19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مولفه‌های معادله جهانی تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی بر مبنای نقشه‌برداری رقومی خاک

مهدی صادقی پور مروی*[۱]

[۱]مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران

* نویسنده مسئول: **Email: msadeghipour@ut.ac.ir**

چکیده

از آنجا که پروتئوباکتری‌های خاکزی یک بخش مهم و تاثیرگذار اکوسیستم خاک می باشند، این مقاله به بحث درباره نقشه-برداری رقومی برای تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی پرداخته است. در حال حاضر هریک از شاخص‌های تنوع زیستی پروئوباکتری‌های خاکزی به تنهایی قابل مقایسه و ارزیابی با یکدیگر نبوده و از طرفی، این شاخص‌ها در اکوسیستم‌های مختلف نیز با یکدیگر قابل مقایسه نیستند. به عبارتی، معیار ثابت و واحدی برای ارزیابی شاخص‌های تنوع زیستی پروتوباکتری‌های خاکزی وجود ندارد. لذا این مقاله به بررسی مولفه‌های تاثیرگذار بر تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی پرداخته تا بر مبنای فناوری‌های نوین سنجش از دور و تصاویر ماهواره لندست ۸، سنسور اولی-تیرز به شاخص واحدی برای مقایسه تنوع زیستی در اکوسیستم‌های مختلف دست یافت. مولفه‌های ۳ گانه‌ای که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قابل استخراج بوده و بر تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی تاثیر گذارند شامل مولفه‌های اقلیمی، ماده مادری و پستی بلندی می‌باشند. این مولفه‌ها با استفاده از شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای شامل NDVI، LST، SMI، LAI، Albedo ، CMR، CI، NDCI، SWIR Ratio، K/SSSI، Elevation، Slope، Aspect، TPI، TWI، Flow Accumulation، Curvature می‌باشند. سپس همبستگی آماری میان این شاخص‌ها با شاخص‌های تنوع زیستی (از قبیل شانون، شائو، مارگالف و ...) ایجاد کرده و با استفاده از مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی، معادله جهانی تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی حاصل می گردد. با استفاده از این معادله می‌توان به ارزیابی تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی در مناطقی با اقلیم و فاکتورهای خاکسازی متفاوت مبادرت ورزید و با شاخصی واحد و جامع، تنوع زیستی را در اکوسیستم های مختلف مورد مقایسه و ارزیابی قرار داد. نتایج این پژوهش، به یافتن شاخصی واحد و جهانی برای کمی‌سازی تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی (به عنوان یک معادله جهانی برای تنوع زیستی) منجر می گردد.

واژگان کلیدی: تنوع زیستی، پارامترهای ژئومورفومتری، خاک، شاخص شانون

مقدمه

تهدیدات فزاینده تنوع زیستی در اکوسیستم خاک (صادقی پور مروی، م. ۱۳۹۹. الف)، (Tibbett, Mark, Fraser, Tandra and Duddigan, Sarah 2020) ، کنشگران فعال در این زمینه را بر آن داشته تا با رصد شاخص‌های تنوع زیستی در این اکوسیستم پویا، ضمن ارزیابی تغییرات تنوع زیستی، فعالیت های مدیریتی متناسب با آن را نیز طراحی و تا حد امکان، مدیریت نمایند (صادقی پور مروی، م. ۱۳۹۹. ب). (Cameron et al. 2025)، نظریه معادله جهانی تنوع زیستی در خاک (صادقی پور مروی، م. ۱۳۹۹. ج) گرچه تاکنون ارایه نشده است، ولی منابع مختلف بطور ضمنی به ضرورت مدل‌سازی و نظریه‌پردازی در این زمینه اشاره دارند (Delgado-Baquerizo et al. 2025., Cameron, Erin et al. 2021., FAO (2025).., Tsiafouli, Maria et al. 2015 ., Geisen et a. 2019) و به منظور رفع مشکلات موجود، به همتراز سازی یا معادل سازی شاخص های تنوع زیستی در اکوسیستم های مختلف می‌پردازند.

