



سینا از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS
سال دوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۹
Vol.2, No.2, Summer 2010
۳۵-۵۴

تهیه نقشه حساسیت رانش زمین، از طریق سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی و GIS (منطقه مورد مطالعه: بخشی از استان مازندران)

محمد اصلانی*^۱، علی اصغر آل‌شیخ^۲، روزبه شاد^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی GIS، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار گروه مهندسی GIS، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۲/۱۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۶/۹

چکیده

رانش زمین از جمله بلایای طبیعی است که هر ساله خسارت‌های مالی و جانی زیادی را به بار می‌آورد. گسترش بی‌رویه شهرها سبب گشته است تا مناطق مسکونی زیادی در محل‌هایی که رانش زمین در آنها بسیار محتمل است پدیدار شوند. این گونه است که تهیه و تدوین نقشه حساسیت رانش زمین، امری بسیار ضروری برای سلامت توسعه شهرها به‌شمار می‌آید. هدف این مقاله، ارائه روشی برای استخراج دانش (توابع عضویت فازی و قوانین فازی) برای پیش‌بینی رانش زمین در بخشی از استان مازندران است. به دلیل مکانی بودن پدیده رانش زمین و همچنین وجود عدم قطعیت مکانی، از تلفیق سیستم اطلاعات مکانی (GIS) و سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی (FRBIS) استفاده شد. در این تحقیق FRBIS از طریق داده‌های آموزشی به صورت خودکار ایجاد گردید. گام نخست برای ایجاد چنین سیستمی، خوشه‌بندی داده‌هاست که بدین منظور از الگوریتم فازی C Means استفاده شده است. برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها دو شاخص ارزیابی خوشه (CVI) و سه معیار «دقت و سازگاری و کامل بودن» پیشنهاد گردید و به کار گرفته شد. در ادامه و با تصویر کردن خوشه‌ها بر روی محورهای مختصات توابع عضویت و قوانین فازی استخراج شدند. در مرحله نهایی و با افزودن دانش کارشناسی به این سیستم عملکرد سیستم بهبود یافت. دقت نقشه حساسیت رانش زمین به دست آمده از طریق سیستم پیشنهادی بیش از ۸۰ درصد است. همچنین با بررسی هیستوگرام نقشه حساسیت رانش زمین ملاحظه شد که ۱۳/۵ درصد از مساحت کل منطقه خطرپذیری بالایی دارد. با محاسبه وابستگی بین نقشه حساسیت به‌دست آمده و نقشه‌های معیار، مشخص گردید که نقشه حساسیت رانش زمین دارای بیشترین همبستگی با سه نقشه معیار سنگ‌شناسی و فاصله از جاده و نیز کاربری اراضی است.

کلیدواژه‌ها: سیستم اطلاعات مکانی، سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی، الگوریتم خوشه‌بندی فازی C Means، نقشه حساسیت رانش زمین، استان مازندران.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری. تلفن: ۸۸۷۸۶۲۱۲

۱- مقدمه

رانش زمین در زمره خطرناک‌ترین بلایای طبیعی جای می‌گیرد. در سال‌های اخیر به‌خاطر رشد بی‌رویه شهرنشینی و توسعه بی‌رویه شهرها و افزایش جنگل‌زدایی، مناطق مستعد برای رانش زمین افزایش یافته‌اند (Ercanoglu and Gokceoglu, 2004). بنابراین تعیین مناطق مستعد رانش زمین برای برنامه‌ریزی جامع شهری و همچنین شهرسازی و برنامه‌ریزی‌های اقتصادی، امری بس ضروری است.

در گذشته برای ایجاد نقشه‌های حساسیت رانش زمین از روش‌های تفسیر بصری عکس‌های هوایی، نقشه‌های موضوعی و هم‌پوشانی آنها استفاده می‌شد، که زمان‌بر و پرخا و در عین حال غیراقتصادی بودند. امروزه به دلیل در دسترس بودن حجم عظیمی از داده‌های سنجش از دور و همچنین داده‌های رقومی مختلف و توانایی آنالیز آنها در محیط GIS، این امکان فراهم آمده است که بتوان نقشه‌های مختلف تأثیرگذار در رانش زمین را آنالیز کرد و به نقشه‌های حساسیت رانش زمین دست یافت (Saha et al., 2002). فناوری‌هایی که امروزه برای تولید نقشه حساسیت رانش زمین به کار می‌روند در دو گروه عمده روش‌های کیفی و روش‌های کمی قرار می‌گیرند (Guzzetti et al., 1999). روش‌های موجود در گروه نخست بر مبنای دانش کارشناسی‌اند. در این روش‌ها نقشه‌های معیار براساس تجربیات و دانش کارشناسان وزن‌دهی می‌شود و از طریق فرایندهایی چون هم‌پوشانی و عملگرهای فازی تلفیق می‌گردند. روش‌های موجود در گروه دوم که در دهه‌های اخیر و به‌خاطر گسترش کامپیوتر رواج یافته‌اند، بیشتر به داده‌ها وابسته‌اند و در آنها بهره‌چندانی از دیدگاه‌های کارشناسان برده نمی‌شود (Rakei, 2007). موفقیت این روش‌ها بستگی به تعداد و نیز کیفیت و اعتمادپذیری داده‌ها دارد. هر کدام از این روش‌ها به هر حال مزایا و معایب خاص خود را دارند (Aleotti and Chowdhury, 1999). عمده‌ترین چارچوب‌های ریاضی استفاده شده برای مدل‌سازی‌های

کمی عبارت‌اند از: نظریه احتمالات (Gorsevski et al., 2006)، محاسبات نرم^۱ همچون تئوری مجموعه‌های فازی و شبکه‌های عصبی (Tangestani, 2004; Fatemi Aghda, 2005; Tangestani, 2009; Vahidnia et al., 2009; Wang et al., 2009)، نظریه شواهد دمیستر - شافر^۲ (Tangestani, 2009)، مدل‌های قطعی^۳ (Casini et al., 1991) و مدل‌های آماری (Alberto et al., 2003; Fatemi Aghda, 2003). یکی از روش‌های به کار رفته برای مدل‌سازی کمی، منطق فازی است (Zadeh, 1965). در سال‌های اخیر مدل‌سازی فازی برای فرایندهای پیچیده‌ای چون رانش زمین با عملکرد بسیار موفق همراه بوده‌اند (Vahidnia et al., 2010). ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ نقشه حساسیت رانش زمین را با استفاده از منطق فازی برای نواحی اطراف شهر گایزو در چین تهیه کردند. در تحقیق آنان دیدگاه‌های کارشناسان درباره اهمیت نسبی لایه‌های اطلاعاتی در قالب اعداد دوزنقه‌ای فازی بیان شدند. این اعداد فازی به اعداد غیرفازی بدل گردیدند و به‌وسیله مدلی خطی با یکدیگر ادغام گشتند. عدم استفاده از اعداد فازی برای تلفیق لایه‌های مکانی در تحقیق آنان سبب مدل‌سازی ناقص عدم قطعیت و کاهش دقت شده است. از روش‌های متداول برای مدل‌سازی عدم قطعیت، استفاده از سیستم استنتاج فازی است. تاکاگی - سوچینو (Takagi and Sugeno, 1985) و ممدانی (Mamadani, 1974) دو نوع از مشهورترین سیستم‌های استنتاج فازی هستند. از مزایای برجسته سیستم‌های استنتاج فازی، انعطاف‌پذیری زیادشان، سادگی در فهم قوانین و تغییر و توسعه آنهاست (Cordón et al., 2001). فاطمی عقدا و همکاران (۲۰۰۵) با به‌کارگیری سیستم استنتاج فازی که در آن توابع عضویت و قوانین فازی به صورت غیرخودکار و از طریق مصاحبه با کارشناس ایجاد می‌شوند، نقشه پتانسیل خطر

