پارامترهای مدل FLEX برای کل حوزه تعریف و تعیین می‌گردند. در این مدل بارندگی می‌تواند قبل از ورود به مخزن غیراشباع در مخزن برگابی ذخیره شود. ظرفیت حداکثر ذخیره برگابی روزانه (I_{max}) تنها پارامتر این مخزن است. هدر رفت اینترسپشن (E_i) توسط این مخزن بر اساس تبخیر پتانسیل (E_p) و ذخیره مخزن برگابی (S_i) و I_{max} محاسبه می‌گردد. برگاب (P_{tf}) نیز با برقراری بیلان تاج پوشش (معادله ۱) با داشتن سایر مؤلفه‌ها (معادلات ۲ و ۳) محاسبه می‌گردد و به عنوان ورودی به مخزن غیراشباع در مدل عمل می‌کند.

بارش ورودی به مخزن غیراشباع از طریق بیلان عمق خاک که هسته مدل‌های هیدرولوژی پیشنهاد شده در این مطالعه است مقدار رواناب تولیدشده را تعیین می‌کند. تابع بتا مدل معروف زیان‌زاگ (۱۴) ضریب رواناب را برای هر گام زمانی به عنوان تابعی از رطوبت نسبی خاک محاسبه می‌کند. در معادله ۶، C_r ضریب رواناب، S_u محتوی رطوبتی خاک، S_{uMax} حداکثر ظرفیت رطوبتی خاک در منطقه ریشه، و β غیریکنواختی مکانی فرایند را توصیف می‌کند. در معادله ۷، R_u همان جریان تولیدشده از بارش مؤثر ورودی به خاک (P_{tf}) است. در معادله ۸، R_f جریان ورودی به مخزن سریع می‌باشد و D

جدول ۳- فرمول‌های مورد استفاده در مدل FLEX (۱۲).

Table 3. The formulation of the FLEX model (12).

$\frac{dS_i}{dt} = P_r - E_i - P_{tf} \quad (1)$	مخزن برگابی
$E_i = \begin{cases} E_p; S_i > 0 \\ 0; S_i = 0 \end{cases} \quad (2) , \quad P_{tf} = \begin{cases} 0; S_i < I_{max} \\ P_r; S_i = I_{max} \end{cases} \quad (3)$	
$\frac{dS_u}{dt} = P_{tf}(1 - C_r) - E_a \quad (4)$	مخزن غیراشباع
$E_a = (E_p - E_i) \min\left(\frac{S_u}{S_{uMax} C_c}, 1\right) \quad (5)$	
$C_r = 1 - \left(1 - \frac{S_u}{S_{uMax}}\right)^\beta \quad (6)$	
$R_u = P_{tf} C_r \quad (7)$	
$R_f = R_u D \quad (8)$	مقسم و تابع تأخیر
$R_s = R_u(1 - D) \quad (9)$	
$R_{fi}(t) = \sum_{i=1}^{T_{lag}} c(i) \cdot R_f(t - i + 1) \quad (10)$	
$c(i) = i / \sum_{u=1}^{T_{lag}} u \quad (11)$	
$\frac{dS_f}{dt} = R_{fi} - Q_{ff} - Q_f \quad (12)$	مخزن سریع
$Q_{ff} = \max(0, S_f - S_{ftr}) / K_{ff} \quad (13)$	
$Q_f = S_f / K_f \quad (14)$	
$\frac{dS_s}{dt} = R_s - Q_s \quad (14) \quad Q_s = S_s / K_s \quad (15)$	مخزن آهسته



شکل ۱۰- شماتیک مدل مفهومی FLEX ویژه حوزه آبخیز تمر.

Figure 10. The schematic of the FLEX conceptual model for the Tamer watershed.