به عنوان مثال در صورتی که شاخص شانون در خاک منطقه‌ای گرم و خشک در ایران (از قبیل یزد) ۲/۷ باشد، همین شاخص در منطقه‌ای با اقلیم گرم و مرطوب آفریقا، قابل مقایسه و ارزیابی نیست. چرا که فاکتورهای مختلف خاکسازی شامل اقلیم، توپوگرافی، ماده مادری، زمان و موجودات زنده در این دو اکوسیستم متفاوت بوده و لذا توانایی تاب آوری دو اکوسیستم برای بقای میکروارگانیسم‌ها را متفاوت می‌نماید. به عبارتی ممکن است، شاخص تنوع زیستی شانون در خاک این دو منطقه، یکسان باشد، ولی توانایی، قابلیت و پتانسیل خاک این دو منطقه متفاوت بوده و وجود شاخص شانون یکسان، نمی‌تواند موید یکسان بودن توان تاب‌آوری دو اکوسیستم با تنوع زیستی متفاوت باشد. در این حالت، شاخص شانون (به عنوان یکی از شاخص‌های تنوع زیستی) نمی‌تواند به تنهایی موید توان تاب‌آوری اکوسیستم (و تنوع زیستی موجود در آن) در برابر تنش‌های محیطی و غیر محیطی باشد.

نتایج پژوهش های مختلف در سراسر دنیا از وجود شاخص‌های مختلف تنوع زیستی در اکوسیستم خاک حکایت دارد که این اعداد قابل مقایسه و ارزیابی با یکدیگر نیستند (Bardgett, Richard. and Putten, Wim. 2014., Wall, Diana ert al. 2015., Griffiths, Bryan et al. 2011. , Bach, Elizabeth et al. 2020. , Guerra, Carlos et al. 2021. , Wall, Diana et al. 2012.). برای رفع این مشکل، تلاش‌هایی بین‌المللی برای همترازسازی شاخص‌های تنوع زیستی خاک و امکان مقایسه داده‌ها در مقیاس جهانی گزارش شده است (Orgiazzi et al. 2016) که البته تا به حال به نتیجه نرسیده است. یکی از علل آن توجه کمتر به استفاده از سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای بوده است. لذا در این مقاله، نظریه معادله جهانی تنوع زیستی در خاک (صادقی پور مروی، م. ۱۳۹۹. ج) مورد توجه قرار گرفته است که می‌تواند ضمن رفع مشکلات تلاش‌های قبلی، با دستیابی به به یک شاخص واحد برای تنوع زیستی خاک، اعداد مناطق مختلف دنیا را قابل مقایسه با یکدیگر نماید.

از آنجا که تنوع زیستی در سطوح مختلف ماکرو و میکروارگانیسم‌های موجود در کره زمین قابل بررسی است و امکان بررسی همگی آنها در یک معادله ثابت، در حال حاضر مقدور نمی‌باشد، لذا در این مقاله، با توجه به اهمیت پروتئوباکتری‌هایی خاکزی در اکوسیتم خاک (Osburn et al. 2023)، در اینجا، تنوع زیستی در میان پروتئوباکتری‌های خاکزی مورد بحث قرار گرفته و بدیهی است که برای سایر اشکال حیات، از قبیل ماکرو ارگانیسم‌هایی از قبیل کرم خاکی، میکروارگانیسم‌هایی از قبیل جلبک و قارچ نیز بایستی معادله‌ای مجزا تعیین گردد تا این شاخص‌های تنوع زیستی در شرایط متفاوت اکوسیستم، قابل مقایسه و ارزیابی با یکدیگر باشند.

مولفه‌های سه گانه تاثیر گذار شاخص‌های تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی:

مولفه‌های موثر بر شاخص‌های تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی به صورت زیر می‌باشد:

$$Y_{USBE}=f(Cl_i+Pi+R_i) \quad (۱)$$

به عبارتی، شاخص واحد جهانی برای کمی‌سازی تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی، تابع مولفه‌های اقلیم، ماده مادری و پستی بلندی می‌باشد.

الف) مولفه اقلیم، (Cl_i):

پارامترهای اقلیمی تاثیرگذار بر تنوع زیستی شامل بارندگی، میانگین درجه حرارت سالانه خاک، رطوبت نسبی خاک و تعداد ساعات آفتابی می‌باشند (Zhang et al. 2025). این پارامترها را می‌توان از طریق شاخص‌های زیر که قابل استخراج از تصاویر ماهواره‌ای هستند برآورد نمود:

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (برای سنجش پوشش و سلامت گیاهان)، LST (Land Surface Temperature) (برای برآورد دمای سطح خاک)، SMI (Soil Moisture Index) (برای تخمین رطوبت خاک)، LAI (Leaf Area Index) (برای برآورد تراکم پوشش گیاهی) و Albedo یا بازتاب سطحی (برای برآورد تاثیر نوع سطح زمین بر دما) است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قابل محاسبه می‌باشد (Skidmore et al. 2025., Chariton et al. 2025., Anderson and Haddad. 2025).

