



نگاهی به مرزهای سیاره‌ای: وضعیت کنونی و پیامدهای عبور از آن‌ها برای بشر

حنانه سادات سادات موسوی^۱، مجید رحیمی^۲، مهدی قربانی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه محیط‌زیست طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. پژوهشگر، مؤسسه کسب و کار اجتماعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
*رایانامه نویسنده: rahimi74@ut.ac.ir

چکیده

چارچوب مرزهای سیاره‌ای یک مدل بنیادی است که به منظور شناسایی محدودیت‌های محیط‌زیستی ایمن برای فعالیت‌های انسانی طراحی شده است. این چارچوب اولین بار در سال ۲۰۰۹ توسط Johan Rockström و همکارانش معرفی شد و براساس آن، نه مرز مهم برای حفظ ثبات زمین و محیط‌زیست شناسایی شد. تا سپتامبر ۲۰۲۳، به‌روزرسانی‌های قابل توجهی در این چارچوب انجام شد که نشان می‌دهد شش مرز از نه مرز در شرایط مخاطره‌آمیز قرار دارد و نیازمند اقدامات فوری جهانی است. این پژوهش به بررسی توسعه تاریخی و وضعیت کنونی این چارچوب، شامل تحلیل تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر مرزهای سیاره‌ای می‌پردازد. گزارش‌ها حاکی از این است که تغییرات اقلیمی، از دست رفتن تنوع زیستی و استفاده ناپایدار از منابع آب شیرین، از مهم‌ترین چالش‌هایی هستند که مرزهای سیاره‌ای را تهدید می‌کنند. تمرکز بر مفهوم حکمرانی یکپارچه و درک پیوستگی میان این مرزها به‌عنوان ضرورت‌های حیاتی در راستای پایداری و سلامت سیاره مطرح است. در نهایت، این پژوهش ضمن تأکید بر نیاز به اقدامات فوری، پیشنهاداتی جدیدی برای استراتژی‌های عملیاتی جهت بازگشت به شرایط ایمن زیستی ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: بحران محیط‌زیستی، پیامدهای اکولوژیک، توسعه پایدار، همکاری جهانی

تغییر سیستم‌های زمین، یکپارچگی زیست‌کره و آلودگی‌های نوظهور فراتر رفته‌اند (شکل ۳). این ارزیابی تاریخی تأثیر زیادی بر گفت‌وگوهای علمی و سیاست‌گذاری در مورد پایداری جهانی به دنبال داشته است (Richardson et al., 2023).

مروری بر نه مرز سیاره‌ای

نه مرز سیاره‌ای، سیستم‌های متقابلاً مرتبطی هستند که برای حفظ تعادل فرایندهای اکولوژیک زمین ضروری هستند. هر مرز با شاخص‌ها و تأثیرات خاصی بر محیط، اقتصاد و جامعه مرتبط است.

تغییرات اقلیمی^۱: این مرز با تغییرات در تعادل انرژی زمین به دلیل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای (GHG^۲) در جو مشخص می‌شود. وضعیت کنونی نشان‌دهنده عبور قابل توجه از این مرز است؛ به‌طوری‌که این تغییرات نه تنها بر تولیدات کشاورزی تأثیر می‌گذارد، بلکه به تضعیف امنیت غذایی و افزایش نابرابری‌ها در جوامع مختلف نیز منجر خواهد شد.

مواد نوظهور^۳: این مرز شامل همه مواد ساختگی است که می‌توانند فرایندهای طبیعی را مختل کنند. در حال حاضر، انتشار مواد شیمیایی مصنوعی، پلاستیک و سایر آلودگی‌ها به حدی رسیده است که این مرز را فراتر از سطوح ایمن قرار داده است.

کاهش اوزون استراتسفری^۴: با وجود اینکه مقررات به بهبود وضعیت لایه اوزون منجر شده‌اند، ارزیابی‌های اخیر نشان می‌دهند در حالی که سطوح کنونی اوزون استراتسفری در محدوده ایمن قرار دارند، برای محافظت از تهدیدات احتمالی باید هشیاری بیش‌تری وجود داشته باشد.

