Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

University of Tehran Press

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Integrated vulnerability-resilience assessment in coupled systems: a novel approach in spatial model development

Masoumeh Heydari[1] | **Afshin Danekar**[2]✉ | **Davood Mafi-Golami**[3]

1. Department of Natural Environment, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: heydari.masoumeh@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Natural Environment, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: danehkar@ut.ac.ir
3. Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: d.mafigholami@sku.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 31 December 2025

Received in revised form 28 January 2026

Accepted 27 February 2026

Keywords:

Multiple hazards,
Panarchy cycle,
Social-ecological systems,
Spatial model development,
Sustainable land management.

ABSTRACT

Spatial land management in response to environmental hazards and climate change requires an integrated assessment of vulnerability and resilience in social-ecological systems, as well as understanding the dynamic characteristics of these systems. Despite the existence of numerous frameworks and conceptual models in vulnerability assessment, the lack of comprehensive models in analyzing coupled systems' responses to multiple hazards and the interaction of influential components has created limitations in spatial land management. Furthermore, some significant scientific ambiguities and gaps in research related to this field remain unresolved. A review of resilience history indicates that more than several decades have passed since the introduction of the panarchy cycle, and during this period, despite multiple applications of this concept, its use in vulnerability-resilience models has largely remained in the form of descriptive and abstract concepts. By extending the panarchy cycle theory to threatened coupled systems, it can be inferred that land planning is a dynamic process lacking static characteristics. In fact, coupled systems have a dynamic mechanism that continuously goes through four stages of "exploitation," "conservation," "release," and "reorganization." In this research, by integrating hazard-risk and ecological resilience approaches, comprehensive conceptual models have been developed for integrated vulnerability-resilience assessment of coupled systems. Additionally, to visualize complex interactions between components of coupled systems, models with multidimensional and nonlinear processes and structures in relation to stresses have been utilized. The obtained results provide significant considerations in sustainable land management, particularly in critical conditions where planners are required to make immediate decisions to strengthen resilience at spatial-temporal critical points.

Cite this article: Heydari, A., Danekar, A., Mafi-Golami, M. (2026). Integrated vulnerability-resilience assessment in coupled systems: a novel approach in spatial model development. *Journal of Natural Environment*, 79 (1), 169-188. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2025.387869.2743

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Spatial land management in response to environmental hazards and climate change requires integrated assessment of vulnerability and resilience in social-ecological systems (SES). Despite the existence of numerous frameworks in vulnerability assessment, the lack of comprehensive models for analyzing coupled systems' responses to multiple hazards has created significant limitations in sustainable land management. This study addresses these gaps by integrating hazard-risk and ecological resilience approaches within the theoretical framework of the panarchy cycle.

Material and Methods

This research employs an analytical-conceptual methodology grounded in two foundational approaches: (1) the hazard-risk approach, which examines relationships between hazards and their impacts on coupled systems; and (2) the ecological resilience approach, which focuses on system dynamics and response capacity to disturbances. Building on the panarchy cycle theory (comprising four phases: exploitation/growth, conservation, release, and reorganization), a Resilience-Vulnerability (RV) analytical framework was developed. A schematic model of coupled social-ecological systems was constructed to visualize complex interactions between ecological and social subsystems. A resilience-vulnerability matrix was then formulated to classify coupled systems into four distinct states based on sensitivity and adaptability characteristics.

Results

Four conceptual scenarios were developed corresponding to the four phases of the panarchy cycle: • Scenario 1 (r-phase – Growth): Both ecological and social systems exhibit high adaptability, representing a resilient and stable state where Resilience > Vulnerability. • Scenario 2 (K-phase – Conservation): The ecological system maintains high adaptability while the social system becomes increasingly sensitive due to resource exploitation, representing the acceptable limit of change. • Scenario 3 (Ω-phase – Release): The social system is adaptive through centralized management while the ecological system becomes highly sensitive, representing the threshold of change where Resilience ≈ Vulnerability. • Scenario 4 (α-phase – Reorganization): Both systems are sensitive, representing a vulnerable state where Resilience < Vulnerability, with potential trajectories of complete collapse, recovery, or system transformation.

Discussion

The integrated RV framework reveals that vulnerability and resilience are not opposing concepts but dynamically interrelated properties of coupled systems. The application of panarchy theory enables identification of critical transition points, thresholds, and management intervention windows within the system lifecycle. The models developed demonstrate that sustainable land management requires moving beyond traditional static vulnerability assessments toward dynamic, multi-scale frameworks that account for the nonlinear interactions between social and ecological subsystems. Management strategies must be phase-specific, as interventions appropriate in one panarchy phase may be counterproductive in another. The results highlight the importance of building adaptive capacity, identifying spatial-temporal critical points, and implementing proactive risk reduction strategies that strengthen system resilience before hazard events occur.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

محیط زیست طبیعی

انتشارات دانشگاه تهران

شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

ارزیابی یکپارچهٔ آسیب‌پذیری-تاب‌آوری در سیستم‌های زوجی: رویکردی نوین در توسعهٔ مدل‌های فضایی

معصومه حیدری[۱] | افشین دانه‌کار[۲]✉ | داوود مافی‌غلامی[۳]

۱. گروه محیط‌زیست طبیعی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: heydari.masoumeh@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه محیط‌زیست طبیعی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: danehkar@ut.ac.ir

۳. گروه علوم جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: d.mafigholami@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

کلیدواژه‌ها:

چرخهٔ پانارکی،

سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیک،

توسعهٔ مدل‌های فضایی،

مدیریت پایدار سرزمین،

مخاطرات چندگانه.

چکیده

مدیریت فضایی سرزمین در برابر مخاطرات محیطی و تغییر اقلیم، مستلزم ارزیابی یکپارچهٔ آسیب‌پذیری و تاب‌آوری در سیستم‌های اکولوژیک -اجتماعی و نیز شناخت خصوصیت پویای این سیستم‌ها است. علی‌رغم وجود چارچوب و مدل‌های مفهومی متعدد در حوزهٔ ارزیابی آسیب‌پذیری، فقدان مدل‌های جامع در تحلیل واکنش سیستم‌های زوجی در مقابل مخاطرات چندگانه و تعامل نقش مؤلفه‌های تأثیرگذار، محدودیت‌هایی در مدیریت فضایی سرزمین ایجاد نموده است. علاوه بر این، برخی ابهامات و خلأهای علمی قابل‌توجه در پژوهش‌های مرتبط با این حوزه، همچنان مرتفع نشده است. بررسی پیشینه تاب‌آوری گویای این است که تاکنون بیش از چند دهه از معرفی چرخهٔ پانارکی می‌گذرد و طی این دوره، علی‌رغم کاربرد متعدد این مفهوم، استفاده از آن در مدل‌های آسیب‌پذیری-تاب‌آوری عمدتاً در قالب مفاهیم توصیفی و انتزاعی باقی‌مانده است. با تعمیم نظریهٔ چرخهٔ پانارکی بر سیستم‌های زوجی در معرض تهدید، استنباط می‌گردد برنامه‌ریزی سرزمین یک فرآیند پویا بوده و فاقد خصوصیت ایستایی است. در واقع سیستم‌های زوجی مکانیزم پویایی دارند که به‌صورت متمادی، چهار مرحلهٔ «بهره‌برداری»، «حفاظت»، «رهاسازی» و «سازمان‌دهی مجدد» را طی می‌کنند. در این پژوهش با تلفیق رویکردهای مخاطره-ریسک و تاب‌آوری اکولوژیک، مدل‌های مفهومی جامعی جهت ارزیابی یکپارچهٔ آسیب‌پذیری-تاب‌آوری سیستم‌های زوجی، تدوین گردیده است؛ همچنین به‌منظور تصویرسازی تعاملات پیچیده بین اجزای سیستم‌های زوجی از مدل‌های دارای فرآیند و ساختارهای چندبعدی و غیرخطی نسبت به تنش‌ها بهره گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده، ملاحظات قابل‌توجهی در مدیریت پایدار سرزمین به‌ویژه در شرایط بحرانی که برنامه‌ریزان ملزم به اتخاذ تصمیمات آنی برای تقویت تاب‌آوری در نقاط بحرانی فضایی-زمانی هستند، ارائه می‌نماید.

استناد: حیدری، معصومه؛ دانه‌کار، افشین؛ و مافی‌غلامی، داوود (۱۴۰۵). ارزیابی‌یکپارچهٔ آسیب‌پذیری-تاب‌آوری در سیستم‌های زوجی رویکردی نوین درتوسعهٔ مدل‌های فضایی. *محیط زیست طبیعی*، ۷۹ (۱)، ۱۸۸-۱۶۹.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2025.387869.2743

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

جوامع و اکوسیستم‌ها در سراسر جهان به‌طور فزاینده‌ای در معرض مخاطرات طبیعی و انسانی قرار دارند. علاوه بر این ساختار سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی به‌دلایل عوامل طبیعی مانند تغییر اقلیم و یا عوامل انسانی مانند توسعهٔ اقتصادی، دائماً در حال تغییر است. این تغییرات ساختاری می‌تواند بر بازخورد بین زیرسیستم‌ها و آسیب‌پذیری آنها تأثیر بگذارد (Malakar *et al*., 2023). دیدگاه حاکم در میان پژوهشگران، آسیب‌پذیری را به‌عنوان بنیادی‌ترین و جامع‌ترین ویژگی یک سامانهٔ اکولوژیک–اجتماعی در مواجهه با مخاطرات قلمداد می‌کند. مفهوم آسیب‌پذیری از دههٔ ۱۹۷۰ ریشه در پیشینهٔ مخاطرات دارد. Miler و همکاران (۲۰۱۰) معتقدند، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری دو رکن اساسی در ارزیابی پویای سیستم‌ها به‌شمار می‌روند و تلفیق این دو مفهوم در قالب یک چارچوب تحلیلی جامع و مدل‌های مفهومی، نقش محوری در جهت ارتقای دانش و بینش برنامه‌ریزان از وضعیت سیستم‌ها در مقابل پیامدهای مخاطرات ایفا می‌کند (Miller *et al*., 2010). تحلیل روابط پیچیده میان مفاهیم آسیب‌پذیری و تاب‌آوری در بستر سیستم‌های اکولوژیک و پیامدهای اجتماعی آن، مستلزم اتخاذ رویکرد سیستمی است. ارزیابی سیستماتیک آسیب‌پذیری و تاب‌آوری، به‌مثابه بازخوردهایی عمل می‌نماید که قابلیت پیش‌بینی و برآورد شدت و دامنهٔ پیامدهای مخاطرات بر سیستم‌های زوجی را فراهم می‌آورد.

