



A Meta-Methodological Architecture for Decision-Relevant Mountain Vulnerability Assessment

Fariab Amini^a, Hassan Darabi^{b*}

^aDepartment of Environmental Planning, Management and HSE, Aras International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

^aDepartment of Environmental Design Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: darabih@ut.ac.ir, ORCID: 0000-0002-5137-4200

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 2026/08/22

Received in revised form:

2026/09/05

Accepted 2026/09/21

Available online: 2026/09/22

Keywords:

Mountain vulnerability,
Vulnerability assessment,
Uncertainty analysis,
Meta-method,
Methodological architecture.

Mountain vulnerability assessment has shifted from indicator-based and spatial approaches toward hybrid frameworks combining GIS, remote sensing, machine learning, MCDA, and statistical-participatory methods. Yet methodological diversity alone does not guarantee that the resulting documents are coherent, robust, or useful for decision-making. To examine the state of methodology in mountain vulnerability research, we conducted a review-based methodological assessment. Following the PRISMA 2020 protocol, we selected 96 articles and carefully analyzed their methodological landscape within a meta-method framework. Data processing, classification, and statistical analysis were performed using Python in the Google Colab environment, based on a reproducible computational flowchart. We examined the documents across several dimensions: methodological groups, methodological architecture, process robustness, output types, and their linkage to decision-making. Results showed that composite architecture dominated vulnerability assessment (83.3%, $n=80$). Uncertainty, however, received limited attention, appearing in only 10.4% of studies. Validation was reported in 57.3% of the reviewed papers. Overall, 57.3% of the studies presented a complete method–output–decision chain. Monte Carlo permutation tests followed by Benjamini–Hochberg correction indicated a significant association between methodological architecture and chain completeness (Cramér’s $V = 0.441$; $pFDR = 0.0003$). Temporal shifts in methodological architecture were also evident. Synthesizing the findings within the meta-method framework confirmed an eight stage process: problem framing, vulnerability conceptualization, data architecture, method architecture, aggregation and modeling, validation and robustness, output translation, and decision linkage. The final results suggest that a methodological gap does not actually exist in this field. Rather, the core issue lies in methodological shortcomings, specifically, weaknesses in addressing uncertainty and in connecting to decision-making. As a result, methodological outputs are only partially transformed into decision functions.

Cite this article: Amini, F. & Darabi, H. (2026). A Meta-Methodological Architecture for Decision-Relevant Mountain Vulnerability Assessment. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(2), 97-122. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598056.1035>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598056.1035>

Introduction

Mountain vulnerability assessment has grown into a methodologically diverse field. Early work leaned heavily on indicators and spatial analysis. More recent studies combine GIS, remote sensing, statistical models, machine learning, multi-criteria decision analysis, scenario techniques, and participatory approaches. This expansion has increased analytical capacity. But it has not necessarily produced assessments that are equally robust or useful for decision-making. A study may bring together several advanced techniques and still leave important parts of the analytical process weakly specified. Validation may be missing. Uncertainty may go untested. Outputs may stop at vulnerability maps, indices, or classifications without being translated into a clear decision function. Moreover, methodological complexity can sometimes obscure how individual analytical choices influence the final assessment, making comparisons across studies difficult and limiting the reproducibility of reported findings. These concerns highlight the need to examine not only which methods are used, but also how they are structured, connected, evaluated, and ultimately interpreted. This study examines mountain vulnerability assessment at the level of methodological architecture. We do not ask which single method performs best. Instead, we address three questions. How have methodological families and their combinations changed over time? How are validation, sensitivity analysis, and uncertainty analysis treated? Can an empirically grounded meta-methodological architecture be derived from the literature? Particular attention is given to the connection between method, analytical output, and decision use.

Methods

A systematic scoping review and meta-methodological synthesis was conducted following the PRISMA 2020 protocol. Searches covered 2008–2026 and used Semantic Scholar and OpenAlex. Records were screened for mountain context, vulnerability focus, assessment orientation, methodological evidence, and eligibility for full-text analysis. After deduplication, title and abstract screening, full-text assessment, retrieval, and bibliographic verification, 96 studies formed the final analytical corpus. The studies were coded for several dimensions: vulnerability conceptualization, data architecture, methodological family, method sequence, indicator selection, normalization, weighting, aggregation, modelling, validation, sensitivity analysis, uncertainty analysis, output type, and decision relevance. Methods were grouped into major families. These included index-based approaches, GIS and remote sensing, statistical methods, machine learning, MCDA/AHP, scenario-based analysis, and survey or participatory approaches. Method architecture was then classified according to whether studies used a single family, two-family combinations, or multi-method combinations. Data processing and statistical analysis were performed in Python within Google Colab using a reproducible computational workflow. Associations between categorical variables were examined with Pearson's chi-square statistic and Cramér's V. Because some contingency-table cells had small expected frequencies, statistical significance was estimated using 20,000 Monte Carlo permutations. Benjamini–Hochberg false discovery rate correction was applied to multiple comparisons. The method–output–decision relationship was also coded as a methodological chain, here termed M–O–D.

Results

Methodological combination was the dominant pattern. Of the 96 studies, 53.1% used multi-method architectures and 30.2% combined two methodological families. Only 9.4% relied on a single methodological family. Taken together, 83.3% of the corpus used a combined architecture. This indicates that the field has moved toward methodological recombination rather than the simple replacement of older methods by newer ones. The change was also temporal. Publication period was significantly associated with method architecture after Monte

Carlo testing and FDR correction (Cramér's $V = 0.279$; $pFDR = 0.0143$). Its association with the dominant methodological family was not statistically significant after correction (Cramér's $V = 0.328$; $pFDR = 0.0820$). Thus, the more evident change concerns how methods are assembled within assessments.

Methodological robustness analysis provides an alternative viewpoint on the data. According to the statistics provided above, 57.3% of studies demonstrate validation. In case sensitivity analysis is considered, the percentage goes down to 14.6%. Importantly, 10.4% of studies were distinguished by uncertainty analysis. One more important point relates to the relationship between vulnerability outputs and decision-making that was revealed in 69.8% of cases. When the chain was expanded to include explicit vulnerability conceptualization, identifiable method architecture, identifiable output, validation, uncertainty analysis, and decision linkage, only 6.2% satisfied all six components.

The statistical results support this distinction. Method architecture was associated with the completeness of the M–O–D chain (Cramér's $V = 0.441$; $pFDR = 0.0003$). The dominant method family was also associated with chain completeness (Cramér's $V = 0.417$; $pFDR = 0.0054$). By contrast, robustness architecture alone showed no significant association with M–O–D completeness after FDR correction (Cramér's $V = 0.209$; $pFDR = 0.1817$). Methodological plurality, in other words, cannot by itself be treated as evidence of methodological integration. The review of the literature from a robustness perspective shows that the concept of “uncertainty” is used in many ways. Some of the papers performed simulation and global sensitivity analysis. In other papers, model or scenario uncertainty was analyzed using either an ensemble analysis, diagnostics, or the comparison of models' performance. There were also three papers in which uncertainty was viewed as a part of the research, a suggestion, or methodological issue, but not as an element of the evaluation process. Some variability was also seen in validation techniques. Among 55 papers that used some type of validation technique, 26 used predictive or statistical validation, such as cross-validation, AUC/ROC, and other performance measures. Nine papers compared their model outputs with field data or other data. In three papers, the validation was performed by experts or stakeholders, and in 17 papers, no information on validation methods was provided. This variability is important, since they reflect different aspects of evaluation process. The first one is discriminatory ability, while the second one refers to performance versus observation.

Conclusions

The synthesis produced an eight-stage meta-methodological architecture: problem framing, vulnerability conceptualization, data architecture, method architecture, aggregation and modelling, validation and robustness assessment, output translation, and decision linkage. These stages describe functions that need to be connected, not a prescribed sequence of techniques. The main methodological problem identified in the literature is therefore not a shortage of assessment methods. The field already contains a wide range of analytical tools and increasingly combines them. The weaker point lies elsewhere. Uncertainty is rarely examined explicitly. Validation remains incomplete. Analytical outputs do not always reach a clear decision function. For mountain vulnerability assessment, the practical question is consequently less about adding another method and more about maintaining a defensible analytical chain from the definition of vulnerability to the use of results in planning, management, or policy.



معماری فراروش شناختی برای ارزیابی تصمیم محور آسیب پذیری مناطق کوهستانی

فریبا امینی^a، حسن دارابی^{b*}

^aگروه برنامه ریزی، مدیریت و HSE محیط زیست، پردیس بین المللی ارس، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^bگروه مهندسی طراحی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: darabih@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	ارزیابی آسیب پذیری مناطق کوهستانی از رویکردهای شاخص محور و فضایی فاصله گرفته است و در حال حرکت به سمت رویکردهای ترکیبی است. اما تنوع روش شناسی به تنهایی نمی تواند منجر این استنتاج گردد که مستندات حاصل از روش ها الزاما یکپارچه، استوار و قابل بهره برداری در تصمیم گیری هاست. برای اطمینان و بررسی از وضعیت روش شناسی در موضوع آسیب پذیری کوهستان، یک ارزیابی مروری بر روش شناسی صورت گرفت. به این منظور به استناد پروتکل پریسما ۲۰۲۰ تعداد ۹۶ مقاله برگزیده شد و چشم انداز روش شناسی آنها به دقت مورد واکاوی در چارچوب فراروش قرار گرفت. در مراحل پردازش داده و طبقه بندی و تحلیل آماری از پایتون در محیط کولب گوگل و مبتنی بر فلوجارت محاسباتی قابل تکرار استفاده شد. مستندات در گروه های روش شناسی، معماری روش شناسی، استواری فرایندها و نوع خروجی و پیوند آنها با تصمیم گیری بررسی شد. نتایج نشان داد معماری مرکب در حوزه ارزیابی آسیب پذیری (۸۳/۳۰، ۸۰/۹۶٪) در این حوزه غلبه داشت. در حالی که در مطالعات انجام شده عدم قطعیت با ۱۰/۴ درصد جایگاه چندانی را به خود اختصاص نداده است. اعتبار سنجی نیز در بیش از نیمی از مطالعات (۵۷/۳٪) مشهود است. در همین تعداد از مطالعات زنجیره روش - خروجی - تصمیم کامل بود. آزمون های جایگشت مونت کارلو و سپس تصحیح صورت گرفته مبتنی بر بنیامین - هوچبرگ نشان از آن داشت که معماری روش با کامل بودن زنجیره ارتباط معناداری دارد ($Cramér's V = 0.441$; $pFDR = 0.0003$). تغییرات زمانی در معماری روش های کاملا مشهود بود. ترکیب یافته مبتنی بر الگوی فراروش یک چارچوب هشت مرحله ای را تایید می کند که شامل چارچوب بندی مسئله، مفهوم سازی آسیب پذیری، معماری داده، معماری روش، تجمیع و مدل سازی، اعتبار سنجی و استواری، ترجمه خروجی و پیوند با تصمیم می شود. نتایج نهایی دلالت بر این دارد که در این حوزه عملا خلا روش شناسی وجود ندارد بلکه مساله اصلی در نقص های روش شناختی به طور اخص ریشه در ضعف در مواجهه با عدم قطعیت دارند و پیوند با تصمیم گیری دارند. لذا به شکل ناقصی برون دادهای روش شناختی به توابع تصمیم گیری تبدیل می شود.