بارگذاری آتروسول اتمسفری^۵: این مرز به میزان و توزیع ذرات معلق در هوا اشاره دارد که بر اقلیم و اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارد. ارزیابی‌های اخیر نشان می‌دهند که برخی جنبه‌های این مرز در بخش ایمن باقی مانده‌اند، اما فشارهای ناشی از فعالیت‌های صنعتی در حال افزایش است.

اسیدی‌شدن اقیانوس‌ها^۶: اسیدی‌شدن ناشی از جذب دی‌اکسید کربن توسط اقیانوس‌ها اتفاق می‌افتد. اسیدی‌سازی تهدیدی برای تنوع زیستی و اکوسیستم‌های دریایی است. وضعیت فعلی این است که اشباع آراگونیت^۷ به مرز نزدیک می‌شود و برای کاهش بیش‌تر اثرات اسیدی‌سازی نیاز به کاهش قابل توجه CO₂ وجود دارد.

تغییر جریان‌های محیط‌زیستی^۸: این مرز بر جریان‌های مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر تمرکز دارد، که برای حفظ تولیدات اکوسیستمی ضروری هستند. فعالیت‌های انسانی به شدت این چرخه‌های طبیعی را تغییر داده و اغلب از سطوح ایمن فراتر رفته

تکامل و وضعیت کنونی چارچوب مرزهای سیاره‌ای

چارچوب مرزهای سیاره‌ای یک مدل حیاتی است که برای شناسایی محدودیت‌های ایمن در شرایطی که انسان می‌تواند فعالیت کند، به‌منظور جلوگیری از تخریب قابل قبول محیط‌زیست توسعه یافته‌ای است. این چارچوب که در سال 2009 توسط Rockström و گروه متنوعی از دانشمندان پیش‌رو پیشنهاد شد، نه فرآیند سیاره‌ای را مشخص می‌کند که برای حفظ ثبات و تاب‌آوری زمین ضروری هستند. تا سپتامبر ۲۰۲۳، به‌روزرسانی قابل توجهی در این چارچوب انجام شده است که پژوهش‌های گسترده‌ای را تجزیه و تحلیل کرده و نشان می‌دهد که شش مرز از نه مرز شناسایی شده، نیازمند اقدام جهانی فوری برای بازگشت به سلامت سیاره‌مان است (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2023; Richardson et al., 2023).

زمینه تاریخی و توسعه چارچوب

مفهوم مرزهای سیاره‌ای در پاسخ به نگرانی‌های روزافزون درباره فعالیت‌های انسانی به‌وجود آمده است که به‌طور جدی بر محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. از آغاز قرن ۲۱، چالش‌های جهانی مختلفی دامنه تأثیر بشریت بر سیستم‌های اکولوژیک را به نمایش گذاشته است. چارچوب اولیه ارائه‌شده توسط Rockström و همکاران در سال ۲۰۰۹ شامل مرزهایی برای تغییرات اقلیمی، از دست رفتن تنوع زیستی، جریان‌های زیست‌شناختی، تغییر سیستم‌های زمین و استفاده از آب‌های شیرین بود (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015) (شکل ۱). این چارچوب رویکردی کمی برای پایداری فراهم کرد، که از سیاست‌گذاران و جامعه خواست تا این محدودیت‌های ذاتی اکولوژیک را شناسایی و محترم بشمارند. در طول سال‌ها، چارچوب مرزهای سیاره‌ای به‌روز شده است تا یافته‌های علمی و روش‌های جدید را منعکس کند. نسخه‌های بعدی بر این نکته تأکید کردند که این مرزها به‌طرز متقابلی به‌هم پیوسته‌اند و عبور از یک مرز می‌تواند خطر عبور از مرزهای دیگر را افزایش دهد (شکل ۲)، که ضرورت رویکردی جامع به حکمرانی محیط‌زیستی و توسعه پایدار را به وضوح بیان می‌کند (Rockström et al., 2009; Richardson et al., 2023; IPCC, 2021; IPBES, 2024).