بررسی پیشینهٔ تحقیقات نشان می‌دهد، آسیب‌پذیری و تاب‌آوری عمدتاً به‌صورت مجزا در رشته‌های مختلف انجام شده و در بررسی جامع ابعاد این مفاهیم، ارائهٔ چارچوب و رویکرد واحد در ارزیابی آنها خلأهایی وجود دارد (Serfilippi *et al*., 2018). آسیب‌پذیری و تاب‌آوری، دو مفهوم محوری در حوزهٔ مدیریت مخاطرات، ارتباط ذاتی با یکدیگر دارند. نخستین‌بار Timmerman در اثر خود با عنوان "آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و فروپاشی جامعه" به بررسی روابط این دو مفهوم پرداخته است (Timmerman, 2008). برخی از دانشمندان معتقدند که این دو مفهوم به‌طور کامل در تقابل با یکدیگر نیستند، بلکه دارای همبستگی بوده و در حوزه‌های علمی متعددی، به‌صورت مشترک یافت می‌شوند. علی‌رغم تلقی رایج از تضاد این دو مفهوم، درجهٔ آسیب‌پذیری یک سیستم بیانگر سطح تاب‌آوری آن در برابر مخاطرات است. در واقع رابطهٔ بین "آسیب‌پذیری" و "تاب‌آوری" به نحوهٔ تعریف این دو مفهوم بستگی دارد؛ مفاهیم "آسیب‌پذیری" و "تاب‌آوری" باوجود وابستگی ذاتی، رابطه‌ای پیچیده و غیرخطی دارند که تاکنون به‌طور کامل تبیین نشده است (McKeown *et al*., 2020). آسیب‌پذیری بر وضعیت یک سامانهٔ پیش از وقوع فاجعه تمرکز دارد و "در معرض قرارگرفتن" و "حساسیت" دو مؤلفهٔ اساسی آن است. در مقابل، تاب‌آوری به‌عنوان یک فرآیند پویا عمل می‌کند که عمدتاً بر مراحل حین و پس از وقوع فاجعه متمرکز است. این فرآیند، ارتقای توانایی‌های سیستم برای مقاومت در برابر مخاطرات، بازیابی و بازگشت به شرایط پایدار را تسهیل می‌نماید (Skondras, 2020).

سیستم‌های زوجی در مواجهه با اختلالات، با بهره‌گیری از خاصیت انطباق‌پذیری و مکانیسم‌های بازخوردی مختلف، پاسخ می‌دهند (Li *et al*., 2020). در عصر حاضر، تشدید اثرات هم‌افزایی مخاطرات انسانی–طبیعی و تأثیر تعامل متقابل آنها در وقوع پدیدهٔ تغییر اقلیم، سیستم‌های زوجی را با اختلالاتی مواجه نموده که عمدتاً فراتر از ظرفیت خودسازماندهی این سیستم‌ها بوده و این مسئله منجر به تغییر رژیم و ناپایداری در سرزمین شده است؛ بنابراین مدیریت فضایی سرزمین در مواقع بروز آشفتگی و مخاطرات، از اهمیت دوچندان برخوردار می‌گردد. مدیریت مؤثر مخاطرات، مستلزم برخورداری از اطلاعات جامع در خصوص جنبه‌های اکولوژیک و اجتماعی سیستم‌ها است (Zio, 2018). هنگامی که تهدیدی بر سیستم اکولوژیک حادث می‌شود، تأثیراتی بر سیستم اجتماعی می‌گذارد. این موضوع که چگونه تهدیدهای تحقق‌یافته به تغییرات در کل سیستم‌های زوجی منتهی می‌گردد، نیازمند درک عمیقی از پویایی پیچیدهٔ حاکم بر سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی (چارچوب چرخه پانارکی) است. مفاهیم تعادل‌های چندگانه و آستانه‌های بحرانی که از اصول بنیادین نظریهٔ تاب‌آوری محسوب می‌شود، در تحلیل این پویایی نقش مهمی ایفا می‌کنند. سیستم‌های زوجی، براساس ماهیت پویایی خود، اغلب از الگوی چهار فازی "چرخهٔ پانارکی" (رشد، نگهداری، فروپاشی و سازماندهی مجدد) در مقیاس‌های فضایی–زمانی مختلف پیروی می‌کنند. سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی دارای آستانه‌هایی هستند که در صورت عبور از آنها، بازخوردهای سیستم تغییریافته و منجر به تغییراتی در عملکرد و ساختار آنها می‌گردد. این الگو نشان‌دهندهٔ ظرفیت سیستم‌ها برای انطباق با تغییرات محیطی است (Menegat, 2022). بررسی پویایی و آسیب‌پذیری سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی در طول چرخهٔ حیات آنها، به‌منظور مدیریت پایدار منابع طبیعی و سرزمین، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا،

پژوهش حاضر به‌دنبال پاسخ به این سؤال اساسی است که در چه مقاطع زمانی خاص (مراحل چرخهٔ حیات سیستم) و تحت تأثیر چه عوامل محرک و تغییردهنده‌ای (متغیرهای کلیدی)، احتمال گذار سیستم‌ها به فازهای جدید و متفاوت وجود دارد.

فقدان چارچوب‌های مفهومی و مدل‌های تحلیلی در ارزیابی تعاملات پیچیدهٔ سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی، محدودیت‌هایی در برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین ایجاد کرده است؛ بنابراین ضروری است که باتوجه به انواع تهدیدها، دامنه، و ابعاد زمانی–مکانی آنها، مدل‌های مفهومی جامع برای ارزیابی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری سرزمین تدوین گردد. این پژوهش با تلفیق رویکردهای تحلیل مخاطره–ریسک و پارادایم تاب‌آوری اکولوژیک، مدل مفهومی نوینی برای واکاوی سیستماتیک تعاملات پیچیدهٔ سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی ارائه می‌دهد. پارادایم مدل‌های مفهومی می‌تواند در تعمیق روابط علّی و معلولی بین مؤلفه‌های آسیب‌پذیری–تاب‌آوری کارآمد باشد. این رویکرد علمی، با شناسایی دقیق مکانیسم‌های آسیب‌پذیری و پتانسیل‌های تاب‌آوری، امکان طراحی راهبردهای مدیریتی مبتنی بر کاهش ریسک و افزایش قابلیت انعطاف‌پذیری سیستم‌ها را فراهم می‌آورد.

چارچوب روش‌شناختی

رویکردهای مخاطره–ریسک[1] و تاب‌آوری اکولوژیک[2]، عمدتاً شالوده چارچوب‌های مفهومی برای تحلیل و سنجش آسیب‌پذیری سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی در مقابل مخاطرات را تشکیل می‌دهند (Hagenlocher, 2018). رویکرد مخاطره–ریسک به‌بررسی روابط بین مخاطرات (به‌عنوان عوامل تهدید) و اثرات آنها بر سیستم‌های زوجی می‌پردازد. باوجود کاربرد گستردهٔ این رویکرد در مطالعهٔ آسیب‌پذیری سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی محدودیت‌هایی در این زمینه وجود دارد. نخستین محدودیت این رویکرد، عدم توجه به تعاملات پیچیده و چندوجهی بین سیستم‌های اکولوژیک و اجتماعی است. این رویکرد صرفاً بر روابط خطی بین عوامل تهدید و سامانه‌های آسیب‌پذیر تمرکز دارد و تعاملات غیرخطی و پویای بین اجزای مختلف سیستم‌های زوجی را نادیده می‌گیرد. محدودیت دوم این رویکرد، عدم توجه به ماهیت پایدار و مستمر برخی تهدیدها است. این رویکرد عمدتاً بر رویدادهای ناگهانی مانند مخاطرات طبیعی تمرکز دارد و فرآیندهای تدریجی و مداوم مانند تغییرات اقلیمی را به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرد. محدودیت سوم این رویکرد، عدم توجه به حساسیت و آستانهٔ تحمل سیستم‌ها در برابر عوامل تنش‌زا است. این رویکرد ظرفیت تاب‌آوری سیستم‌های اکولوژیک و اجتماعی را در قبال تنش‌های مختلف نادیده می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، این رویکرد تأثیر ظرفیت برد سیستم‌ها در برابر فشار را لحاظ نمی‌کند و پیامد عبور از آستانه‌ها (مانند فروپاشی سیستم) را مدنظر قرار نمی‌دهد (Balvanera *et al.*, 2012).

در مقابل، رویکرد تاب‌آوری اکولوژیک بر پویایی و تاب‌آوری سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی و نیز نحوهٔ واکنش سیستم‌های زوجی در برابر تغییرات و مخاطرات تمرکز دارد. این رویکرد بر بوم‌شناسی استوار است و پویایی سیستم‌ها را در زمان وقوع اختلال و خروج آنها از تعادل بررسی می‌کند. بر پایهٔ این رویکرد، تاب‌آوری به‌شدت اختلالی که یک سامانه می‌تواند پیش از دگرگونی ساختار خود متحمل گردد، وابسته است (Metzger *et al.*, 2006). به‌طورکلی در رویکردهای تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری اکولوژیک–اجتماعی، دو جنبهٔ اصلی مورد مطالعه قرار گرفته است: ۱) چگونگی تغییر و واکنش اکوسیستم‌ها به انواع مختلف تهدیدها، ۲) تأثیراتی که چنین تهدیدهایی بر سیستم‌های اجتماعی دارد و اینکه چگونه برخی از ویژگی‌های اجتماعی–اقتصادی در سیستم اجتماعی ظرفیت آن را برای سازگاری با تغییرات تعیین می‌کند. از ابهامات مربوط به این مطالعات، عدم شناسایی واضحی از تهدیدها و واکنش‌ها نسبت به مؤلفه‌های آسیب‌پذیری سیستم اکولوژیک–اجتماعی مانند در معرض قرارگرفتن، حساسیت و ظرفیت سازگاری است (Gunderson and Holling, 2002; Brand, 2009; Crona *et al.*, 2009). در جدول ۱، مقایسهٔ رویکردهای مخاطره–ریسک و تاب‌آوری اکولوژیک جهت ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم ها انجام گردیده است.