ب) مولفه ماده مادری، (P_x):

مواد مادری بر نوع کانی سیلیکاته موجود در اکوسیستم خاک (از قبیل مونت موریلونایت، کائولینتایت، کلرایت و ...) تاثیرگذار بوده و تاثیر آنها در فامیل خاک با عنوان ظرفیت تبادلی کاتیونی ویژه خاک لحاظ می‌گردد (NumberAnalytics. (2025)., Soil Survey Staff. (2022) .

به عنوان مثال فامیل خاک "fine, smectitic, mesic Typic Haplustert" نشان‌دهنده خاک‌هایی با بافت ریز، کانی‌های رسی فعال CEC) بالا (و دمای متوسط) هستند. فامیل‌هایی با کانی‌های کم‌فعال مانند کائولینیت دارای CEC پایین بوده و در دسته‌هایی با فعالیت رسی کم قرار می‌گیرند (Ben-Dor et al. 2025., Zhang et al. 2025., Gholizadeh et al. 2025) .

شاخص‌های مرتبط با کانی‌های رس سیلیکاته که توسط تصاویر ماهواره‌ای قابل استخراج هستند شامل موارد زیر است: Clay Mineral Ratio (CMR)، Clay Index (CI)، Normalized Difference Clay Index (NDCI) ، Shortwave Infrared Ratio (SWIR Ratio) و Kaolinite/Smectite Spectral Signature Index(K/SSSI) .

تحلیل طیفی (Spectral Analysis) کانی‌ها نشان می‌دهد، رس‌ها مانند اسمکتیت، کائولینیت و ایلیت دارای اثر طیفی خاص در محدوده مادون قرمز کوتاه (SWIR) بوده و با استفاده از داده‌های سنجنده‌هایی مانندASTER ، Landsat و Sentinel-2 می‌توان آنها را شناسایی نمود. بر این مبنا، با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های طیفی رس (Clay Indices) را می‌توان استخراج نمود و غلظت نسبی رس‌ها در خاک را تخمین زد. شاخص‌هایی از قبیل Clay Mineral Ratio (CMR) و Normalized Difference Clay Index (NDCI) با استفاده از باندهای خاص طیفی قابل محاسبه می‌باشند (Ben-Dor, E., Chabrillat, S. and Demattê, J.A.M. (2025)., Zhang, L., Li, J. and Wang, Y. (2025). , Gholizadeh, A., Borůvka, L. and Saberioon, M. (2025) .

ج) مولفه پستی بلندی، (R_i):

پستی و بلندی شامل کوه، تپه، دشت، فلات و غیره می باشند. نقشه مدل رقومی ارتفاع که از آن به نقشه DEM (Digital Elevation Map) یاد می‌شود برای شناسایی پستی و بلندی بکار می‌رود. شاخص‌هایی که از DEM استخرج شده و بر شاخص‌های تنوع زیستی تاثیرگذارند (Zhang et al. 2025)., Skidmore et al. 2025)., Gholizadeh et al. 2025 شامل ارتفاع(Elevation) ، شیب (Slope) ، جهت شیب (Aspect) ، شاخص موقعیت توپوگرافی - (Topographic Position Index TPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic Wetness Index - TWI)، شاخص جریان تجمعی (Flow Accumulation) و انحنای سطح زمین (Curvature) می‌باشند.

بدین ترتیب، با تعریف مولفه‌های اقلیمی (شامل شاخص های NDVI، LST، SMI، LAI، Albedo)، ماده مادری (شامل CMR، CI ، NDCI، SWIR Ratio، K/SSSI) و مولفه پستی بلندی (شامل Elevation، Slope، Aspect، TPI، TWI، Flow Accumulation، Curvature) می‌توان عوامل تاثیرگذار بر شاخص‌های تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی را کمی‌سازی نمود و با استفاده از یادگیری ماشین، به مدلسازی (بر پایه شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصاوفی و غیره) میان مولفه‌های تاثیرگذار با شاخص‌های تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی اقدام نمود.

نتیجه‌گیری:

مولفه‌های سه گانه اقلیم، ماده مادری و پستی بلندی که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد شاخص واحد تنوع زیستی در پروتئوباکتری‌های خاکری شامل مولفه‌های NDVI، LST، SMI، LAI، Albedo ، CMR، CI ، NDCI، SWIR Ratio، K/SSSI) ، Elevation، Slope، Aspect، TPI، TWI، Flow Accumulation، Curvature بودند. برای تهیه معادله تنوع زیستی برای پروتئوباکتری‌های خاکزی بایستی از این شاخص‌ها استفاده نمود و آنها را با شاخص‌های تنوع زیستی، همبستگی داد و از آن در مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی استفاده نمود تا در نهایت به معادله جهانی تنوع زیستی دست یافت. نتایج این معادله، به یافتن شاخصی واحد و جهانی برای کمی‌سازی تنوع زیستی پروتئوباکتری‌های خاکزی (به عنوان یک معادله جهانی برای تنوع زیستی) منجر می گردد.