استناد به این مقاله: امینی، فریبا و دارابی، حسن (۱۴۰۵). معماری فراروش شناختی برای ارزیابی تصمیم محور آسیب پذیری مناطق کوهستانی. راهنمای علوم

مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۲)، ۹۷-۱۲۲. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598056.1035>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598056.1035>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

ارزیابی آسیب‌پذیری کوهستان‌ها ارتباط تنگاتنگ بین متغیرهای اقلیمی، اکولوژیکی و زمین‌شناختی و فشارهای اجتماعی را نشان می‌دهد و در سطح مناطق کوهستانی نتایج متفاوتی را بر اساس شرایط بستر و محیط زیست ارائه می‌دهند (Gerlitz et al., 2016; Cavallo et al., 2025). چنین ارزیابی و درک این مشکل نیاز به استفاده از روش‌های مختلف دارد. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که عدم سازگاری زیادی در این زمینه وجود دارد که در آن آسیب‌پذیری مرتبط با بلایا و رویدادها اغلب غالب است. با این حال به این معنا نیست که مسائل اقلیمی، محیط زیستی، اجتماعی-اقتصادی و معیشتی را نادیده گرفته شود. مطالعات اولیه و تاثیرگذار در این زمینه بیشتر در چارچوب پارادایم‌های سوانح و تاب‌آوری، شاخص‌های آسیب‌پذیری معیشتی، شاخص‌های آسیب‌پذیری اجتماعی و رویکردهای مبتنی بر شاخص توسعه یافته‌اند (Fuchs, 2009; Papathoma-Köhle et al., 2019). در نتیجه این روند ارزیابی آسیب‌پذیری را به ارزیابی تشخیصی تبدیل کرده است که مناطق در معرض خطر، تحلیل حساسیت، ظرفیت سازگاری همراه با موانع و شرایط اجتماعی و اقتصادی را ارائه می‌دهد (Simane et al., 2014; Valencia et al., 2020). بررسی ادبیات نشان می‌دهد که تعداد فزاینده‌ای از مطالعات در این زمینه وجود دارد. روش‌های مبتنی بر شاخص و روش‌های یکپارچه شاخص‌گرا به گروه پیشرو تحقیقات در این زمینه تبدیل شده‌اند که گاهی اوقات با استفاده از GIS و حسگرهای از راه دور برای نقشه‌برداری از ناسازگاری‌های فضایی همراه‌اند (Tessema & Simane, 2019; Aksha et al., 2018). علاوه بر آن روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مانند AHP گاهی اوقات برای اولویت‌بندی استفاده می‌شوند (Darabi et al., 2019). در همین حال رویکرد کاهش‌گرا سعی در کاهش تکرار و برقراری رابطه تجربی دارد (Nisha & Punia, 2014; Limboo et al., 2025). با گذشت زمان روش‌های یادگیری ماشین شروع به استفاده در زمینه تخمین توانایی‌ها، طبقه‌بندی و ارزیابی از طریق پیش‌بینی و سناریوها کرده است. هدف این دسته از مطالعات ادبیات بررسی پیش‌بینی شرایط آینده تحت تاثیر اصلی آب و هوا و اکوسیستم است (Iwahashi et al., 2021; Wu et al., 2023).

به موازات این مطالعات نظرسنجی‌ها و مطالعات تحقیقاتی مبتنی بر مشارکت نقش مهمی را در مواردی که آسیب‌پذیری جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی دارد ایفا می‌کنند (Valencia et al., 2020; Li et al., 2025). نمونه‌هایی از این نوع تحقیقات را می‌توان در مورد آسیب‌پذیری چند بعدی معیشت و شرایط اجتماعی یافت (Gerlitz et al., 2018; Aksha et al., 2018). مطالعات ارزیابی چندمتغیره را می‌توان در تحقیقات شاه و همکاران (۲۰۲۳)؛ فایاز و همکاران (۲۰۲۳) یافت. تحقیقاتی مانند کارهای هان و همکاران (۲۰۲۳)؛ ایواهاشی و همکاران (۲۰۲۱) نمونه‌هایی از یادگیری ماشین و طبقه‌بندی مبتنی بر داده است. والنسیا و همکاران (۲۰۲۰)؛ بای و همکاران (۲۰۱۴) مطالعاتی هستند که از ارزیابی‌های مبتنی بر سناریو استفاده کرده هستند. در نهایت فوکس و همکاران (۲۰۱۲)؛ فاویه و همکاران (۲۰۱۴) نمونه‌هایی از استفاده از آمار فضایی در مطالعات سوانح هستند. با وجود اینکه این لیست شامل انواع مختلف تحقیقات در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری کوهستانی است، اما مشکلات ساختاری خاصی با این روش‌ها وجود دارد. یعنی اگر خود مسئله به خوبی تعریف نشده باشد حتی پیچیده‌ترین روش‌ها در ارزیابی آسیب‌پذیری شکست خواهند خورد یا اگر نتایج تایید نشده و عدم قطعیت را در نظر نگرفته باشد دوباره شکست خواهد خورد. علاوه بر این عدم توانایی در اجرای نتایج تجزیه و تحلیل به تصمیمات عملی ممکن است کیفیت روش را به طور منفی تحت تاثیر قرار دهد. با وجود اینکه محققان زمینه روش‌شناختی مهمی و بسیاری از نمونه‌ها در ادبیات تولید کرده‌اند اما به اندازه کافی به ارتباط بین تجزیه و تحلیل مسئله و تصمیم‌گیری توجه نمی‌کنند. اغلب مقالات زنجیره M-O-D را نشان می‌دهند.

مطالعات بررسی‌های قبلی جنبه‌های مختلف آسیب‌پذیری مناطق کوهستانی را مورد بررسی قرار داده‌اند. پاپاتوما-کوله و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود آسیب‌پذیری فیزیکی را برای ارزیابی خطر کوهستانی مورد بحث قرار دادند و

رویکردهای موجود و الزامات روش‌شناختی آنها را تجزیه و تحلیل کردند. **تاکر و همکاران (۲۰۲۱)** ۷۵ مطالعه را بررسی کرده‌اند. به عنوان نتیجه محققان ناسازگاری قابل توجهی در مقیاس، اهداف شاخص و رویکردها را شناسایی کردند. **سلطان و همکاران (۲۰۲۲)** ۵۹ مطالعه را که به آسیب‌پذیری در هیمالیا اختصاص داده شده بود تجزیه و تحلیل کردند. آنها نشان دادند که تحقیقات آسیب‌پذیری در هیمالیا شامل رویکردهای اجتماعی، طبیعی و ترکیبی است. یعنی از نظر روش‌شناختی ناسازگاری قابل توجهی وجود دارد. هرچند این مطالعات به طور قابل توجهی به گسترش پایگاه دانش در ارزیابی آسیب‌پذیری کمک کرده‌اند اما هرکدام از آنها بر یک منطقه، رویکرد، شاخص و پاسخ و واکنش به آسیب‌پذیری متمرکز بوده‌اند. بنابراین مفهومی‌سازی آسیب‌پذیری، معماری داده و روش‌های تجزیه و تحلیل، تجمیع یا مدل‌سازی و تایید و ارزیابی عدم قطعیت و پیوند آن به تصمیم‌گیری مورد توجه قرار نگرفته است. واضح است که توجه ناکافی به مفهوم آسیب‌پذیری، معماری داده و روش‌های تجزیه و تحلیل، تجمیع یا مدل‌سازی و تایید و ارزیابی عدم قطعیت و پیوند آن به تصمیم‌گیری یک شکاف جدی در این زمینه ایجاد می‌کند. اینکه کدام روش عملکرد موثرتری را ارائه می‌دهد چندان روشن نیست. علی‌رغم تنوع و تعدد روش‌هایی که در مطالعات موجود در این زمینه ارائه شده‌اند آنها به سطح یکپارچگی که نشان دهد چگونه عملکردهای روش‌های مختلف به هم متصل شده‌اند نرسیده‌اند یا اینکه در کجا استحکام یک روش شکست می‌خورد. در نهایت اینکه آیا نتیجه یک روش به یافته‌های عملی برای برنامه‌ریزی، سیاست و مدیریت تبدیل می‌شود. بنابراین این پژوهش با هدف پاسخگویی به سوالات زیر انجام می‌شود: ۱- چگونه خانواده روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری کوهستانی و معماری آنها در طول زمان توسعه یافته است؟ ۲- نقش تایید، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت در این مطالعات چیست؟ ۳- چه نوع معماری روش می‌تواند به صورت تجربی از ادبیات بدست آید؟ بنابراین تمرکز این مطالعه بر روی معماری روش است.

روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه به عنوان یک بررسی سیستماتیک همراه با رویکرد ترکیبی انجام می‌شود. چارچوب بررسی سیستماتیک بر اساس پروتکل PRISMA (۲۰۲۰) است. شکل ۱ روند شناسایی، غربالگری، ارزیابی، انتخاب مجموعه نهایی مقالات بر اساس این پروتکل را نشان می‌دهد (Page et al., 2021). به عنوان منبع اطلاعات برای جستجو پایگاه‌های داده Semantic Scholar و OpenAlex در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۶ استفاده شده‌است. Web of Science به دلیل محدودیت‌ها برای جستجو در دسترس نبود. برای جستجوی مناطق کوهستانی چنین کلمات کلیدی مانند کوه، کوهستانی، آلپین، ارتفاعات، اراضی مرتفع استفاده شده‌است. برای جستجوی واژه‌ها سه گروه واژگان بهره گرفته شد که در محورهای کوهستان، ارزیابی و آسیب‌پذیری به شرح زیر دسته‌بندی شدند: mountainous, mountain, indicator, index, evaluation, fragility assessment, vulnerable, vulnerability, upland, highland, alpine, statistical, MCDA/AHP, remote sensing, GIS, framework, model.

استفاده از ۵۸۳۲ رکورد از Scopus که داده خام بودند انجام شد. سپس داده‌ها به ۳۱۷۰ مرجع کاهش یافتند و در نهایت ۲۰۰۸ منبع اصلی تشکیل جستجوی اصلی را دادند. در Open Alex، حدود ۵۲۲۳ رکورد بدست آمد. در کل ۷۲۳۱ رکورد حاصل شد. از این تعداد ۶۸۴۰ رکورد پس از حذف داده‌های تکراری باقی ماند. سپس با غربالگری عنوان و خلاصه ۳۴۸۵ منبع باقی ماند. در مرحله بعد با ادغام رکوردها بر اساس زمینه کوهستانی، تمرکز آسیب‌پذیری، جهت ارزیابی، نشانه‌های روش‌شناختی و ویژگی‌های غیره‌دفعند آنها طبقه‌بندی شدند. پس از غربالگری متن کامل تعداد به ۱۰۰۷ مرجع کاهش یافت. سپس بر اساس متن کامل ۳۲۴ مرجع واجد شرایط برای ارزیابی کامل و ورود به مرحله ارزیابی بودند. پس از جستجوی منابع و بدست آوردن متن کامل مشخص شد که در واقع دسترسی به ۲۲۶ منبع

غیرممکن است و ۹۸ منبع برای تحلیل نهایی که قابل بررسی سیستماتیک هستند بدست آمد. در مرحله آخر با انجام تأیید کتابخانه هر سند از طریق DOI خود شناسایی شد. با حذف موارد تکراری بدنه اصلی ۹۶ مورد مطالعه شد. علاوه بر این که بررسی سندهای DOI این منابع بررسی دیگر جزئیات کتابخانه‌ای را برای اطمینان از دقت بررسی انجام گرفت. سپس ساخت پایگاه داده از یافته‌ها، مفاهیم آسیب‌پذیری، معماری داده و خانواده روش‌ها ساخته شد. در این توالی روش‌ها انتخاب نشانه‌ها، نرمال‌سازی، وزن‌دهی، تجمیع، مراحل تأیید، حساسیت، ناسازگاری، انواع خروجی و توابع تصمیم‌گیری در نظر گرفته شدند.



