

اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز استان گلستان براساس آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری

امید رحمتی^۱، ناصر طهماسبی پور^۲، حمیدرضا پورقاسمی^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۲. استادیار دانشکده کشاورزی، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۳. استادیار دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۰۸ - تاریخ تصویب: ۹۴/۰۶/۰۱)

چکیده

برنامه‌ریزی حوضه‌های آبخیز از لحاظ توسعه پایدار و مدیریت سرزمین بسیار ضروری است. بنابراین اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها و شناسایی خصوصیات مورفومتریک به‌منظور شناسایی رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز و طراحی راهبردهای مدیریتی اهمیت زیادی دارند. در این پژوهش اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز استان گلستان براساس روش ترکیبی آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری انجام گرفت. در ابتدا هشت پارامتر مورفومتریک شامل نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، ثابت نگهداشت آبراهه، فراوانی آبراهه، ضریب فرم، نرخ بافت زهکشی، نسبت ناهمواری و عدد ناهمواری به‌علت تأثیر زیاد در فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش و رسوب حوضه‌های آبخیز انتخاب شد. لایه‌های رقومی هر یک از آنها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 تهیه شد. به‌منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز، از روش نوین ترکیبی آنالیز مورفومتري و همبستگی آماری استفاده شد. ارتباط بین پارامترهای مورفومتریک و تعیین وزن تأثیر هر یک از آنها با استفاده از روش‌های همبستگی تاوی کندال و آنالیز مجموع وزنی (WSA) تحلیل شد. در نهایت شاخص اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز (SWPI) براساس روش ترکیب خطی وزنی (WLC) برای هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل، از داده‌های موقعیت سیل‌های مخرب گذشته در حوضه آبخیز گلستان استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که روش نوین اولویت‌بندی قادر به تعیین اولویت‌ترتیبی تمام زیرحوضه‌های آبخیز نبود، اما توانست زیرحوضه‌های با بیشترین اولویت، یعنی زیرحوضه‌های شماره ۳ (مادرسو)، ۱۶ و ۹ را اولویت‌دارترین زیرحوضه‌ها برای اجرای اقدامات آبخیزداری شناسایی کند.

واژه‌های کلیدی: اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، آنالیز مورفومتري، آنالیز همبستگی آماری، حوضه آبخیز گلستان.

مقدمه

زیرحوضه‌های آبخیز از لحاظ پتانسیل فرسایش خاک، تولید رسوب و تشکیل جریان‌های سطحی متفاوت‌اند. به تبع آن، هدررفت منابع آب و خاک در آنها نیز متفاوت خواهد بود [۹]. به‌طور کلی در سطح حوضه آبخیز مسائل و مشکلات متعددی وجود دارد که با فرسایش خاک و وقوع سیلاب ارتباط دارند و برای مهار هر یک از خطرهای مزبور، مدل‌ها و روش‌های مختلفی طراحی شده است. از طرف دیگر، محدودیت بودجه‌های مربوط به مدیریت منابع طبیعی موجب اجرا نشدن پروژه‌های اجرایی در تمام زیرحوضه‌ها می‌شود. بنابراین اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها به‌منظور بهبود مدیریت حوضه‌های آبخیز ضرورت می‌یابد [۵]. زهتابیان و همکاران [۵] بیان کردند که به‌دلیل وسعت زیاد حوضه‌های آبخیز و محدودیت‌های اقتصادی و اجرایی، احیای تمام زیرحوضه‌های یک حوضه آبخیز در یک پروژه هم‌زمان نه‌تنها عملی نیست، بلکه ممکن است اثرهای معکوس داشته باشد. براین اساس، اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز، تأثیر اساسی در مدیریت راهبردی و همه‌جانبه حوضه‌های آبخیز کشور خواهد داشت.

روش‌های مختلفی برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز وجود دارد. از آن جمله می‌توان به روش شاخص تولید رسوب^۱ (SYI) [۱۸]، به‌کارگیری جنبه‌های اقتصادی-اجتماعی [۱۹، ۱۳، ۸]، به‌کارگیری فاکتورهای مؤثر در ارزیابی زیست‌محیطی [۶]، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ (AHP) [۹]، مدل‌سازی پتانسیل فرسایش خاک زیرحوضه‌ها [۵] و روش‌های تلفیقی مدل‌سازی هیدرولوژیکی و سامانه اطلاعات جغرافیایی [۴، ۲، ۱] اشاره کرد. این روش‌ها اغلب نیازمند داده‌هایی با کیفیت مناسب یا اطلاعات گسترده و متنوع از حوضه آبخیزند. بنابراین استفاده از آنها در مناطقی که اطلاعات و داده‌های محدودی دارند، دشوار است.