فهرست منابع

صادقی پور مروی، م. ۱۳۹۹. نظریه معادله جهانی تنوع زیستی در خاک. اولین همایش بین المللی و ششمین همایش ملی تنوع زیستی و تاثیر آن بر کشاوزی و محیط زیست. ۳۵۶- ۳۶۱.

صادقی پور مروی، م. ۱۳۹۹. شاخص‌های تنوع زیستی در خاک‌های کشاورزی. اولین همایش بین‌المللی و ششمین همایش ملی تنوع زیستی و تاثیر آن بر کشاوزی و محیط زیست. ۴- ۱.

صادقی پور مروی، م. ۱۳۹۹. تهدیدات جهانی تنوع زیستی خاک. اولین همایش بین‌المللی و ششمین همایش ملی تنوع زیستی و تاثیر آن بر کشاوزی و محیط زیست. ۶- ۱.

Anderson, C. and Haddad, N. (2025). *Remote sensing indicators for microbial biodiversity modeling across temperate ecosystems*. Journal of Environmental Microbiology, 18(1), pp.55–70. Available at: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431161.2025.2464958 [Accessed 29 Sep. 2025].

Bach, Elizabeth M., Ramirez, Kelly S., Fraser, Tandra D. and Wall, Diana H. (2020). Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. *Sustainability*, 12(7), 2662. Available at: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/7/2662 [Accessed 29 Sep. 2025]. Ben-Dor, E., Chabrillat, S. and Demattê, J.A.M. (2025). *Remote sensing of soil clay minerals: Advances in hyperspectral indices and mapping techniques*. Remote Sensing of Environment, 312, p.113478. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.113478 [Accessed 29 Sep. 2025].

Bardgett, Richard D. and van der Putten, Wim H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), pp. 505–511.

Cameron, Erin K., Guerra, Carlos A., Delgado-Baquerizo, Manuel, Singh, Brajesh K., Xu, Zhihong, Eisenhauer, Nico and Montanarella, Luca (2021). Managing and monitoring soil biodiversity: a global imperative for sustainable land use. *Nature Ecology & Evolution*, 5(7), pp. 987–995. Available at: https://www.nature.com/articles/s41559-021-01406-0 [Accessed 29 Sep. 2025].

Chariton, A.A., Wang, T., Duan, Y. et al. (2025). *Mapping the relative abundance of soil microbiome biodiversity from hyperspectral imagery and eDNA*. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 11(2), pp.112–130. Available at: https://research.utwente.nl/files/284819211/1_s2.0_S266601722200027X_main.pdf [Accessed 29 Sep. 2025].

Delgado-Baquerizo, Manuel, Eldridge, David J., Liu, Yu-Rong, Liu, Zhong-Wen, Coleine, Claudia and Trivedi, Pankaj (2025). Soil biodiversity and function under global change. *PLOS Biology*, 23(3), e3003093. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3003093 [Accessed 29 Sep. 2025].

FAO (2025). *Status of the World's Soil Resources Report 2025: Updates & Way Forward*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/ASP/ASP_8/SWSR_2025.pdf [Accessed 29 Sep. 2025].

Gholizadeh, A., Borůvka, L. and Saberioon, M. (2025). *Spectral indices for estimating soil clay content and mineral types using UAV and satellite imagery*. Soil and Tillage Research, 230, p.105328. Available at: https://doi.org/10.1016/j.still.2025.105328 [Accessed 29 Sep. 2025].

Geisen, Stefan, Wall, Diana H., van der Putten, Wim H., Wardle, David A., Bardgett, Richard D., de Vries, Franciska T., Bodelier, Paul L.E., Kowalchuk, George A., Delgado-Baquerizo, Manuel and Rillig, Matthias C. (2019). Soil biodiversity: biological communities and ecosystem functions. *Nature Reviews Microbiology*, 17(11), pp. 685–695.

Griffiths, Bryan S., Philippot, Laurent, Henault, Christian, Bru, David, Kandeler, Ellen, Schloter, Michael, Zhang, Xiaoyuan, Spedding, Tom and Laville, Patrice (2011). An examination of the biodiversity–ecosystem function relationship in arable soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(1), pp. 100–106.

Guerra, Carlos A., Bardgett, Richard D., Caon, Lucrezia, Crowther, Thomas W., Delgado-Baquerizo, Manuel, Montanarella, Luca, Navarro, Laetitia M., Orgiazzi, Alberto, Singh, Brajesh K., Tedersoo, Leho and Eisenhauer, Nico (2021). Tracking global trends in soil biodiversity. *Nature Communications*, 12, Article 3648.