شکل ۱. فرآیند طی شده براساس پروتکل پریسما به منظور غربالگری منابع مورد استفاده

Figure 1. Process followed based on the PRISMA protocol for screening the sources used

روش‌ها به چندین خانواده به شرح زیر تقسیم شدند: نشانه/ نشانه ترکیبی، یادگیری ماشین، نظرسنجی/ مشارکت، MCDA/AHP، روش‌های مبتنی بر بر اساس سناریو، GIS/حسگر از راه دور، کاهش ابعاد آماری یا سایر/ غیر واضح. معماری روش‌ها به خانواده یکی، ترکیب دو خانواده، ترکیب چند روش یا نامشخص تقسیم شد. در زمینه تصمیم‌گیری داده استخراج شده قادر به ارزیابی صریح برنامه‌ریزی و مدیریت سیاست یا اولویت‌بندی تصمیمات بودند. با توجه به مقدار داده‌های بدست آمده برای مدیریت و هماهنگی رکوردها، حذف داده‌های تکراری، غربالگری، استخراج شواهد از متن کامل، طبقه‌بندی روش‌شناختی و تحلیل کمی از برنامه پایتون استفاده شد. برای اجرای پایتون در Google Colab عملیاتی شد برای تولید داده‌های توصیفی، جدول‌های همخوان، استنباطات آماری پایتون استفاده شد. برای تحلیل رابطه بین دو متغیر دسته‌ای آمار کای دو پیرسون به شرح زیر محاسبه شد:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}$$

که در آن:

O_{ij} فراوانی مشاهده شده در سلول i و j

E_{ij} فراوانی مورد انتظار در همان سلول

r = تعداد سطرهای جدول توافقی

c = تعداد ستون‌های جدول توافقی

فراوانی مورد انتظار هر سلول نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{ij} = \frac{R_j \cdot C_i}{N}$$

که در آن R_j مجموع فراوانی سطر i ، C_j مجموع فراوانی ستون j و N تعداد کل مطالعات است. درجه آزادی آزمون نیز برابر است با:

$$df = (r-1)(c-1)$$

از آنجا که معناداری آماری به‌تنهایی شدت ارتباط را نشان نمی‌دهد، اندازه اثر با کرامر وی محاسبه شد:

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{N \cdot \min(r-1, c-1)}}$$

که در آن X^2 کای دو پیرسون، N تعداد کل مطالعات، r و c تعداد سطرها و ستون‌های جدول توافقی است. مقدار V در بازه صفر تا یک قرار می‌گیرد. مقادیر بیشتر بیانگر ارتباط قوی‌تر است. به دلیل وجود فراوانی‌های مورد انتظار کوچک در تعدادی از سلول‌ها جداول توافقی اقدام به برآورد مقدار احتمال با ۲۰۰۰۰ جایگشت مونت کارلو شد. به این منظور از روش زیر استفاده شد:

$$P_{MC} = \frac{1 + \sum_{b=1}^B I(T_b \geq T_{obs})}{B + 1}$$

که در آن $B=20000$ تعداد جایگشت، T_{obc} آماره آزمون مشاهده شده، T_b هم معادل آماره حاصل از جایگشت b و $I(.)$ تابع شاخص است که در صورت برقراری شرایط عدد یک و در صورت عدم برقراری شرایط مقدار صفر به خود می‌گیرد. از سوی دیگر به دلیل برای کنترل خطای ناشی از مقایسه‌های چندگانه از روش نرخ کشف کاذب بنیامین هوچبرگ استفاده شد. ابتدا به صورت صعودی مقادیر مرتب شد:

$$p_{(i)} \leq (i/m)q$$

سپس معیار بنیامین - هوچبرگ به شکل زیر اعمال شد:

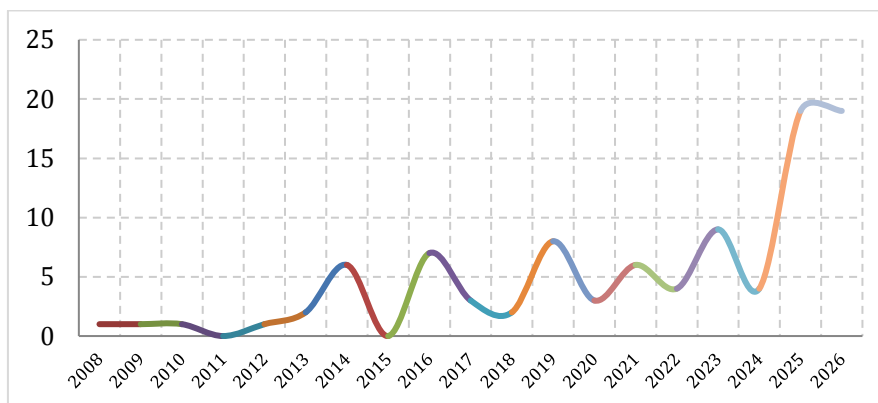
$$P_{(i)} \leq \frac{i}{m} q$$

که در آن $P_{(i)}$ مقدار احتمال مرتبه شده در رتبه i و i رتبه مقدار احتمال، m تعداد کل آزمون‌های همزمان در این رابطه مساوی با ۶ بود و q معادل سطح FDR مورد نظر که برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. در نهایت زنجیره M-O-D براساس ماهیت به کامل، جزئی، یا ضعیف و غیر قابل بازیابی تفکیک شد. این زنجیره می‌تواند در بردارنده شش جزئی گسترده‌تر، شامل مفهوم‌سازی صریح آسیب‌پذیری، معماری روش قابل‌شناسایی، خروجی قابل‌شناسایی، اعتبارسنجی، تحلیل عدم قطعیت و پیوند با تصمیم باشد. باید به خاطر داشت که وقتی از تکرار روش‌شناختی بحث می‌شود این به تعداد خانواده‌های روش تلفیق‌شده اشاره دارد، اما وقتی از یکپارچگی روش‌شناختی صحبت به میان می‌آید به معنا این است که روش‌ها و کارکردهای مکملی را در درون یک زنجیره تحلیلی وجود دارد. لذا باید بین این دو تفاوت قایل شد.

روش ترکیب یافته‌ها بر اساس ترکیب شواهد با رویکرد چارچوب مبتنی بر شواهد بود. در ابتدا شواهد تولید شده در سطح مطالعه به صورت مقایسه‌ای در خانواده‌های روش بر اساس استحکام توابع، نوع خروجی و پیوند تصمیم‌گیری کدگذاری شدند. سپس الگوهای تکراری بر روی زنجیره M-O-D و سپس به هشت تابع شناختی تفکیک شدند. به این ترتیب سعی شد که مشخص شود آیا توابع وجود دارند یا خیر و به یکدیگر پیوند خورده‌اند یا خیر. برای پوشش بازیابی مراحل در ارتباط با متغیرهای کدگذاری موجود ارزیابی شد. در مرحله اولیه تولید شواهد مبتنی بر قوانین و با کمک کامپیوتر استخراج شدند و موارد هدف از طریق بررسی دستی کل متن کنترل شدند.

یافته‌ها و بحث

بررسی روند سالانه نشان می‌دهد که تعداد مطالعات در مورد آسیب‌پذیری در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است (شکل ۲). افزایش در سال‌های اخیر نباید به عنوان افزایش ذاتی در بهبود روش‌ها در نظر گرفته شود. تغییرات در معماری روش بر اساس داده‌های آماری بیشتر توضیح داده خواهد شد. قبل از اینکه به روش‌ها پرداخته شود، لازم است روش‌های اصلی ارزیابی که در مجموعه‌ای از ۹۶ منبع شناسایی شده‌اند طبقه‌بندی شوند. لازم است به این نکته اشاره شود تکرار یک مرجع در چند دسته باشد که ناشی از بهره‌مندی یک مطالعه از چند روش است. بنابراین مطالعات ترکیبی ممکن است در به بیش از یک دسته پدیدار شوند. در جدول ۱ فهرستی از روش‌ها و طبقه‌بندی آنها وجود دارد.



شکل ۲. روند انتشار سالانه ۹۶ مطالعه از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۶

Figure 2. Annual publication trend of 96 studies from 2008 to 2026

جدول ۱. طبقه‌بندی توصیفی جامع روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری در مجموعه ۹۶ مطالعه

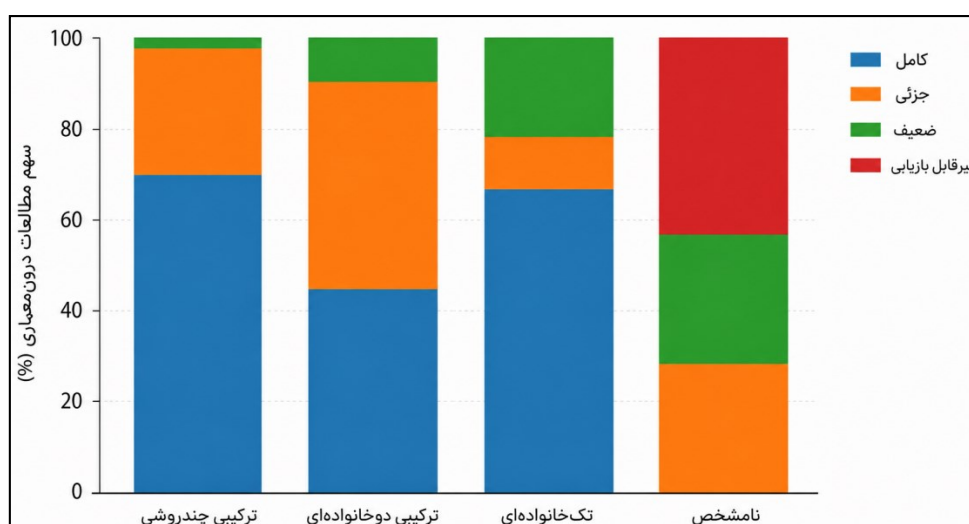
Table 1. Comprehensive descriptive classification of vulnerability-assessment methods in the 96-study corpus.

دسته کلی	روش خاص به‌کاررفته	فراوانی	مطالعات انجام شده
شاخص، وزن- دهی و تجمیع	شاخص ترکیبی / ارزیابی مبتنی بر شاخص	۵۹	Khadzhaev & Fazilova (2026); Bui et al. (2026); Wang et al. (2026); Gjoni & Kopliku (2026); Munyai et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Veloso et al. (2026); Moreno-Abdelnur et al. (2026); Pitchaimani et al. (2026); Sguigaa et al. (2026); Sarieva et al. (2025); Lan et al. (2025); Lyngdoh et al. (2025); Cai et al. (2025); Zhu et al. (2025); Batista & Passini (2025); Cojocariu et al. (2025); Cavallo et al. (2025); Limboo et al. (2025); Lalrinsangpuii et al. (2025); Fatima et al. (2025); Zhou et al. (2025); Ma et al. (2025); Tokarev et al. (2024); Tian et al. (2024); Bhandari et al. (2024); Bista (2023); Khatri & Pasa (2023); Fayaz et al. (2023); Jamal-ud-din et al. (2023); Wu et al. (2023); Shah et al. (2023); He et al. (2023); Hespanhol et al. (2022); Handwerger et al. (2021); Zhao & Chi (2021); Mekonen & Berlie (2021); Valencia et al. (2020); Jr. et al. (2020); Naithani et al. (2019); Nepal et al. (2019); Shahzad (2019); Orchard et al. (2019); Zeng et al. (2019); Tessema & Simane (2019); Papathoma-Köhle et al. (2019); Aksha et al. (2018); Song et al. (2017); Mohanty et al. (2017); Zhang et al. (2016); Saputra et al. (2016); Ciurean et al. (2016); Gerlitz et al. (2016); Papathoma-Köhle (2016); Simane et al. (2014); Maggini et al. (2014); Земцов et al. (2014); Nisha & Punia (2014); Han et al. (2013)
مکانی و فضایی	سامانه اطلاعات جغرافیایی / تحلیل مکانی (GIS)	۵۷	Khadzhaev & Fazilova (2026); Brown et al. (2026); Gjoni & Kopliku (2026); Munyai et al. (2026); Joshi et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Veloso et al. (2026); Moreno-Abdelnur et al. (2026); Pitchaimani et al. (2026); Jing et al. (2026); Qiu & Geng (2025); Lan et al. (2025); Lyngdoh et al. (2025); Cai et al. (2025); Zhu et al. (2025); Batista & Passini (2025); Cojocariu et al. (2025); Cavallo et al. (2025); Limboo et al. (2025); Fatima et al. (2025); Li et al. (2025); Li & Shen (2025); Zhou et al. (2025); Ma et al. (2025); Tokarev et al. (2024); Tian et al. (2024); Fayaz et al. (2023); Jamal-ud-din et al. (2023); Wu et al. (2023); Shah et al. (2023); He et al. (2023); Attiogbé et al. (2022); Piedallu et al. (2022); Zhao & Chi (2021); Iwahashi et al. (2021); Mekonen & Berlie (2021); Mountain et al. (2020); Jr. et al. (2020); Naithani et al. (2019); Shahzad (2019); Papathoma-Köhle et al. (2019); Azmeri & Isa (2018); Aksha et al. (2018); Schlögl et al. (2019); Song et al. (2017); Zhang et al. (2016); Saputra et al. (2016); Ciurean et al. (2016); Utaş et al. (2016); Papathoma-Köhle (2016); Bai et al. (2014); Favier et al. (2014); Земцов et al. (2014); Nisha & Punia (2014); Han et al. (2013); Fuchs et al. (2012); Alcántara-Ayala (2008)
مکانی	سنجش از دور	۵۳	Khadzhaev & Fazilova (2026); Bui et al. (2026); Brown et al. (2026); Munyai et al. (2026); Joshi et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Moreno-Abdelnur et al. (2026); Pitchaimani et al. (2026); Sguigaa et al. (2026); Jing et al. (2026); Kashyap et al. (2026); Kee et al. (2025); Cai et al. (2025); Zhu et al. (2025); Batista & Passini (2025); Cojocariu et al. (2025); Smyk & Arkhypova (2025); Limboo et al. (2025); Marshall et al. (2026); Fatima et al. (2025); Collette et al. (2026); Li & Shen (2025); Cong et al. (2025); Zhou et al. (2025); Ma et al. (2025); Tian et al. (2024); Malik & Ford (2024); Fayaz et al. (2023); Wu et al.