1. Soft Computing
2. Dempster-Shafer Evidential
3. Deterministic Models

قائم‌شهر، طالع رودبار، فیل‌بند، آلاشت، کیاده، ورسک و سفیدار گله است. منطقه مورد مطالعه مساحتی در حدود ۲۹۳۸ کیلومتر مربع دارد. مقیاس نقشه‌های به کار رفته در این مقاله ۱:۱۰۰,۰۰۰ است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و موقعیت ۱۲۹ رانش زمین را نشان می‌دهد. میانگین میزان بارش در نزدیک‌ترین ایستگاه باران‌سنجی به منطقه مورد مطالعه (قائم‌شهر) در بین سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۵۹، ۷۳۳/۵ میلیمتر است. حداکثر و حداقل ارتفاع منطقه به ترتیب ۲۹۶۵ و ۴۷ متر، و حداکثر شیب منطقه در حدود 63° است. گفتنی است ۵۱ درصد منطقه دارای شیبی بین 15°- و ۴۲ درصد منطقه نیز دارای شیبی بیشتر از 30° است. مهم‌ترین واحدهای کاربری زمین در منطقه مطالعاتی عبارت‌اند از: جنگل‌ها با تراکم‌های مختلف، زمین کشاورزی و باغ و یا ترکیبی از این واحدها. مهم‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی در این منطقه سنگ آهک، دولومیت، سنگ‌های سیلیتی^۲، سنگ‌های ماسه‌ای، آهکی رسی، توف و یا ترکیبی از موارد مذکور است. تغییرات بالای شیب و بارندگی‌های شدید و مقاومت پایین خاک در برخی مناطق، سبب ایجاد ناپایداری‌ها و در نتیجه رانش در این منطقه می‌گردد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

با بررسی ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، داده‌های موجود، دیدگاه‌های کارشناسان و مطالعات پیشین، ۸ معیار مؤثر در رانش زمین مشخص شدند: ۱- شیب؛ ۲- جهت شیب؛ ۳- انحنای^۳ (مشخص‌کننده مقعر و محدب بودن سطح، (شکل ۲))؛ ۴- سنگ‌شناسی؛ ۵- فاصله از رودخانه‌ها و آبراهه‌ها؛ ۶- پوشش و کاربری اراضی؛ ۷- فاصله از گسل؛ و ۸- فاصله از جاده‌ها.

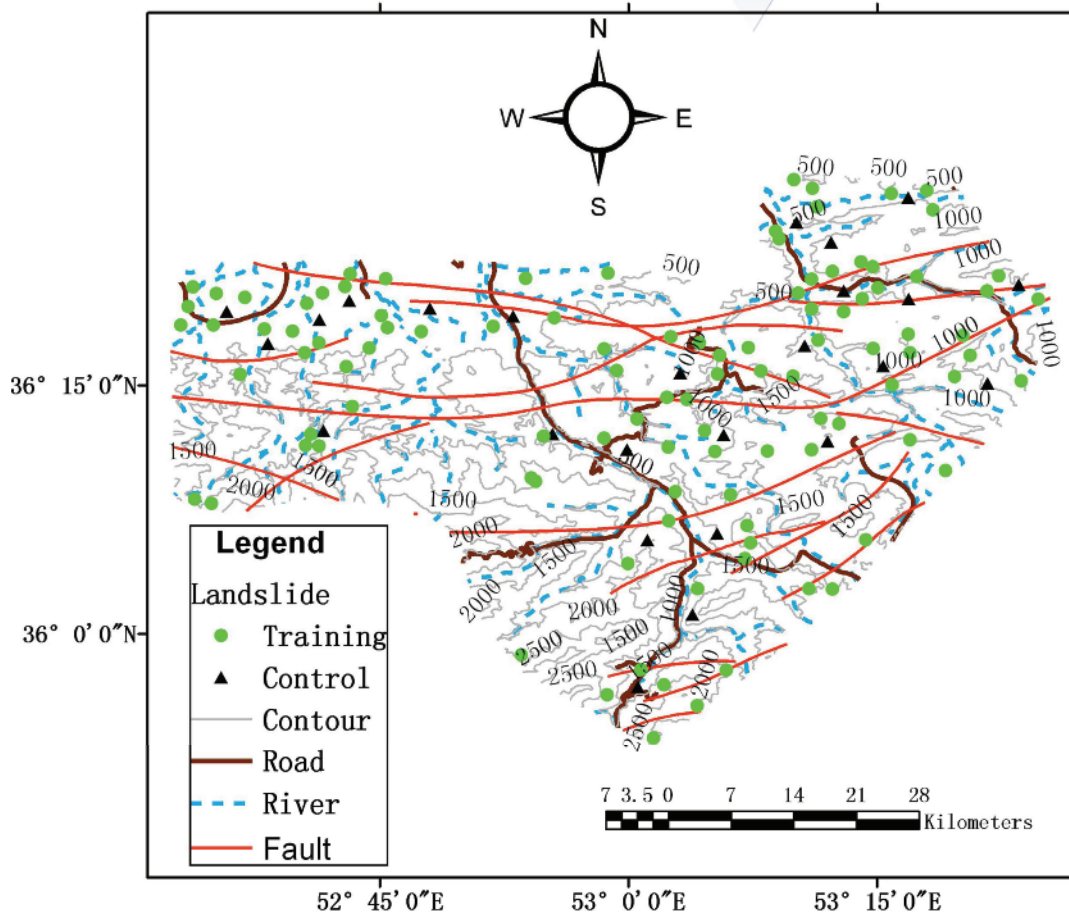
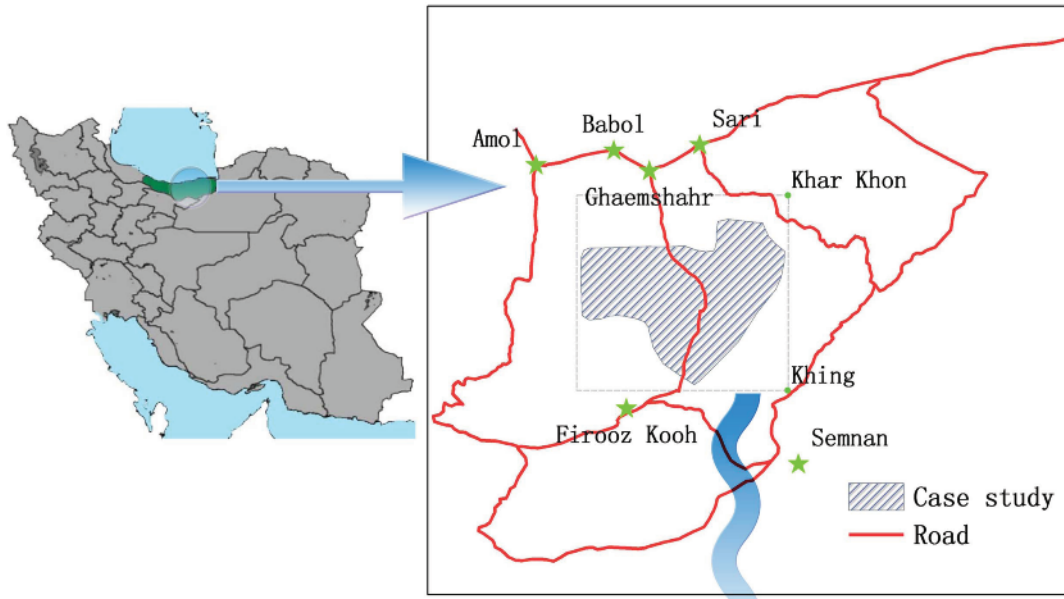
زمین‌لغزش را در منطقه رودبار تهیه کردند. از آنجا که ایجاد سیستم استنتاج فازی به صورت غیرخودکار وقت‌گیر و دشوار است و غالباً به نتایج پذیرفتنی و معقولی نمی‌انجامد، به روشی نیاز است که بتوان با آن توابع عضویت و قوانین فازی را به صورت خودکار استخراج کرد. سیزر و همکاران (۲۰۱۰) از شبکه عصبی برای استخراج خودکار توابع عضویت و قوانین فازی استفاده کردند. آنان سیستم پیشنهادی را - که از تلفیق سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی تشکیل شده بود - برای ایجاد نقشه حساسیت رانش زمین در یکی از شهرهای مالزی به کار بردند. پیچیدگی‌های فراوان در طراحی این سیستم، از جمله معایب آن به شمار می‌آید. در مقاله حاضر با استفاده از خوشه‌بندی فازی - و به طور مشخص فازی C Means - توابع عضویت و قوانین «اگر - آن‌گاه» فازی به طور خودکار استخراج شدند. در الگوریتم فازی C Means تعداد بهینه خوشه‌ها بایستی معرفی گردند. روابط ریاضی شناسایی تعداد خوشه‌ها را شاخص ارزیابی خوشه‌ها^۱ می‌نامند (Ramze Rezaee et al., 1998). برای ارزیابی نحوه عملکرد سیستم‌های استنتاج فازی ایجاد شده از طریق خوشه‌بندی، از این سه معیار استفاده شد: کامل بودن، سازگاری و دقت (Yaochu et al., 1999). از آنجا که ممکن است تعداد داده‌های موجود در مورد رانش زمین کافی نباشد، چه بسا سیستم استنتاج فازی ایجاد شده بر پایه داده‌های موجود نیز عملکرد مناسبی نداشته باشد. بنابراین با تبدیل معلومات کارشناسان به توابع عضویت و قوانین فازی عملکرد سیستم فازی در پیش‌بینی رانش زمین اصلاح شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از استان مازندران با طول جغرافیایی 26'53° - 31'52° و عرض جغرافیایی 28'36° - 52'35° واقع در شمال ایران است. محدوده مذکور شامل مناطق پهنه کلا، سادات‌محله، درازکلا،