NumberAnalytics. (2025). CEC's Role in Soil Classification. [online] Available at: https://www.numberanalytics.com/blog/cec-role-soil-classification [Accessed 29 Sep. 2025].

Orgiazzi, Alberto, Bardgett, Richard D., Barrios, Edmundo, Behan-Pelletier, Valerie, Briones, Maria J.I., Chotte, Jean-Luc, De Deyn, Gerlinde B., Eggleton, Paul, Fierer, Noah, Fraser, Tandra, Hedlund, Katarina, Jeffery, Simon, Johnson, David L., Jones, Arwyn, Kandeler, Ellen, Lavelle, Patrick, Lemanceau, Philippe, Miko, Ladislav, Montanarella, Luca, Moreira, Fatima M.S., Ramirez, Kelly S., Ritz, Karl, Setälä, Heikki, Tardy, Vincent, van der Putten, Wim H., Wall, Diana H. and Martin-Laurent, Fabrice (2016). *Global Soil Biodiversity Atlas*. Luxembourg:

Skidmore, A.K., Abdullah, H., Siegenthaler, A. et al. (2025). *eDNA biodiversity from space: predicting soil bacteria and fungi alpha diversity in forests using DESIS satellite remote sensing*. International Journal of Remote Sensing. Available at: https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2464958 [Accessed 29 Sep. 2025].

Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy. 13th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/keys-to-soil-taxonomy [Accessed 29 Sep. 2025].

Skidmore, A.K., Abdullah, H. and Siegenthaler, A. (2025). *eDNA biodiversity from space: predicting soil bacteria and fungi alpha diversity in forests using DESIS satellite remote sensing*. International Journal of Remote Sensing. Available at: https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2464958 [Accessed 29 Sep. 2025].

Tibbett, Mark, Fraser, Tandra D. and Duddigan, Sarah (2020). Identifying potential threats to soil biodiversity. *PeerJ*, 8, e9271. Available at: https://peerj.com/articles/9271/

Tsiafouli, Maria A., Thébault, Elisa, Sgardelis, Stefanos P., de Ruiter, Peter C., van der Putten, Wim H., Birkhofer, Klaus, Hemerik, Lia, de Vries, Franciska T., Bardgett, Richard D., Brady, Mark V., Bjørnlund, Lisa, Jørgensen, Helene B., Christensen, Søren, Hertefeldt, Tina D., Hotes, Stefan, Mortimer, Simon R., Setälä, Heikki, Tzanopoulos, Joseph, Uteseny, Karsten, Winding, Anne and Hedlund, Katarina (2015). Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 21(2), pp. 973–985.

Osburn, E.D., Yang, G., Rillig, M.C. & Strickland, M.S. (2023). Evaluating the role of bacterial diversity in supporting soil ecosystem functions under anthropogenic stress. *ISME Communications*, 3(1), Article 66. Available at: https://academic.oup.com/ismecommun/article/3/1/66/7584897

Wall, Diana H., Nielsen, Uffe N. and Six, Johan (2015). Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528(7580), pp. 69–76.

Wall, Diana H., Bardgett, Richard D., Behan-Pelletier, Valerie, Herrick, Jeffrey E., Jones, Heather, Ritz, Karl, Six, Johan, Strong, Donald R. and van der Putten, Wim H. (2012). A global biodiversity framework for soils. *Nature Reviews Microbiology*, 10(11), pp. 805–812.

Zhang, L., Li, J. and Wang, Y. (2025). *Mapping soil CEC and clay mineralogy using Sentinel-2 and Landsat-8 data in semi-arid regions*. Geoderma, 428, p.116234. Available at: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.116234 [Accessed 29 Sep. 2025].

Zhang, Y., Liu, H. and Chen, X. (2025). *Topographic controls on soil microbial diversity: Insights from DEM-derived indices*. Geoderma, 430, p.116512. Available at: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.116512 [Accessed 29 Sep. 2025].