[1]Hazard-risk Approach

[2]Ecological Resilience Approach

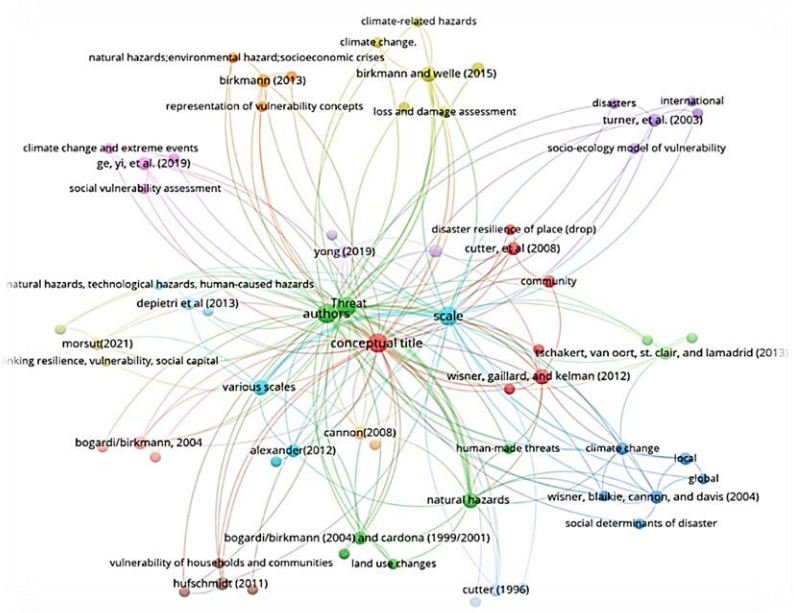
جدول ۱- مقایسهٔ رویکردهای مخاطره-ریسک و تاب‌آوری اکولوژیک در ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌ها
Table 1- Comparison of hazard-risk and ecological resilience approaches in vulnerability assessment of systems

ویژگی رویکردها	رویکرد مخاطره-ریسک	رویکرد تاب‌آوری اکولوژیک
هدف	شناسایی مخاطرات و ارزیابی اثرات آنها بر سیستم	درک پویایی سیستم و توانایی آن در جذب اختلالات و بازگشت به حالت تعادل
دیدگاه	خطی و علت-معلولی	سیستمی و پویا
مقیاس زمانی	عمدتاً رویدادهای کوتاه‌مدت و ناگهانی	تغییرات تدریجی و بلندمدت
مقیاس مکانی	غالباً مقیاس محلی یا منطقه‌ای	مقیاس‌های مختلف (محلی، منطقه‌ای، جهانی)
مفاهیم کلیدی	مخاطره، ریسک، آسیب‌پذیری، قرارگیری در معرض خطر	تاب‌آوری، پایداری، ظرفیت تحمل
روش‌شناسی	تحلیل ریسک، مدل‌سازی کمی سیستم‌های دینامیکی، شبیه‌سازی	تحلیل تعاملات پیچیدهٔ سیستم‌ها، ظرفیت تحمل و آستانه‌ها

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد، ارزیابی آسیب‌پذیری تحت تأثیر ویژگی‌های سیستم اکولوژیک-اجتماعی، نوع تهدید مورد بررسی و مقیاس زمانی-مکانی، متفاوت است. این میزان تنوع، وجود تعدد چارچوب‌ها و روش‌های مختلف در این حوزه را توجیه می‌کند (Adger *et al.*, 2014). باوجود این تنوع، چالش‌های جدیدی در ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی پدیدار شده است که در چارچوب‌های پیشین مورد توجه قرار نگرفته است. گنجاندن این چالش‌ها در تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری، مستلزم تغییر رویکرد مفهومی، روش‌شناختی و توسعهٔ چارچوب‌های نوین برای ارزیابی‌های آسیب‌پذیری است. علاوه بر این، باوجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در زمینهٔ چارچوب‌های مفهومی مرتبط با ارزیابی آسیب‌پذیری، همچنان در تعریف متغیرهای تعیین‌کنندهٔ این مفهوم، ابهامات متعددی وجود دارد (Janssen and Ostrom, 2006). این ابهامات ناشی از عدم تمایز دقیق بین مفاهیمی نظیر آسیب‌پذیری، سازگاری، تهدید، مواجهه و ظرفیت سازگاری که به‌طور همگن بیان نشده و گاه ناسازگار هستند. این امر منجر به ابهام، عدم انسجام و دشواری مقایسهٔ بین مطالعات مختلف در مناطق گوناگون می‌شود. علاوه بر این، پژوهش‌ها به‌طور معمول به اندازه‌گیری بخشی از ابعاد پیچیدهٔ آسیب‌پذیری سیستم بسنده می‌کنند و به‌طور نادرست آن را به‌عنوان شاخصی جامع از آسیب‌پذیری کل سیستم ارائه می‌دهند. یکی دیگر از نقاط ضعف مشترک در چارچوب‌های مفهومی و تحلیل‌های کاربردی پیشین در حوزهٔ ارزیابی آسیب‌پذیری، عدم تفکیک بین تهدیدهایی است که به‌ترتیب سیستم‌های اکولوژیک و اجتماعی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. این فرض رایج که سیستم اجتماعی با همان تهدیدهایی روبه‌رو است که سیستم اکولوژیک با آنها مواجه می‌شود، منجر به نادیده‌گرفتن توانایی ذاتی سیستم اکولوژیک برای مقاومت در برابر برخی تهدیدها، بدون از دست‌دادن ساختار و عملکرد خود و در نتیجه بدون تأثیرگذاری بر ظرفیت آن برای ارائهٔ خدمات به سیستم اجتماعی می‌شود.

شکل ۱، به ارائهٔ خلاصهٔ برخی از مطالعات پیشگام در زمینهٔ تجزیه‌وتحلیل رویکردها و مدل‌های آسیب‌پذیری سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی می‌پردازد. تحلیل سیستماتیک خروجی نرم‌افزار VOSviewer از بررسی مدل‌های مفهومی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری (۲۰۲۱-۱۹۹۶)، نشان‌دهندهٔ شبکهٔ پیچیده از روابط مفهومی است که حول سه محور اصلی تهدیدها، مقیاس و چارچوب‌های مفهومی سازمان یافته است. ارتباطات درون‌شبکه‌ای نشان می‌دهد که چگونه مطالعات پیشگام مانند Turner و همکاران (۲۰۰۳) و Birkmann (۲۰۱۳)، با ارائهٔ چارچوب‌های مفهومی جامع، مسیر تحول این حوزهٔ مطالعاتی را شکل داده‌اند. خوشه‌های موضوعی در این نگاشت علمی حاکی از آن است که طیف تهدیدها از مخاطرات طبیعی و محیط‌زیستی تا بحران‌های اجتماعی-اقتصادی و تهدیدهای انسان‌ساخت گسترش یافته است و مقیاس‌های تحلیل از سطح خرد (خانوار و اجتماعات محلی) تا سطح کلان (منطقه‌ای و بین‌المللی) را در بر می‌گیرد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، پژوهش‌های مورد بررسی در ابتدا به بررسی چالش‌های به‌کارگیری چارچوب‌های سنتی آسیب‌پذیری (طراحی شده برای تهدیدهای نقطه‌ای) در تحلیل آسیب‌پذیری سیستم‌های پیچیده در برابر مخاطرات با ماهیت پویا (مانند تغییر اقلیم) متمرکز بود. پس از آن، توجه به نحوهٔ تلفیق تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری اجتماعی و اکولوژیک معطوف شد، تحلیل روند تکاملی مطالعات نشان می‌دهد که این حوزه از رویکردهای تک‌بعدی اولیه به سمت مدل‌های پیچیده و یکپارچهٔ اکولوژیک-اجتماعی حرکت کرده است. با این وجود، بخش قابل توجهی از مطالعات

انجام شده در زمینهٔ ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی، صرفاً به بررسی یکی از دو سیستم (اجتماعی یا اکولوژیک) تمرکز دارند و تعاملات پیچیده بین این دو سیستم را نادیده می‌گیرند.



شکل ۱- خلاصهٔ برخی از مطالعات پیشگام در زمینهٔ مدل‌ها و چارچوب‌های آسیب‌پذیری–تاب‌آوری
Figure 1. Summary of some pioneering studies in vulnerability-resilience models and frameworks

مطالعات آسیب‌پذیری سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی به مدل‌های مفهومی جامعی نیازمند است، تا بتوانند پیچیدگی‌های تعاملات سیستم‌های زوجی و درک مفاهیم سازگاری، حد قابل قبول تغییرات، آستانهٔ تغییرات و آسیب‌پذیری را به‌طور دقیق تحلیل کنند. پژوهش حاضر چارچوب مفهومی نوینی، برای تحلیل آسیب‌پذیری سیستماتیک و یکپارچهٔ سیستم‌های زوجی ارائه می‌دهد. در این مدل، تهدیدهایی‌که سیستم اکولوژیک با آنها مواجه است، به‌طور ذاتی با ویژگی‌ها و خواص تاب‌آوری سیستم اجتماعی مرتبط هستند. این مدل بر تعاملات پیچیده بین سیستم‌های اجتماعی و اکولوژیک، تنوع تهدیدها و مکانیسم‌های تاب‌آوری تأکید دارد. با تحلیل آسیب‌پذیری سیستم‌های زوجی نسبت به وقوع مخاطرات، می‌توان سیاست‌هایی را برای تقویت بازخوردهای مثبت و تعدیل بازخوردهای منفی در چارچوب پویایی سیستم‌ها تدوین کرد. این امر به ارتقای تاب‌آوری کلی سیستم در برابر آشفتگی‌ها و تنش‌های محیطی و کاهش احتمال فروپاشی آن منجر خواهد شد. این چارچوب با تلفیق مزایای رویکردهای موجود، بر ضرورت درک چگونگی عملکردهای سیستم‌های زوجی، روابط و تأثیر متقابل آنها در فرآیند آسیب‌پذیری و تاب‌آوری پرداخته شده است (Burkhard *et al.*, 2012).

تحلیل یکپارچهٔ تاب‌آوری–آسیب‌پذیری[3] (RV)

دیدگاه سیستماتیک آسیب‌پذیری–تاب‌آوری، رویکردی کل‌نگر است که بر اساس مطالعات (۲۰۱۶) Adger، Turner و همکاران (۲۰۱۶) بر تعامل پیچیدهٔ اجزای کلیدی در سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی تمرکز دارد. مطالعات O'Brien و همکاران (۲۰۱۸) نشان می‌دهد، آسیب‌پذیری اجتماعی، فرآیندی پویا از تعاملات پیچیدهٔ اکولوژیک–اجتماعی است که ریشه در ساختارهای اقتصادی، سیاسی و محیطی دارد. با این حال، برخی پژوهشگران مانند Cutter و همکاران (۲۰۱۶)، بر این باورند که تمرکز صرف بر ساختارهای اجتماعی، درک جامع از آسیب‌پذیری را محدود می‌کند و ضرورت رویکرد چندبعدی را آشکار می‌سازد. در این راستا،

[3]Resilience-Vulnerability

چارچوب تحلیلیRV با تأکید بر تجزیه‌وتحلیل یکپارچه، امکان درک عمیق‌تر از پویایی‌های سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی را فراهم می‌آورد.