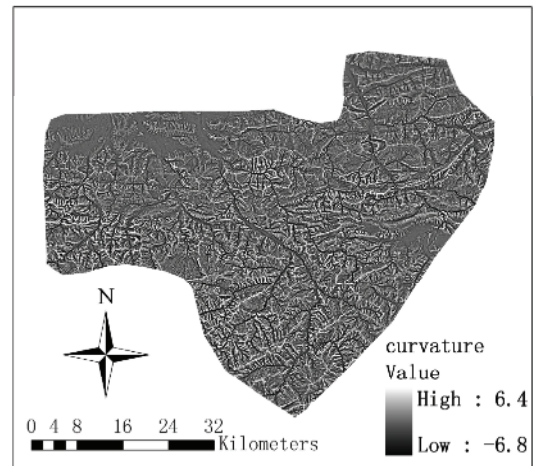
1. Cluster Validity Index
2. Siltstone
3. Curvature



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

تهیه نقشه حساسیت رانش زمین، از طریق سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی و GIS (منطقه مورد مطالعه: بخشی از استان مازندران)

برای ایجاد نقشه‌های فاکتور شیب و نیز جهت شیب و انحنای زمین، از نقشه مدل ارتفاعی رقومی زمین^۱ با دقت ارتفاعی ده متر استفاده شد. برای ایجاد نقشه‌های فاکتور فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و فاصله از جاده نیز نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی رودخانه و گسل و جاده مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی نقشه‌های اولیه از پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور (NGDIR, 2008) تهیه شدند. جدول ۱ تمام داده‌های استفاده‌شده را همراه با مقیاس و نوع روش تهیه آنها از روی نقشه‌های اولیه نشان می‌دهد.



شکل ۲. نقشه انحنای

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده تحقیق و خصوصیات آنها

نقشه‌های اولیه	مقیاس	نوع داده	مرجع داده	نقشه فاکتور (نقشه مشتق شده)	نوع داده	روش تهیه نقشه فاکتور از داده اولیه
کاربری اراضی	$\frac{1}{100000}$	برداری (پلی‌گون)	NGDIR	کاربری اراضی	رستر	به‌کارگیری تابع تبدیل بردار به رستر
سنگ‌شناسی	$\frac{1}{100000}$	برداری (پلی‌گون)	NGDIR	سنگ‌شناسی	رستر	به‌کارگیری تابع تبدیل بردار به رستر
رودخانه، آبراهه	$\frac{1}{100000}$	برداری (خطی)	NGDIR	فاصله از رودخانه	رستر	به‌کارگیری تابع فاصله اقلیدسی
گسل	$\frac{1}{100000}$	برداری (خطی)	NGDIR	فاصله از گسل	رستر	به‌کارگیری تابع فاصله اقلیدسی
جاده اصلی	$\frac{1}{100000}$	برداری (خطی)	NGDIR	فاصله از جاده	رستر	به‌کارگیری تابع فاصله اقلیدسی
رانش زمین	$\frac{1}{100000}$	برداری (نقطه‌ای)	NGDIR	-	-	-
مدل ارتفاعی رقومی زمین	دقت ارتفاعی ۱۰ متر	رستر	NGDIR	شیب	رستر	به‌کارگیری تابع مشتق اول ارتفاع
				جهت شیب	رستر	به‌کارگیری تابع جهت بزرگترین شیب
				انحنای	رستر	به‌کارگیری تابع مشتق دوم ارتفاع

1. Digital Elevation Model

جدول ۲. وزن کلاس‌های مختلف در نقشه کاربری اراضی

نقشه فاکتور	کلاس	وزن
کاربری اراضی	منطقه آبی	۱۰۰
	شهری	۹۰
	جنگلی با تراکم فشرده	۸۰
	جنگلی با تراکم متوسط	۷۰
	مزرعه چای	۶۰
	باغ	۵۰
	کشاورزی	۴۰
	مخلوط (باغ- جنگلی با تراکم متوسط)	۳۰
	جنگلی با تراکم کم	۲۰
	زمین بایر	۱۰
سایر کاربری‌ها	۰	

۲-۳- روش مطالعه

شکل ۳ مراحل انجام کار این تحقیق را به طور جامع نشان می‌دهد. مراحل ۱ تا ۷ مربوط به آماده‌سازی داده‌ها هستند که در بخش‌های ۱-۲ و ۲-۲ شرح داده شده‌اند. مراحل ۸ تا ۱۲ به طراحی و آماده‌سازی سیستم استنتاج فازی مربوط می‌شوند. مرحله ۱۳ به کارگیری سیستم استنتاج فازی برای تولید نقشه حساسیت رانش زمین است.

۲-۳-۱- شاخص‌های ارزیابی خوشه‌ها^۲ برای

الگوریتم فازی C Means^۳

فازی C Means از روش‌های رایج خوشه‌بندی فازی غیرنظارت‌شده است (Bezdek, 1981). ورودی اصلی الگوریتم فازی C Means، تعداد خوشه‌ها (C) است که

با توجه به اینکه لایه‌های معیار مربوط به کاربری زمین و جنس سنگ ماهیت معنایی و اسمی^۱ دارند، با استفاده از دیدگاه‌های کارشناسی رتبه‌بندی شدند. در گام بعدی مقادیر تمام نقشه‌های فاکتور بین ۰ تا ۱۰۰ نرمال گشتند. به عنوان نمونه، جدول ۲ وزن نسبت داده‌شده به تمامی کلاس‌های نقشه معیار کاربری اراضی را نشان می‌دهد. مقادیر نقشه‌های فاکتور در محل‌های رانش زمین به عنوان ورودی‌ها در نظر گرفته شدند، و میزان شدت رانش به عنوان خروجی‌های نقشه. بدین ترتیب، این تحقیق شامل ۱۲۹ بردار با ۸ مؤلفه به عنوان ورودی، و یک مؤلفه به عنوان خروجی است. از میان ۱۲۹ داده رانش زمین، ۲۵ داده به عنوان نقاط کنترل (نقاطی که برای کنترل نتایج به کار می‌روند) و بقیه به عنوان داده‌های آموزشی (که برای آموزش سیستم به کار می‌روند) مورد استفاده قرار گرفتند.

1. Nominal

2. Cluster Validity Index

3. Fuzzy C Mean Clustering

رابطه (۱)

$$V_{XB} = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n \mu_{ij} \|x_j - v_i\|^2}{n(\min_{i \neq k} \|v_i - v_k\|^2)}$$

در رابطه مذکور μ_{ij} نشان‌دهنده درجه عضویت

نقطه x_j زام به خوشه v_i است؛ و $\|x_j - v_i\|$ نرم

اقلیدسی بین x_j و v_i است. c_{max} بیشترین میزان

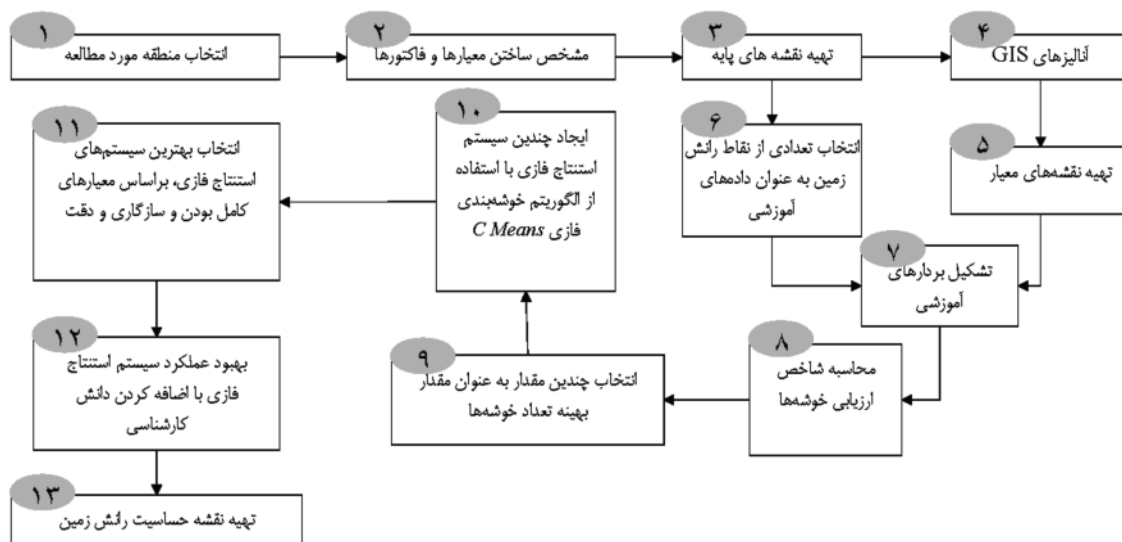
تعداد خوشه‌هاست که معمولاً $c_{max} \leq \sqrt{n}$ انتخاب

می‌گردد (Pakhira et al., 2004).