(2023); Shah et al. (2023); He et al. (2023); Han et al. (2023); Xu et al. (2023); Piedallu et al. (2022); Iwahashi et al. (2021); Mekonen & Berlie (2021); Valencia et al. (2020); Naithani et al. (2019); Shahzad (2019); Zeng et al. (2019); Papathoma-Köhle et al. (2019); Azmeri & Isa (2018); Schlögl et al. (2019); Song et al. (2017); Zhang et al. (2016); Saputra et al. (2016); Ciurean et al. (2016); Papathoma-Köhle (2016); Bai et al. (2014); Земцов et al. (2014); Nisha & Punia (2014); Han et al. (2013); Alcántara-Ayala (2008)			
Munyai et al. (2026); Joshi et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Veloso et al. (2026); Moreno-Abdelnur et al. (2026); Pitchaimani et al. (2026); Sguigaa et al. (2026); Cruz-Burga et al. (2026); Kashyap et al. (2026); Qiu & Geng (2025); Batista & Passini (2025); Cojocariu et al. (2025); Smyk & Arkhypova (2025); Limboo et al. (2025); Li et al. (2025); Collette et al. (2026); Li & Shen (2025); Ma et al. (2025); Tian et al. (2024); Fayaz et al. (2023); Wu et al. (2023); Shah et al. (2023); He et al. (2023); Han et al. (2023); Hespanhol et al. (2022); Iwahashi et al. (2021); Papathoma-Köhle et al. (2019); Schlögl et al. (2019); Saputra et al. (2016)	۲۹	یادگیری ماشین	داده‌محور و پیش‌بینی‌کننده
Bui et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Cruz-Burga et al. (2026); Kee et al. (2025); Lan et al. (2025); Lyngdoh et al. (2025); Cavallo et al. (2025); Bhandari et al. (2024); Bista (2023); Khatri & Pasa (2023); Jamal-ud-din et al. (2023); Piedallu et al. (2022); Mekonen & Berlie (2021); Mountain et al. (2020); Nepal et al. (2019); Shahzad (2019); Orchard et al. (2019); Tessema & Simane (2019); Aksha et al. (2018); Schlögl et al. (2019); Mohanty et al. (2017); Gerlitz et al. (2016); Simane et al. (2014); Земцов et al. (2014); Alcántara-Ayala (2008)	۲۵	پیمایش / پیمایش خانوار یا جامعه	اجتماعی و مشارکتی
Bui et al. (2026); Wang et al. (2026); Joshi et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Pitchaimani et al. (2026); Sguigaa et al. (2026); Lyngdoh et al. (2025); Zhu et al. (2025); Batista & Passini (2025); Cavallo et al. (2025); Limboo et al. (2025); Marshall et al. (2026); Li & Shen (2025); Khatri & Pasa (2023); Wu et al. (2023); Shah et al. (2023); He et al. (2023); Han et al. (2023); Hespanhol et al. (2022); Piedallu et al. (2022); Papathoma-Köhle et al. (2019); Azmeri & Isa (2018)	۲۲	مدل‌سازی رگرسیونی	آماري و کاهش بُعد
Bui et al. (2026); Munyai et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Moreno-Abdelnur et al. (2026); Pitchaimani et al. (2026); Kee et al. (2025); Lan et al. (2025); Cai et al. (2025); Limboo et al. (2025); Zhou et al. (2025); Tian et al. (2024); Fayaz et al. (2023); Jamal-ud-din et al. (2023); Wu et al. (2023); Shah et al. (2023); He et al. (2023); Zhao & Chi (2021); Naithani et al. (2019); Zeng et al. (2019); Papathoma-Köhle et al. (2019); Papathoma-Köhle (2016); Han et al. (2013)	۲۲	فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)	تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره
Khadzhaev & Fazilova (2026); Bui et al. (2026); Muhammad et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Ruegg et al. (2026); Cruz-Burga et al. (2026); Lan et al. (2025); Lyngdoh et al. (2025); Cai et al. (2025); Zhu et al. (2025); Limboo et al. (2025); Fatima et al. (2025); Li et al. (2025); Zhou et al. (2025); Handwerger et al. (2021); Zhao & Chi (2021); Naithani et al. (2019); Aksha et al. (2018); Nisha & Punia (2014)	۱۹	تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)	آماري و کاهش بُعد
Bui et al. (2026); Joshi et al. (2026); Cruz-Burga et al. (2026); Lan et al. (2025); Lyngdoh et al. (2025); Cavallo et al. (2025); Fatima et al. (2025); Ma et al. (2025); Malik & Ford (2024); Khatri & Pasa (2023); Wu et al. (2023); Mekonen & Berlie (2021); Naithani et al. (2019); Nepal et al. (2019); Shahzad (2019); Orchard et al. (2019); Tessema & Simane (2019); Papathoma-Köhle et al. (2019); Onyango et al. (2016)	۱۹	روش‌های مشارکتی	اجتماعی و مشارکتی
Bui et al. (2026); Munyai et al. (2026); Magdiev et al. (2026); Pitchaimani et al. (2026); Kee et al. (2025); Limboo et al. (2025); Fayaz et al. (2023); Jamal-ud-din et al. (2023); Shah et al. (2023); Zhao & Chi (2021); Schlögl et al. (2019); Utaas et al. (2016)	۱۲	تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) نشانگان صریح	تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره
Ruegg et al. (2026); Lyngdoh et al. (2025); Li et al. (2025); Collette et al. (2026); Cong et al. (2025); Bhandari et al. (2024); Xu et al. (2023); Attiogbé et al. (2022); Hespanhol et al. (2022); Valencia et al. (2020); Jr. et al. (2020); Bai et al. (2014)	۱۲	تحلیل / مدل‌سازی سناریو	سناریو و آینده‌نگر
Munyai et al. (2026); Ma et al. (2025); He et al. (2023)	۳	وزن‌دهی آنتروپی	شاخص، وزن-دهی و تجمیع

تمامی ۹۶ مطالعه که در بین سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۶ انجام شده است در این مطالعه وارد شده‌اند. در این میان رویکردهای شاخص محور پرتکرارترین روش (۲۷/۱٪) و خانواده غالب بوده‌اند. پس از آن یادگیری ماشین (۲۱/۹٪)، مطالعات پیمایشی و مشارکتی در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. هم‌رخدادی روش‌ها نیز متنوع است. ترکیب شاخص‌ها با GIS در ۴۶/۹ درصد از مطالعات و ترکیب آماری، GIS و سنجش از دور ۳۰/۲ درصد از هم‌رخدادی‌ها را پوشش می‌دهد.

ترکیب روش‌ها توسط دو خانواده روش انجام شده است. اما نکته اصلی این است که ۵۳/۱٪ از مطالعات ترکیبی از چندین روش استفاده کرده‌اند. در کل ۸۳/۳٪ از مطالعات ترکیبی شده‌اند. دوره انتشار پس از تصحیح مونت کارلو و نرخ کشف نادرست (FDR) نشان دهنده معماری به طور معنی دار مرتبط ($pFDR=0.0143$; $V=0.279$) بود در حالی که اهمیت معماری خانواده روش غالب نبوده است ($pFDR=0.0820$; $V=0.328$). این بدان معناست که بازسازمان‌دهی روش‌ها و بازترکیب روش‌ها و به معنی جایگزینی یک روش با روش دیگر نیست. با این حال زنجیره M-O-D در معماری روش در شکل ۳ نشان داده شده است. مطالعات ترکیبی چند روش جایگاهی ویژه در یک زنجیره کامل دارند.

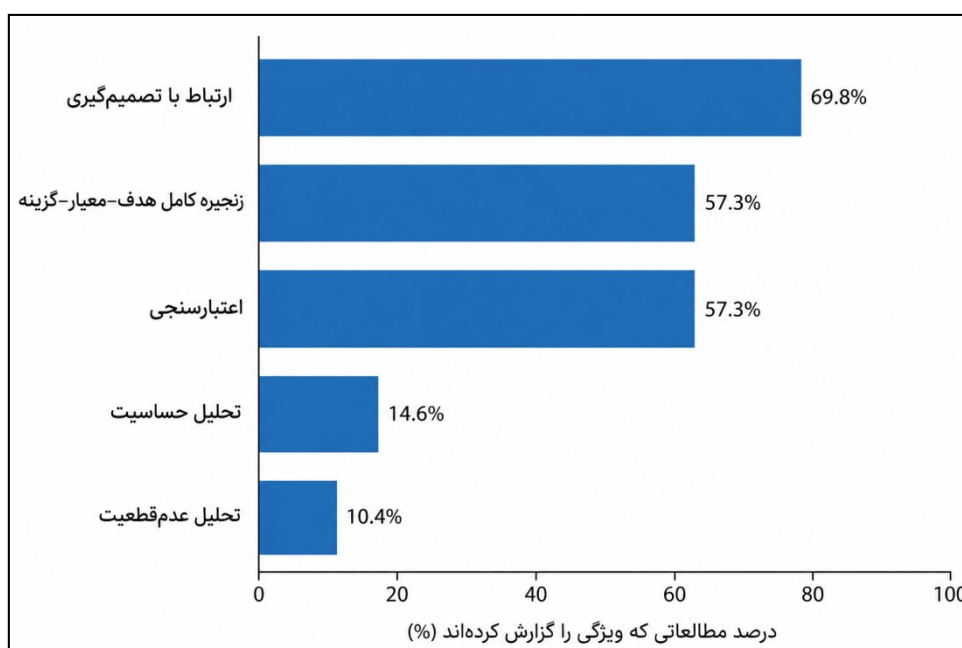


شکل ۳. معماری روش و ارزیابی کامل بودن زنجیره روش خروجی و تصمیم، محور افقی طبقات معماری روش و محور عمودی درصد از زنجیره M-O-D در هر طبقه از زنجیره

Figure 3. Method architecture and completeness assessment of the Method-Output-Decision (M-O-D) chain; the horizontal axis represents method architecture layers, and the vertical axis shows the percentage of the M-O-D chain within each layer

ارزیابی استواری مطالعات یکی از محورهای این بررسی است. از کل مطالعات در مجموع مطالعات ۵۷/۳ درصد آنها اقدام به اعتبارسنجی مطالعه خود کرده‌اند. تحلیل حساسیت صرفاً در ۱۴/۶ درصد از مطالعات انجام گرفته است. مهمترین یافته شاید عبارت باشد از توجه به تحلیل عدم قطعیت این موضوع فقط در ده مطالعه قابل شناسایی است. بررسی از نظر زنجیره معماری نشان می‌دهد: در ۶۹/۸ درصد از مطالعات پیوند خروجی با تصمیم مشخص و قابل شناسایی است. اما وقتی بحث از زنجیره کامل می‌شود تنها ۵۷/۳ درصد از مطالعات آن را به صورت کامل ارائه کرده‌اند. در مجموع مطالعات ۶/۲ درصد آنها به صورت همزمان مباحث مفهوم‌سازی صریح آسیب‌پذیری، روش، خروجی، اعتبارسنجی، تحلیل عدم قطعیت و پیوند با تصمیم را در کار خود ارائه کرده بودند. بررسی ارتباط معماری با تکامل زنجیره M-O-D رابطه‌ای متوسط را منعکس می‌کند ($V=0.441$; Monte Carlo $pFDR=0.0003$). در ضمن بین

خانواده روش‌شناسی غالب و کامل بودن زنجیره ارتباط معناداری وجود دارد ($V=0.417$; $pFDR=0.0054$). براساس شکل ۴ اعتبارسنجی در کمی بیش از نصف حجم جامعه نمونه قابل رویت است تحلیل حساسیت و عدم قطعیت موضوعی نادر است. تضاد بین پیوند با تصمیم‌گیری ۶۹/۸ درصد و تحلیل صریح عدم قطعیت (۱۰/۴ درصد)، نشان از آن دارد که عدم‌توازن روش‌شناختی وجود دارد که در تلفیق میان این دو قرار گرفته است. شکل ۴ نمایه استواری تا تصمیم را خلاصه می‌کند. اعتبارسنجی در کمی بیش از نیمی از پیکره مطالعاتی وجود دارد، در حالی که تحلیل حساسیت و به‌ویژه تحلیل عدم قطعیت همچنان نادر هستند. تضاد بین پیوند با تصمیم نشان‌دهنده عدم‌توازن روش‌شناختی مرکزی است که توسط این تلفیق شناسایی شده است.