یکی از روش‌های اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، آنالیز مورفومتری حوضه آبخیز در قالب سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) است که در نظر گرفتن پارامترهای مورفولوژیکی در فرایندهای فرسایش خاک و تشکیل رواناب در روش مذکور بسیار حائز اهمیت است. به‌کارگیری روش آنالیز مورفومتری در مناطق مواجه با کمبود داده و اطلاعات، بسیار مفید است

[۱۵]. در این روش خصوصیات فیزیوگرافیکی و مورفولوژیکی حوضه آبخیز براساس مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۳ تجزیه و تحلیل می‌شود و در نهایت اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها مشخص می‌شود [۱۰]. همچنین آنالیز همبستگی بین پارامترهای مورفومتری حوضه آبخیز موجب کاهش خطاها می‌شود [۱۵]. روش آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری نسبت به روش‌های مرسوم اولویت‌بندی حوضه‌های آبخیز مانند روش‌های فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)^۴ دارای این مزیت است که خطای ناشی از نظر کارشناسی در فرایند تعیین اولویت‌ها هیچ تأثیری ندارد. روش‌های AHP و FAHP برپایه مقایسه‌های زوجی و پرسشنامه است که بی‌تردید نظرهای کارشناسی در نتیجه اولویت‌بندی دخالت دارد و از طرفی مقایسه‌های زوجی انجام‌گرفته توسط کارشناسان به‌دلیل کامل نبودن تحقیقات در زمینه اهمیت عوامل مؤثر، فاقد مستندات علمی است. این درحالی است که در روش آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری، اولویت‌بندی براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از لایه‌های رقومی عوامل تأثیرگذار حوضه‌های آبخیز و ایجاد رابطه همبستگی بین پارامترها انجام می‌گیرد [۷]. با توجه به مشکلات اقتصادی نهادهای اجرایی و کمبود آمار و اطلاعات، ارائه یک روش نوین برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز (از لحاظ تأثیر بر رژیم سیل‌خیزی حوضه) که در طی آن به داده‌های هیدرومتری مربوط به هر زیرحوضه نیاز نباشد، دستاورد علمی مهمی است.

حوضه آبخیز گلستان به‌دلیل وقوع سیلاب‌های متعدد و هدررفت منابع آب و خاک به یکی از حوضه‌های آبخیز بحرانی کشور تبدیل شده است [۲]. در یک مطالعه، رحمتی و همکاران [۱۷] براساس داده‌های موقعیت سیلاب‌های گذشته به بررسی مناطق مستعد سیل حوضه آبخیز گلستان پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بخش وسیعی از حوضه آبخیز گلستان، مستعد سیلاب‌های خطرناک است و از لحاظ مدیریتی باید به این حوضه آبخیز توجه ویژه‌ای داشت. سفیان و همکاران [۱۹] نیز پس از ارزیابی وضعیت تغییر کاربری اراضی و شرایط هیدرولوژیک حوضه آبخیز گلستان به این نتیجه رسیدند که این حوضه حساسیت زیادی از لحاظ سیل‌خیزی دارد. از این نظر، اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز

3. Digital Elevation Model (DEM)

4. Fuzzy-Analytic Hierarchy Process (FAHP)

1. Sediment Yield Index (SYI)

2. Analytical Hierarchy Process (AHP)

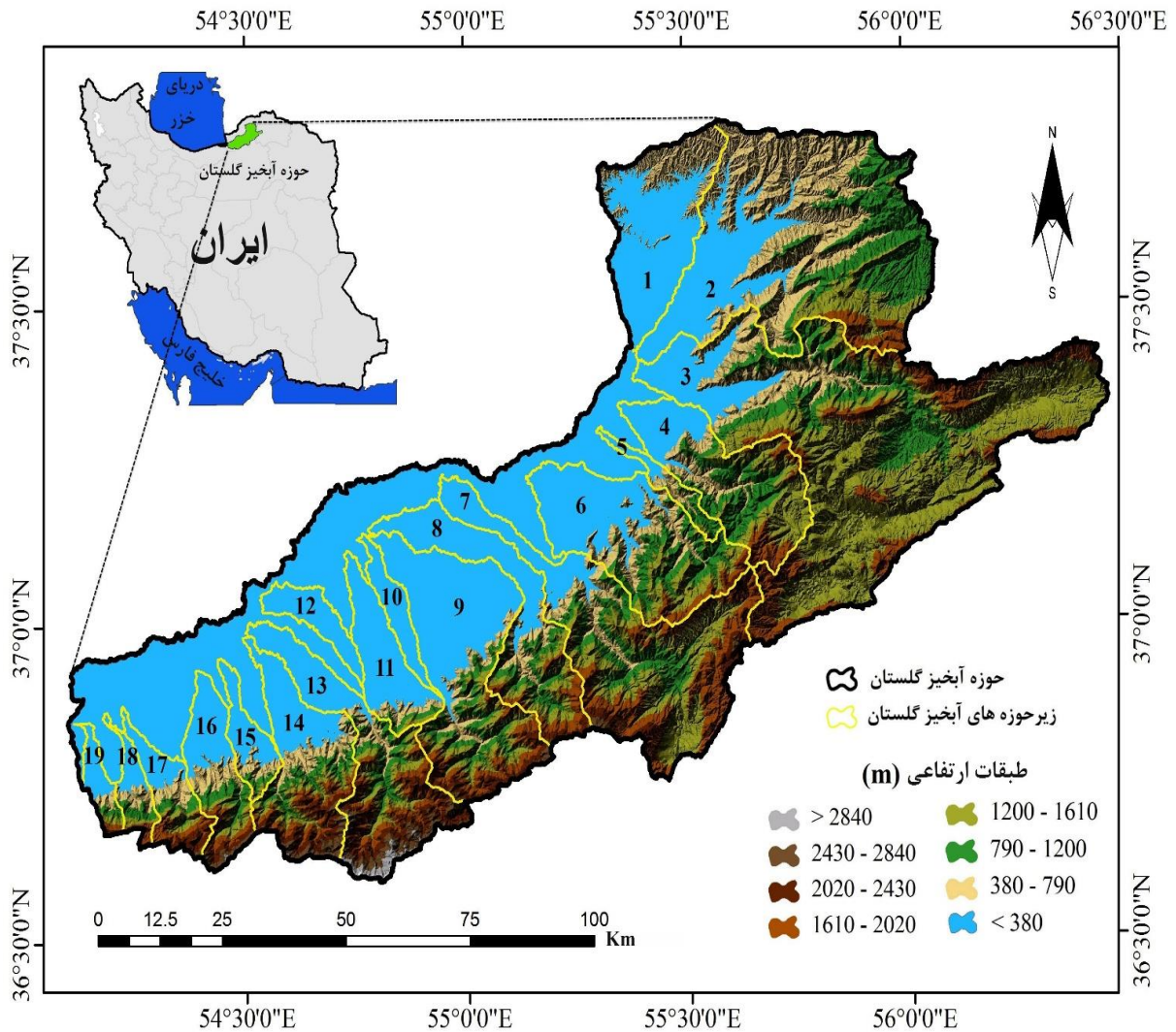
جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه آبخیز با مساحتی بیش از ۱۱۸۸۸ کیلومتر مربع، شامل دو واحد ژئومورفولوژی کوهستان و دشت‌سر است. پارک ملی گلستان در این حوضه واقع شده است که توجه به آن در پژوهش‌های مختلف حائز اهمیت است. میانگین بارندگی و دمای سالانه حوضه به ترتیب ۴۸۳/۳ میلی‌متر و ۱۷/۸ درجه سانتی‌گراد است [۲]. وقوع سیلاب‌های خطرناک یکی از ویژگی‌های اصلی این منطقه به‌شمار می‌رود. همچنین این حوضه آبخیز دارای ۱۹ زیرحوضه است.