(sinkholes)، پایپ‌ها و تونل‌های زیرسطحی در دو چشم‌انداز فلات و دامنه شیبدار و این‌که این عوارض فرسایشی در نهشته‌های لسی منطقه در زیر سطح اغلب بهم پیوسته هستند و ایجاد شبکه زیرسطحی می‌کنند (۶ و ۱۱)، ضرورت لحاظ آن‌ها در مدل مفهومی هیدرولوژی حوزه به‌طور جدی مطرح می‌گردد. در مدل پیشنهادی (با نام FLEX-Topo-P) دو تغییر در ساختار مدل FLEX-Topo برای لحاظ همین موضوع در نظر گرفته شده است. یکی تخصیص ورود مستقیم بخش مشخصی از بارش به فروچاله‌ها (سینک‌ها) بر اساس پارامتر X و دیگر لحاظ یک مخزن واکنش سریع که به‌صورت مشترک بین دو چشم‌انداز فلات و دامنه شیبدار در نظر گرفته شده که روندیابی جریان در تونل‌های فرسایش پایپینگ و تونلی را مدلسازی کند. چون فروچاله‌ها در چشم‌انداز فلات متمرکز هستند بنابراین تخصیص ورود مستقیم بارش به آن‌ها فقط در چشم‌انداز فلات در نظر گرفته

مدل نیمه توزیعی FLEX-Topo: در مدل FLEX-Topo تغییرات مکانی با تقسیم‌بندی حوزه به چشم‌اندازهای هیدرولوژی بر اساس توپوگرافی به‌صورت نیمه توزیعی لحاظ می‌گردد. در اینجا ساختار مشابه مدل FLEX برای هر یک از چشم‌اندازهای هیدرولوژی پیشنهاد می‌شود. سپس مدل‌های تمامی چشم‌اندازها به‌صورت موازی بهم متصل می‌گردند (۱). البته مخزن آب زیرزمینی به‌طور مشترک بین تمامی چشم‌اندازها پیشنهاد می‌گردد. چیدمان مخازن و ساختار مدل اختصاصی ویژه حوزه آبخیز تمر، بگونه‌ایست که تأثیر فرسایش پایپینگ و تونلی در واکنش هیدرولوژیک حوزه نیز لحاظ شود. پیشنهاد می‌شود این مدل که برای اراضی با فرسایش پایپینگ و تونلی ارائه شده است، FLEX-Topo-P نامیده شود.

مدلسازی تأثیر پایپینگ و فرسایش تونلی در واکنش هیدرولوژیک حوزه: با حضور گسترده فروچاله‌ها

می‌شود (شکل ۱۱). تعیین پارامتر X بر اساس نسبت سطح فروچاله‌ها و پایپ‌ها به سطح چشم‌انداز فلات پیشنهاد می‌شود و بایست بر مبنای این نسبت باشد و صرفاً به صورت محدود کالیبره گردد تا مقدار نهایی پارامتر منطقی و منطبق بر واقعیت باشد. همچنین باید اشاره کرد که می‌توان سناریوی دیگری فرض کرد که در آن تونل‌ها و پایپ‌های دو چشم‌انداز مذکور در ارتباط نبوده و مخازن سریع آنها مشترک نباشد. منظور از مخزن واکنش سریع رواناب ترجیحی مربوط به زون غیراشباع (رواناب مربوط به جریان ترجیحی زیرقشری) است. جریان ترجیحی بخشی از جریان زیرقشری است که در فضاهای ایجادشده حاصل از پوسیدگی ریشه‌ها، لانه کرم‌ها و یا ترک‌ها و شکاف‌ها برقرار است. در خصوص مطالعه موردی این مقاله، حرکت آب در تونل‌های فرسایشی و پایپ‌ها را به دلیل تشابه مانند جریان ترجیحی فرض کردیم. البته در این خصوص دو آستانه در مخزن در نظر گرفته شده، یکی برای حالتی که تونل‌ها خشک هستند (یا قطور هستند) و درواقع مانند شبکه زهکشی سطحی عمل می‌کنند (پارامتر K_f) و دیگر در حالتی که در اثر بارندگی طولانی مدت و شدید تونل‌ها و پایپ‌ها پر می‌شوند و برای تخلیه آنها آستانه دیگری با پارامتر K_{ff} در نظر گرفته شده است.