رابطه نزدیکی با تعداد قوانین و دقت مدل‌سازی سیستم استنتاج فازی دارد و برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها از شاخص‌های ارزیابی خوشه‌ها (CVI) استفاده می‌شود (Ramze Rezaee et al., 1998).

زی و بنی (Xie and Beni, 1991) برای نخستین بار شاخص ارزیابی V_{XB} را، که بر دو ویژگی فشردگی^۱ و تفکیک^۲ خوشه‌ها استوار است، معرفی کردند. فشردگی در واقع شاخصی برای ارزیابی پراکندگی داده‌های داخل هر خوشه است، و تفکیک نیز شاخصی برای اندازه‌گیری جدایی خوشه‌هاست (رابطه ۱).

در رابطه (۱) صورت کسر نشان‌دهنده فشردگی و مخرج کسر تفکیک بین خوشه‌ها را نشان می‌دهد. از این رو تعداد بهینه خوشه‌ها با مینیمم‌سازی V_{XB} برای $C = 2, 3, \dots, c_{max}$ به دست می‌آید.



شکل ۳. مراحل اجرایی به کار رفته در این تحقیق

1. Compactness
2. Separation

قاعده‌مبنای فازی ممدانی از پرکاربردترین سیستم‌های استنتاج است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. این سیستم از ۴ جزء اصلی تشکیل یافته است (شکل ۴) (Cordón et al., 2001):

الف) واسط فازی‌ساز؛ ب) پایگاه دانش؛ ج) سیستم استنتاج؛ و د) واسط غیرفازی‌ساز.

واسط فازی‌ساز: واسط فازی‌ساز دارای تابعی است که داده‌های غیرفازی را به مقادیر فازی تبدیل می‌کند (Wang, 1996).

پایگاه دانش: پایگاه دانش از دو جزء تشکیل شده است: پایگاه داده، و پایگاه قوانین. پایگاه داده شامل مجموعه گزاره‌های^۱ زبانی به کار رفته در قوانین و توابع عضویت است، و پایگاه قوانین مجموعه قوانین زبانی «اگر - آن‌گاه» را در بر می‌گیرد (Ross, 2004).

سیستم استنتاج: وظیفه سیستم استنتاج محاسبه خروجی فازی از روی ورودی‌های فازی و براساس قوانین تعریف‌شده است (Wang, 1996).

واسط غیرفازی‌ساز: غیرفازی‌سازی فرایند تبدیل خروجی فازی به مقدار بهینه غیرفازی است. روش‌های مختلفی برای غیرفازی‌سازی وجود دارند که در این تحقیق، غیرفازی‌ساز مرکز ثقل (Al-Jarrah and Abu-Qdais, 2006) - که در آن تأثیر تمام قوانین به گونه‌ای متناسب در نظر گرفته می‌شود - به کار رفته است.

کوان (Kwon, 1998) با اضافه کردن تابع جریمه به شاخص ارزیابی مطرح و پیشنهادشده زی و بنی، به حذف کاهش یکنواخت V_{XB} در زمانی که تعداد خوشه‌ها به تعداد داده‌ها نزدیک می‌شوند پرداخت. در رابطه (۲) کمترین مقدار V_K برای $C = 2, 3, \dots, c_{max}$ متناظر با تعداد بهینه خوشه‌ها ارائه شده است.

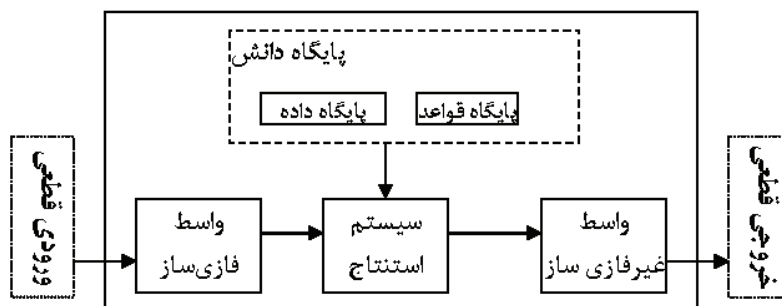
رابطه (۲)

$$V_K = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ij}^2 \|x_j - v_i\|^2 + \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \|v_i - \bar{v}\|^2}{\min_{i \neq k} \|v_i - v_k\|^2}$$

در آن، \bar{v} میانگین مرکز خوشه‌هاست. در این تحقیق، $c_{max} = 10$ انتخاب گردید و مقادیر V_{XB} و V_K به ازای $C = 7, 8, 10$ بسیار بزرگ بوده است؛ و بنابراین می‌توان گفت که مقدار بهینه C را هیچ‌گاه نمی‌توان از میان مقادیر پیش‌گفته برگزید.

۲-۳-۲- سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی

سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی، روشی برای ساختن مدل‌های کیفی از دانش بشری با توانایی محاسبه بدون استفاده از محاسبات کمی است. سیستم استنتاج



شکل ۴. ساختار سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی (ممدانی)

منبع: Cordón et al., 2001

صورتی که توزیع داده‌ها بی‌قاعده باشد، توابع عضویت نیز غیرواقعی و سیستم استنتاج فازی به‌دست آمده هم ناکامل و ناسازگار خواهد بود.

۲-۳-۴- ارزیابی سیستم‌های استنتاج فازی براساس این معیارها: کامل بودن، سازگاری، و دقت

سیستم‌های قاعده‌مبنای استنتاج فازی باید تا حد ممکن کامل و در عین حال سازگار و بادقت باشند (Cordón et al., 2001). چنانچه سیستم استنتاج فازی شرط نخست را داشته باشد، این سیستم دارای مفهوم فیزیکی خواهد بود. اعمال شرط دوم زمانی ضروری است که تعداد متغیرهای موجود در سیستم فازی زیاد باشند. معمولاً سیستم‌های فازی که براساس ورودی‌ها و خروجی‌ها ایجاد می‌شوند، معیارهای مذکور را به‌طور کامل ندارند؛ اما می‌توان از معیارهای یادشده برای ارزیابی سیستم‌های استنتاج فازی (حاصل از اعمال مقادیر متفاوت C) استفاده کرد.

برای مدل‌سازی کامل بودن، در این مقاله از شاخص شباهت فازی $S(A,B)$ برای دو مجموعه A و B استفاده شده است (Yaochu et al., 1999).

رابطه (۳)

$$S(A,B) = \frac{M(A \cap B)}{M(A \cup B)} \quad \text{و} \quad M(A) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x) dx$$

که در آن متغیر ورودی X به‌وسیله m تابع تعلق فازی $A_1(x), A_2(x), \dots, A_m(x)$ نمایش داده می‌شود. اگر شاخص شباهت فازی دو مجموعه فازی مجاور، صفر (یا نزدیک به صفر) باشد آن‌گاه دو مجموعه فازی ناکامل‌اند و یا هم‌پوشانی و اشتراک کافی ندارند. بالا بودن شاخص شباهت دو مجموعه فازی نشان‌دهنده

در اکثر سیستم‌های استنتاج قاعده‌مبنای فازی ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی را کارشناس تعیین می‌کند. البته معمولاً کارشناس نمی‌تواند تمامی قوانین را به‌گونه‌ای ساختاریافته بیان کند. به‌علاوه، برای بسیاری از کاربردها امکان دسترسی به کارشناس وجود ندارد. بدین ترتیب، استخراج خودکار توابع عضویت و قوانین فازی از طریق خوشه‌بندی می‌تواند پاسخگوی مشکلاتی از این دست باشد (Sugeno and Wang, 1993; Yasukawa, 1993).