شکل ۴. ارزیابی استواری مطالعات انجام شده محور عمودی مولفه‌های استواری و پیوند با تصمیم و محور افقی درصد از کل مطالعات بررسی شده

Figure 4. Assessment of the robustness of the conducted studies; the vertical axis represents robustness components and their link to decision-making, while the horizontal axis represents the percentage of the total studies reviewed

تلفیق یافته‌ها نشان از آن دارد که نقص در بسته روشی به صورت کامل و نه فقدان ابزار تحلیل را به عنوان یک مساله اصلی در این عرصه مشخص می‌سازد. این درحالی است که چرخه کامل حکایت از هشت مرحله مشخص دارد که عبارت است از چارچوب‌بندی مسئله، مفهوم‌سازی آسیب‌پذیری، معماری داده، معماری روش، تجمیع / مدل‌سازی، اعتبارسنجی و استواری، ترجمه خروجی، پیوند با تصمیم. در حالی که این معماری نقطه قوت محسوب می‌شود و ماهیتی کارکردی به تمام معنا دارد. اما داده‌ها حکایت از نادیده انگاری آن دارند. لذا این معماری مشخص می‌کند که یک ارزیابی باید از چه مولفه‌هایی برخوردار باشد و آنها را چگونه به یکدیگر پیوند بزند. در عین حال در این میان آزادی عمل برای انتخاب اجزا تشکیل‌دهنده روش مانند سنجش از دور، استفاده از مجموعه شاخص‌ها یا تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، یادگیری ماشین و سناریو و یا رویکردهای مشارکتی وجود دارد.

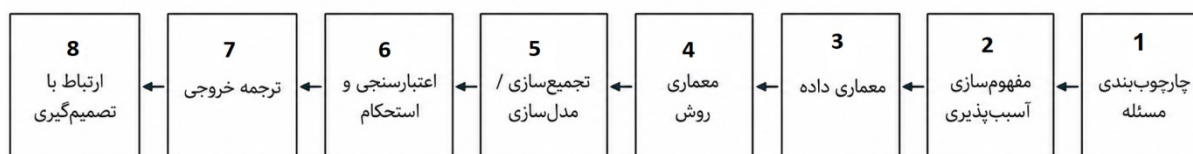
تحلیل هشت مرحله از پوشش نشان می‌دهد که در ۹۳ مطالعه (۹۶/۹٪) شواهد مربوط به تمرکز بر مساله / آسیب-پذیری وجود دارد، ۹۰ مطالعه (۹۳/۸٪) اجزای صریح مفهومی آسیب‌پذیری را دارند، ۸۶ مطالعه (۸۹/۶٪) شواهد قابل

بازیابی در مورد معماری داده‌ها دارند، ۸۹ مطالعه (۹۲/۷٪) شواهد قابل شناسایی در مورد معماری روش دارند، ۸۱ مطالعه (۸۴/۴٪) قابلیت تجمیع یا مدل‌سازی را دارند، ۵۵ مطالعه (۵۷/۳٪) تاییدیه دارند، ۷۷ مطالعه (۸۰/۲٪) خروجی قابل شناسایی دارند و ۶۷ مطالعه (۶۹/۸٪) پیوند صریح با تصمیم‌گیری دارند. در مرحله بلوغ تنها ۱۴ مطالعه (۱۴/۶٪) تحلیل حساسیت و ۱۰ مطالعه (۱۰/۴٪) شواهد صریح در مورد شاخص‌های عدم قطعیت دارند. این درصدها نشان‌دهنده پوشش عملکردها می‌باشد و نمی‌توان آنها را به عنوان نمره کیفیت مطالعات در نظر گرفت.

جدول ۲. آزمون‌های ارتباطی با تأیید مونت کارلو و تصحیح نرخ کشف کاذب (FDR) بنیامینی-هوچبرگ (n=96)

Table 2. Monte Carlo-validated association tests with Benjamini-Hochberg FDR correction (n= 96)

تحلیل	Cramér's V	pFDR	Monte Carlo p	df	χ^2	رابطه
متوسط	۰/۳۲۸	۰/۰۸۲۰	۰/۰۶۸۳	۲۱	۳۱/۰۰	ارتباط دوره انتشار با خانواده روش غالب
اندک	۰/۲۷۹	۰/۰۱۴۳	۰/۰۰۷۶	۹	۲۲/۳۶	ارتباط دوره انتشار با معماری روش
اندک	۰/۲۸۶	۰/۰۱۴۳	۰/۰۰۹۵	۹	۲۳/۵۴	ارتباط معماری روش با معماری استواری
متوسط	۰/۴۴۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰	۹	۵۵/۹۳	ارتباط معماری روش با زنجیره روش-خروجی-تصمیم
متوسط	۰/۴۱۷	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۱۸	۲۱	۵۰/۰۱	ارتباط خانواده روش غالب با زنجیره روش-خروجی-تصمیم
اندک	۰/۲۰۹	۰/۱۸۱۷	۰/۱۸۱۷	۹	۱۲/۶۴	ارتباط معماری استواری با زنجیره روش-خروجی-تصمیم



شکل ۵. معماری حاصل فراروش هشت مرحله مستخرج از ۹۶ مطالعه برگزیده

Figure 5. Architecture resulting from the eight-step meta-method derived from 96 selected studies.

جدول ۳. معماری روش‌شناسی، از استواری روش تا تصمیم‌گیری در ۹۶ مطالعه برگزیده

Table 3. Methodological architecture: from methodological robustness to decision-making in 96 selected studies

ویژگی / مشخصه	n	%
ترکیبی چند روش	۵۱	۵۳/۱
ترکیبی دو خانواده	۲۹	۳۰/۲
تک خانواده	۹	۹/۴
اعتبارسنجی گزارش شده	۵۵	۵۷/۳
تحلیل حساسیت گزارش شده	۱۴	۱۴/۶
تحلیل عدم قطعیت گزارش شده	۱۰	۱۰/۴
پیوند با تصمیم شناسایی شده	۶۷	۶۹/۸
زنجیره کامل روش-خروجی-تصمیم (M-O-D)	۵۵	۵۷/۳
زنجیره کامل شش جزئی	۶	۶/۲

بر اساس اهداف تحقیق داده‌های مورد نیاز در بخش نتایج ارائه شد. نتایج نشان می‌دهند که ارزیابی آسیب‌پذیری کوهستانی حوزه‌ای ترکیبی به شمار می‌آید در بسیار از مطالعات مورد توجه بوده و از چارچوب بهره گرفته است (Papathoma-Köhle et al., 2019; Simane et al., 2014). به عنوان مثال هر آن جایی که موضوع مباحث اجتماعی و اقتصادی در آسیب‌پذیری مطرح شده است، شاخص‌های ترکیب توام با اطلاعات مکانی ارایه شده و شواهد مرتبط با رویه‌های مانند وزن‌دهی، مدل‌سازی مخاطره و مانند آن تلفیق می‌شوند (Aksha et al., 2018; Gerlitz et al., 2016). این موضوع در مطالعات قابل مشاهده است (Lan et al., 2025; Tessema & Simane, 2019). این الگو در مطالعات مرتبط با یادگیری ماشین، تصمیم‌گیری چند معیاره و سنجش از دور و GIS و یا روندهای پیش‌بینی توان با رتبه‌بندی‌ها در سامانه اطلاعات جغرافیای قابل ردیابی است (Shah et al., 2023; Fayaz et al., 2023). این موضوع به خوبی بیانگر معماری روش‌شناختی است که به نوعی تایید کننده زنجیره کامل (M-O-D) است.

واضح است که ادغام هر روش فقط زمانی سودمند خواهد بود که انتظار داشته باشیم در تحقیق نقش خاصی را ایفا کند. در حال حاضر ارزیابی‌های آسیب‌پذیری از عدم سازگاری در استفاده از روش‌ها و تعامل آنها در ادبیات روش‌شناسی رنج می‌برند. **پاپاتوما-کول (۲۰۱۱)** ناسازگاری در مقیاس، شاخص‌ها و فناوری مورد استفاده در ارزیابی‌های آسیب‌پذیری فیزیکی خطرات کوهستانی را برجسته کرده است. همچنین بر اساس مطالعه **تاکور و همکاران (۲۰۲۱)** در ۷۵ مورد از آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های جنگلی کوهستانی در رویکرد مبتنی بر مدل فقدان داده‌های اجتماعی-اکولوژیکی و مبتنی بر زمین مشاهده شده است. علاوه بر این بر اساس **سلطان و همکاران (۲۰۲۲)** در یک بررسی از ۵۹ مطالعه در هیمالیا ناسازگاری در انواع آسیب‌پذیری، مقیاس و روش‌های ارزیابی مشاهده شده است. بنابراین تحقیق فعلی با بررسی‌های ذکر شده در مسئله چند روش‌گرایی موافق است. اما حتی فراتر از این است زیرا تغییرات مشاهده شده در "معماری و بازترکیب روش‌ها" است نه جایگزینی خانواده روش‌های غالب. علاوه بر این ارتباط ضعیف بین معماری محکم و کامل بودن زنجیره M-O-D نشان می‌دهد که علیرغم اینکه اعتبارسنجی یا تحلیل عدم قطعیت لازم است این عوامل نمی‌توانند جای بزرگترین نقص در این حوزه موضوعی عدم قطعیت تحلیل است. از ۱۰/۴ درصد مقالاتی که به صراحت به مسئله عدم قطعیت پرداخته‌اند نگرانی زیادی در مورد تحلیل عدم قطعیت در ارزیابی آسیب‌پذیری وجود دارد. اگرچه مسایل دیگری مانند انتخاب یک شاخص، نرمال‌سازی و وزن‌دهی، ویژگی‌های مدل مورد استفاده، توسعه سناریو و انتخاب آستانه طبقه‌بندی وجود دارد، ولی نگرانی زیادی در مورد مسئله عدم قطعیت در این مقاله وجود دارد. چون به صراحت ذکر شده است که تخمین آسیب‌پذیری به انتخاب مدل یا شاخص بستگی دارد (Gerlitz et al., 2016; Aksha et al., 2018). تایید نتایج در ۵۷/۳ درصد مطالعات یافت شده است. بنابراین به دلیل این نگرانی مطرح شده است که لازم است تایید نتایج و تحلیل حساسیت از تحلیل عدم قطعیت جدا شود (Fuchs et al., 2012; Favier et al., 2014). به عبارت دیگر لازم است ببینیم که آیا نتایجی که به دست آمده در برابر انتخاب‌های فعلی کافی محکم هستند یا خیر (Bai et al., 2014; Valencia et al., 2020).