به‌روزرسانی ارائه‌شده در سال ۲۰۲۳، اولین ارزیابی کمی جامع از تمام نه فرآیند مربوط به ثبات زمین را فراهم کرده است. به‌ویژه، این به‌روزرسانی تأیید کرده است که مرزهای مرتبط با تغییرات اقلیمی، استفاده از آب‌های شیرین، جریان‌های زیست‌شناختی،

1. Climate Changes
2. Greenhouse Gas
3. Novel Entities
4. Stratospheric Ozone Depletion
5. Atmospheric Aerosol Leading
6. Ocean Acidification

7 آراگونیت (Aragonite) با فرمول شیمیایی CaCO₃، کانی کربناتی و یکی از دو گونه معمول بلورهای کربنات کلسیم که به صورت طبیعی تشکیل می‌شود. ارتعاشات سنگ آراگونیت که به عنوان «سنگ محافظ» نیز شناخته می‌شود، حفاظت و مراقبت از سیاره زمین را فراهم می‌کند و به زمین کمک می‌کند.

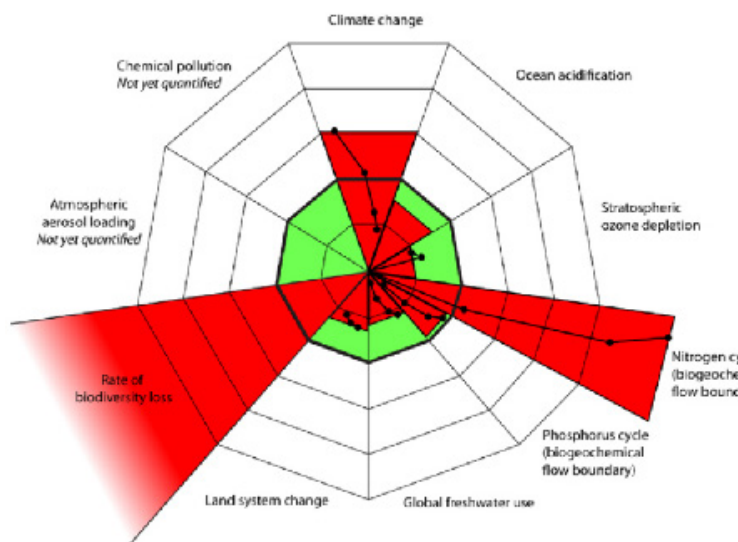
8. Changing Environmental Flows

که در اثر از دست رفتن زیستگاه و کاهش تنوع زیستی اتفاق افتاده است.

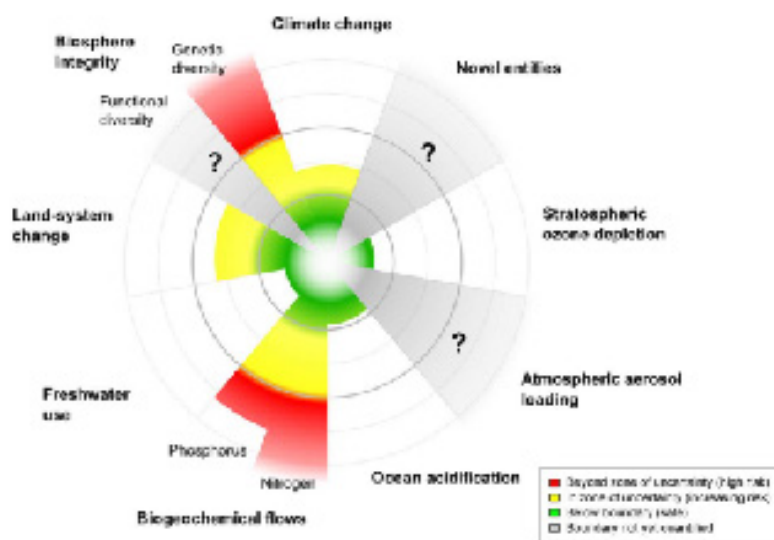
یکپارچگی زیست کره^۴: این مرز بر سلامت اکوسیستمها و تنوع گونهها متمرکز است. کاهش تنوع زیستی تهدیدی برای تابآوری اکوسیستمها در برابر تغییرات محیطی است و ارزیابیهای کنونی نشان دهنده عبور قابل توجه از این مرز است (Rockström et al., 2024).