گلستان می‌تواند در مدیریت بهتر آبخیزها و برنامه‌ریزی اجرای اقدامات آبخیزداری مؤثر باشد. از طرفی با توجه به نبود داده‌های هیدرومتری و نقشه‌های مربوط به اطلاعات خاک‌شناسی کافی برای هر زیرحوضه، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها به‌سختی امکان‌پذیر است [۱]. بدین منظور هدف اصلی پژوهش حاضر، اولویت‌بندی زیرحوضه‌های مربوط به حوضه آبخیز گلستان براساس روش نوین ترکیبی آنالیز مورفومتری و همبستگی آماری است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه تحقیق

حوضه آبخیز گلستان در شمال ایران و بین طول‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گلستان و زیرحوضه‌های آن

روش تحقیق

رابطه ۲ در نرم افزار ArcGIS 10.2 برای تمام زیرحوضه‌ها محاسبه شد.

$$C = \frac{A}{\sum_{i=1}^{i=n} L_i} \quad (2)$$

که در آن A و ΣL به ترتیب مساحت (کیلومتر مربع) و مجموع طول آبراهه‌های (کیلومتر) حوضه آبخیز است.

د فراوانی آبراهه $(F_s)^4$

فراوانی آبراهه عبارت است از نسبت تعداد آبراهه در واحد سطح حوضه آبخیز که رابطه معناداری با فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز دارد. مقدار این پارامتر براساس رابطه ۳ برای تمام زیرحوضه‌ها محاسبه شد [۷].

$$F_s = \frac{N}{A} \quad (3)$$

که در آن N و A به ترتیب تعداد آبراهه‌های موجود و مساحت حوضه آبخیز (کیلومتر مربع) است.

ه ضریب فرم $(F_f)^5$

ضریب فرم یکی از پارامترهای مهم فیزیوگرافی است که شکل حوضه آبخیز را توصیف می‌کند. همچنین ضریب فرم تأثیر مستقیمی در زمان تمرکز و سرعت انتقال جریان به خروجی حوضه آبخیز دارد. مقدار این پارامتر براساس رابطه ۴ در نرم افزار ArcGIS 10.2 برای تمام زیرحوضه‌ها محاسبه شد [۷، ۱۱].

$$F_f = \frac{A}{(L_b)^2} \quad (4)$$

که در آن A و L_b به ترتیب مساحت (کیلومتر مربع) و طول (کیلومتر) حوضه آبخیز است.

و نرخ بافت زهکشی $(R_t)^6$

نرخ بافت زهکشی یکی از پارامترهای مهم در ژئومورفولوژی کمی است که ارتباط نزدیکی با نفوذپذیری و فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز دارد. مقدار این پارامتر براساس رابطه ۵ تعیین شد [۷].

$$R_t = \frac{N_u}{P} \quad (5)$$

انتخاب پارامترهای مورفولوژی

پارامترهای مورفولوژی تأثیر مهمی در فرایندهای هیدرولوژیکی و هدررفت منابع آب و خاک حوضه آبخیز دارند که ممکن است جنبه‌های خطی یا سطحی داشته باشند. در این پژوهش ۸ پارامتر مربوط به جنبه‌های خطی، سطحی و ناهموازی حوضه آبخیز انتخاب شده که در اینجا تشریح می‌شود.