Zhang, Y., Liu, H. and Chen, X. (2025). *Climatic Drivers of Soil Bacterial Diversity Across Ecosystems*. Environmental Microbiology Reports, 17(3), pp.245–259. Available at: https://www.envmicroreports.org/articles/climatic-drivers-soil-biodiversity [Accessed 29 Sep. 2025]

Components of the Universal Soil Biodiversity Equation for Proteobacteria Based on Digital Soil Mapping

Mahdi Sadeghi Pour Marvi*1
[1]Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Tehran Province, IRAN

Email: msadeghipour@ut.ac.ir

Abstract
A trio of environmental factors — climate, parent material, and topography — were analyzed using satellite imagery to estimate a unified biodiversity index for soil-dwelling Proteobacteria. Climate indicators included NDVI, LST, SMI, LAI, and Albedo; parent material was assessed through metrics like CMR, CI, NDCI, SWIR Ratio, and K/SSSI; and topographic variables encompassed Elevation, Slope, Aspect, TPI, TWI, Flow Accumulation, and Curvature. To construct a universal Soil Biodiversity Equation, these indicators must be correlated with biodiversity indices and integrated into artificial neural network modeling — ultimately leading to a universal formula for microbial ecological diversity. The outcome of this equation leads to the formulation of a unified global index for quantifying the biodiversity of soil-dwelling Proteobacteria — effectively serving as a universal Soil Biodiversity Equation.

Keywords: Biodiversity, Geomorphometric Parameters, Soil, Shannon Index

Abstract:

Global Soil Biodiversity Faces Mounting Threats. Scientists Push for a Universal Equation. As threats to biodiversity in soil ecosystems intensify (Sadeghi Pour Marvi, 2020a; Tibbett, Fraser & Duddigan, 2020), researchers and environmental stakeholders are increasingly focused on monitoring biodiversity indicators to assess ecological shifts and design responsive management strategies (Sadeghi Pour Marvi, 2020b; Cameron et al., 2025). Although a formal “Global Biodiversity Equation” for soil has yet to be proposed (Sadeghi Pour Marvi, 2020c), a growing body of literature underscores the urgent need for modeling and theoretical frameworks in this domain (Delgado-Baquerizo et al., 2025; Cameron et al., 2021; FAO, 2025; Tsiafouli et al., 2015; Geisen et al., 2019).

One major challenge lies in the comparability of biodiversity indices across ecosystems. For example, a Shannon diversity index of 2.7 in the arid soils of Yazd, Iran, cannot be directly compared to the same index value in the humid tropics of Africa. Differences in climate, topography, parent material, biological activity, and soil age mean that resilience and ecological potential vary widely—even when the numerical biodiversity index appears identical. In such cases, the Shannon index alone cannot reliably reflect an ecosystem’s capacity to withstand environmental stressors.

Global studies have revealed a wide range of biodiversity metrics in soil ecosystems (Bardgett & van der Putten, 2014; Wall et al., 2015; Griffiths et al., 2011; Bach et al., 2020; Guerra et al., 2021), yet these figures remain difficult to compare across regions. International efforts to standardize soil biodiversity indicators (Orgiazzi et al., 2016) have so far fallen short—partly due to limited integration of remote sensing and satellite imagery.

This article revisits the concept of a “Global Biodiversity Equation” for soil (Sadeghi Pour Marvi, 2020c), proposing a unified index that could enable meaningful comparisons across ecosystems worldwide. Given the complexity of biodiversity across macro- and microorganisms, a single equation is not currently feasible. Therefore, this study focuses on soil-dwelling Proteobacteria—recognized as key players in soil health and ecosystem function (Osburn et al., 2023). It argues that separate biodiversity models must be developed

for other life forms, such as earthworms, algae, and fungi, to ensure accurate cross-ecosystem evaluations.

The Three Pillars of Universal Soil Biodiversity Equation for Proteobacteria

In a groundbreaking effort to quantify microbial biodiversity in soils, researchers have proposed a Universal Soil Biodiversity Equation for Proteobacteria (USBE) defined by three core environmental dimensions: climate (Cl_i), parent material (P^i), and relief or topography (R_i). Expressed as:

$$\mathbf{Y_{USBE} = f(Cl_i + P_i + R_i)}$$

This formula aims to capture the ecological complexity of soil-dwelling Proteobacteria, a microbial group essential to soil health and ecosystem resilience.

Climate (Cli): Climatic parameters such as precipitation, average annual soil temperature, relative humidity, and sunlight hours significantly influence microbial diversity (Zhang et al., 2025). These can be estimated using satellite-derived indices including:

- **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) – vegetation health
- **LST** (Land Surface Temperature) – soil surface temperature
- **SMI** (Soil Moisture Index) – moisture content
- **LAI** (Leaf Area Index) – canopy density
- **Albedo** – surface reflectivity and heat absorption (Skidmore et al., 2025; Chariton et al., 2025; Anderson & Haddad, 2025)

Parent Material (Pi): The mineral composition of soil—particularly silicate clays like montmorillonite, kaolinite, and chlorite—affects its cation exchange capacity (CEC), a key determinant of microbial habitat quality (NumberAnalytics, 2025; Soil Survey Staff, 2022). For example, soils classified as *fine, smectitic, mesic Typic Haplustert* exhibit high CEC and active clay minerals, while kaolinitic soils show lower activity. Satellite-derived clay indices include:

- **CMR** (Clay Mineral Ratio)
- **CI** (Clay Index)
- **NDCI** (Normalized Difference Clay Index)
- **SWIR Ratio** (Shortwave Infrared Ratio)
- **K/SSSI** (Kaolinite/Smectite Spectral Signature Index) These are extracted via spectral analysis using sensors like ASTER, Landsat, and Sentinel-2 (Ben-Dor et al., 2025; Zhang et al., 2025; Gholizadeh et al., 2025).