ارتباط متقابل میان مفاهیم "آسیب‌پذیری" و "تاب‌آوری" از طریق دو مکانیسم کلیدی "ظرفیت‌سازشی" و "سازگاری" تبیین می‌گردد. ظرفیت‌سازشی[۴] از طریق تعدیل مخاطرات و تأثیر بر مؤلفهٔ حساسیت، میزان آسیب‌پذیری سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مؤلفه به‌عنوان قابلیت سیستم در تغییر ساختار و عملکرد در پاسخ به مخاطرات محیطی، نقش محوری در ارتقای تاب‌آوری سیستمی ایفا می‌نماید. ظرفیت سازشی ماهیتی وابسته به مقیاس و موقعیت مکانی دارد و در سطوح سلسله‌مراتبی مختلف، از محلی تا ملی، قابل ارزیابی است. تاب‌آوری را می‌توان به‌عنوان ظرفیت پاسخ‌دهی سیستم به تغییرات مفهوم‌سازی نمود که شامل مکانیسم‌های سازگاری انسانی[۵] و سازگاری اکولوژیک[۶] است. سازگاری به‌معنای تغییر فعال در ساختار و عملکرد سیستم برای انطباق با تغییرات محیطی یا مخاطرات مرتبط است. تاب‌آوری نشان‌دهندهٔ پتانسیل سیستم‌های پیچیدهٔ تطبیقی در خودسازماندهی و ایجاد ظرفیت‌های یادگیری و انطباق است. کاهش تاب‌آوری در سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی منجر به افزایش آسیب‌پذیری در برابر تغییراتی می‌شود که پیش‌تر قابلیت جذب داشته‌اند. ظرفیت سازگاری به‌عنوان نمود عینی سازگاری، دربرگیرندهٔ توانایی توسعهٔ دانش جدید و متنوع‌سازی رویکردهای مؤثر، شامل ظرفیت جذب اثرات مخاطرات، آمادگی، سازگاری و بازیابی است(Gallopín, 2006; Pelling, 2010).

برخلاف ظرفیت سازشی که عموماً پاسخی واکنشی به بحران‌ها است، سازگاری غالباً اقدامی پیش‌گیرانه در مقابل مخاطرات پیش‌بینی‌شده است؛ به‌گونه‌ای که اثرات منفی بالقوه یا مخاطرات از پیش کاهش می‌یابد. سازگاری معمولاً به فرآیندی بلندمدت اشاره دارد که طی آن یک واکنش موقت تاب‌آورانه به استراتژی پایدار تبدیل می‌شود (Griffiths *et al.*, 2019). ارزیابی به‌موقع ریسک می‌تواند طیف گسترده‌ای از سناریوها را برای تسهیل استراتژی‌های سازگاری آینده‌نگر ارائه نماید. به‌طور سنتی، پژوهش‌های متمرکز بر "آسیب‌پذیری" و "تاب‌آوری" تلاش قابل توجهی برای حفظ سیستم‌های پایدار صورت داده‌اند. در فرآیند گذار به‌سمت پایداری سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی، تکیهٔ صرف بر مفهوم سنتی تاب‌آوری که غالباً بر الگوهای خطی و رویکردهای تک‌بعدی استوار است، برای مواجهه با پیچیدگی‌های نوین، کارآمد نیست. در مقابل، "تاب‌آوری نوین" در قالب سیستم‌های سازگار نوظهور که با پویایی‌های محیطی هماهنگ هستند، راهکاری قابل اتکا برای مواجهه با چالش‌های آینده به‌شمار می‌رود (Amit, 2016).

روش‌شناسی پژوهش

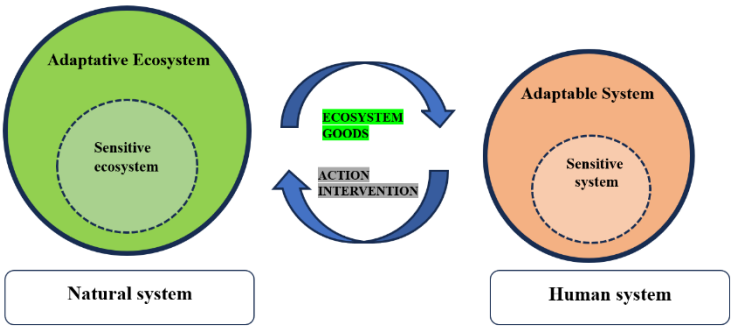
پارادایم مفهومی مدل: مطالعهٔ حاضر چارچوب نوینی از تحلیل سیستمی را معرفی می‌نماید که امکان ارزیابی یکپارچهٔ آسیب‌پذیری-تاب‌آوری سیستم‌های زوجی در مواجهه با مخاطرات چندگانه را فراهم می‌آورد. مبنای نظری مدل برگرفته از رویکرد بنیادین تاب‌آوری سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی است که انسان را بخشی جدایی‌ناپذیر از زیست‌کره تلقی می‌کند؛ به این معنا که انسان در مقیاس‌های مختلف مکانی از محلی تا جهانی درون سیستم اکولوژیک جهانی ادغام شده است و فعالیت‌های انسانی نقش محوری در شکل‌دهی محیطی دارد (Cumming, 2011). مطابق با دیدگاه (۱۹۹۶) Holling، در سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی، انسان‌ها اغلب عامل اصلی تغییرات محیط‌زیستی هستند. فشارهای انسان‌زاد همچون حملات زیستی، تخریب زیستگاه‌ها، پیدایش بیماری‌های نوظهور و تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌هایی که بشر به آنها وابسته است، تأثیر عمیق می‌گذارد. در برخی موارد، تغییرات نسبتاً اندک خطی در این فشارها، می‌تواند منجر به دگرگونی‌های ناگهانی و غیرخطی گسترده در اکوسیستم‌ها شوند (Folke *et al.*, 2002). به‌منظور توسعهٔ مدل‌های کاربردی و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد در مدیریت سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی، شناخت عمیق از مفاهیم شماتیک سیستم‌های زوجی و ماتریس ارزیابی تاب‌آوری-آسیب‌پذیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

[4]Adaptive capacity

[5]Coping

[6]Adaptation

مدل شماتیک سیستم‌های زوجی: براساس تحلیل مفهومی، مدل‌سازی شماتیک سیستم‌های زوجی طبیعی و انسانی به‌شیوه‌ای مشابه شکل ۲، انجام شده است. در وضعیت پایه، سیستم طبیعی[۷] شامل اکوسیستم سازگار[۸] و اجزای حساس آن[۹] است که در تعامل پیوسته با سیستم انسانی[۱۰] قرار دارد. سیستم انسانی نیز دارای زیرسیستم سازگار[۱۱] و زیرسیستم حساس[۱۲] است. تعامل[۱۳] میان این دو سیستم، بر کالاهای اکوسیستمی[۱۴] تأثیرگذار است. درک ماهیت و چگونگی این تعامل سیستمی امری ضروری است تا بتوان به مدیریت پایدار سرزمین و پیش‌بینی تغییرات پرداخت (Wang *et al.*, 2023). این تعاملات، تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تغییرات اقلیمی، مخاطرات طبیعی، انسانی و توسعه قرار دارند؛ در نتیجه، پایداری سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی متأثر از عوامل متعدد است. مدل‌سازی سیستم‌های زوجی، ابزاری ارزشمند برای ارزیابی سناریوهای مختلف و تصمیم‌گیری در زمینهٔ مدیریت پایدار سرزمین است.



شکل ۲- تعامل سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی
Figure 2. Interaction of social-ecological systems

ماتریس تاب‌آوری–آسیب‌پذیری: براساس مبانی علمی بوم‌شناسی، پارادایم مفهومی مدل‌های ارائه شده منعکس‌کنندهٔ دیدگاه پویایی سیستم‌های اکولوژیک (رویکرد مبتنی بر نظریهٔ چرخهٔ پانارکی) است که در آن فرآیند سیستم‌ها از چهار فاز اساسی تبعیت می‌کند. این چرخهٔ چهارمرحله‌ای، شامل فازهای رشد، نگهداری، فروپاشی و سازماندهی مجدد است و نشان‌دهندهٔ خصوصیت دینامیک سیستم‌ها است. چرخهٔ پانارکی، فرآیند پیچیدهٔ ایجاد، گسترش، تثبیت، تغییرات سریع و بازسازماندهی سیستم را نشان می‌دهد. پس از هر دوره سازماندهی مجدد، معمولاً چرخهٔ جدیدی ظاهر می‌شود که اگرچه شباهت‌هایی با چرخهٔ قبلی دارد، اما ممکن است مسیر متفاوتی را طی کند. این چرخه لزوماً از یک توالی خطی ثابت پیروی نمی‌کند. انتقال به نظام‌های جدید تحت تأثیر انسان، معمولاً با کاهش چشمگیر تنوع زیستی و خدمات اکوسیستمی مشخص می‌گردد. این رویکرد تحلیلی، پیچیدگی و پویایی ذاتی سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی را آشکار می‌سازد و درک عمیق‌تری از فرآیندهای تحولی آنها ارائه می‌دهد (Peterson, 2000; Gunderson, 2003, Peterson *et al.*, 2008).

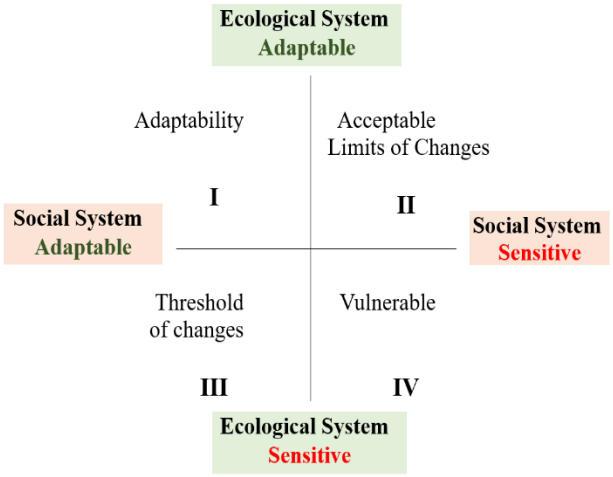
هنگامی که سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی در معرض تهدید قرار می گیرند، بر مبنای چرخهٔ پانارکی چهار وضعیت برای قرارگیری سیستم‌های زوجی در معرض مخاطرات برای سیستم‌ها قابل تصور است: ۱) سازگاری[۱۵]، ۲) حد قابل قبول تغییرات[۱۶] ۳)

[7]Natural System
[8]Adaptive Ecosystem
[9]Sensitive Ecosystem
[10]Human System
[11]Adaptable System
[12]Sensitive System
[13]Intervention Action
[14]Ecosystem Goods
[15]Adaptability
[16]Limit of Acceptable Change

آستانه تغییرات[17] و ۴) آسیب‌پذیری[18]. باهدف بهبود درک رابطه‌ای از جنبه‌های مختلف آسیب‌پذیری و تاب‌آوری، چارچوب تحلیلی براساس تجزیه‌وتحلیل مکانیزم چرخهٔ پارکی، طراحی شده است. شکل ۳، با تلفیق مفاهیم تاب‌آوری، آسیب‌پذیری و نظریهٔ چرخهٔ پارکی، چهار وضعیت متمایز از سیستم‌های اکولوژیکی-اجتماعی در معرض تهدید را به‌طور دقیق تشریح می‌کند. بر این اساس، وضعیت سیستم‌های زوجی در سرزمین برحسب دو ویژگی حساسیت و سازگاری، به شرح ذیل طبقه‌بندی می‌شود (Stojanovic, 2019; Paz, Henderson *et al.*, 2020,Tan *et al.*, 2023):