الف) نسبت انشعاب $(R_b)^1$

نسبت انشعاب یکی از عوامل مؤثر در شکل هیدروگراف حوضه‌های آبخیز به شمار می‌آید. نسبت انشعاب عبارت است از میانگین نسبت تعداد آبراهه‌های یک رده به تعداد آبراهه‌های رده بعدی حوضه آبخیز [۱۱]. بنابراین ابتدا رتبه‌بندی آبراهه با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.2 مدل رقومی ارتفاع منطقه (با قدرت تفکیک ۳۰ متر) براساس روش استراهلر انجام گرفت. در نهایت نسبت انشعاب برای ۱۹ زیرحوضه موجود محاسبه شد.

ب) تراکم زهکشی $(D_d)^2$

تراکم زهکشی برابر است با نسبت مجموع طول آبراهه‌ها به سطح حوضه آبخیز که تحت تأثیر ماهیت سنگ‌شناسی منطقه است [۱۲]. عموماً مقدار کمتر این پارامتر نشان‌دهنده نفوذپذیری زیاد، تراکم پوشش گیاهی زیاد و هموارتر بودن منطقه است. به منظور محاسبه این پارامتر برای هر زیرحوضه از رابطه ۱ در نرم افزار ArcGIS 10.2 استفاده شد.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{A} \quad (1)$$

که در آن A و ΣL به ترتیب مجموع طول آبراهه‌ها (کیلومتر) و مساحت (کیلومتر مربع) حوضه آبخیز است.

ج) ثابت نگهداشت آبراهه $(C)^3$

ثابت نگهداشت آبراهه برابر است با نسبت سطح حوضه آبخیز به مجموع طول آبراهه‌های موجود که مقدار آن منعکس‌کننده نفوذپذیری و کنترل انتقال جریان به خروجی حوضه آبخیز است [۷]. مقدار این پارامتر براساس

4. Stream frequency
5. Form factor
6. Drainage texture rate

1. Bifurcation ratio
2. Drainage density
3. Constant of channel maintenance

کرد و برای هر یک از پارامترها، وزن نسبی و بدون دخالت تصمیم‌گیرندگان (مدیران) تعریف کرد. براساس ضرایب ماتریس همبستگی، وزن هر یک از پارامترهای مورفومتری با روش آنالیز مجموع وزنی^۴ (WSA) تعیین شد. براساس رابطه^۸ وزن تأثیر (W_i) یک پارامتر عبارت است از نسبت مجموع ضرایب همبستگی آن پارامتر و مجموع کل ضرایب ماتریس همبستگی. بنابراین وزن تأثیر (W) برای تمام پارامترهای مورفومتری محاسبه شد [۷].

$$W_i = \frac{\sum C_i}{\sum T} \quad (۸)$$

که در آن $\sum C_i$ و $\sum T$ به ترتیب مجموع ضرایب همبستگی پارامتر i ام و مجموع کل ضرایب ماتریس همبستگی است. به منظور تعیین شاخص اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها^۵ (SWPI) از روش ترکیب خطی وزنی^۶ (WLC) استفاده شد. وزن‌های به دست آمده برای پارامترهای مورفومتری به عنوان متغیرهای ورودی شاخص اولویت‌بندی استفاده شده و در نهایت شاخص SWPI در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 برای هر یک از زیرحوضه‌ها براساس رابطه^۹ محاسبه شد.

$$SWPI = W_1 R_n + W_2 R_h + W_3 R_f + W_4 F_f + W_5 F_s + W_6 C + W_7 D_d + W_8 R_b \quad (۹)$$

که در آن پارامتر W_1 تا W_9 وزن تأثیر حاصل برای هر یک از پارامترهای مورفومتریک و R_n : عدد ناهمواری، R_h : نسبت ناهمواری، R_f : نرخ بافت زهکشی، F_f : ضریب فرم، F_s : فراوانی آبراهه، C : ثابت نگهداشت آبراهه، D_d : تراکم زهکشی و R_b : نسبت انشعاب است. هر چه مقدار این شاخص در یک زیرحوضه بیشتر باشد، آن زیرحوضه اولویت بیشتری برای اجرای طرح‌های مدیریتی خواهد داشت.

یافته‌ها

براساس آنالیز شبکه زهکشی در سامانه اطلاعات جغرافیایی، رده‌بندی آبراهه‌های موجود در هر زیرحوضه آبخیز انجام گرفت. همچنین متغیرهای مورفومتری نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، ثابت نگهداشت آبراهه، فراوانی آبراهه، ضریب فرم، نرخ بافت زهکشی، نسبت ناهمواری و عدد ناهمواری برای هر یک از زیرحوضه‌ها مطابق جدول ۱ محاسبه شد.

که در آن N_h و P به ترتیب تعداد آبراهه‌های رده‌های مختلف و محیط حوضه آبخیز (کیلومتر) است.