۲-۳-۳- ایجاد سیستم استنتاج فازی با استفاده از خوشه‌بندی فازی C Means

با داشتن مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی و خوشه‌بندی آنها می‌توان سیستم استنتاج فازی را به صورت خودکار ایجاد کرد. با توجه به ماهیت این تحقیق، که تنها خروجی سیستم در آن شدت رانش زمین است، از مدل‌سازی فازی با به‌کارگیری چندین ورودی^۱ و یک خروجی استفاده شد. در این نوع مدل‌سازی X بردار داده‌های ورودی با بُعد P است، Y بردار داده‌های خروجی با بُعد ۱، و n نیز تعداد داده‌های آموزشی است. چنانچه داده‌های ورودی و خروجی با یکدیگر ادغام شوند، بُعد بردار حاصل $p+1$ (X^*) خواهد شد.

با انجام خوشه‌بندی بر روی X^* هر بردار، داده‌های ورودی و خروجی x_i^* با درجه‌ای از عضویت متعلق به هر یک از خوشه‌های فازی خواهد بود. با تصویر کردن هر خوشه بر روی محورهای مختصات می‌توان به توابع فازی مورد نظر دست یافت. در این روش هر خوشه به دست آمده به عنوان یک قانون فازی که فضای ورودی را به فضای خروجی مرتبط می‌کند در نظر گرفته می‌شود.

توابع عضویت از طریق خوشه‌بندی به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که تا حد ممکن بر داده‌های موجود برازش یابند. از این رو توزیع توابع عضویت به‌دست آمده، بر طبق توزیع داده‌های آموزشی است. حال در

$$SRP(i, k) = \min_{j=1}^n S(A_{ij}, A_{kj})$$

$$SRC(i, k) = S(B_i, B_k)$$

که در آن (SRP) و (SRC) به ترتیب دو شاخص شباهت مقدم قوانین^۱ و شباهت قسمت تالی قوانین^۲، و n تعداد متغیرهای ورودی است. اگر قوانین دارای بخش مقدم و تالی یکسان باشند، درجه سازگاری به یک نزدیک خواهد شد. ناسازگاری پایگاه قوانین طبق این روابط محاسبه می‌شود:

رابطه (۶)

$$f_{Incons} = \sum_{i=1}^N Incons(i)$$

و

$$Incons(i) = \sum_{k=1, k \neq i}^N [1 - cons(R(i), R(k))]$$

که در روابط مذکور N تعداد قوانین، f_{Incons} درجه ناسازگاری قانون نام در پایگاه قوانین و f_{Incons} درجه ناسازگاری پایگاه قوانین است. برای محاسبه دقت نیز از رابطه (۷) استفاده گردید.

$$MSE = \sqrt{\sum_{i=1}^k (y_{oi} - y_{ci})^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه مذکور k تعداد داده‌های آموزشی، y_{ci} خروجی سیستم استنتاج قاعده مبنای فازی برای آامین داده (آموزشی و یا کنترل) و y_{oi} خروجی مورد انتظار است.

هم‌پوشانی و یا اشتراک بالای آنهاست. لذا مقدار $S(A, B)$ نباید خیلی بزرگ و یا خیلی کوچک انتخاب گردد. بنابراین نیاز است که دو حد بالا (UB) و پایین (LB) برای شاخص شباهت فازی مد نظر قرار گیرد تا بتوان میزان تمایزپذیری و هم‌پوشانی توابع عضویت فازی را کنترل کرد (رابطه ۴).

رابطه (۴)

$$LB \leq S(A_i, A_{i+1}) \leq UB$$

اگر شاخص شباهت فازی به دست آمده خارج از محدوده مذکور باشد، مقداری به عنوان جریمه برای سیستم استنتاج فازی در نظر گرفته می‌شود. مقدار جریمه نهایی از مجموع تمام مقادیر جریمه جزئی برای هر دو تابع فازی مجاور به دست می‌آید. در صورتی که قسمت‌های مقدم بسیار شبیه باشند ولی قسمت‌های تالی متفاوت، آن‌گاه قوانین فازی موجود در پایگاه قوانین ناسازگارند. برای دو قانون R_k ، R_i ، این روابط برقرار است:

$$R_i : \text{If } (x_1, A_{i1}(x_1)) \dots \text{And } x_n, A_{in}(x_n))$$

$$\text{Then } y, B_i(y)$$

$$R_k : \text{If } (x_1, A_{k1}(x_1)) \dots \text{And } x_n, A_{kn}(x_n))$$

$$\text{Then } y, B_k(y)$$

سازگاری دو قانون $R(k)$ و $R(i)$ را رابطه‌ای که در پی می‌آید تعریف می‌کند (Yaochu et al., 1999):

رابطه (۵)

$$Cons(R(i), R(k)) = \exp \left\{ - \frac{\left(\frac{SRP(i, k)}{SRC(i, k)} - 1 \right)^2}{\left(\frac{1}{SRP(i, k)} \right)^2} \right\}$$

1. Similarity of Rule Premise
2. Similarity of Rule Consequent

۲-۳-۵- بهبود عملکرد سیستم استنتاج فازی،

با اضافه کردن دانش کارشناس

سیستم استنتاج فازی‌ای که فقط با به‌کارگیری داده‌های رانش زمین ایجاد شده است، چه‌بسا توانایی کافی برای پیش‌بینی رانش زمین در سایر نقاط را نداشته باشد، زیرا تعداد و پراکندگی داده‌های موجود در مورد رانش زمین همواره لزوماً کافی و مناسب نیستند. بهترین راه‌حل برای این مشکل استفاده از دانش کارشناسی است. به عبارت دیگر، با تبدیل دانش کارشناسی به توابع عضویت و قوانین فازی می‌توان پایگاه دانش سیستم استنتاج فازی را کامل‌تر کرد و در نتیجه عملکرد آن را بهبود بخشید.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج به‌کارگیری شاخص‌های ارزیابی خوشه‌ها

در حالت بهینه رابطه بین تعداد خوشه‌ها و داده‌ها به صورت $k \leq \sqrt{n}$ است که در آن k تعداد خوشه‌ها و n تعداد داده‌هاست (Pakhira et al., 2004). با توجه به اینکه در این مقاله از ۱۰۴ داده آموزشی استفاده شده است، بنابراین حداکثر تعداد بهینه خوشه‌ها می‌تواند

۱۰ باشد. از دو شاخص اعتبار V_{XB} و V_K (روابط ۱ و ۲) به‌منظور تعیین بهینه تعداد خوشه‌ها استفاده شد. جدول ۳ مقادیر شاخص‌ها را به ازای تعداد مختلف خوشه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول می‌توان دریافت، مقادیر ۱۰ و ۹ و ۷ C بیشترین شاخص‌های اعتبار را تولید می‌کنند، بنابراین یقیناً می‌توان گفت که این مقادیر هرگز نمی‌توانند به عنوان مقادیر بهینه C برای ایجاد سیستم استنتاج فازی از طریق خوشه‌بندی انتخاب شوند.

۳-۲- نتایج ارزیابی سیستم‌های استنتاج فازی

براساس معیارهای کامل بودن و سازگاری و دقت

سیستم بهینه، آنی است که دارای بالاترین میزان سازگاری و کامل بودن باشد و بتواند داده‌های آموزشی و کنترلی را با بیشترین دقت تقریب بزند. برای انتخاب تعداد بهینه خوشه‌ها، ۶ سیستم استنتاج فازی مختلف با مقادیر ۸ و ۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ C ایجاد شد، و معیارهای سازگاری و کامل بودن و دقت برای هر سیستم استنتاج فازی محاسبه گردید.

جدول ۳. مقادیر شاخص ارزیابی به ازای $C=2-10$

C	V_{XB}	V_K
۲	۰/۳۳۴	۳۵/۰۰۲
۳	۰/۶	۶۳/۱۶۴
۴	۱/۱۵۵	۱۲۲/۰۷۳
۵	۱/۵۵۲	۱۶۴/۵۹۵
۶	۱/۹۵۱	۲۰۷/۵۶۶
۷	۴۰۳۳۷۰۸۵۵۴۳	۲۷۳۶۱۲۴۹۳۹۰۳۰
۸	۷/۶۷۹	۸۲۵/۵۲۵
۹	$1/818 \times 10^{29}$	$2/54 \times 10^{30}$
۱۰	$1/134 \times 10^{29}$	$7/80 \times 10^{30}$

به طوری که C نشان‌دهنده مرکز منحنی است و σ پراکندگی منحنی را نشان می‌دهد. جدول ۴ مقادیر خطا و ناسازگاری - ناکاملی را برای ۱۲۹ داده آموزشی و مقادیر ۸ و ۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ $C=$ نشان می‌دهد. در این جدول، اطلاعات براساس دو معیار خطا و ناسازگاری - ناکاملی، جداگانه مرتب شده‌اند و بنابراین می‌توان اطلاعات بیشتری از آن استخراج کرد.