- حالت I (سازگار-سازگار): در این حالت، هر دو سیستم اکولوژیک و اجتماعی توانایی بالایی در سازگاری با تغییرات دارند. این حالت، نمایانگر وضعیت سازگاری (Adaptability) یک سیستم پویا و پایدار است که قابلیت مقاومت در برابر تغییرات محیطی و اجتماعی را دارد.
- حالت II (سازگار-حساس): سیستم اکولوژیک توانایی بالایی در سازگاری دارد، اما سیستم اجتماعی نسبت به تغییرات حساس‌تر است. این حالت نشان‌دهندهٔ حد قابل‌قبول تغییرات (Limit of Acceptable Change) سیستم است.
- حالت III (حساس-سازگار): سیستم اجتماعی توانایی بالایی در سازگاری دارد، اما سیستم اکولوژیک نسبت به تغییرات حساس‌تر است. این حالت نشان‌دهندهٔ آستانهٔ تغییرات (Threshold of changes) سیستم است.
- حالت IV (حساس-حساس): هر دو سیستم اکولوژیک و اجتماعی نسبت به تغییرات حساس هستند. این حالت نشان‌دهندهٔ وضعیت آسیب‌پذیر (Vulnerable) سیستم در برابر تغییرات است.

	Ecological System	
Social System	**Adaptable**	**Sensitive**
Adaptable	Adaptability **(I)**	Threshold of change **(III)**
Sensitive	Acceptable Limits of Changes **(II)**	Vulnerable **(IV)**



شکل ۳- ماتریس تاب‌آوری-آسیب‌پذیری سیستم‌های زوجی
Figure 3. Resilience-vulnerability matrix of coupled systems

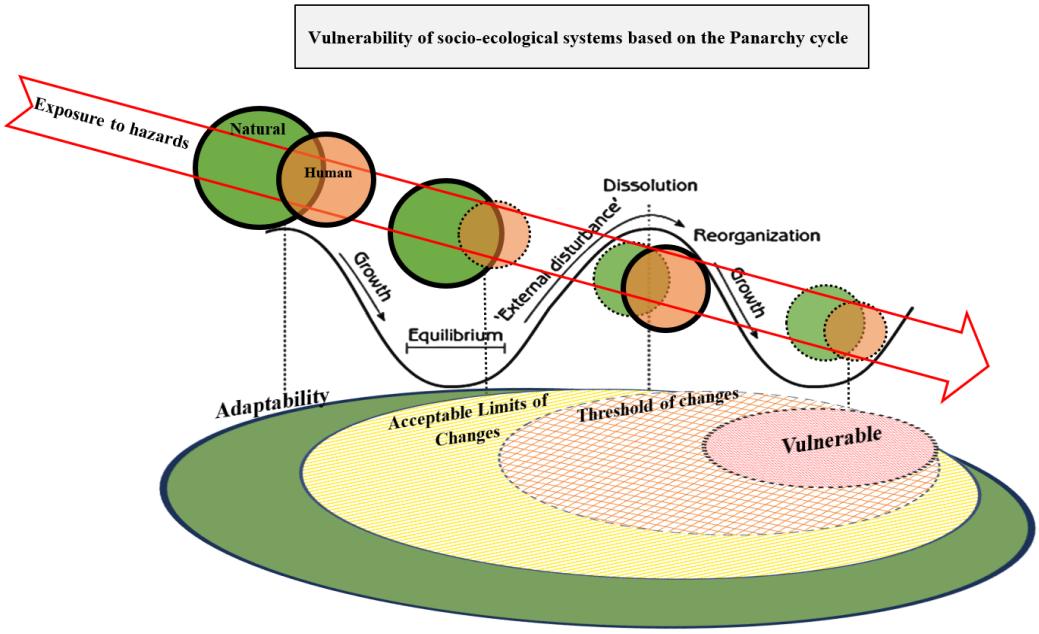
یافته‌های پژوهش

سناریوهای قرارگیری سیستم‌های زوجی در معرض تنش: همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی، مکانیسم پویایی دارند و در طول زمان تغییر می‌کنند. سیستم‌های زوجی غالباً از یک الگوی ۴ فازی (شامل رشد، نگهداری، فروپاشی و سازماندهی مجدد) پیروی خواهند کرد. از مجموعه تعاریف فوق این‌طور استنباط می‌گردد که یک سیستم اکولوژیک تا جایی تاب‌آور است که در اثر بروز هر گونه اختلال و شوک در سیستم، ساختار و عملکرد اولیهٔ آن حفظ شود. چرخهٔ پارکی نشان می‌دهد که چگونه یک سیستم ایجاد شده، گسترش پیدا کرده، تثبیت شده، دچار تغییرات سریع شده و سپس خودسازماندهی مجدد می‌نماید تا مجدداً مراحل مذکور را پشت سر بگذارد. غالباً به‌دنبال سازماندهی مجدد، یک چرخهٔ جدید، مشابه با چرخهٔ قبلی ولی گاهی در خط مسیری متفاوت ظهور می‌کند. از منظر ساختاری، چرخهٔ پارکی به دو حلقهٔ اصلی قابل تفکیک است: حلقهٔ پیشین شامل فازهای رشد و حفاظت، و حلقهٔ پسین شامل فازهای فروپاشی و بازسازماندهی. در اکثر موارد، حلقهٔ پیشین دورهٔ زمانی طولانی‌تری

[17] Threshold of changes
[18] Vulnerability

را نسبت به حلقهٔ پسین طی می‌کند. تغییرات در این دو حلقه متفاوت هستند: در حلقهٔ پیشین، تغییرات تدریجی و نسبتاً قابل پیش‌بینی رخ می‌دهد، درحالی‌که در حلقهٔ پسین، تغییرات ناگهانی و غالباً غیرقابل‌پیش‌بینی مشاهده می‌شود. این ساختار پویا و چندوجهی، پیچیدگی ذاتی سیستم‌های اکولوژیک را آشکار می‌سازد و اهمیت درک جامع از تعاملات و فرآیندهای درونی آنها را برجسته می‌کند (Jalonen, 2024). مفهوم تاب‌آوری محیط‌زیستی، معرف میزان اختلالی است که یک سیستم می‌تواند پیش از انتقال به دامنهٔ پایداری جایگزین تحمل کند (Holling, 1996) و چارچوب تحلیلی مهمی برای درک و مدیریت سیستم‌های محیط‌زیستی مستعد تغییرات نظام محسوب می‌شود (Adger *et al.*, 2007). چنانچه تاب‌آوری سیستم از آستانهٔ تحمل فراتر رود، دگردیسی سیستم محقق می‌گردد. پژوهشگران برجسته‌ای چون Peterson (۲۰۰۰)، Gunderson (۲۰۰۲) و Pendall و همکاران (۲۰۰۸) بر اهمیت این مرحله و نقش آن در پویایی سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی تأکید ورزیده‌اند (Peterson, 2000; Gunderson, 2003; Pendall, 2010). هنگامی که یک سیستم اکولوژیک–اجتماعی در معرض منابع متعدد مخاطرات قرار می‌گیرد، برای حفاظت از وضعیت پایدار خود، دو راهبرد اساسی مقاومت یا سازگاری را اتخاذ می‌کند که این امر منجر به تکامل و پویایی چرخz پانارکی می‌شود (Menegat, 2022). عبور سیستم از فازهای مختلف چرخz پانارکی، تحولاتی در جنبه‌های درونی، آسیب‌پذیری و ظرفیت پاسخگویی سیستم به‌همراه دارد. شناخت این فازها و زمان‌بندی تغییرات آنها، بینش راهبردی برای تعیین نوع و زمان مداخلات مدیریتی فراهم می‌آورد. نتایج اقدامات در هر فاز ممکن است نسبت به فازهای دیگر کاملاً متفاوت باشد و اقدامات نادرست در یک فاز می‌تواند فرصت‌های مدیریتی آتی را محدود سازد.

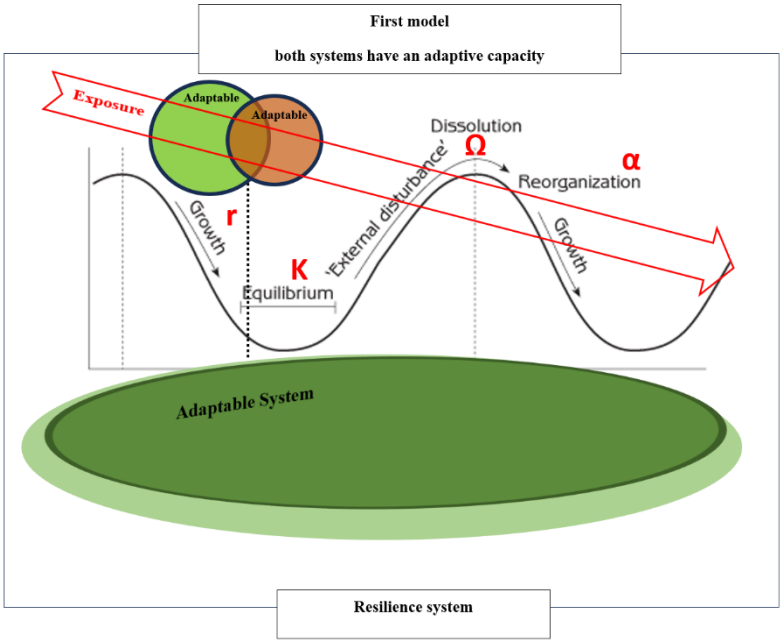
شکل ۴، نمایشی بصری از ارتباط پیچیده بین پویایی سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی و سطح آسیب‌پذیری آنها ارائه می‌دهد. تلفیق مفاهیم تاب‌آوری، رویکردهای آسیب‌پذیری با نظریهٔ چرخهٔ پانارکی، به‌عنوان یک مدل مفهومی جامع، نشان‌دهندهٔ این است که سیستم‌ها در طول زمان دچار تغییرات متمادی می‌شوند و در هر مرحله از این چرخه، سطح آسیب‌پذیری آنها متغیر است. درک این دینامیک پیچیده، برای مدیریت پایدار سرزمین و کاهش اثرات مخاطرات بر سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی ضروری است. در ادامه چهار سناریو برای توصیف حالات مختلف سیستم‌های زوجی در معرض تنش‌ها، ارائه خواهد شد.