ز) نسبت ناهمواری^۱ (R_n)

نسبت ناهمواری نیز یکی از پارامترهای مهم ژئومورفولوژیکی است که ارتباط مستقیمی با درجه شیب آبراهه‌ها و سطح زمین دارد. همچنین این پارامتر به طور محسوسی بر فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش حوضه آبخیز اثر می‌گذارد [۷]. مقدار این پارامتر براساس رابطه^۶ در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 برای تمام زیرحوضه‌های منطقه محاسبه شد [۱۱].

$$R_n = \frac{\Delta H}{L_b} \quad (۶)$$

که در آن ΔH و L_b به ترتیب اختلاف ارتفاع (کیلومتر) و طول (کیلومتر) حوضه آبخیز است.

ح) عدد ناهمواری^۲ (R_n)

عدد ناهمواری یک پارامتر بی‌بعد است که منعکس‌کننده خصوصیات توپوگرافی و هیدرولوژیکی حوضه آبخیز است. مقدار این پارامتر براساس رابطه^۷ محاسبه شد [۷].

$$R_n = \Delta H \times D_d \quad (۷)$$

که متغیرهای آن پیشتر معرفی شده است.

اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها براساس روش ترکیبی آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری

پارامترهای مورفولوژیکی حوضه آبخیز در فرایندهای فرسایش خاک و تشکیل رواناب تأثیر متفاوتی دارند. بدین منظور در این پژوهش اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در قالب روشی نوین و براساس تفاوت اهمیت پارامترهای مورفولوژیکی و آنالیز همبستگی آماری بین آنها انجام گرفت.

مقدار پارامترهای مورفومتریک مزبور برای هر یک از زیرحوضه‌ها در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) محاسبه شد؛ سپس همبستگی آماری پارامترهای مورفومتری براساس روش تاوی کندال^۳ [۲۱] و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 21 انجام گرفت. براساس ماتریس همبستگی به دست آمده می‌توان ارتباط بین پارامترها را تجزیه و تحلیل

4. Weighted Sum Analysis: WSA
5. Sub-Watershed Prioritization Index
6. Weighted Linear Composite

1. Relief ratio
2. Ruggedness number
3. Kendall's tau

جدول ۳. وزن تأثیر (W_i) به‌دست آمده برای هریک از پارامترهای مورفومتری

پارامتر	نسبت انشعاب	تراکم زهکشی	ثابت نگهداشت آبراهه	فراوانی آبراهه	ضریب فرم	نرخ بافت زهکشی	نسبت ناهمواری	عدد ناهمواری
وزن تأثیر (W_j)	۰/۱۶۸	-۰/۱۹۲	۰/۰۳۱	۰/۱۲۵	۰/۲۱۸	۰/۲۰۹	۰/۲۱۱	۰/۲۳

است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که روش نوین آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری در اولویت‌بندی تمام زیرحوضه‌ها موفق نیست، ولی این روش در شناسایی زیرحوضه‌های دارای بیشترین اولویت (حادترین شرایط) دقت مناسبی دارد. دلیل این امر را می‌توان کارایی کمتر آنالیز مورفومتریک و مشخصات آبراهه‌ها در حوضه‌های آبخیز کم‌شیب عنوان کرد. همچنین دلیل دقیق برآورد نکردن اولویت برخی از زیرحوضه‌ها، در نظر نگرفتن عوامل انسانی و اجتماعی زیرحوضه‌های آبخیز است که تأثیر زیادی در فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز دارد. براساس نتایج اعتبارسنجی، زیرحوضه‌های شماره ۳ (مادرسو)، ۱۶ و ۹ دارای بیشترین اولویت‌اند که روش نوین آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری به‌درستی آنها را در بالاترین اولویت برای توجه بیشتر مدیران لحاظ کرده است.

شاخص اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها (SWPI) براساس روش ترکیب خطی وزنی (WLC) مطابق رابطه ۱۰ تعیین شد.

$$SWPI = 0.23R_n + 0.211R_h + 0.209R_t + 0.218F_f + 0.125F_s + 0.23C - 0.192D_d + 0.168R_b \quad (10)$$

در نهایت، مقدار شاخص مزبور برای هر زیرحوضه محاسبه و براساس آن اولویت‌بندی نهایی زیرحوضه‌های آبخیز گلستان انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

به‌منظور تعیین دقت روش ترکیبی آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز، از داده‌های موقعیت سیل‌های گذشته که در حوضه آبخیز گلستان اتفاق افتاده بود، استفاده شد. در این بخش مجموع تعداد نقاط سیل برای هریک از زیرحوضه‌ها به تفکیک محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده

جدول ۴. مقدار شاخص SWPI و اولویت‌بندی نهایی زیرحوضه‌ها

اولویت	SWPI	شماره زیرحوضه	اولویت	SWPI	شماره زیرحوضه
۸	۰/۹۱۶	۱۱	۱۵	۰/۷۴۲	۱
۱۸	۰/۴۶۱	۱۲	۱۰	۰/۸۹۲	۲
۵	۰/۹۶۸	۱۳	۱	۱/۱۸۲	۳
۷	۰/۹۲۸	۱۴	۱۴	۰/۷۵۳	۴
۱۶	۰/۶۹۱	۱۵	۱۲	۰/۸۱۸	۵
۲	۱/۰۳۷	۱۶	۶	۰/۹۳۸	۶
۹	۰/۹۱۵	۱۷	۴	۰/۹۸۱	۷
۱۷	۰/۶۴۰	۱۸	۱۱	۰/۸۳۹	۸
۱۳	۰/۷۸۰	۱۹	۳	۰/۹۹۷	۹
-	-	-	۱۹	۰/۴۴۷	۱۰

جدول ۵. تعداد وقایع سیل‌های بزرگ و خسارت‌آور ثبت‌شده برای هریک زیرحوضه‌های آبخیز

شماره زیرحوضه	تعداد وقایع سیل	شماره زیرحوضه	تعداد وقایع سیل
۱	۷	۱۱	۶
۲	۸	۱۲	۱
۳	۲۶	۱۳	۹
۴	۳	۱۴	۷
۵	۷	۱۵	۲
۶	۱۰	۱۶	۱۳
۷	۹	۱۷	۴
۸	۶	۱۸	۲
۹	۱۲	۱۹	۶
۱۰	۱	-	-

بحث و نتیجه‌گیری

کمبود اطلاعات و داده‌های هیدرومتری مربوط به هر زیرحوضه، همواره یکی از مشکلات اصلی تعیین اولویت سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز برای اجرای اقدامات آبخیزداری محسوب می‌شود [۲۲]. از آنجا که خصوصیات فیزیوگرافی و مورفومتری زیرحوضه‌های آبخیز تأثیر بسیار مهمی در سیل‌خیزی و رفتار هیدرولوژیکی دارد، می‌توان براساس آن به بررسی وضعیت و پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز پرداخت. بنابراین، در این پژوهش به منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز گلستان روش نوین آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری به کار گرفته شد. نتایج تحقیق نشان داد که زیرحوضه‌های شماره ۳ (مادرسو)، ۱۶ و ۹ برای اجرای اقدامات مدیریتی در بیشترین اولویت قرار دارند. به منظور اطمینان از نتایج این روش، داده‌های وقوع سیل‌های گذشته حوضه آبخیز گلستان برای اعتبارسنجی استفاده شد. براساس نتایج اعتبارسنجی (جدول ۶) می‌توان بیان کرد که اگرچه روش نوین اولویت‌بندی قادر به تعیین اولویت ترتیبی تمام زیرحوضه‌های آبخیز نبود، توانست زیرحوضه‌های با بیشترین اولویت، یعنی زیرحوضه‌های شماره ۳ (مادرسو)، ۱۶ و ۹ را اولویت‌دارترین زیرحوضه‌ها شناسایی کند. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، سه زیرحوضه مزبور به ترتیب دارای ۲۶، ۱۳ و ۱۲ سیل مخرب در دهه گذشته بوده‌اند که خسارات جانی و مالی زیادی را برجای گذاشته‌اند. با توجه به تحقیقات گذشته [۲۰، ۱۹، ۳] و آمار و اطلاعات موجود،

می‌توان به این نکته پی‌برد که زیرحوضه آبخیز شماره ۳ (مادرسو) یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های کشور است که سابقه زیادی در وقوع سیل، تلفات جانی و مالی دارد. تجزیه و تحلیل متغیرهای مورفومتری نشان داد که این زیرحوضه مستعد سیل‌های خطرناک است و باید همواره به آن توجه ویژه‌ای داشت. به‌عنوان مثال سیلاب مردادماه ۱۳۸۰ یکی از خطرناک‌ترین سیلاب‌های کشور بوده است. در راستای تأیید این اولویت‌بندی پژوهش‌های گذشته نیز بررسی شد. شریفی و همکاران [۲۰] به بررسی عوامل و تأثیر سیل‌های مهیب زیرحوضه شماره ۳ (مادرسو) پرداختند و نتایج نشان داد که این زیرحوضه دارای استعداد سیل‌خیزی زیادی بوده و نیازمند اقدامات مدیریتی فراوانی است. نتایج این پژوهش با یافته‌های ثقفیان و فرازجو [۳] که با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی و روندیابی سیل به بررسی سیل‌خیزی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز گلستان پرداختند، همخوانی دارد. نتایج ایشان نشان داد که زیرحوضه مادرسو دارای بیشترین اولویت برای اجرای اقدامات آبخیزداری است. پژوهشگرانی دیگر از جمله ثقفیان و همکاران [۱۴، ۱۶، ۱۹] نیز تأیید کردند که زیرحوضه مادرسو از لحاظ سیل‌خیزی دارای پتانسیل زیادی است. روش‌های مختلفی برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز از لحاظ سیل‌خیزی وجود دارد که می‌توان به مدل‌سازی هیدرولوژیکی، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل داده‌های رسوب خروجی از زیرحوضه‌ها اشاره کرد. روش مبتنی بر مدل‌سازی هیدرولوژیکی، توانایی

زیرحوضه‌های با بیشترین اولویت را به طور دقیق شناسایی کند. این امر را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که بخش عظیمی از پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز مربوط به وضعیت مورفومتریک حوضه آبخیز است و با بررسی دقیق آن می‌توان به نتایج قابل قبولی در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز دست یافت.