بررسی ده مقاله هدفمند که دارای شاخص‌های صریح عدم قطعیت هستند نشان می‌دهد که آنها یکسان نیستند **اسجیجا و همکاران (۲۰۲۶)** بر روی عدم قطعیت در تخمین جرم با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و تخمین بازه اطمینان تمرکز کرده‌اند **فیور و همکاران (۲۰۱۴)** از شاخص‌های مونت کارلو و Sobol برای انجام تحلیل حساسیت داده‌های ورودی استفاده کرده‌اند. **کلوت و همکاران (2026)**، **ایزو و همکاران (۲۰۲۳)**، **ولنسیا و همکاران (۲۰۲۰)** و **سیریون و همکاران (۲۰۱۶)** با استفاده از مسیر سناریو/ گروه‌بندی، انتخاب مدل، انتخاب متغیر یا فرمول‌بندی احتمالی به دنبال عدم قطعیت بوده‌اند. **فوکس و همکاران (۲۰۱۲)** از آزمون مونت کارلو برای انجام استنباط از اهمیت آماری استفاده کرده‌اند. در مقابل در سه مطالعه **مونایی و همکاران (۲۰۲۶)**، **فاطمیما و همکاران (۲۰۲۵)** و **شاه و همکاران**

(۲۰۲۳) نشان می‌دهد که عدم قطعیت بیشتر به عنوان یک محدودیت، پیشنهاد برای مطالعه بیشتر یا فقط به عنوان یک مرجع روش مطرح شده است. انتشار صریح عدم قطعیت تا خروجی نهایی انجام نشده است. بنابراین این موضوع باید به عنوان "وجود شاخص‌های صریح عدم قطعیت" درک شود نه ده شاخص کامل در مورد گسترش عدم قطعیت. بررسی اعتبار سنجی استحکام و استواری مطالعات نیز نشان‌دهنده ناهمگنی بالایی است. با بازبینی حدوده ۵۵ مطالعه بیانگر آن است که ۲۶ مطالعه از معیارهای کنترل عملکرد استفاده کرده‌اند. در ۹ مطالعه در کارشان از پیش‌بینی و تایید آماری از جمله تایید متقاطع، AUC/ROC یا معیار عملکرد استفاده کرده‌اند. فقط ۳ مطالعه شامل از تایید متخصص یا ذینفع بهره برده‌اند. در ۱۷ مطالعه نوع تایید مشخص در گزارش قابل‌بازبینی نبوده است. تایید مدل روشی برای ارزیابی توانایی تمایز مدل است و وقتی با اطلاعات مستقل مقایسه شود ارزیابی مناسب‌تری از تناسب آزمایشی را ارائه می‌دهد. تایید متخصص از نظر قابلیت تفسیر و مفید بودن در تصمیم‌گیری ارزشمند است. در مقابل گزارش مبهم تایید روش که قابل‌بازبینی نیست شواهد کمتری از استحکام مدل ارائه می‌دهد.

یک عامل مهم دیگر ناسازگاری روش - خروجی - تصمیم است از میان کارهای مورد مطالعه ۶۹/۸ درصد به فرایندهای تصمیم‌گیری خاص و قابل‌بازبینی مرتبط بوده است. با این حال تنها ۵۷/۳ درصد از مقالات یک زنجیره کامل از فرآیند تصمیم‌گیری را ارائه دادند. برای مثال یک نقشه آسیب‌پذیری یا پیش‌بینی زمان به عنوان شواهد و مستندات فرآیند تصمیم‌گیری که خروجی را توضیح می‌دهد و چگونه می‌توان آن را اولویت‌بندی کرد، تبدیل به یک برنامه مدیریت و برنامه‌ریزی یا تخصیص منابع می‌شود. در اکثر موارد مطالعات اقتصادی و همکارانه نتایج غنی ارائه می‌دهند درحالی که مطالعات تصمیم‌گیری چند متغیره معمولاً اولویت‌های واضحی را تولید می‌کنند (Khatrī & Pasa, 2023; Jamal-ud-din et al., 2023). اما هرچند مطالعاتی با پیش‌بینی‌ها یا شدت فضایی ممکن است خروجی خوبی تولید کنند در حوزه تصمیم‌گیری خروجی ممکن است آنقدر واضح نباشد؛ بنابراین این مطالعه نشان می‌دهد که بین تولید خروجی و خروجی مرتبط با تصمیم‌گیری هماهنگی وجود ندارد (Li et al., 2025; Piedallu et al., 2022) خروجی‌های دو مورد نمی‌توانند فرایندهای تصمیم‌گیری را پشتیبانی کنند.

نکته دیگر عبارت است از این که معماری روش و دسته‌بندی روش‌های مورد استفاده ارتباط نه چندان قوی با زنجیره کامل دارد. در همین راستا موضوع استواری بعد از تصحیح FDR ارتباط معناداری با کامل بودن زنجیره پیدا نکرد. البته این یافته دال بر فقدان اهمیت استواری نبوده و موید آن است که دو موضوع اعتبارسنجی و یا عدم قطعیت از بحث معماری مجزا هستند و جایگزین یک دیگر نیستند. آن چه در معماری روش‌شناسی مهم است پیوند میان مسئله، روش، خروجی و تصمیم است تا این به موضوعاتی مانند تحلیل، همبستگی و مانند آن بپردازد.

مدلی که به عنوان نتیجه این مطالعات پدید آمده است پتانسیل توسعه یک چارچوب آزمایشی پیشنهادی را دارد که پایه منطقی روش‌شناسی تحقیقات آینده را تشکیل خواهد داد. این مطالعات نشان داده‌اند که این چارچوب و سوال است که سطح آسیب‌پذیری را تعریف می‌کند. با این درک از آسیب‌پذیری کمک می‌کند تا معنای آسیب‌پذیری در مطالعه را درک کرد. با این حال شواهد مربوط به معماری داده، فضایی، زمانی، محیطی و اجتماعی باید هماهنگ شود (Handwerger et al., 2021; Mekonen & Berlie, 2021). به وضوح در چارچوب معماری روش، ممارسات ضروری و مکمل شناسایی و اعمال خواهد شد (Zhao & Chi, 2021; He et al., 2023). در فرآیند جمع‌آوری یا مدل‌سازی شواهد و خروجی‌های بدست آمده هماهنگ است. تایید و قابلیت اعتماد یکی از مراحل کلیدی کار است که قرار است خروجی‌های بدست آمده را از نظر صحت و پایداری آن بررسی و تایید کند و آن را بپذیرد یا رد کند. خروجی‌های تایید شده همراه با شواهد و مستندات باید به فرآیند تصمیم‌گیری متصل شود و بازتاب دهنده کاربرد خروجی‌های بدست آمده

باشد. این مدل پتانسیل این را دارد که به یک چک لیست تبدیل شود که دیدگاهی پیش رو در فرآیند ارزیابی وجود دارد را بهتر هدایت کند (Utassee et al., 2016; Kee et al., 2025).

این مطالعه اگر چه نکات مشخصی را برجسته کرد اما از محدودیت‌هایی هم برخوردار است. اول این که اگر چه مطالعه ۹۶ مطالعه را بررسی کرد اما با سوگیری مقالات منتشر شده از یک سو و از سوی دیگر مقالات قابل ارزیابی رودرو است. لذا نمی‌توان ادعا کرد نمونه کاملی از تمامی مطالعات بالقوه مرتبط با آسیب‌پذیری کوهستانی به شمار می‌آید. سوگیری بعدی که وجود دارد به انتشار مقالات در کشورهای شمال باز می‌گردد که به طور متعارف بسیار بیشتر از کشورهای جنوب است که خود یک موضوع قابل تامل است. در نهایت باید اشاره کرده که جداول توافقی پراکنده، مورد استفاده در تحلیل مونت کارلو تفسیر زیرگروه‌ها را با دقت بالا محدود خواهد ساخت. به عبارت دیگر توصیه می‌شود که یک آزمایش بر اساس چارچوب شناختی که در بالا بحث شد انجام شود و نتایج آن گزارش شود. در مورد دیگری که در آن امکان استفاده از این چارچوب در مناطق کوهستانی با انواع مختلف دسترسی به داده‌ها و رژیم‌های خطر مورد بررسی قرار گرفته است. این پیشنهاد مطابق با آن تغییر کرده و پس از تایید به پروتکل تاییدشده تبدیل خواهد شد. لازم به ذکر است که چون فرایند کدگذاری دوگانه برای تمام مواد کدگذاری شده انجام نشده است، ممکن است سوگیری طبقه‌بندی در میان متغیرهای تفسیری ایجاد شود. اما این مشکل از طریق راهنمایی‌های از پیش تعریف شده و ارجاعات متنی حل شده است.

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعات عبارت بود از ارزیابی مبتنی روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق کوهستانی مبتنی بر چارچوب بر فراروش تعدد ۹۶ مطالعه مستقل در این تحقیق در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۶ استفاده شد. نتایج بیانگر آن بود که ارزیابی آسیب‌پذیری در مناطق کوهستانی از تحلیل‌های تک روشی فراتر رفته است. اما تنوع‌گرایی روش‌شناختی قادر به ارزیابی معماری کامل این مطالعات نبوده است. لذا یک چرخه ناقص از زنجیره روش خروجی و تصمیم‌گیری شکل گرفته است. اگر چه که در این فرایند روش‌های ترکیبی در حال حاضر غالب است اما درمقابل عدم قطعیت حاکم بر دستاوردها موضوعی چالش برانگیز در این حوزه است. از سوی دیگر انتقال نتایج به دست آمده به فرآیند تصمیم‌گیری از الگوی ناقصی برخوردار است. در بهترین حالت قوی‌ترین نتیجه ساختاری به دست آمده موید ارتباطی متوسط بین معماری روش و کامل‌بودن زنجیره M-O-D است که خود جای بررسی عمیق‌تری دارد.

افزودن بر این‌ها، به نظر نمی‌رسد توسعه ابزارهای تحلیلی جدید، اگر به صورت هم‌زمان به انسجام معماری ارزیابی توجه نشود، به‌تنهایی برای رفع این شکاف کفایت نخواهد کرد. تمرکز بر تکمیل زنجیره از چارچوب‌بندی مسئله و مفهوم‌سازی آسیب‌پذیری، از طریق معماری داده و روش، مدل‌سازی استوار، ترجمه خروجی و پیوند با تصمیم در قالب یک چارچوب هشت‌مرحله‌ای پیشنهادی گزینه‌ای تعیین‌کننده برای رفع این مشکل ساختاری است. لذا همین موضوع نیز می‌تواند بنیاد مطالعات بعدی برای بهبود ساختاری مبتنی بر داده‌های تجربی فراهم سازد.

References

- Aksha, S. K., Juran, L., Resler, L., & Zhang, Y. (2018). An Analysis of Social Vulnerability to Natural Hazards in Nepal Using a Modified Social Vulnerability Index. *International Journal of Disaster Risk Science*. <https://doi.org/10.1007/s13753-018-0192-7>.
- Alcántara-Ayala, I. (2008). On the historical account of disastrous landslides in Mexico: the challenge of risk management and disaster prevention. *Advances in geosciences*. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-159-2008>.

- Attiogbé, A. A. C., Abotsi, K., Adjossou, K., Parkoo, E. N., Adjonou, K., & Kokou, K. (2022). Climate vulnerability of coffee-cocoa agrosystems in the sub-humid mountain ecosystems in south-west Togo (West Africa). *Environmental Systems Research*. <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00274-4>.
- Azmeri, A., & Isa, A. H. (2018). An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of Aceh Besar Regency, Aceh province, Indonesia. *Jamba*. <https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.550>.
- Bai, Y., Kaneko, I., Kobayashi, H., Kurihara, K., Takayabu, I., Sasaki, H., & Murata, A. (2014). A Geographic Information System (GIS)-based approach to adaptation to regional climate change: a case study of Okutama-machi, Tokyo, Japan. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9450-6>.
- Batista, E. F., & Passini, L. D. B. (2025). Ecological vulnerability in landslide risk measurement in the municipality of Barra do Turvo, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.4.p2621-2639>.
- Bhandari, A., Magar, N. T., Thapa, B. J., Shahi, P., & Sharma, T. P. P. (2024). Measuring climate vulnerability of tourism-dependent livelihoods: The case of Lamtang National Park. *Journal of Tourism and Himalayan Adventures*. <https://doi.org/10.3126/jtha.v6i1.67397>.
- Bista, R. (2023). Assessment of Climate Change induced Household Vulnerability in Nepal: Application of Index Method. *ARRUS Journal of Social Sciences and Humanities*. <https://doi.org/10.35877/soshum1151>.
- Brown, T. M., Amirkhiz, R. G., Albright, S., Arnold, A., Brown, E., Brown, C., Chevreuil, V., Cheung, R., Cortes, D., Gallardo, J., Hanna, K., Lozano, R. R., Rebellon, J., Santillana, L., Silberberg, K., Yoo, J., Bernier, K., Ruegg, K., Hooten, M., & Zavaleta, E. (2026). Co-limitation by stable, dynamic and directional habitat features shapes climate vulnerability in an alpine specialist. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.64898/2026.04.09.717579>.
- Bui, V. L., Vu, B. T., Pham, K. D., Nong, D., Pham, D. V., Le, N., Pham, L. T., Brychkova, G., McKeown, P., Murray, C., S.Obaitor, O., Garschagen, M., & Spillane, C. (2026). Analytical hierarchy process-based mapping of social vulnerability to climate change in mountainous communes across Northwestern Vietnam. *GeoJournal*. <https://doi.org/10.1007/s10708-026-11588-6>.
- Cai, Y., Guo, X., Liu, J., Wang, D., & Zheng, J. (2025). Ecological geological vulnerability assessment in Northern Shanxi Province (China) based on sensitivity resilience pressure (SRP) model. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92642-0>.
- Calvo, R., Amigo, C., Billi, M., González, M. F., Urquiza, A., Álamos, N., & Navea, J. (2021). Territorial Energy Vulnerability Assessment to Enhance Just Energy Transition of Cities. *Frontiers in Sustainable Cities*. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.635976>.
- Cavallo, A., Cannata, G., Mastronardi, L., & Romagnoli, L. (2025). Environmental vulnerability in Italian mountain areas and its socioeconomic drivers. *RIVISTA DI ECONOMIA AGRARIA*. <https://doi.org/10.36253/rea-16630>.
- Ciurean, R., Hussin, H., Westen, C., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Chen, L., Frigerio, S., & Glade, T. (2016). Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2612-6>.
- Cojocariu, L., Copăcean, L., Horablagă, N., Sărățeanu, V., Bostan, C., & Samfira, I. (2025). Ecological vulnerability of mountain grasslands in protected areas of southwestern Romania: limiting factors and degradation processes. *Present Environment and Sustainable Development*. <https://doi.org/10.47743/pesd2025192011>.