به طور مثال در محدوده‌ای به وسعت ۵۰۰ هکتار در فلات لسی ایران، ۳۳۷ عدد پایپنگ به وسعت تقریبی ۲۲ هکتار توسط پهپاد نقشه بندی شده است. بنابراین درصد وسعت محدوده به پایپنگ اختصاص دارد و مقدار پارامتر X حدود ۰/۰۴ در نظر گرفته می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر در محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۲۷۰۰ هکتار در فلات لسی ایران با دو کاربری زراعت (به وسعت ۱۶۰۰ هکتار با ۱۹۵ عدد پایپنگ) و مرتع (به وسعت ۱۱۰۰ هکتار با ۶۳۶ عدد پایپنگ) به ترتیب ۲۴ درصد و ۷۶ درصد پایپنگ‌ها در کاربری

زراعت و مرتع واقع شده‌اند (۹). در همین محدوده در دو سال متوالی تغییرات تعداد و وسعت پایپنگ ناشی از بارندگی اسفندماه ۱۳۹۷ و فروردین ۱۳۹۸ توسط پهپاد مورد بررسی قرار گرفت. تعداد پایپنگ‌ها از ۸۳۰ عدد به ۷۶۰ عدد کاهش یافت، ولی وسعت آنها از ۲۲ هکتار به ۶۷ هکتار تغییر کرد. این تغییرات نشان‌دهنده ادغام پایپنگ‌های مجاور به یکدیگر و افزایش وسعت پایپنگ‌ها بوده است. در این محدوده ۲/۵ درصد وسعت عرصه را سطح پایپنگ در برگرفته است، بنابراین مقدار پارامتر X حدود ۰/۰۲۵ برآورد می‌گردد. می‌توان همین محاسبه را به کل سطح حوزه هم تعمیم داد و پارامتر X را برای کل حوزه برآورد کرد.

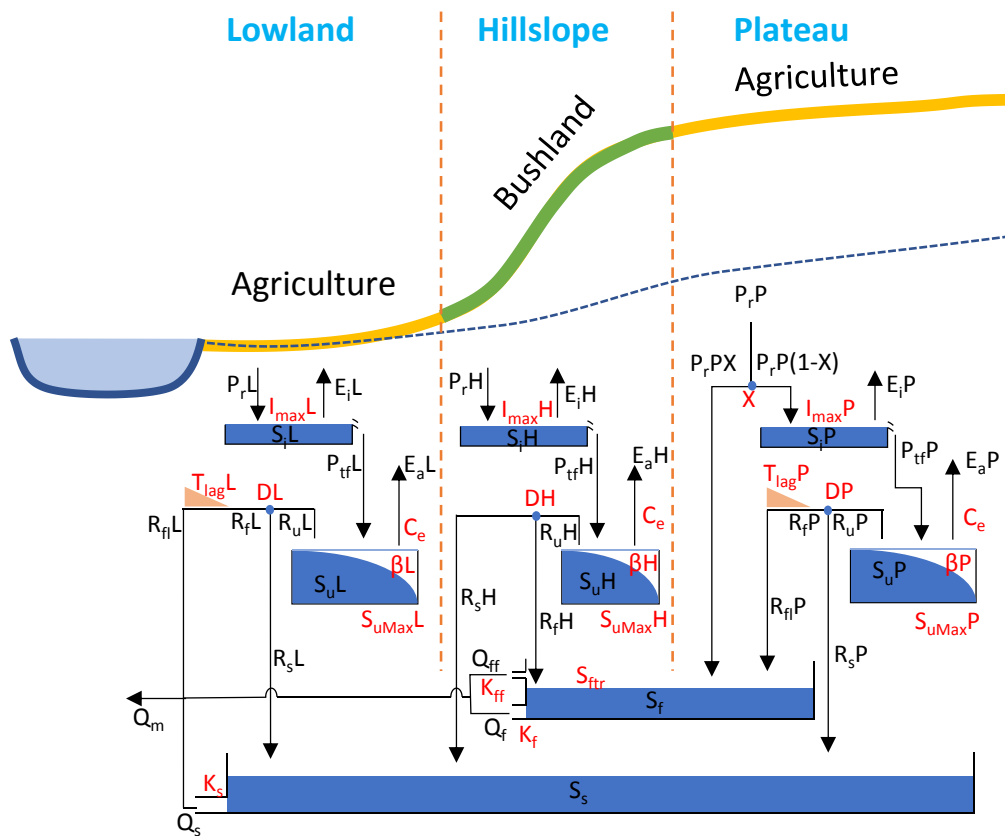
البته در حوزه آبخیز تمر، فرسایش آبکندی هم وجود دارد که در خصوص آبکندها با این استدلال که حضور آنها اغلب در توپوگرافی و مدل رقومی زمین حوزه منعکس شده و بخشی از شبکه هیدروگرافی مشخص حوزه می‌باشند بنابراین مفهوم‌سازی و پارامترسازی ویژه آنها در مدل پیشنهادی در این مرحله ضروری نیست.