استفاده آبهای شیرین^۱: تأثیرات انسانی بر منابع آب شیرین، شامل دریاچهها، رودخانهها و آبهای زیرزمینی از سطوح پایدار فراتر رفته است. برداشت بیش از حد و آلودگی، سبب ایجاد مشکل کمبود آب شده و کیفیت آب را در سطح جهانی کاهش داده است.

تغییر کاربری اراضی^۲: جنگل زدایی، شهری شدن و گسترش کشاورزی، اکوسیستمهای طبیعی را به شدت از هم جدا^۳ کرده است و این مرز در وضعیت نگران کنندهای قرار دارد

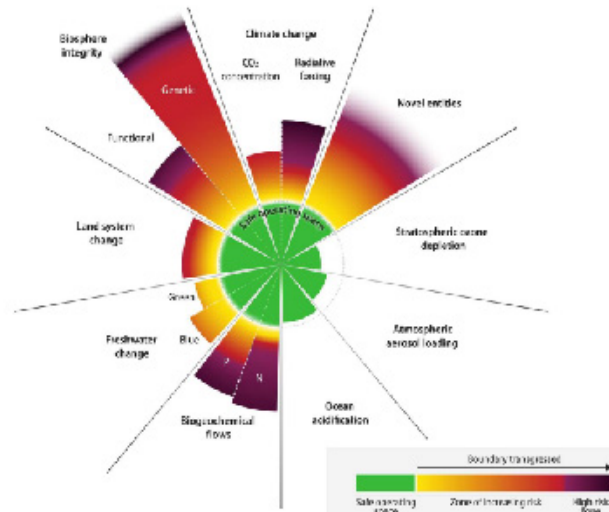


شکل ۱- برآورد تکامل کمی متغیرهای کنترل برای هفت مرز سیاره‌ای از سطوح پیش از صنعتی شدن تا سال ۲۰۰۹ (Rockström et al., 2009)



شکل ۲- وضعیت متغیرهای کنترلی برای هفت مرز از نه مرز سیاره‌ای از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۵ (Steffen et al., 2015)

۱. Freshwater Use
۲. land use change
۳. Fragment
۴. Biosphere Integrity



شکل ۳- وضعیت فعلی متغیرهای کنترل برای هر نه مرز سیاره‌ای (Richardson et al., 2023)

فناوری‌هایی که اثر کربن را کاهش می‌دهند و ارتقای حفاظت از محیط‌هایی است که برای تنوع زیستی حیاتی هستند (Richardson et al., 2023).

علاوه بر این، بخش خصوصی به طور فزاینده‌ای ضمن شناسایی ارتباط چارچوب مرزهای سیاره‌ای با شکل‌گیری شیوه‌های کسب و کار مسئول و سرمایه‌گذاری‌های پایدار، به آن توجه داشته است. شرکت‌ها در صنایع مختلف اکنون به این مرزها به‌عنوان دستورالعمل برای کاهش تأثیرات محیط‌زیستی خود و بهبود مشارکتهای خود در دستیابی به اهداف توسعه پایدار (SDGs¹) توجه می‌کنند (Steffen et al., 2015). در نتیجه، چارچوب مرزهای سیاره‌ای به عنوان یک نقشه راه حیاتی در درک و رویارویی با چالش‌هایی عمل می‌کند که فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست تحمیل می‌کند. با ادامه تحول علم و پیشرفت در دنیای واقعی، ضروری است ساختارهای حاکمیتی جهانی و جوامع، این پارادایم را به‌طور مشترک در نظر بگیرند تا از حفظ سلامت اکولوژیک برای نسل‌های آینده اطمینان حاصل شود.