بنابراین با توجه به نتایج و موارد بحث‌شده در این پژوهش، می‌توان به این جمع‌بندی رسید که روش نوین اولویت‌بندی مبتنی بر آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری توانایی خوبی در شناسایی زیرحوضه‌های با بیشترین اولویت دارد و در شرایطی که داده‌ها و اطلاعات لازم برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز از نظر سیل‌خیزی وجود ندارد، استفاده از این روش پیشنهاد می‌شود.

در راستای تکمیل این تحقیق، موارد زیر به‌عنوان پیشنهادهای آتی، به دیگر محققان و علاقه‌مندان توصیه می‌شود:

- استفاده از شاخص‌های توپوگرافی ثانویه از جمله شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI) و شاخص موقعیت توپوگرافی^۲ (TPI) در تحلیل‌های مورفومتریک حوضه‌های آبخیز؛
- استفاده از شاخص‌های مرتبط بیان‌کننده پتانسیل فرسایش و رسوب حوضه آبخیز از جمله شاخص انتقال رسوب^۳ (STI) که براساس وضعیت مورفولوژیک زیرحوضه‌های آبخیز به‌دست می‌آید؛
- به‌کارگیری همزمان روش‌های اولویت‌بندی مبتنی بر مدلسازی هیدرولوژیک و اولویت‌بندی مبتنی بر آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر؛
- استفاده از روش‌های بهینه‌سازی اقدامات اجرایی آبخیزداری و کنترل سیلاب (مانند برنامه‌ریزی‌های خطی و غیرخطی) در تحلیل اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز؛
- در نظر گرفتن مقدار رسوب‌دهی زیرحوضه‌های آبخیز در بخش اعتبارسنجی در صورت موجود بودن داده‌های اندازه‌گیری رسوب زیرحوضه‌های آبخیز.

مناسی در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز دارد، اما این مدلسازی نیازمند اطلاعات دقیق بارندگی، شرایط هیدرولوژیکی خاک، نفوذپذیری، کاربری اراضی و داده‌های جریان ایستگاه هیدرومتری مربوط به هر یک از زیرحوضه‌های آبخیز است که محدودیت زیادی برای به‌کارگیری آن در زمینه اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها ایجاد کرده است [۴، ۳]. یکی از مزایای مهم روش نوین مطرح‌شده در این پژوهش این است که تجزیه و تحلیل‌ها براساس رابطه آماری و واقعی بین پارامترهای مورفومتریک صورت گرفته که به تبع آن خطای ناشی از مقایسه‌های نظری مدیران در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز حذف می‌شود. براین اساس اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز با دقت بیشتری انجام می‌گیرد و اولویت‌بندی‌ها به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود [۷]. این درحالی است که روش‌هایی همچون فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز دارای دخالت مستقیم تصمیم‌گیرندگان (مقایسه زوجی پارامترها) بوده که به تبع آن خطاهای زیادی در تعیین اولویت زیرحوضه‌ها ایجاد خواهد شد. همچنین روش‌های اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها برپایه وضعیت رسوب و جریان نیازمند اطلاعات و داده‌های مختلف است که در اکثر مناطق محدودیت اطلاعات وجود دارد. از طرفی برای تعیین اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز براساس روش نوین آنالیز مورفومتریک و همبستگی آماری فقط به یک لایه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) نیاز است تا سایر خصوصیات مورفومتریک با استفاده از آن تهیه شود. اگرچه عوامل مختلف فیزیوگرافی، کاربری اراضی، خاکی و هیدرولوژیکی در سیل‌خیزی حوضه‌های آبخیز تأثیر دارد، کمبود اطلاعات و داده‌های لازم برای بررسی‌های عمیق‌تر زیرحوضه‌های آبخیز مشکلی اساسی در مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود [۵، ۲، ۱]. تحلیل‌های مبتنی بر پارامترهای مورفومتریک زیرحوضه‌های آبخیز به دلیل ثابت بودن شرایط فیزیوگرافی و مورفومتریک حوضه آبخیز قابل دسترس و قابل استناد است که می‌توان براساس آن به اولویت‌بندی زیرحوضه‌های یک حوضه آبخیز پرداخت [۷]. نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه اولویت‌بندی تمام زیرحوضه‌های آبخیز (با توجه به مقایسه با وقایع سیل‌های گذشته حوضه آبخیز گلستان) به‌درستی تخمین زده نشده است، روش مطرح‌شده توانست