- Collette, N., Pinel, S., Delorme-Hinoux, V., & Bertrand, J. A. M. (2026). Projecting spatiotemporal bioclimatic niche dynamics of endemic Pyrenean plant species under climate change: How much will we lose? *Ecography*, e08067. <https://doi.org/10.1002/ecog.08067>.
- Cong, W., Li, J., Zhang, Y., Huang, T., Gao, S., Yu, J., Zhang, Y., & Li, D. (2025). Snow Leopard habitat vulnerability assessment under climate change and connectivity corridor in Xinjiang Uygur autonomous region, China. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98909-w>.
- Cruz-Burga, Z., Fernández-Heaton, B. D. M., Ibáñez-Blancas, A. N., Chávez-Achong, J., & Sánchez-Uzcátegui, J. M. (2026). Socio-ecological drivers of forest-use change in the coffee landscapes of Chanchamayo, Peru. *Frontiers in Forests and Global Change*. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2026.1769428>.
- Darabi, H., Islami Farsani, S., & Irani Behbahani, H. (2019). Evaluation of Ecological Vulnerability in Chelgard Mountainous Landscape. *Pollution*, 5(3), 597–610. <https://doi.org/10.22059/poll.2018.262881.486>.
- Fatima, K., Jan, M., Ahmad, I., Farooq, M., & Muslim, M. (2025). Micro-level vulnerability assessment among agricultural communities of District Kupwara, Kashmir Himalaya. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14950-9>.
- Favier, P., Bertrand, D., Eckert, N., & Naaim, M. (2014). A reliability assessment of physical vulnerability of reinforced concrete walls loaded by snow avalanches. *Natural hazards and earth system sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-689-2014>.
- Fayaz, M., Romshoo, S., Rashid, I., & Chandra, R. (2023). Earthquake vulnerability assessment of the built environment in the city of Srinagar, Kashmir Himalaya, using a geographic information system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1593-2023>.
- Fuchs, S. (2009). Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria - paradigms of vulnerability revisited. *Natural hazards and earth system sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-337-2009>.
- Fuchs, S. (2010). A coupled vulnerability approach for European mountain regions. *WIT transactions on information and communication technologies*. <https://doi.org/10.2495/risk100441>.
- Fuchs, S., Orntsmüller, C., & Totschnig, R. (2012). Spatial scan statistics in vulnerability assessment: an application to mountain hazards. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0081-5>.
- Gerlitz, J., Macchi, M., Brooks, N., Pandey, R., Banerjee, S., & Jha, S. K. (2016). The Multidimensional Livelihood Vulnerability Index – an instrument to measure livelihood vulnerability to change in the Hindu Kush Himalayas. *Climate and Development*. <https://doi.org/10.1080/17565529.2016.1145099>.
- Gjoni, F., & Kopliku, B. (2026). ENVIRONMENTAL VULNERABILITY TO TOURISM PRESSURE IN PROTECTED MOUNTAIN AREAS: THE CASE OF THETH NATIONAL PARK, ALBANIA. *Revue Roumaine de Géographie / Romanian Journal of Geography*. <https://doi.org/10.59277/rrg.2026.1.04>.
- Han, W., Guan, J., Zheng, J., Liu, Y., Ju, X., Liu, L., Li, J., Mao, X., & Li, C. (2023). Probabilistic assessment of drought stress vulnerability in grasslands of Xinjiang, China. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143863>.
- Han, Y., Peng, S., Zhengchao, C., Xianzhao, L., Peng, H., & Shaokun, D. (2013). Disaster Insurance against Secondary Mountain Hazards in 32 Counties Severely Affected by the 2008 Wenchuan Earthquake. <https://doi.org/10.5595/idrim.2013.0054>.

- Handwerger, L. R., Runkle, J. R., Leeper, R., Shay, E., Dempsey, K. E., & Sugg, M. (2021). An Assessment of Social and Physical Vulnerability to Hydroclimate Extremes in Appalachia. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-469519/v1>.
- He, Y., Ding, M., Zheng, H., Gao, Z., Huang, T., Duan, Y., Cui, X., & Luo, S. (2023). Integrating development inhomogeneity into geological disasters risk assessment framework in mountainous areas: a case study in Lushan–Baoxing counties, Southwestern China. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05983-2>.
- Hespanhol, H., Cezón, K., Muñoz, J., Mateo, R. G., & Gonçalves, J. (2022). How vulnerable are bryophytes to climate change? Developing new species and community vulnerability indices. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108643>.
- Iwahashi, J., Yamazaki, D., Nakano, T., & Endo, R. (2021). Classification of topography for ground vulnerability assessment of alluvial plains and mountains of Japan using 30 m DEM. *Progress in Earth and Planetary Science*. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00398-0>.
- Jamal-ud-din, Ainuddin, S., Murtaza, G., Faiz, S., Muhammad, A., Raheem, A., & Khan, S. (2023). Earthquake vulnerability assessment through spatial multi-criteria analysis: a case study of Quetta city, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10967-3>.
- Jing, X., Qiao, C., Zhang, D., & Wang, R. (2026). Spatio-temporal evolution and driving factors of land degradation in Deyang City, Sichuan province. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1855067>.
- Joshi, B. R., Bhandary, N., Acharya, I. P., K.C., N., & Bhandari, C. (2026). Geospatial Integration of Landslide Susceptibility and Road Network Vulnerability in Mountainous Terrain. *Journal of Engineering Issues and Solutions*. <https://doi.org/10.3126/joeis.v5i2.97804>.
- Jr., C. E. J., Leibowitz, S., Sawicz, K. A., Comeleo, R., Stratton, L., Morefield, P., & Weaver, C. (2020). Using hydrologic landscape classification and climatic time series to assess hydrologic vulnerability of the western U.S. to climate. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3179-2021>.
- Kashyap, A., Pandey, V. K., Bera, D., Parashar, D., Kumar, A., Pandey, A., Ullah, S., Alkhuraji, W. S., & Zhran, M. (2026). Vegetation loss and climate-driven fragmentation in the Himalayan alpine ecosystem: an AI/ML-based LULC and carbon stock analysis. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-026-06269-w>.
- Kee, T., Qiu, B., Du, Q., & Sui, J. (2025). An application of AHP-based fire vulnerability assessment for 20th century mountainous built heritage. *npj Heritage Science*. <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01823-7>.
- Khadzhaev, R. N., & Fazilova, D. (2026). A spatial assessment of environmental vulnerability in the Akhangaran river basin, Uzbekistan. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series "Earth Sciences"*. <https://doi.org/10.25587/2587-8751-2025-1-44-67>.
- Khatri, B. B., & Pasa, R. B. (2023). Climate Change Adaptation Strategies of the Communities in Bagmati Province, Nepal. *Pravaha*. <https://doi.org/10.3126/pravaha.v29i1.71409>.
- Земцов, , Бабурин, , Koltermann, K. P., Krylenko, I., Yumina, N. M., & Litvinov, V. (2014). SOCIAL RISK AND VULNERABILITY ASSESSMENT OF HAZARDOUS HYDROLOGICAL PHENOMENA IN RUSSIA. *GEOGRAPHY ENVIRONMENT SUSTAINABILITY*. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-4-95-117>.
- Lalrinsangpuii, Feroze, S., & Lalruatsangi, E. (2025). Evaluation of Climate Change Vulnerability and Adaptive Capacity among Turmeric Farmers in Mizoram. *International Journal of Economic Plants*. <https://doi.org/10.23910/2/2025.6303a>.
- Lan, B., Truong, D. D., Dat, T. T., Quang, B. H., Hang, N. D., & Huan, L. (2025). Assessment of community livelihood vulnerability to climate change in Vietnam: A case study of ethnic

- groups in Northern Upland Region. PLoS ONE. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330482>.
- Li, C., & Shen, L. (2025). Research on landslide ecological vulnerability assessment in alpine valley region considering spatial heterogeneity and feature optimization: a case study of Luding County. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1686605>.
- Li, X., Yang, D., Wang, J., & Pan, G. (2025). Prediction of the change in suitable growth area of *Sabina tibetica* on the Qinghai-Tibetan plateau using MaxEnt model. *Frontiers in Forests and Global Change*. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1465416>.
- Lima, B. C., Francisco, C., & Bohrer, C. (2017). DESLIZAMENTOS E FRAGMENTAÇÃO FLORESTAL NA REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. <https://doi.org/10.5902/1980509830321>.
- Limboo, S., Guite, L., Haq, A. U., & Bharti, S. (2025). Evaluating determinants of inherent vulnerability and risk index (IVRI) assessment of Gangtok city using PCA (Principal Component Analysis) approach. *Discover Environment*. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00398-1>.
- Lyngdoh, V., Lynrah, M. M., Wahlang, E., Nongrang, A. L., Wahlang, N., Chiang, A., & Beda, J. (2025). District-level climate vulnerability assessment in Meghalaya using an IPCC AR5 framework. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26651-4>.
- Ma, R., Liu, L., Xu, J., Yang, M., Xu, G., Yang, H., & Ma, M. (2025). Vulnerability-based analysis of traditional village distribution in Northwest Yunnan as an ecologically fragile area. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27342-w>.
- Magdiev, K., Fazilova, D., & Kazakov, A. (2026). GIS-based Ecological Vulnerability Assessment in a Mountainous Region: the Charvak Reservoir, Uzbekistan. *Forum Geografic*. <https://doi.org/10.23917/forgeo.13377>.
- Maggini, R., Lehmann, A., Zbinden, N., Zimmermann, N. E., Bolliger, J., Schröder, B., Foppen, R., Schmid, H., Beniston, M., & Jenni, L. (2014). Assessing species vulnerability to climate and land use change: the case of the Swiss breeding birds. *Diversity and Distributions*. <https://doi.org/10.1111/ddi.12207>.
- Malik, I. H., & Ford, J. D. (2024). Monitoring climate change vulnerability in the Himalayas. *AMBIO*. <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02066-9>.
- Marshall, A. M., Abatzoglou, J. T., Koshkin, A. L., & Rhoades, A. M. (2026). High-resolution mountain topography can inform global snow vulnerability estimates. *Environmental Research Letters*, 21(1), 014017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae2d73>.
- McGahey, D. J., Williams, D. G., Muruth, P., & Loubser, D. (2013). Investigating climate change vulnerability and planning for adaptation: Learning from a study of climate change impacts on the Mountain Gorilla in the Albertine Rift. *Natural Science*. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.55a002>.
- Mekonen, A. A., & Berlie, A. B. (2021). Rural households' livelihood vulnerability to climate variability and extremes: a livelihood zone-based approach in the Northeastern Highlands of Ethiopia. *Ecological Processes*. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00313-5>.
- Mohanty, S. K., Agrawal, N., Mahapatra, B., Choudhury, D., Tuladhar, S., & Holmgren, E. V. (2017). Multidimensional poverty and catastrophic health spending in the mountainous regions of Myanmar, Nepal and India. *International Journal for Equity in Health*. <https://doi.org/10.1186/s12939-016-0514-6>.
- Moreno-Abdelnur, A., Bateman, J. F. T., Bernal, J. E. M., Quesada, B., & Avila-Diaz, A. (2026). Integrated flood vulnerability assessment in a data-scarce tropical mountain-to-piedmont watershed. *Environmental Research Communications*. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae47ac>.