همان‌طور که از جدول ۴ مشخص است، $C=۸$ کمترین میزان خطا و بالاترین میزان ناسازگاری - ناکاملی را دارد. $C=۲$ دارای کمترین میزان ناسازگاری - ناکاملی و بیشترین میزان خطاست. سیستمی بهینه است که در آن هر دو معیار ناسازگاری - ناکاملی و خطا دارای مقادیر کوچکی باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که $C=۴$ مقدار بهینه برای تعداد خوشه‌هاست و سیستم استنتاج فازی که از این طریق به دست آید، بالاترین کارایی را دارد.

در این مقاله به منظور ساده‌سازی تصمیم‌گیری در مورد تعداد بهینه خوشه‌ها، دو معیار ناسازگاری و ناکاملی با یکدیگر تلفیق گردیدند و به عنوان معیار ناسازگاری - ناکاملی به کار گرفته شدند. برای محاسبه معیارهای ناسازگاری - ناکاملی از رابطه (۸)، و برای معیار دقت از رابطه (۷) استفاده شد.

رابطه (۸)

$$f_{\text{Incons \& Incompl}} = \varepsilon \cdot f_{\text{Incons}} + f_{\text{Incompl}}$$

که در رابطه مذکور f_{Incons} درجه ناسازگاری پایگاه قوانین، و f_{Incompl} مقدار جریمه برای پایگاه داده‌ای است که شرایط کامل بودن (رابطه ۴) را ارضا نمی‌کند، و ε نیز ضریب ثابت برای کنترل سطح سازگاری است. توابع عضویت به کار رفته برای ایجاد سیستم استنتاج فازی از نوع گوسین^۱ هستند (رابطه ۹)

رابطه (۹)

$$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{(c-x)^2}{2\sigma^2}\right)$$

جدول ۴. مقادیر خطا و ناسازگاری - ناکاملی (مرتب‌شده)

C	MSE (Training Data)	C	Inconsistency Incompleteness
۸	۱۵۹/۲۲۲	۲	۰/۳۹۸
۴	۱۶۰/۳۷۳	۴	۰/۴۲۱
۶	۱۶۰/۵۶۳	۵	۰/۴۲۶۰
۳	۱۶۱/۱۱۳	۳	۰/۴۲۶۸
۵	۱۶۳/۴۷۲	۶	۰/۴۶۲
۲	۱۶۵/۴۶۷	۸	۰/۴۷۸

1. Gaussian

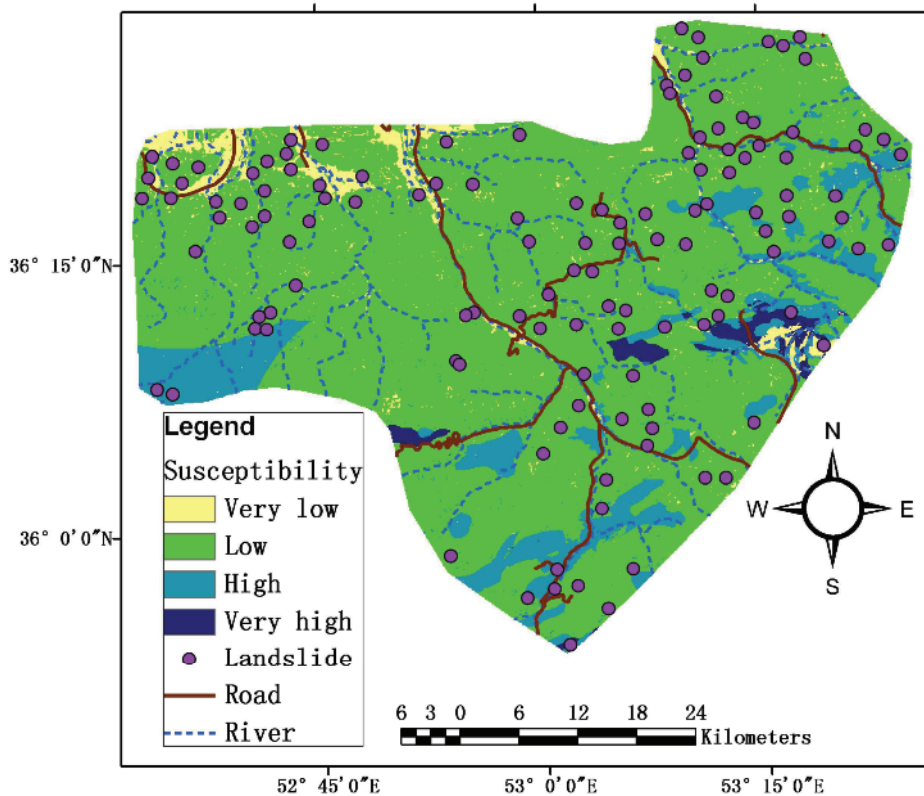
تهیه نقشه حساسیت رانش زمین، از طریق سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی و GIS (منطقه مورد مطالعه: بخشی از استان مازندران)

وارد سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی نهایی شدند و مقادیر خروجی به ازای تک‌تک پیکسل‌ها مورد محاسبه قرار گرفت. در نهایت مقادیر پیکسل‌ها بین ۰ و ۱ نرمال شناخته شدند و سپس به چهار رده یا کلاس ۰/۲۵-۰ و ۰/۵-۰/۲۵ و ۰/۷۵-۰/۵ و ۱-۰/۷۵ تقسیم‌بندی گردیدند. شکل ۵ نقشه به‌دست آمده را نشان می‌دهد. با بررسی ابتدایی نقشه‌های معیار و نقشه‌های حساسیت رانش زمین، مشخص می‌شود که مناطق دارای خطرپذیری بالا عمدتاً به گسل‌ها نزدیک‌اند.

سیستم استنتاج فازی به دلیل محدودیت در تعداد داده‌های رانش زمین نمی‌تواند به صورت کامل ارتباط بین فضاهای ورودی و خروجی را پوشش دهد. در این تحقیق از اطلاعات کارشناس خبره‌ای استفاده شد، تا با افزایش تعداد توابع عضویت و قوانین فازی این کاستی برطرف گردد.

۳-۳- تهیه نقشه حساسیت رانش زمین

تمامی نقشه‌های معیار محاسبه‌شده از آنالیزهای GIS



شکل ۵. نقشه حساسیت رانش زمین حاصل از سیستم استنتاج فازی

جدول ۵. مقادیر خطا

C	۲	۳	۴	۵	۶	۸
MSE (Control Data)	۴۲/۸۶۳	۳۹/۳۷	۳۸/۸۶۶	۴۱/۳۵۴	۳۸/۹۱۵	۳۹/۶۸۰

۴- نتیجه‌گیری

پیچیدگی‌های فراوان پدیده رانش زمین، به دشوار شدن مدل‌سازی این پدیده از طریق دانش اولیه کارشناس دامن می‌زند. به همین خاطر روش‌های دانش‌مبنا به تنهایی فاقد کارایی لازم‌اند. روش‌های داده‌مبنا می‌توانند به عنوان روش جایگزین مدنظر پژوهشگران و محققان قرار گیرند. از طرفی، هر کدام از روش‌های داده‌مبنا و دانش‌مبنا، مزایا و معایب خاص خود را نیز دارند. بنابراین با تلفیق این دو روش، همزمان می‌توان از مزایای این هر دو سود برد.

به دلیل بسیار انعطاف‌پذیر بودن سیستم‌های استنتاج فازی، استفاده از آنها می‌تواند روش مناسبی برای تولید نقشه‌های حساسیت باشد. یکی از روش‌های تولید سیستم استنتاج فازی، به‌کارگیری روش خوشه‌بندی فازی است؛ بدین ترتیب که داده‌های آموزشی، خوشه‌بندی می‌شوند و با تصویر کردن خوشه‌ها بر روی محورهای مختصات قوانین و توابع عضویت فازی مورد محاسبه قرار می‌گیرند. نکته مهم در به‌کارگیری چنین روشی مشخص ساختن تعداد بهینه خوشه‌هاست، زیرا در صورت انتخاب نادرست تعداد بهینه خوشه‌ها، الگو و چیدمان داده‌ها در فضای چندبعدی به خوبی مدل‌سازی نمی‌شود. برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها از شاخص‌های ارزیابی خوشه‌ها

استفاده می‌شود. اما به دلیل پیچیدگی بالای ساختار داده‌ها نمی‌توان به نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های ارزیابی خوشه‌ها اعتماد کرد. بنابراین، با استفاده از چندین مقدار C (تعداد خوشه‌ها) می‌توان سیستم‌های استنتاج فازی مختلفی را ایجاد کرد.