شکل ٤- سناریوهای قرارگیری سیستم‌های زوجی در معرض تنش
Figure 4. Scenarios of coupled systems exposure to stress

سناریوی اول؛ فاز (r): سیستم اجتماعی نوظهور، سیستم اکولوژیک با تنوع و پویایی بالا: در فاز رشد چرخهٔ پاناركی (r-phase) تعامل سیستم نظام اکولوژیک–اجتماعی (SES)[۱۹] با تنوع زیستی بالا و ساختاری پویا، مشاهده می‌شود (شکل ۵). این مرحله، شامل شکل‌گیری و تکامل روابط بین سیستم‌های اجتماعی و اکولوژیک است که با ویژگی‌های منحصربه‌فردی مشخص می‌شود. سیستم‌های اجتماعی در این فاز، از ظرفیت‌های برجسته‌ای مانند یادگیری، انطباق، آگاهی سیستمی و توانایی تعامل با محیط برخوردار هستند. همزمان، اکوسیستم‌ها با تنوع زیستی بالا، اتصالات قوی بین اجزا و ظرفیت ذخیره‌سازی منابع، پتانسیل بالایی برای سازگاری نشان می‌دهند. به‌طورکلی، ویژگی سیستم‌های زوجی شامل تنوع، افزونگی، سرمایه‌های اکولوژیک و ظرفیت سازگاری بالا، بر توانایی آنها در مقابله با مخاطرات تأثیر خواهد گذاشت. واکنش سیستم‌ها به وقوع مخاطرات شامل انطباق و یادگیری است که می‌تواند از طریق تجربیات قبلی و اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی مناسب، با اختلالات سازگار شود. تعامل بین سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی و تعادل در استفاده از منابع و حفاظت محیط‌زیست در این مرحله ضروری است. این امر مستلزم مدیریت پایدار منابع طبیعی، حفظ دانش بومی و ترویج ارزش‌های توسعهٔ پایدار است. هنگامی که سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی در معرض مخاطرات قرار می‌گیرد، تعامل پیچیده‌ای از عوامل می‌تواند منجر به طیف وسیعی از پیامدها برای سیستم‌های زوجی شود. ماهیت خطر شامل شدت، مدت و دفعات وقوع مخاطره، نقش قابل توجهی در تعیین واکنش‌ها و پیامدهای سیستم‌های زوجی خواهد داشت (Holling *et al.*, 2002).

$$\text{IF}\begin{cases}\text{Adaptable ES} > \text{Sensitive ES}\\ \text{Adaptable SS} > \text{Sensitive SS}\end{cases} \rightarrow \text{Resilience} > \text{Vulnerability} \rightarrow \textbf{Resilience system}$$



شکل ۵- فاز رشد چرخهٔ پاناركی (r-phase)، تعامل سیستم اکولوژیک–اجتماعی

Figure 5. Growth phase of the panarchy cycle (r-phase): social-ecological system interaction

سناریوی دوم؛ فاز (K): سیستم اجتماعی درحال رشد، سیستم اکولوژیک در فاز بهره‌برداری: تداوم شدت اختلالات در بازهٔ زمانی طولانی‌مدت، سیستم‌های زوجی را به سمت فاز دوم چرخهٔ پاناركی، موسوم به K-phase[۲۰] (مرحله حفاظت) سوق می‌دهد (Gunderson and Holling, 2002) و پیچیدگی تعاملات بین سیستم‌های اجتماعی و اکولوژیک را با الگوهای متمایز آشکار می‌سازد (شکل ۶). در این مرحله، سیستم اجتماعی درحال‌رشد سریع و انباشت سرمایه از ظرفیت سیستم اکولوژیک برای بهره‌برداری از منابع است؛ درحالی‌که سیستم اکولوژیک در حال سازگاری با شرایط جدید و حفظ تعادل است. سیستم‌های اجتماعی

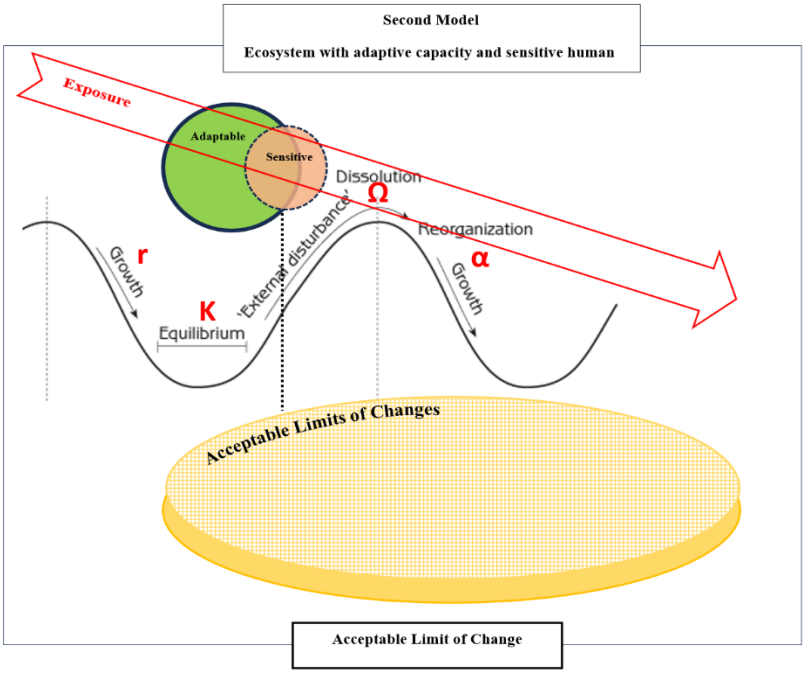
[19] Social-Ecological Systems

[20] Conservation phase

در فاز گذار کنونی، تحت سلطهٔ پارادایم توسعهٔ اقتصادی و رفاه کوتاه‌مدت، به استثمار بیش از حد منابع طبیعی و تخریب اکوسیستم‌ها می‌پردازد؛ این امر منجر به عدم توجه سیستماتیک به پیامدهای بلندمدت فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست می‌شود. این سیستم‌ها با ویژگی‌هایی مانند عدم آگاهی از وضعیت محیط‌زیست، فقدان دانش بومی، عدم توانایی یادگیری، فقدان ظرفیت سازگاری، روابط اجتماعی ضعیف، فقدان حاکمیت مشارکتی و بی‌عدالتی اجتماعی مواجه هستند و این امر می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد اکوسیستم‌ها و کاهش تنوع زیستی گردد. در مقابل، سیستم‌های اکولوژیک از ویژگی‌های فاز پیشین، مانند تنوع زیستی بالا، اتصالات قوی بین اجزای اکوسیستم، فرآیندهای بازخورد مؤثر، توانایی ذخیرهٔ ذخایر و ظرفیت یادگیری و سازگاری برخوردارند. سیستم‌های اکولوژیک سازگار به‌واسطهٔ تاب‌آوری ذاتی خود، قادر به جذب شوک‌های ناشی از بهره‌برداری در حفظ عملکردهای اساسی هستند. این سازگاری می‌تواند شامل تغییرات در تنوع زیستی، ساختار جوامع و عملکرد اکوسیستم‌ها باشد. در طول زمان، سیستم‌های اکولوژیک ممکن است مقاومت خود را در برابر تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی افزایش داده و ظرفیت انطباق‌پذیری خود را برای مقابله با این تغییرات ارتقا دهند.

شدت، مدت و دفعات اختلالات نقش قابل‌توجهی در تعیین پیامدهای مخاطرات برای سیستم‌های زوجی خواهد داشت. مخاطرات شدید و طولانی‌مدت، منجر به پیامدهای منفی می‌شوند، درحالی‌که مخاطرات خفیف‌تر و نامنظم، امکان سازگاری و تاب‌آوری را فراهم می‌کنند. در این مرحله، راهکارهای مدیریتی شامل مشارکت ذی‌نفعان، استفاده از دانش بومی، رویکردهای پیشگیرانه، مدیریت پایدار منابع و حکمرانی مشارکتی در برابر مخاطرات باید اولویت اصلی باشد. همچنین افزایش آگاهی از پیامدهای اقدامات انسانی بر محیط‌زیست و ترویج ارزش‌های پایدار از جمله حفاظت از تنوع زیستی و استفاده پایدار از منابع طبیعی، ضروری است (Escamilla Nacher, 2020; Løvschal, 2022).

$$\text{IF}\begin{cases}\text{Adaptable ES} > \text{Sensitive ES}\\ \text{Adaptable SS} < \text{Sensitive SS}\end{cases} \rightarrow \text{Resilience} > \text{Vulnerability}$$
$$\rightarrow \textbf{Acceptable limit of changes}$$



شکل ٦- فاز حفاظت چرخهٔ پارکی (K-phase)، تعامل سیستم اکولوژیک-اجتماعی

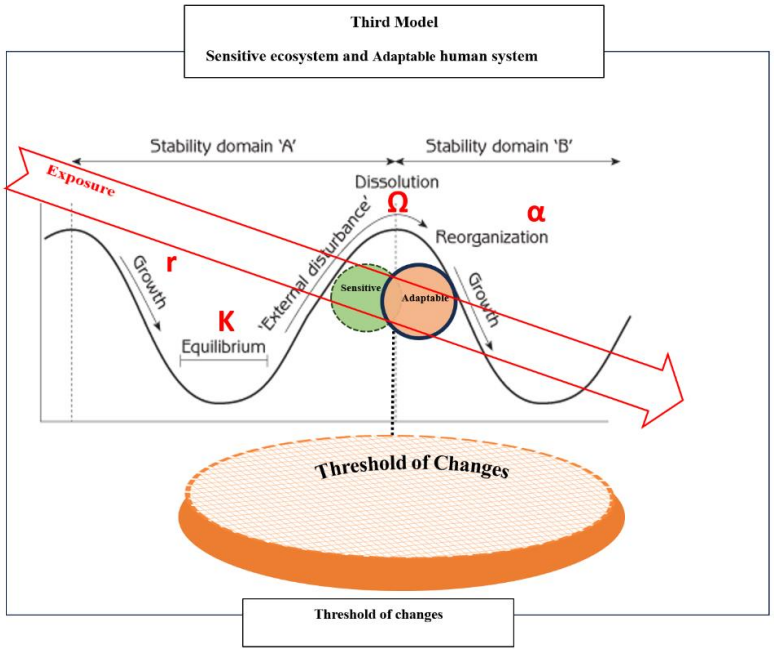
Figure 6. Conservation phase of the panarchy cycle (K-phase): social-ecological system interaction

سناریوی سوم؛ فاز (Ω): سیستم اجتماعی سازگار و سیستم اکولوژیک حساس: در مرحلهٔ سوم چرخهٔ پارکی، سیستم اجتماعی با اعمال مدیریت متمرکز و وضع قوانین و مقررات، به‌طور فزاینده‌ای تاب‌آور و سازگار می‌گردد. در مقابل، سیستم اکولوژیک

به‌دلیل بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، به‌شدت آسیب‌پذیر و شکننده است. این عدم تعادل ذاتی، شتاب حرکت سیستم‌ها به‌سمت فاز سوم چرخهٔ پارکی[۲۱] Ω-phase (آزادسازی) را رقم می‌زند (شکل ۷). این مرحله با انحطاط و فروپاشی نیز شناخته می‌شود؛ زیرا ساختار، روابط، سرمایه یا پیچیدگی که در طول فازهای r و K انباشته شده است، به‌طور معمول به‌صورت تدریجی یا ناگهانی آزاد می‌شود. در سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی، تعاملات بین انسان و محیط‌زیست پیچیدگی‌های متعددی را به‌همراه دارد. اکوسیستم‌های حساس، به‌شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند و ممکن است توانایی ترمیم خود را از دست بدهند. این امر پیامدهای منفی مانند کاهش تنوع زیستی، تخریب خدمات اکوسیستمی و بروز معضلات محیط‌زیستی را به‌دنبال دارد. علاوه بر این، اکوسیستم‌ها در برابر تهدیدهای متعدد مانند تغییرات اقلیمی، آلودگی و تخریب زیستگاه نیز آسیب‌پذیر هستند. این چالش‌ها ضرورت بازنگری و اصلاح عمیق در ساختارهای مدیریتی فعلی را آشکار می‌کند (Stewart, 2022).