- Mountain, U., Tribe, U., Oden, J. H., Bauch, N. J., Arnold, R., Reilly, J. F., McMahon, P., Paschke, S., Beisner, K. R., & Walton-Day, K. (2020). Hydrogeologic characterization, groundwater chemistry, and vulnerability assessment, Ute Mountain Ute Reservation, Colorado and Utah. <https://doi.org/10.3133/sir20195122>.
- Muhammad, S., Khalid, T., Tayyab, M., Majeed, M., Nawaz, H., Bilal, M., Khan, M. J. T., & Khan, Z. (2026). Climate-growth coupling across elevational gradients: species-specific response of Himalayan conifers in Galyat region, Pakistan. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. <https://doi.org/10.15835/nbha54215211>.
- Mulska, O., Vasylytsiv, T., Levytska, O., Осінська, & Kynytska-Iliash, M. (2022). Assessment of environment of an area's social vulnerability: ecological aspect. *Agricultural and Resource Economics International Scientific E-Journal*. <https://doi.org/10.51599/are.2022.08.03.04>.
- Munyai, R. B., Nenwiini, S. C., Mohomi, T., Singo, M. V., & Chikoore, H. (2026). Flood vulnerability assessment in Mopani District Municipality, South Africa. Part 1: Physical factors and adaptation framework. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-026-08299-z>.
- Naithani, S., Naithani, S., Ray, P. K. C., & Joshi, R. (2019). A MULTI PARAMETRIC MICRO-LEVEL VULNERABILITY ASSESSMENT MODEL FOR MOUNTAIN HABITAT: A CASE EXAMPLE FROM BHILANGANA BLOCK, UTTARAKHAND HIMALAYA, INDIA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w8-267-2019>.
- Nepal, A., Mandal, R., Pradhananga, S., & Khanal, S. (2019). Assessing Climate Variability in Langtang Valley Using Livelihood Vulnerability Index. *Journal of aquatic science and marine biology*. <https://doi.org/10.22259/2638-5481.0201003>.
- Nisha, & Punia, M. (2014). Socio-economic vulnerability and sustainable development in context of Development vs. Conservation debate: A study of Bhagirathi Basin, Uttarakhand, INDIA. ~ The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences/International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-8-77-2014>.
- Onyango, E., Sahin, O., Awiti, A., Chu, C., & Mackey, B. (2016). An integrated risk and vulnerability assessment framework for climate change and malaria transmission in East Africa. *Malaria Journal*. <https://doi.org/10.1186/s12936-016-1600-3>.
- Orchard, S., Glover, D., Karki, S. T., Ayele, S., Sen, D., Rathod, R., & Rowhani, P. (2019). Exploring synergies and trade-offs among the sustainable development goals: collective action and adaptive capacity in marginal mountainous areas of India. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00768-8>.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- Papathoma-Köhle, M. (2016). Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards. *Natural hazards and earth system sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1771-2016>.
- Papathoma-Köhle, M., Schlögl, M., & Fuchs, S. (2019). Vulnerability indicators for natural hazards: an innovative selection and weighting approach. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50257-2>.
- Piedallu, C., Dallery, D., Bresson, C., Legay, M., Gégout, J., & Pierrat, R. (2022). Spatial vulnerability assessment of silver fir and Norway spruce dieback driven by climate warming. *Landscape Ecology*. <https://doi.org/10.1007/s10980-022-01570-1>.

- Pitchaimani, V., Jerin, R., Stuvvar, S. S. R., Liberthin, M., Antony, A., Promilton, A., & Abishek, S. (2026). Landslide susceptibility and vulnerability assessment using GIS–AHP in the highland of Wayanad, Western Ghats, India. *Discover Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s44475-026-00008-5>.
- Qiu, C., & Geng, X. (2025). An integrated method for assessing vulnerability of buildings caused by debris flows in mountainous areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-709-2025>.
- Ruegg, K., Bossu, C., Amirkhiz, R. G., Goel, N., Robertson, E. C. N., Brown, T. M., Bernier, K., Vernasco, B., Bolton, P., Funk, E., Taylor, S. A., Hooten, M., & Zavaleta, E. (2026). Loss of Adaptive Capacity Drives Climate Vulnerability Across Taxonomic Scales in an Alpine Specialist Species Complex. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.64898/2026.05.13.724772>.
- Saputra, A., Sartohadi, J., Hadmoko, D., & Gomez, C. A. (2016). Geospatial Assessment of Coseismic Landslides in Baturagung Area. <https://doi.org/10.23917/forge.v29i2.693>.
- Sarieva, G. E., Yusupov, R., Bazarkanova, G. D., Maimulov, R. K., Moldakunova, N. K., & Bekbolotova, N. (2025). Analysis of Vulnerability of the Population of the Sary-Dzhas Natural Plague Focus in Kyrgyzstan. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2025-1-134-140>.
- Schlögl, M., Avian, M., Richter, G., Thaler, T., Heiss, G., Fuchs, S., & Lenz, G. (2019). On the nexus between landslide susceptibility and transport infrastructure – agent-based vulnerability assessment of rural road networks in the Eastern European Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(1), 201–219. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-201-2019>.
- Sguigaa, A., Lahssini, S., Moukrim, S., Sebari, I., Menzou, K., Rahoui, H., Khattabi, A., & Azedou, A. (2026). Quantifying aboveground carbon at risk and composite vulnerability in semi-arid mountain forests: A Landsat and field-inventory approach in the Moroccan High Atlas. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. <https://doi.org/10.12912/27197050/221824>.
- Shah, N. A., Shafique, M., Ishfaq, M., Faisal, K., & Meijde, M. van. der. (2023). Integrated Approach for Landslide Risk Assessment Using Geoinformation Tools and Field Data in Hindukush Mountain Ranges, Northern Pakistan. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15043102>.
- Shahzad, L. (2019). DOES LIVELIHOOD VULNERABILITY INDEX JUSTIFY THE SOCIO-ECONOMIC STATUS OF MOUNTAINOUS COMMUNITY? A CASE STUDY OF POST-EARTHQUAKE ECOLOGICAL ADAPTATION OF BALAKOT POPULATION. *Applied Ecology and Environmental Research*. https://doi.org/10.15666/aeer/1703_66056624.
- Shimpi, V., Sivasubramanian, M. V. R., Singh, S. B., & Periyasamy, D. (2021). Seismic vulnerability assessment and fragility curves for a multistorey gallery arch bridge. *SN Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04652-y>.
- Simane, B., Zaitchik, B., & Foltz, J. (2014). Agroecosystem specific climate vulnerability analysis: application of the livelihood vulnerability index to a tropical highland region. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9568-1>.
- Smyk, I., & Arkhypova, L. (2025). Environmental assessment of water resources in the tourist zones of Ivano-Frankivsk region: A case study. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. <https://doi.org/10.12912/27197050/209739>.
- Song, W., Chen, M., Zhang, Q., Liu, S., & Yang, J. (2017). Analysis of Human Disturbance and Ecological Security Evolution in Oasis in Arid Area Based on LUCC: A Case Study of

- Oasis in the Northern Tianshan Mountain Slope Economic Zone. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/74/1/012018>.
- Tessema, I., & Simane, B. (2019). Vulnerability analysis of smallholder farmers to climate variability and change: an agro-ecological system-based approach in the Fincha'a sub-basin of the upper Blue Nile Basin of Ethiopia. *Ecological Processes*. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0159-7>.
- Tian, H., Xiao, C., Xu, H.G., Liang, X., Zhao, H., Zhao, Q., Qiao, L., & Zhang, W. (2024). GROUNDWATER VULNERABILITY ASSESSMENT FOR NITRATE POLLUTION BASED ON MODIFIED DRASTIC METHOD: A CASE STUDY IN SOUTHWEST CHINA. *Applied Ecology and Environmental Research*. https://doi.org/10.15666/aeer/2203_23392358.
- Tokarev, S., Amelichev, G., Braga, E., & Sereda, A. (2024). Assessment of Karst Groundwater Vulnerability to Contamination as a Tool for Delineation of Source Protection Zones: A Case Study in the Crimean Mountains. *Russian Journal of Earth Science*. <https://doi.org/10.2205/2024es000953>.
- Utasse, M., Jomelli, V., Grancher, D., Leone, F., Brunstein, D., & Virmoux, C. (2016). Territorial Accessibility and Decision-Making Structure Related to Debris Flow Impacts on Roads in the French Alps. *International Journal of Disaster Risk Science*. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0088-3>.
- Valencia, J. B., Mesa, J., León, J., Madriñán, S., & Cortés, A. (2020). Climate Vulnerability Assessment of the Espeletia Complex on Páramo Sky Islands in the Northern Andes. *Frontiers in Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.565708>.
- Veloso, V., Reis, F. A. G. V., Cabral, V., Ribeiro, T. D. C., Corrêa, C. V. D. S., Giordano, L. C., & Sá, A. A. (2026). Integrated debris flow hazard assessment in critical infrastructure zones: a case study of the 2022 Cubatão event, Serra do Mar, Brazil. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-026-07969-2>.
- Wang, J., Chen, J., Zeng, L., Yang, F., Li, X., Zhao, W., & Chen, H. (2026). Assessment of the vulnerability of buildings destroyed during postfire debris flow events in Kule village, Yajiang County, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-26-2717-2026>.
- Wu, J., Liu, H., Li, T., Ou-Yang, Y., Zhang, J., Zhang, T., Huang, Y., Gao, W., & Shao, L. (2023). Evaluating the ecological vulnerability of Chongqing using deep learning. *Environmental science and pollution research international*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28032-8>.
- Xu, X., Tian, H., Yang, G., Li, X., He, X., Li, Y., Gao, Y., Li, F., Li, P., Liu, B., & Xue, L. (2023). Spatial and temporal changes in land and water resources on the northern slopes of the Tianshan mountains from the perspective of "production-living-ecological space". *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1121248>.
- Zeng, J. J., Li, K., Cui, Y. C., Kang, L. F., & Cao, S. (2019). Study on vulnerability assessment of Xiaoxiang water source in Qujing. *IOP Conference Series: Earth and Environment*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/344/1/012163>.
- Zhang, F., Zhang, J., Chen, Y., Ma, Q., Guo, E., & Wang, Y. (2016). Assessment of West Liaohe River Basin's Ecological Vulnerability and Temporal-Spatial Distribution based on Landscape Pattern *. <https://doi.org/10.2991/rac-16.2016.7>.
- Zhao, K., & Chi, L. (2021). Assessment of External Spatial Vulnerability of Mountain Cities under Climate Change : Zhao Tong Case Study, China. *Proceedings of the 57th ISOCARP World Planning Congress*. <https://doi.org/10.47472/nnau5vdf>.

- Zhou, L., Pan, A., Luo, F., & Cao, L. (2025). SPATIAL-TEMPORAL EVOLUTION OF ECOLOGICAL VULNERABILITY IN DADU RIVER BASIN, CHINA. *Applied Ecology and Environmental Research*. https://doi.org/10.15666/aeer/2302_28212836.
- Zhu, K., Zhu, Y., Zhao, Z., Wang, Y., Guo, X., Du, Y., Fu, J., & Gao, J. (2025). Ecological vulnerability and driving factors in the himalayan transboundary landscape under global climate change. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86811-4>.
- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., & Glade, T. (2011). Physical vulnerability assessment for alpine hazards: State of the art and future needs. *Natural Hazards*, 58(2), 645–680. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9632-4>.
- Thakur, S., Negi, V. S., Dhyan, R., Satish, K. V., & Bhatt, I. D. (2021). Vulnerability assessments of mountain forest ecosystems: A global synthesis. *Trees, Forests and People*, 6, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100156>.
- Sultan, H., Zhan, J., Rashid, W., Chu, X., & Bohnett, E. (2022). Systematic review of multi-dimensional vulnerabilities in the Himalayas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12177. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912177>.