1. Topographic Wetness Index: TWI
2. Topographic Position Index: TPI
3. Sediment Transport Index: STI

منابع

- [9]. Chowdary, V.M., Chakraborty, D., Jeyaram, A., Krishna Murthy, Y.V.N., Sharma, J.R., Dadhwal, V.K., 2013, Multi-Criteria Decision Making Approach for Watershed Prioritization Using Analytic Hierarchy Process Technique and GIS. *Water Resource Management*, vol 27, pp. 3555-3571.
- [10]. Grohmann, C.H., 2004, Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R star. *Computer and Geoscience*, vol 30 (10), pp. 1055-1067.
- [11]. Horton, R.E., 1932, Drainage basin characteristics. *Trans. Am. Geophys. Union* vol 13, pp. 350-361.
- [12]. Horton, R.E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins; hydrological approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.* vol 56, pp. 275-370.
- [13]. Jang, T., Vellidis, G., Hyman, J.B., Brook, E., and Kurkalova, L.A., 2011, Impact of socioeconomic factors on synoptic assessment for prioritizing BMP implementation to reduce sediment load. In: ASABE Annual International Meeting Louisville, Kentucky, August, pp. 7-10.
- [14]. Javed, A., Khanday, M.Y., and Ahmed, R., 2009, Prioritization of sub-watersheds based on morphometric and land use analysis using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol 37, pp. 261-274.
- [15]. Melton, M.A., 1958, Correlations structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents. *Journal of Geology*, vol 66, pp. 442-460.
- [16]. Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C., and Billib, M., 2009. Application of the WEPP model for prioritization and evaluation of best management practices in an Indian watershed. *Hydrologic processes*, vol 23, pp. 2997-3005.
- [17]. Rahmati, O., Pourghasem, H.R., and Zeinivand, H., 2015, Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*. doi: 10.1080/10106049.2015.1041559.
- [18]. Ratnam, N.K., Srivastava, Y.K., Rao, V.V., Amminedu, E., and Murthy, K.S.R., 2005, Check dam positioning by prioritization micro-watersheds using SYI model and morphometric analysis – remote sensing and GIS perspective. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol 33 (1), pp. 25-38.
- [۱]. ایزانلو، حسن؛ مرادی، حمیدرضا؛ صادقی، سید حمیدرضا، ۱۳۸۸، مقایسه اولویت بندی زمانی سیل خیزی در دوره های هیدرولوژیکی مختلف (مطالعه موردی: زیرحوضه های آبخیز کوشک آباد خراسان رضوی)، فصلنامه پژوهش های آبخیزداری، شماره ۸۲: ۳۰-۲۱.
- [۲]. بهرامی، سید علیرضا؛ اونق، مجید؛ فرازجو، حسن، ۱۳۹۰، نقش روندیابی رودخانه در شناسایی و اولویت بندی واحدهای هیدرولوژیک حوضه سد بوستان از نظر سیل خیزی و ارائه راهکارهای مدیریتی، مجله حفاظت منابع آب و خاک، شماره ۱: ۲۷-۱۱.
- [۳]. ثقفیان، بهرام؛ فرازجو، حسن، ۱۳۸۶، تعیین مناطق مولد سیل و اولویت بندی سیل خیزی واحدهای هیدرولوژیک حوضه سد گلستان، علوم و مهندسی آبخیزداری، شماره ۱: ۱۱-۱.
- [۴]. زهتابیان، غلامرضا؛ قدوسی، جمال؛ احمدی، حسن؛ خلیلی زاده، مجتبی، ۱۳۸۸، بررسی اولویت پتانسیل سیل خیزی زیرحوضه های آبخیز و تعیین مناطق مولد سیل در آن (مطالعه موردی: حوضه آبخیز مارمه-استان فارس)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، شماره ۶: ۳۸-۲۷.
- [۵]. محمدی، علی اصغر؛ احمدی، حسن، ۱۳۹۰، اولویت بندی زیرحوضه ها جهت ارائه برنامه های احیایی آبخیزداری (مطالعه موردی: حوضه آبخیز معروف)، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، شماره ۲۹: ۷۷-۶۹.
- [6]. Adinarayana, J., Krishna, R.N., and Rao, K., 1995, An integrated approach for prioritization of watersheds. *Journal of Environmental Management*, vol 44, p. 375-384.
- [7]. Aher, P., Adinarayana, J., and Gorantiwar, S.D., 2014, Quantification of morphometric characterization and prioritization for management planning in semi-arid tropics of India: A remote sensing and GIS approach. *Journal of Hydrology*, vol 511, pp. 850-860.
- [8]. Badar, B., Romshoo, S.A., and Khan, M.A., 2013, Integrating biophysical and socioeconomic information for prioritizing watersheds in a Kashmir Himalayan lake: a remote sensing and GIS approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol 185, pp. 6419-6445.

- [19]. Saghafian, B., Farazjoo, H., Bozorgy, B., Yazdandoost, F., 2008, Flood intensification due to changes in land use. *Water Resources Management*, 22, pp. 1051-1067.
- [20]. Sharifi F., Samadi S.Z., and Wilson C., 2012, Causes and consequences of recent floods in the Golestan catchments and Caspian Sea regions of Iran. *Natural Hazards*, vol 61, pp. 533-550.
- [21]. Shieh, G.S., 1998, A weighted Kendall's tau statistic. *Statistics & Probability Letters*, vol 39(1), pp. 17-24.
- [22]. Vittala, S.S., Govindaiah, S., and Gowda, H.H., 2008, Prioritization of sub-watersheds for sustainable development and management of natural resources: an integrated approach using remote sensing, GIS and socio-economic data. *Current Science*, vol 95(3), pp. 345-354.