Relief (Ri): Topographic variation—mountains, hills, plains—shapes soil formation and microbial distribution. Digital Elevation Models (DEMs) provide key indicators such as (Zhang et al., 2025; Skidmore et al., 2025; Gholizadeh et al., 2025):

- **Elevation**
- **Slope**
- **Aspect**
- **TPI** (Topographic Position Index)
- **TWI** (Topographic Wetness Index)

- **Flow Accumulation**
- **Curvature**

By integrating these satellite-derived indices into machine learning frameworks—such as artificial neural networks and random forest models—scientists can model the relationship between environmental variables and microbial biodiversity. The ultimate goal: a standardized, scalable equation that enables global comparison of soil biodiversity, starting with Proteobacteria and eventually extending to other life forms like earthworms, algae, and fungi.

Conclusion: Toward a Universal Soil Biodiversity Equation

By integrating satellite-derived data across three key environmental dimensions—climate, parent material, and topography—researchers have laid the groundwork for a unified biodiversity index focused on soil-dwelling Proteobacteria. Climate indicators such as NDVI, LST, SMI, LAI, and Albedo capture vegetation health, temperature, and moisture. Parent material is assessed through spectral indices like CMR, CI, NDCI, SWIR Ratio, and K/SSSI, reflecting mineral composition and clay activity. Topographic features including Elevation, Slope, Aspect, TPI, TWI, Flow Accumulation, and Curvature provide insight into landscape structure and hydrological dynamics.

These variables, when correlated with biodiversity indices and modeled through artificial neural networks, converge into a proposed global biodiversity equation. The result is a standardized metric capable of quantifying microbial diversity across ecosystems—an essential step toward understanding and managing the resilience of soil life in a changing world.

References:

Sadeghi Pour Marvi, M., 2020a. *Global biodiversity equation theory in soil*. Proceedings of the 1st International and 6th National Conference on Biodiversity and Its Impact on Agriculture and the Environment, pp.356–361.

Sadeghi Pour Marvi, M., 2020b. *Biodiversity indices in agricultural soils*. Proceedings of the 1st International and 6th National Conference on Biodiversity and Its Impact on Agriculture and the Environment, pp.1–4.

Sadeghi Pour Marvi, M., 2020c. *Global threats to soil biodiversity*. Proceedings of the 1st International and 6th National Conference on Biodiversity and Its Impact on Agriculture and the Environment, pp.1–6.

Anderson, C. and Haddad, N., 2025. Remote sensing indicators for microbial biodiversity modeling across temperate ecosystems. *Journal of Environmental Microbiology*, 18(1), pp.55–70. Available at: https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431161.2025.2464958 [Accessed 29 Sep. 2025].

Bach, E.M., Ramirez, K.S., Fraser, T.D. and Wall, D.H., 2020. Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. *Sustainability*, 12(7), p.2662. Available at: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/7/2662 [Accessed 29 Sep. 2025].

Bardgett, R.D. and van der Putten, W.H., 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), pp.505–511.

Ben-Dor, E., Chabrillat, S. and Demattê, J.A.M., 2025. Remote sensing of soil clay minerals: Advances in hyperspectral indices and mapping techniques. *Remote Sensing of Environment*, 312, p.113478. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.113478 [Accessed 29 Sep. 2025].

Cameron, E.K., Guerra, C.A., Delgado-Baquerizo, M., Singh, B.K., Xu, Z., Eisenhauer, N. and Montanarella, L., 2021. Managing and monitoring soil biodiversity: a global imperative for sustainable land use. *Nature Ecology & Evolution*, 5(7), pp.987–995. Available at: https://www.nature.com/articles/s41559-021-01406-0 [Accessed 29 Sep. 2025].

Chariton, A.A., Wang, T., Duan, Y. et al., 2025. Mapping the relative abundance of soil microbiome biodiversity from hyperspectral imagery and eDNA. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 11(2), pp.112–130. Available at: https://research.utwente.nl/files/284819211/1_s2.0_S266601722200027X_main.pdf [Accessed 29 Sep. 2025].

Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D.J., Liu, Y.-R., Liu, Z.-W., Coleine, C. and Trivedi, P., 2025. Soil biodiversity and function under global change. *PLOS Biology*, 23(3), e3003093. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3003093 [Accessed 29 Sep. 2025].

FAO, 2025. *Status of the World's Soil Resources Report 2025: Updates & Way Forward*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/ASP/ASP_8/SWSR_2025.pdf [Accessed 29 Sep. 2025].

Geisen, S., Wall, D.H., van der Putten, W.H., Wardle, D.A., Bardgett, R.D., de Vries, F.T., Bodelier, P.L.E., Kowalchuk, G.A., Delgado-Baquerizo, M. and Rillig, M.C., 2019. Soil biodiversity: biological communities and ecosystem functions. *Nature Reviews Microbiology*, 17(11), pp.685–695.

Gholizadeh, A., Borůvka, L. and Saberioon, M., 2025. Spectral indices for estimating soil clay content and mineral types using UAV and satellite imagery. *Soil and Tillage Research*, 230, p.105328. Available at: https://doi.org/10.1016/j.still.2025.105328 [Accessed 29 Sep. 2025].

Griffiths, B.S., Philippot, L., Henault, C., Bru, D., Kandeler, E., Schloter, M., Zhang, X., Spedding, T. and Laville, P., 2011. An examination of the biodiversity–ecosystem function relationship in arable soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(1), pp.100–106.

Guerra, C.A., Bardgett, R.D., Caon, L., Crowther, T.W., Delgado-Baquerizo, M., Montanarella, L., Navarro, L.M., Orgiazzi, A., Singh, B.K., Tedersoo, L. and Eisenhauer, N., 2021. Tracking global trends in soil biodiversity. *Nature Communications*, 12, Article 3648.

NumberAnalytics, 2025. CEC's Role in Soil Classification. [online] Available at: https://www.numberanalytics.com/blog/cec-role-soil-classification [Accessed 29 Sep. 2025].

Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I., Chotte, J.-L., De Deyn, G.B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, D.L., Jones, A., Kandeler, E., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., Moreira, F.M.S., Ramirez, K.S., Ritz, K., Setälä, H., Tardy, V., van der Putten, W.H., Wall, D.H. and Martin-Laurent, F., 2016. *Global Soil Biodiversity Atlas*. Luxembourg.

Osburn, E.D., Yang, G., Rillig, M.C. and Strickland, M.S., 2023. Evaluating the role of bacterial diversity in supporting soil ecosystem functions under anthropogenic stress. *ISME Communications*, 3(1), Article 66. Available at: https://academic.oup.com/ismecommun/article/3/1/66/7584897

Skidmore, A.K., Abdullah, H. and Siegenthaler, A., 2025. eDNA biodiversity from space: predicting soil bacteria and fungi alpha diversity in forests using DESIS satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. Available at: https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2464958 [Accessed 29 Sep. 2025].

Skidmore, A.K., Abdullah, H., Siegenthaler, A. et al., 2025. eDNA biodiversity from space: predicting soil bacteria and fungi alpha diversity in forests using DESIS satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. Available at: https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2464958 [Accessed 29 Sep. 2025].

Soil Survey Staff, 2022. *Keys to Soil Taxonomy*. 13th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/keys-to-soil-taxonomy [Accessed 29 Sep. 2025].

Tibbett, M., Fraser, T.D. and Duddigan, S., 2020. Identifying potential threats to soil biodiversity. *PeerJ*, 8, e9271. Available at: https://peerj.com/articles/9271/

Tsiafouli, M.A., Thébault, E., Sgardelis, S.P., de Ruiter, P.C., van der Putten, W.H., Birkhofer, K., Hemerik, L., de Vries, F.T., Bardgett, R.D., Brady, M.V., Bjørnlund, L., Jørgensen, H.B., Christensen, S., Hertefeldt, T.D., Hotes, S., Mortimer, S.R., Setälä, H., Tzanopoulos, J., Uteseny, K., Winding, A. and Hedlund, K., 2015. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 21(2), pp.973–985.

Wall, D.H., Bardgett, R.D., Behan-Pelletier, V., Herrick, J.E., Jones, H., Ritz, K., Six, J., Strong, D.R. and van der Putten, W.H., 2012. A global biodiversity framework for soils. *Nature Reviews Microbiology*, 10(11), pp.805–812.

Wall, D.H., Nielsen, U.N. and Six, J., 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528(7580), pp.69–76.

Zhang, L., Li, J. and Wang, Y., 2025. Mapping soil CEC and clay mineralogy using Sentinel-2 and Landsat-8 data in semi-arid regions. *Geoderma*, 428, p.116234. Available at: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.116234 [Accessed 29 Sep. 2025].