مخازن مدل هیدرولوژی ویژه چشم‌انداز زمین پست حاشیه رودخانه: در این چشم‌انداز هیدرولوژی بدلیل بالا بودن سطح سفره آب زیرزمینی، بخشی از جریان خروجی از ناحیه غیراشباع از طریق مخزن آب زیرزمینی و بخشی دیگر به طور مستقیم با لحاظ یک تأخیر زمانی به رواناب سطحی (جریان رودخانه) اضافه می‌گردد. بنابراین در این چشم‌انداز بغیر از مخزن آب زیرزمینی که بین هر سه چشم‌انداز هیدرولوژی مشترک است، دو مخزن ذخیره برگابی و مخزن غیراشباع نیز در نظر گرفته می‌شود. در شکل ورودی‌ها، خروجی‌ها، ذخیره‌ها و پارامترهای این مخازن با علائم ریاضی نمایش داده شده است.

می‌شود و در آن فعالیت‌های فرسایشی پایبند مشهود و غالب است. برای مدلسازی هیدرولوژی آن مخزن ذخیره برگابی و مخزن غیراشباع در کنار مخزن سریع و آهسته که بین دو تا سه چشم‌انداز مشترک می‌باشند در نظر گرفته می‌شود. ورود مستقیم آب باران به فروچاله‌ها و تونل‌های فرسایشی و نقش ذخیره و انتقالی این بخش در ساختار مدل در نظر گرفته می‌شود. قابل ذکر است در این چشم‌انداز کشاورزی به صورت دیم است و هیچ‌گونه چاه بهره‌برداری موجود نیست.

مخازن مدل هیدرولوژی ویژه چشم‌انداز دامنه شیبدار: ویژگی‌های بارز این چشم‌انداز در حوزه تمر، شیب خیلی زیاد و پوشش گیاهی طبیعی آن (سیاه تلو، نی و عرعر) است. در این چشم‌انداز، مخزن ذخیره برگابی و مخزن غیراشباع در کنار مخزن سریع و آهسته که بین دو تا سه چشم‌انداز مشترک می‌باشند، در نظر گرفته می‌شود.

مخازن مدل هیدرولوژی ویژه چشم‌انداز فلات: این چشم‌انداز با شیب کمی که دارد اغلب زمین‌های کشاورزی (گندم، هندوانه و آفتابگردان) را شامل



شکل ۱۱- شماتیک مدل مفهومی هیدرولوژی ارائه شده به منظور لحاظ پایبند در حوزه آبخیز تمر.

Figure 11. The schematic of the hydrologic conceptual model tailored for Tamer watershed to include piping.

جمع‌بندی و پیشنهاد

در این مقاله بر پایه مدل‌های هیدرولوژی مفهومی FLEX و FLEX-Topo برای حوزه آبخیز تمر که حوزه‌ای لسی با فرسایش پایینگ و تونلی که واکنش هیدرولوژی حوزه را تحت تأثیر قرار می‌دهند یک مدل مفهومی هیدرولوژی نیمه توزیعی ارائه و تشریح گردید. با استفاده از فرمول‌ها و نمودارهای جریانی حاوی چیدمان مخازن ارائه شده در این مقاله و کدنویسی فرمول‌ها در یکی از زبان‌های برنامه‌نویسی مانند پایتون می‌توان هیدروگراف خروجی از حوزه را شبیه‌سازی نمود و آن را با هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف محاسباتی یک مدل بنچ مارک مانند FLEX مقایسه نمود.

برای لحاظ کردن تأثیر پایینگ در مدل پیشنهادی (FLEX-Topo-P) یک پارامتر مقسم بارش ورودی و یک مخزن سریع مشترک بین دو چشم‌انداز هیدرولوژی فلات و دامنه شیب‌دار پیشنهاد گردید که این می‌تواند یک سناریوی مناسب باشد و برای پژوهش عملی پس از کدنویسی مدل سناریوهای دیگری نیز قابل طراحی و آزمون است.