اتخاذ رویکردهای جامع و انطباق‌پذیر به مدیریت منابع طبیعی که به‌طور کامل چالش‌های پیچیده و چندوجهی محیط‌زیستی را در نظر بگیرد، امری ضروری است. توانایی سیستم‌های اجتماعی در سازگاری و تاب‌آوری، نقش حیاتی در پایداری بلندمدت دارد، به‌طوری‌که سیستم‌های برخوردار از حکمرانی قوی و انعطاف‌پذیری نهادی، در مواجهه با چالش‌های محیط‌زیستی مقاوم‌تر هستند. تاب‌آوری اجتماعی نشان می‌دهد که جوامع می‌توانند با استفاده از راهبردهای مدیریتی پیشرفته، به‌طور مؤثری با تغییرات محیطی مواجه شوند. باوجود پیشرفت در تاب‌آوری، نباید از مخاطرات فزاینده غافل شد، زیرا تأثیرات ذی‌نفعان در سطوح مختلف می‌توانند بر آستانه‌های سیستم اثرگذار باشند. همچنین درک عمیق از تحولات و آستانه‌های سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی در برابر مخاطرات ضروری است، چراکه واکنش‌های پیچیده و متنوع به مخاطرات، وابسته به ماهیت خطر، ویژگی‌های سیستم‌ها و تصمیمات مدیریتی است. حفظ و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های اکولوژیک در راستای منافع بلندمدت سیستم‌های اجتماعی، نیازمند مدیریت پایدار و مبتنی بر علم است تا مانع عبور از آستانه‌های بحرانی که منجر به گذار سیستم به حالت‌های غیرقابل‌پیش‌بینی می‌شود، گردد.

$$\text{IF}\begin{cases}\text{Adaptable ES} < \text{Sensitive ES}\\ \text{Adaptable SS} > \text{Sensitive SS}\end{cases} \rightarrow \text{Resilience} = \text{Vulnerability} \rightarrow \textbf{Threshold of changes}$$



شکل ۷- فاز آزادسازی چرخهٔ پارکی (Ω-phase)، تعامل سیستم اکولوژیک-اجتماعی

Figure 7. Release phase of the panarchy cycle (Ω-phase): social-ecological system interaction

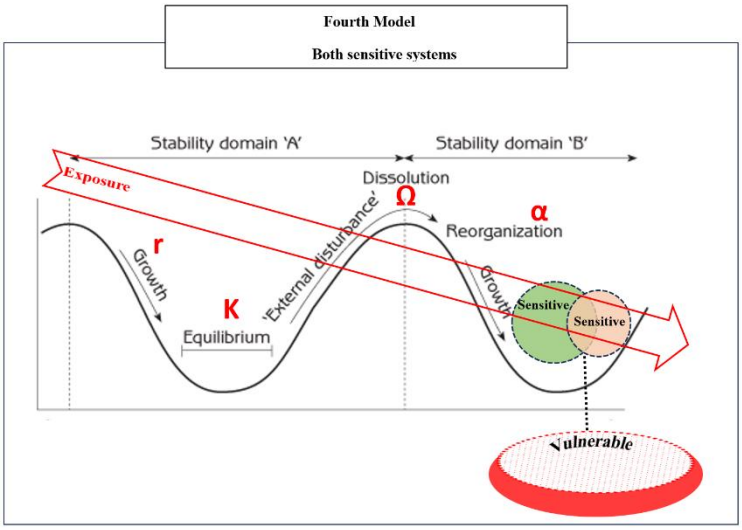
[21]Release phase or collapse phase

سناریوی چهارم؛ فاز (α): سیستم اجتماعی و اکولوژیک حساس: فاز چهارم چرخهٔ پانارکی، α-phase[۲۲] با تجدید و بازسازی سیستم‌ها شناخته می‌شود، در واقع این فاز، دوره‌ای بحرانی است که در آن سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی به‌شدت در برابر مخاطرات مختلف از جمله تغییرات اقلیمی، تخریب زیستگاه و امنیت غذایی آسیب‌پذیر می‌شوند (شکل ۸). این آسیب‌پذیری ناشی از تجمع پیامدهای منفی فعالیت‌های انسانی در مراحل قبلی است که منجر به تخریب اکوسیستم می‌گردد. پیامدهای اکولوژیک این مرحله شامل کاهش چشمگیر تنوع زیستی، اختلال در چرخه‌های اکولوژیک و تنزل خدمات اکوسیستمی است. چنین روندی کمبود منابع حیاتی را موجب می‌شود که به‌دنبال آن ناآرامی‌های اجتماعی، درگیری‌ها و مهاجرت‌های گسترده رخ می‌دهد. در این مرحلهٔ بحرانی، تخریب سیستم اکولوژیک و فروپاشی سیستم اجتماعی، یکدیگر را تقویت می‌کنند و یک حلقه بازخورد منفی ایجاد می‌کنند. بااین‌حال در میان این آشفتگی، پتانسیل‌هایی برای بازسازی و تجدید نیز وجود دارد. سیستم اجتماعی ممکن است در پی تمهیداتی برای بازسازی خود و ایجاد روابط جدید با محیط‌زیست باشد. این امر مستلزم تغییرات بنیادی در نحوهٔ تفکر و رفتار سیستم اجتماعی در مورد محیط‌زیست، از جمله اتخاذ رویکردهای پایدارتر به کشاورزی، جنگلداری و مدیریت منابع طبیعی است. به‌طور موازی، سیستم اکولوژیک نیز ممکن است در حال بهبودی از تخریب‌های مرحلهٔ سوم باشد. این فرآیند بازسازی، نیازمند زمان و منابع قابل‌توجهی است و مستلزم اقدامات فعالانه‌ای مانند احیاء، حفاظت از گونه‌های در حال انقراض و بازسازی عوامل تخریب‌شده است (Lagneaux, 2024). در این فرآیند، گونه‌های حساس به اختلالات از سیستم حذف می‌شوند و جای خود را به گونه‌های مقاوم‌تر و سازگارتر با شرایط جدید می‌دهند. در این مرحله، می‌توان چندین سناریوی محتمل را بررسی کرد:

- سناریوی اول: فروپاشی کامل که در آن تخریب سیستم‌های زوجی به حدی فاجعه‌بار است که منجر به نابودی تمام زیرساخت‌های اکولوژیک و اجتماعی می‌شود. در این وضعیت، نه تنها گونه‌های مختلف، با خطر انقراض مواجه می‌شوند، بلکه سیستم‌های اجتماعی نیز دچار فروپاشی کامل می‌گردند که می‌تواند به از دست‌رفتن گستردهٔ جمعیت انسانی و تخریب غیرقابل بازگشت محیط‌زیست منجر شود.
- سناریوی دوم: فروپاشی و بازسازی است که در آن سیستم‌ها اگرچه آسیب جدی می‌بینند، اما هنوز ظرفیت احیاء و بازسازی خود را حفظ می‌کنند. این فرآیند بازسازی که می‌تواند سال‌ها یا حتی دهه‌ها طول بکشد، نهایتاً منجر به شکل‌گیری سیستم‌های جدیدی می‌شود که از نظر ساختاری پیچیده‌تر و از لحاظ پایداری مقاوم‌تر هستند.
- سناریوی سوم: تغییر مسیر سیستم‌های زوجی بدون تجربهٔ فروپاشی کامل؛ با ایجاد روابط و ساختارهای نوین، الگوهای جدیدی از تعامل بین سیستم‌های اجتماعی و اکولوژیک شکل می‌گیرد که نشان‌دهندهٔ قابلیت انطباق و انعطاف‌پذیری آنها در برابر تغییرات پیچیدهٔ محیطی است.

$$\text{IF}\begin{cases}\text{Adaptable ES} < \text{Sensitive ES}\\ \text{Adaptable SS} < \text{Sensitive SS}\end{cases} \rightarrow \text{Resilience} < \text{Vulnerability} \rightarrow \textbf{Vulnerable system}$$

[22]Reorganization phase or renewal phase



شکل ۸- فاز تجدید و بازسازی چرخهٔ پانارکی (α-phase)، تعامل سیستم اکولوژیک-اجتماعی

Figure 8. Renewal and reorganization phase of the panarchy cycle (α-phase): social-ecological system interaction

نتیجه‌گیری

مطالعات Fischer و Eastwood (۲۰۱۶) تاکید می نماید؛ موفقیت در مدیریت پایدار سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی مستلزم درک عمیق از تعاملات پیچیده میان مؤلفه‌های آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و سازگاری است (Fischer and Eastwood, 2016). بر این مبنا، پژوهش تحلیلی حاضر، ماهیت بنیادین تعاملات نظام‌مند میان مؤلفه‌های آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و سازگاری در سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی (SES) را با رویکرد سیستمی آشکار می‌سازد. رویکرد سیستمی، دیدگاهی جامع‌نگر است که تعاملات پیچیده و پویایی کلی سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این راستا، به‌کارگیری نظریهٔ چرخهٔ پانارکی امکان تعمق در روندهای سازگاری، تعیین حد قابل قبول تغییرات، شناسایی آستانه‌های بحرانی و آسیب‌پذیری در سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی را فراهم آورده است. این دیدگاه، مکانیسم‌های پاسخ‌دهی اجزای سیستم به اختلالات را تحلیل می نماید. بر مبنای تحلیل‌ها، اساس تغییرات رژیم محیط‌زیستی زمانی محقق می گردد که سیستم از ظرفیت تحمل خود فراتر رفته و به تعادل جدیدی وارد شود که از نظر ساختار و عملکرد با وضعیت پیشین متفاوت است. این تغییرات پارادایمی نشان‌دهندهٔ پویایی ذاتی و پیچیدگی سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی است که قابلیت بازسازی و انطباق در مواجهه با مخاطرات را دارد. در چارچوب نظریهٔ پانارکی، تغییرات در سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی می‌تواند به‌صورت تدریجی یا غیرخطی رخ دهد و این نظریه، ابزار تحلیلی مهمی برای شناسایی الگوهای تغییر و تعیین نقاط مداخلهٔ مدیریتی محسوب می‌شود. مدل‌های ارائه شده در این پژوهش، بر مبنای چرخهٔ پانارکی و رویکردهای آسیب‌پذیری بوده و به شناسایی ویژگی‌ها و ابعاد آسیب‌پذیری–تاب‌آوری سیستم ها پرداخته است.