پیوستگی و پیامدهای عبور از مرزها

عبور از مرزهای سیاره‌ای پیامدهای جدی برای تعادل اکولوژیک، رفاه انسانی و ثبات اقلیمی دارد. این مرزها از هم جدا نیستند؛ به این معنی که عبور از یک مرز می‌تواند تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در دیگر مرزها را به‌همراه داشته باشد و یک شبکه از خطرات را ایجاد کند که جنبه‌های مختلف زندگی روی زمین را تهدید می‌کند (Steffen et al., 2015; Richardson et al., 2023). عدم احترام به این مرزها می‌تواند تغییرات عمیق و گسترده‌ای را ایجاد کند که ممکن است غیرقابل بازگشت باشند. این شامل تأثیرات شدید تغییرات اقلیمی، از دست دادن گونه‌ها، ناامنی غذایی و اختلالات در تأمین آب پاک است که در حال حاضر در مناطق مختلف مشاهده می‌شود (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015).

جهت‌گیری‌های آینده و پیامدهای سیاسی

چارچوب مرزهای سیاره‌ای علاقه‌مندی زیادی در جوامع علمی، سیاسی و تجاری به وجود آورده است. این پیوستگی تأکید می‌کند که وجود چنین رویکردی نیازمند حکمرانی یکپارچه و به‌چالش کشیدن چالش‌های چندبعدی پایداری محیط‌زیست است. سیاست‌ها در راستای کاهش تغییرات اقلیمی باید به‌طور جامع به تمام مرزهای سیاره‌ای توجه کنند و نه به‌صورت جداگانه. تلاش‌های جاری برای عملیاتی کردن مفهوم فضای کار ایمن در سطوح مختلف حاکمیت، شامل سیاست‌های محلی، ملی و بین‌المللی، برای ترویج پایداری بلندمدت ضروری است. این شامل تحول به شیوه‌های کشاورزی پایدارتر، سرمایه‌گذاری در

IPBES. (2024). Thematic Assessment Report on the Underlying Causes of Biodiversity Loss and the Determinants of Transformative Change and Options for Achieving the 2050 Vision for Biodiversity of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. O'Brien, K., Garibaldi, L., and Agrawal, A. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11382215>.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi: 10.1017/9781009157896.

Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., ... & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), eadh2458.

Rockström, J., Donges, J. F., Fetzer, I., Martin, M. A., Wang-Erlandsson, L., & Richardson, K. (2024). Planetary Boundaries guide humanity's future on Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(11), 773-788.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *nature*, 461(7263), 472-475.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *science*, 347(6223), 1259855.



A Look at Planetary Boundaries: Current Status and Implications of Their Breach for Humanity

Hannaneh Sadat Sadat Mousavi¹, Majid Rahimi^{2*}, Mehdi Ghorbani³

1- Ph.D. student, Department of Natural Environment, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2-Researcher, Social Business Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

3-Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

* Corresponding Author E-mail: rahimi74@ut.ac.ir

Abstract

The planetary boundaries framework is a fundamental model designed to identify safe environmental limits for human activities. This framework was first introduced in 2009 by Johan Rockström and his colleagues, identifying nine critical boundaries necessary for maintaining the stability of the Earth and its environment. By September 2023, significant updates to this framework have shown that six out of the nine boundaries are currently at risk and require urgent global action. This research examines the historical development and current status of this framework, including an analysis of the impacts of human activities on planetary boundaries. Reports indicate that climate changes, loss of biodiversity, and unsustainable use of freshwater resources are among the most pressing challenges threatening these boundaries. The focus on integrated governance and understanding the interconnectedness among these boundaries is presented as vital necessities for sustainability and planetary health. Ultimately, this research emphasizes the need for immediate action and offers new suggestions for operational strategies to return to safe ecological conditions.

Keywords: Environmental Crisis, Ecological Consequences, Sustainable Development, Global Cooperation