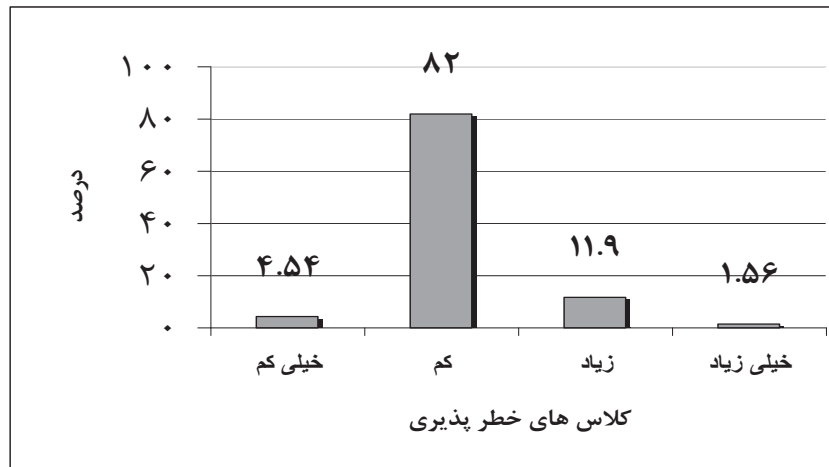
در ادامه، با استفاده از معیارهای ارزیابی سیستم‌های استنتاج فازی از جمله ناسازگاری - ناکاملی و دقت، می‌توان به ارزیابی سیستم‌های استنتاج فازی مختلف پرداخت. در ضمن، اینکه سیستم فازی داده‌های آموزشی را به خوبی تقریب می‌زند، لزوماً بدین معنا نیست که بتواند داده‌های کنترل را نیز به خوبی برآورد کند. بنابراین لازم است تا دقت سیستم‌های فازی گوناگون به ازای مقادیر مختلف خوشه‌ها براساس داده‌های کنترل مجدداً بررسی شوند.

جدول ۵ میزان متوسط مجذور خطا را به ازای مقادیر مختلف C برای داده‌های کنترلی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول مشخص است، $C=4$ بهترین تعداد خوشه در تحقیق حاضر به شمار می‌آید.

همچنین برای بررسی بیشترین منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های فاکتور کلاسه‌بندی شدند و از طریق محاسبه تعداد زمین‌لغزش‌ها در هر کلاس، مؤثرترین کلاس‌ها برای بروز رانش زمین تعیین گشتند (جدول ۶).

جدول ۶. مؤثرترین کلاس مربوط به هر نقشه فاکتور برای بروز رانش زمین

مؤثرترین کلاس	نقشه فاکتور
$7/5^{\circ} - 14/5^{\circ}$	شیب
شمال غربی	جهت شیب
۰/۱۰۱-۰/۱۰۶	انحنا
۰-۱۱۰۰	فاصله از گسل‌ها (متر)
۰-۲۵۰۰	فاصله از جاده‌ها (متر)
۱۵۰۰-۲۵۰۰	فاصله از رودخانه‌ها (متر)
جنگلی با تراکم کم	کاربری اراضی
MIgs	سنگ‌شناسی



شکل ۶. درصد مساحت‌های کلاس‌های مختلف خطر در منطقه مورد مطالعه

محاسبه گردید (شکل ۸). روند افزایشی و شکل خطی نمودار نشان می‌دهد که چهار کلاس خطرپذیری به طور مناسبی از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

با توجه به اینکه با استفاده از این روش نمی‌توان وزن‌های نقشه‌های معیار را به طور کامل استخراج کرد، در این قسمت تصمیم گرفته شد تا براساس میزان وابستگی میان نقشه حساسیت رانش زمین و نقشه‌های معیار، این میزان تأثیرات به نوعی برآورد گردد. میزان تأثیرات یادشده، براساس ضریب همبستگی نقشه حساسیت رانش زمین و نقشه‌های معیار $\rho_{LSM,C}$ محاسبه شده‌اند (رابطه ۱۰).

$$\rho_{LSM,C} = \frac{\sigma_{LSM,C}}{\sqrt{\sigma_{LSM} \cdot \sigma_C}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

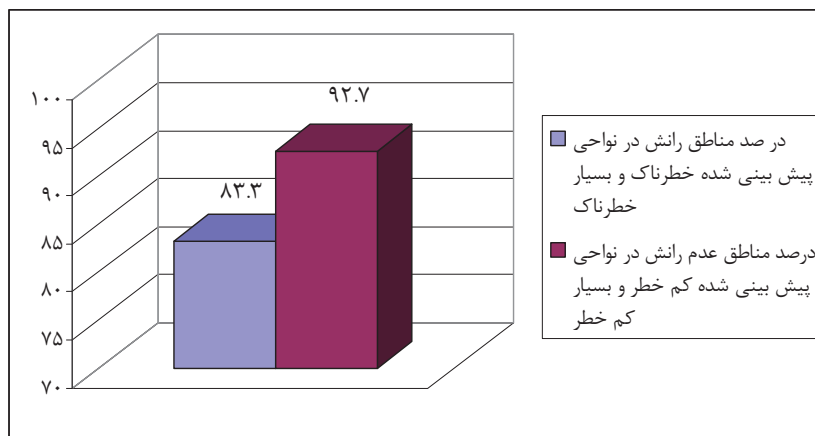
در رابطه (۱۰) $\sigma_{LSM,C}$ کوواریانس نقشه حساسیت رانش زمین و نقشه معیار است؛ و σ_{LSM} و σ_C انحراف معیار نقشه حساسیت زمین و نقشه معیار. جدول ۷ نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد. ضرایب همبستگی، مؤید این نکته‌اند که سه نقشه «معیار سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، و کاربری اراضی» بیشترین میزان همبستگی را با نقشه حساسیت رانش زمین دارند.

برای ارزیابی نتایج به‌دست آمده از سیستم استنتاج فازی در تهیه نقشه حساسیت رانش زمین، هیستوگرام مربوط به این نقشه برای چهار کلاس خطر ترسیم گردید (شکل ۶). همان‌طور که مشخص است، ۸۲ درصد منطقه خطرپذیری اندکی دارد (رانش‌های زمین با عمق کم) و فقط در ۱/۵۶ درصد از منطقه رانش‌های شدید احتمال می‌رود.

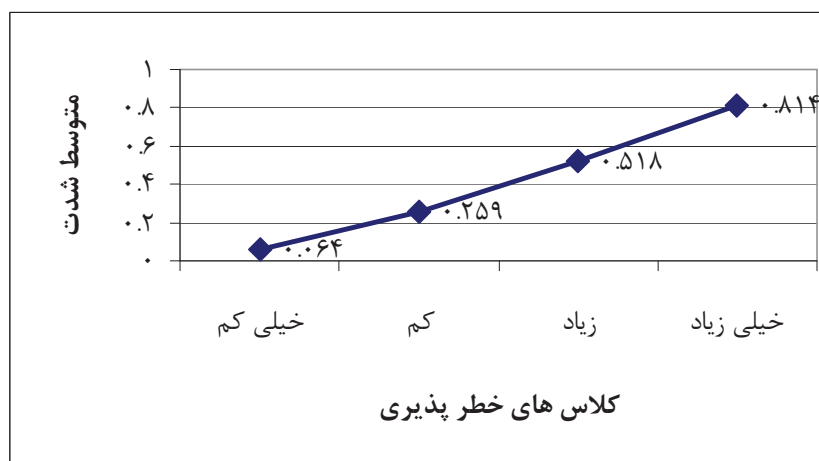
مناسب‌ترین معیار برای سنجش کارایی روش پیشنهاد شده، مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج واقعی موجود است. بدین منظور، مقایسه‌ای براساس درصد قرارگیری مناطق رانش و عدم رانش در مناطقی که خطرپذیری زیاد - خیلی زیاد و خطرپذیری کم - خیلی کم دارند، صورت گرفت که در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که ۸۳/۳ درصد مناطق رانش موجود در نواحی پیش‌بینی‌شده خطرناک و بسیار خطرناک قرار دارند و ۹۲/۷ درصد مناطق عدم رانش موجود در نواحی پیش‌بینی‌شده کم‌خطر و بسیار کم‌خطر واقع‌اند.