هدف اصلی در توسعهٔ مدل‌های فضایی آسیب‌پذیری–تاب‌آوری، کاربست آنها در راهبردهای کاهش ریسک مخاطرات و فرآیندهای تصمیم‌گیری در راستای مدیریت پایدار سرزمین است. مطالعات راهبردی مدیریت مخاطرات در سیستم‌های اکولوژیک–اجتماعی نشان می‌دهد که رویکردهای نوین مدیریت ریسک فراتر از کاهش صرف آسیب‌پذیری، بایستی بر تقویت تاب‌آوری و ظرفیت سازگاری تمرکز داشته باشند. این پارادایم جدید مدیریت مخاطرات، بر اهمیت ایجاد مکانیسم‌های پیش‌بینی، انعطاف‌پذیری و پاسخگویی در برابر اختلالات پیش‌بینی‌نشده، تأکید دارد. این رویکرد نوین نه‌تنها به‌حداقل‌رساندن خسارات اجتماعی–اقتصادی تمرکز دارد، بلکه بر شناسایی و بهره‌برداری از فرصت‌های بالقوه در اجرای اقدامات سازگارانه نیز تأکید می‌ورزد. هدف نهایی این پژوهش، درک عمیق و جامع‌تر از نحوهٔ پاسخ سیستم‌های پیچیده به تغییرات محیطی و اجتماعی است. این امر مستلزم توسعهٔ چارچوب‌های مفهومی جامع و روش‌های کمّی پیشرفته برای ارزیابی و پایش تعاملات پیچیده در مقیاس‌های مختلف فضایی–زمانی است. همچنین ضروری است راهبردهای آتی مدیریت مخاطرات، با تمرکز بر افزایش تاب‌آوری فضایی، توسعهٔ ظرفیت‌های سازگاری و ایجاد تعادل پویا در سیستم‌ها، آمادگی مواجهه با اختلالات محیطی و تغییرات اقلیمی را ارتقا بخشند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

Adger, W.N., Winkels, A., 2014. Vulnerability, poverty and sustaining well-being. In Handbook of sustainable development (pp. 206-216). Edward Elgar Publishing.

Adger, W.N., 2006. Vulnerability. Global Environmental Change 16, 268-281.

Amit, D., 2016. The Neoliberal Biopolitics of Climate Security: Resilience and the European Union's Securitization of Climate Change.

Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T., Hall, J., Lara, A., Laterra, P., Peña-Claros, M., 2012. Ecosystem services research in Latin America: the state of the art. Ecosystem Services 2, 56-70.

Birkmann, J., 2006. Measuring the un-measurable. The challenge of vulnerability.

Birkmann, J., Cardona, O.D., Carreño, M.L., Barbat, A.H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Welle, T., 2013. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. Natural Hazards 67, 193-211.

Birkmann, J., Cutter, S.L., Rothman, D.S., Welle, T., Garschagen, M., Van Ruijven, B., Pulwarty, R., 2015. Scenarios for vulnerability: opportunities and constraints in the context of climate change and disaster risk. Climatic Change 133, 53-68.

Brand, F., 2009. Critical natural capital revisited: ecological resilience and sustainable development. Ecological Economics 68, 605-612.

Burkhard, B., Gee, K., 2012. Establishing the resilience of a coastal-marine social-ecological system to the installation of offshore wind farms. Ecology and Society 17(4).

Cannon, T., 2008. Reducing people's vulnerability to natural hazards: communities and resilience.

Cantelmi, R., Di Gravio, G., Patriarca, R., 2021. Reviewing qualitative research approaches in the context of critical infrastructure resilience. Environment Systems and Decisions 41(3), 341-376.

Cardona, O.D., 2001. The need for rethinking the concepts of Vulnerability and Risk from an Holistic Perspective. Mapping Vulnerability: Disasters, Developing and People.

Crona, B.I., Rönnbäck, P., Jiddawi, N., Ochiewo, J., Maghimbi, S., Bandeira, S., 2009. Murky water: analyzing risk perception and stakeholder vulnerability related to sewage impacts in mangroves of East Africa. Global Environmental Change 19, 227-239.

Cumming, G.S., 2011. Spatial resilience in social-ecological systems. Springer Science & Business Media.

Cutter, S.L., Finch, C., 2008. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. Proceedings of the National Academy of Sciences 105(7), 2301-2306.

Cutter, S.L., 1996. Vulnerability to environmental hazards. Progress in Human Geography 20(4), 529-539.

Cutter, S.L., 2016. The landscape of disaster resilience indicators in the USA. Natural Hazards 80(2), 741-758.
Escamilla Nacher, M., 2020. Insights from a panarchy approach to the resilience of a social-ecological system: the case of La Marjaleria (Castelló, Spain).
Fischer, A., Eastwood, A., 2016. Coproduction of ecosystem services as human-nature interactions—an analytical framework. Land Use Policy 52, 41-50.
Folke, C., 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. Global Environmental Change 16(3), 253-267.
Folke, C., Biggs, R., Norström, A.V., Reyers, B., Rockström, J., 2016. Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. Ecology and Society 21(3).
Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C.S., & Walker, B., 2002. Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. AMBIO: A Journal of the Human Environment 31(5), 437-440.
Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C.S., Walker, B., 2002. Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. AMBIO: A Journal of the Human Environment 31(5), 437-440.
Gallopín, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environmental Change 16(3), 293-303.
Griffiths, S., Allison, C., Kenny, R., Holt, R., Smith, P., Baron-Cohen, S., 2019. The Vulnerability Experiences Quotient (VEQ): A study of vulnerability, mental health and life satisfaction in autistic adults. Autism Research 12(10), 1516-1528.
Gunderson, L., Holling, C., 2002. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Nature.
Gunderson, L.H., 2003. Adaptive dancing: interactions between social resilience and ecological crises. Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change: pp. 33-52.
Hagenlocher, M., Renaud, F.G., Haas, S., & Sebesvari, Z., 2018. Vulnerability and risk of deltaic social-ecological systems exposed to multiple hazards. Science of the Total Environment 631, 71-80.
Holling, C., 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics 4, 1-23.
Holling, C.S., 1996. Engineering resilience versus ecological resilience. Engineering within ecological constraints 31(1996), 32.
Jalonen, H., 2024. A complexity theory perspective on politico-administrative systems: Insights from a systematic literature review. International Public Management Journal: 1-21.
Janssen, M.A., Ostrom, E., 2006. Resilience, vulnerability, and adaptation: a cross-cutting theme of the international human dimensions programme on global environmental change. Global Environmental Change 16, 237-239.
Lagneaux, E.G., Callo-Concha, D., Speelman, E.N., & Descheemaeker, K., 2024. Panarchy to explore land use: a historical case study from the Peruvian Amazon. Sustainability Science, 1-17.
Lanlan, J., 2024. Vulnerability and resilience in the context of natural hazards: a critical conceptual analysis. Environment, Development and Sustainability 26(8), 19069-19092.
Li, T., Dong, Y., & Liu, Z., 2020. A review of social-ecological system resilience: Mechanism, assessment and management. Science of the Total Environment 723, 138113.
Linnenluecke, M.K., 2012. Extreme weather events and the critical importance of anticipatory adaptation and organizational resilience in responding to impacts. Business Strategy and the Environment 21(1), 17-32.
Løvschal, M., 2022. Retranslating resilience theory in archaeology. Annual Review of Anthropology 51(1), 195-211.
Menegat, S., 2022. From panarchy to world-ecology: Combining the adaptive cycle heuristic with historical-geographical approaches to explore socio-ecological systems' sustainability. Sustainability 14(22), 14813.
Metzger, M.J., Rounsevell, M.D.A., Acosta-Michlik, L., Leemans, R., Schröter, D., 2006. The vulnerability of ecosystem services to land use change. Agriculture, Ecosystems & Environment 114, 69-85.
Miller, F., Osbahr, H., Boyd, E., Thomalla, F., Bharwani, S., Ziervogel, G., Nelson, D., 2010. Resilience and vulnerability: complementary or conflicting concepts?. Ecology and Society 15(3).

O'Brien, J., Hayder, H., Zayed, Y., & Peng, C., 2018. Overview of microRNA biogenesis, mechanisms of actions, and circulation. Frontiers in Endocrinology 9, 402.

Peterson, A.T., Papeş, M., & Soberón, J., 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. Ecological Modelling 213(1), 63-72.

Peterson, C., 2000. The future of optimism. American Psychologist 55(1), 44.

Serfilippi, E., & Ramnath, G., 2018. Resilience measurement and conceptual frameworks: a review of the literature. Annals of Public and Cooperative Economics 89(4), 645-664.

Skondras, N.A., Tsesmelis, D.E., Vasilakou, C.G., & Karavitis, C.A., 2020. Resilience–Vulnerability Analysis: A Decision-Making Framework for Systems Assessment. Sustainability 12(22), 9306.

Stewart, K.M., 2022. Resilience Building in Everyday Life [Doctoral dissertation, Aberystwyth University].

Timmerman, P.D., 2008. The impact of individual resiliency and leader trustworthiness on employees' voluntary turnover intentions. The University of Nebraska-Lincoln.

Turner, B., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., 2003a. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences 100, 8074-8079.

Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Schiller, A., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences 100(14), 8074-8079.

Turner, M.D., 2016. Climate vulnerability as a relational concept. Geoforum 68, 29-38.

Tan, L., Li, M., Chen, H., Zhang, Y., Liu, Y., Chen, M., Hu, Y., 2023. Dynamic hydrogel with environment-adaptive autonomous wound-compressing ability enables rapid hemostasis and inflammation amelioration for hemorrhagic wound healing. Nano Today 52, 101962.

Wang, Z., Lin, L., Zhang, B., Xu, H., Xue, J., 2023. Sustainable urban development based on an adaptive cycle model: A coupled social and ecological land use development model. Ecological Indicators 154, 110666.

Zio, E., 2018. The future of risk assessment. Reliability Engineering & System Safety 177, 176-190.