کسب اطلاعات از وضعیت تونل‌ها در زیرزمین و همچنین اطلاعات آب زیرزمینی و سطح سفره می‌تواند به این پژوهش و مدل‌سازی هیدرولوژی منطقه کمک فراوان کند.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان از دانشجویان متعدد گروه مدیریت مناطق بیابانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که در راستای پژوهش‌های

دانشجویی خود اطلاعات و داده‌های ارزشمندی را جمع‌آوری و مستندسازی و منتشر کرده‌اند کمال سپاس را دارند.

داده‌ها و اطلاعات

بخشی از داده‌های این مقاله مربوط به طرح‌های پژوهشی، تزه‌های دکتری و فوق‌لیسانس دانشجویان نویسنده دوم است (به‌خصوص داده‌های پژوهش دکتری نرگس کریمی‌نژاد).

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول بسط ایده، توسعه مدل، فرمولاسیون مدل هیدرولوژیک و نوشتن مقاله را بر عهده داشته‌اند و نویسنده دوم انجام تحقیقات کاربردی، برداشت‌های میدانی، مشارکت در پروراندن موضوع و اصلاح و تکمیل مقاله را انجام داده‌اند.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

به‌جز پژوهانه تحقیقاتی نویسندگان مقاله، این پژوهش تحت حمایت مالی طرح مصوبی نیست.

منابع

1. Savenije, H.H.G. 2010. HESS Opinions "Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)", *Hydrology and Earth System Sciences*, 14: 2681-2692, doi:10.5194/hess-14-2681-2010.
2. Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., and Savenije, H.H.G. 2011. Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 3275-3291, doi:10.5194/hess-15-3275-2011.
3. Bahremand, A., and Kornejady, A. 2015. Introduction and preparation of the new topo-hydrological index: height Above the Nearest Drainage, in the Ziarat watershed. Water Engineering Conference and Exhibition, Iran. 9p. (In Persian)
4. Nobre, A., Cuartas, L., Hodnett, M., Rennó, C., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., and Saleska, S. 2011. Height above the nearest drainage – a hydrologically relevant new terrain model, *Journal of Hydrology*, 404: 13-29.
5. Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Campetella, G., Jalalifard, A., and Alinejad, M. 2018. Spatial point pattern analysis of piping erosion in loess-derived soils in Golestan Province, Iran. *Geoderma*, 328: 20-29.
6. Hosseinalizadeh, M., Alinejad M., Zarei, H., and Jalalifard, A. 2019. Piping Erosion, a Threat or an Opportunity? *Journal of Land Management*. 7: 2. 165-177. doi: 10.22092/lmj.2019.120553.
7. Verachtert, E., Maetens, W., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., and Deckers, J. 2011. Soil loss rates due to piping erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 13. 1715-1725.
8. Bernatek-Jakiel, A., Kacprzak, A., and Stolarczyk, M. 2016. Impact of soil characteristics on piping activity in a mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts., Eastern Carpathians). *Catena*, 141: 117-129.
9. Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H.R., Bernatek-Jakiel, A., and Alinejad, M. 2019. GIS-based susceptibility assessment of the occurrence of gully headcuts and pipe collapses in a semi-arid environment: Golestan Province, NE Iran *Land Degradation & Development*, 30: 18. 2211-2225.
10. Zhu, T.X. 2003. Tunnel development over a 12-year period in a semi-arid catchment of the Loess Plateau, China. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28: 5. 507-525.
11. Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H.R., and Tiefenbacher, J.P. 2021. Change detection in piping, gully head forms, and mechanisms. *Catena* 206, 105550. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105550>.
12. Gao, H., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gharari, S., and Savenije H.H.G. 2014. Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the upper Heihe, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18: 1895-1915.
13. Fenicia, F., Savenije, H.H.G., Matgen, P., and Pfister, L. 2008. Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement, *Water Resources Research*, 44, W01402, doi:10.1029/2006wr005563.
14. Zhao, R.J. 1992. The xinanjiang model applied in china, *Journal of Hydrology*, 135: 371-381, doi:10.1016/0022-1694(92)90096-E.
15. Savenije, H.H.G. 1997. Determination of evaporation from a catchment water balance at a monthly time scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, 1: 93-100, doi:10.5194/hess-1-93-1997.