برای ارزیابی بیشتر نقشه حساسیت رانش زمین، متوسط مقادیر پیکسل‌ها در هر چهار کلاس خطر



شکل ۷. دقت نتایج به دست آمده، براساس قرارگیری مناطق رانش و عدم رانش در کلاس‌های خطرپذیری



شکل ۸. نمودار میانگین شدت رانش زمین در هر کلاس حساسیت

جدول ۷. ضرایب همبستگی میان نقشه حساسیت رانش زمین و معیارها

ضریب همبستگی	نقشه معیار
۰/۲۸۲۹۹	شیب
۰/۰۰۹۵۳۶	جهت شیب
۰/۰۰۲۲۳۳۶	انحنای زمین
۰/۵۱۷۱۴	سنگ‌شناسی
۰/۰۷۹۶۷۴	فاصله از رودخانه‌ها و آبراهه‌ها
۰/۳۳۴۳۱	پوشش و کاربری اراضی
۰/۷۶۹۹۷	فاصله از گسل‌ها
۰/۳۹۱۳۱	فاصله از جاده‌ها

۵- منابع

- Al-Jarrah, O., and Abu-Qdais, H., 2006, **Municipal Solid Waste Landfill Siting Using Intelligent System**, Waste Management, 26(3), 299-306.
- Alberto, C., Giovanni, C., and Paolo, F., 2003, **Geomorphological and Historical Data in Assessing Landslide Hazard**, Earth Surface Processes and Landforms, 28(10), 1125-1142.
- Aleotti, P., and Chowdhury, R., 1999, **Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives**, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58(1), 21-44.
- Bezdek, J.C., 1981, **Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms**, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA.
- Cascini, L., Critelli, S., Gulla, G., and Di Nocera, S., 1991, **A Methodological Approach to Landslide Hazard Assessment: A Case History**, In: Proceedings of the 16th International Landslide Conference, D.H. Bell (Editor), 899-904.
- Cordón, O., Herrera, F., Hoffmann, F., and Magdalena, L., 2001, **Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases**, World Scientific Pub Co Inc, Singapore.
- Ercanoglu, M., and Gokceoglu, C., 2004, **Use of Fuzzy Relations to Produce Landslide Susceptibility Map of a Landslide Prone Area (West Black Sea Region, Turkey)**, Engineering Geology, 75(3-4), 229-250.
- نتایج به‌دست آمده از این تحقیق در مقایسه با پژوهش انجام‌شده به‌وسیله فاطمی عقدا و همکاران (۲۰۰۵) که در آن از سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی برای تهیه نقشه پتانسیل خطر زمین‌لغزش در منطقه رودبار استفاده شد، به مراتب بهتر است. دلیل افزایش دقت این تحقیق را می‌توان به‌کارگیری توأم از روش‌های دانش‌مبنا و داده‌مبنا دانست؛ زیرا آنها توابع عضویت و قوانین فازی را بر پایه دانش شخص خبره استخراج کردند و به صورت غیرخودکار به سیستم استنتاج فازی وارد ساختند. آنها به‌علاوه، نقشه پتانسیل خطر زمین‌لغزش را نیز در ۱۰ کلاس ارائه کردند.
- نتایج پژوهش سیزر و همکاران (۲۰۱۰) که با تلفیق سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی و شبکه عصبی به تهیه نقشه حساسیت رانش زمین در شهر سلانگور^۱ مالزی پرداختند، بهتر از نتایج این تحقیق است. دلیل این امر آن است که اینان از شبکه عصبی برای بهبود عملکرد سیستم استنتاج قاعده‌مبنای فازی سوچینو استفاده کردند و در نهایت هم به دقت ۹۸ درصد (در بهترین حالت مدل‌سازی) دست یافتند.
- این تحقیق نشان داد که تکمیل قاعده تصمیم‌گیری با بهره گرفتن از دانش کارشناسی، بهبود دقت مدل‌سازی را در پی خواهد داشت. سیستم حاصل به‌دلیل استفاده همزمان از داده‌ها و دانش کارشناسی، می‌تواند برگردانی از فردی خبره یا تصمیم‌گیر، یا جایگزینی برای آن باشد.
- برای مطالعات آینده، می‌توان از الگوریتمی تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه کردن فرم توابع عضویت و قوانین فازی و رسیدن به دقت بالاتر استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود، روش جداول جست‌وجو برای تشکیل سیستم استنتاج فازی مورد آزمون و مقایسه قرار گیرد.

1. Selangor

- Fatemi Aghda, M., Ghayomian, J. and Oshgholi Farahani, A., 2003, **Evaluating the Efficiency of Statistical Methods in Determining the Potential Risk of Landslides**, *Geosciences*, 11(47-48), 28-47. (Persian).
- Fatemi Aghda, M., Ghayomian, J., Teshnehlab, M. and Oshgholi Farahani, A., 2005, **Landslide Risk Assessment Using Fuzzy Logic (Case Study: Roodbar Region)**, *Journal of Science University of Tehran*, 31(1), 43-64. (Persian).
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Boll, J., Elliot, W.J., and Foltz, R.B., 2006, **Spatially and Temporally Distributed Modeling of Landslide Susceptibility**, *Geomorphology*, 80(3-4), 178-198.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P., 1999, **Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in A Multi-scale Study**, *Central Italy, Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- Kwon, S.H., 1998, **Cluster Validity Index for Fuzzy Clustering**, *Electronics Letters*, 34(22), 2176-2177.
- Mamdani, E.H., 1974, **Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant**, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585-1588.
- NGDIR, 2008, <http://www.NGDIR.ir/>, Accessed 2 August 2008.
- Pakhira, M.K., Bandyopadhyay, S., and Maulik, U., 2004, **Validity Index for Crisp and Fuzzy Clusters**, *Pattern Recognition*, 37(3), 487-501.
- Rakei, B., Khamseh chian, M., Abdolmaleki, P. and Giahchi, P., 2007, **Using Artificial Neural Network in Mapping Landslide Susceptibility (Case Study: Sefidar Galeh in Semnan Province)**, *Journal of Science University of Tehran*, 33(1), 57-64. (Persian).
- Ramze Rezaee, M., Lelieveldt, B. P. F., and Reiber, J. H. C., 1998, **A New Cluster validity Index for the Fuzzy C-mean**, *Pattern Recognition Letters*, 19(3-4), 237-246.
- Ross, T.J., 2004, **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, Wiley, England.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., and Arora, M.K., 2002, **GIS-based Landslide Hazard Zonation in a Part of the Himalayas**, *International Journal of Remote Sensing*, 23(2), 357-369.
- Sezer, E., Pradhan, B. and Gokceoglu, C., 2010, **Manifestation of an Adaptive Neuro-fuzzy Model on Landslide Susceptibility Mapping: Klang Valley, Malaysia**, *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8208-8219.
- Sugeno, M., and Yasukawa, T., 1993, **A Fuzzy-Logic-based Approach to Qualitative Modeling**, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1(1), 7-31.

- Takagi, T., and Sugeno, M., 1985, **Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control**, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 15(1), 116-132.
- Tangestani, M.H., 2004, **Landslide Susceptibility Mapping Using the Fuzzy Gamma Approach in a GIS**, Kakan Catchment Area, Southwest Iran, Australian Journal of Earth Sciences, 51(3), 439 - 450.
- Tangestani, M.H., 2009, **A Comparative Study of Dempster-Shafer and Fuzzy Models for Landslide Susceptibility Mapping Using A GIS: An Experience from Zagros Mountains**, SW Iran, Journal of Asian Earth Sciences, 35(1), 66-73.
- Vahidnia, M.H., Alesheikh, A.A., Alimohammadi, A., and Hosseinali, F., 2009, **Landslide Hazard Zonation Using Quantitative Methods in GIS**, International Journal of Civil Engineering, 7(3), 176-189.
- Vahidnia, M.H., Alesheikh, A.A., Alimohammadi, A., and Hosseinali, F., 2010, **A GIS-based Neuro-fuzzy Procedure for Integrating Knowledge and Data in Landslide Susceptibility Mapping**, Computers & Geosciences, 36(9), 1101-1114.
- Wang, L.X., 1996, **A Course in Fuzzy Systems and Control**, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Wang, W.D., Xie, C.M., and Du, X.G., 2009, **Landslides Susceptibility Mapping in Guizhou Province Based on Fuzzy Theory**, Mining Science and Technology (China), 19(3), 399-404.
- Xie, X. L., and Beni, G., 1991, **A Validity Measure for Fuzzy Clustering**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(8), 841-847.
- Yaochu, J., Von Seelen, W., and Sendhoff, B., 1999, **On Generating FC3 Fuzzy Rule Systems from Data Using Evolution Strategies**, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 29(6), 829-845.
- Zadeh, L.A., 1965, **Fuzzy Sets, Information and Control**, 8(3), 338-353.