

مدل سازی و نقشه برداری شاخص حاصلخیزی خاک با رویکرد سنجش از دور و یادگیری ماشین

زینب ظاهری عبدهوند^{۱*}، کاظم رنگزن^۲، دانا کریمی^۳، سید روح اله موسوی^{۳*}

۱- دکتری سنجش از دور و GIS، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران* (zaheri.gis@gmail.com)

۲- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- دکتری مدیریت منابع خاک، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران* (r_mousavi@ut.ac.ir)

چکیده

این پژوهش با هدف تهیه نقشه شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) در اراضی کشاورزی مرکز استان خوزستان، با تأکید بر کشت گندم آبی انجام شد. برای این منظور، سه سناریو با استفاده از مدل جنگل تصادفی (RF) و داده‌های ماهواره‌ای ابرطیفی EnMAP و چندطیفی Sentinel-2 ارزیابی گردید. شاخص SFI، با ترکیب هشت پارامتر کلیدی شامل ماده آلی خاک (SOM)، نیتروژن کل (TN)، فسفر در دسترس (P_{av})، پتاسیم قابل تبادل (K_{ex})، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، آهن قابل جذب (Fe)، کربنات کلسیم معادل (CCE) و بافت خاک محاسبه شد. در سناریوی نخست، مدل RF بر اساس داده‌های EnMAP دقت بالایی داشت ($R^2=0.84$). در سناریوی دوم با داده‌های Sentinel-2، دقت کمی کاهش یافت ($R^2=0.72$). ترکیب دو منبع داده در سناریوی سوم با استفاده از الگوریتم گرام-اشمیت، بهترین نتیجه را ارائه داد و وضوح مکانی را با دقت ۱۰ متر ارتقا داد ($R^2=0.90$). تهیه نقشه شاخص SFI بر مبنای سناریوی سوم، نشان داد که ۶۰/۶ درصد منطقه در کلاس حاصلخیزی متوسط قرار دارد. محدودیت‌های اصلی، محتوای بالای CCE و کمبود SOM، P_{av} و TN است. نتایج، روند کاهش SFI در برخی از خاک‌های مطالعاتی بیانگر احتمال افزایش خطر تخریب خاک و کاهش عملکرد محصولات را هشدار می‌دهد و بر اهمیت استفاده از داده‌های سنجش از دور برای حصول به کشاورزی دقیق و مدیریت پایدار خاک تأکید می‌کند.

واژگان کلیدی شاخص حاصلخیزی خاک (SFI)، EnMAP، Sentinel-2، سنجش از دور، کشت گندم

مقدمه:

خاک به‌عنوان محیطی ناهمگن، دارای تنوع مکانی در ویژگی‌ها و حاصلخیزی است و درک این تغییرات برای مدیریت دقیق و افزایش بازدهی ضروری است. با توجه به اینکه ارزیابی مستقیم مواد مغذی خاک پرهزینه و زمان‌بر است، استفاده از شاخص حاصلخیزی خاک به‌عنوان ابزاری مناسب برای حداکثرسازی تولید محصولات زراعی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و مدیریت تنوع زمین‌های کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد ([Munnaf and Mouazen, 2021](#)) شرایط مطلوب حاصلخیزی می‌تواند منجر به افزایش عملکرد محصولات و بهبود جذب مواد مغذی گردد ([Jin et al., 2021](#)). از این رو، مدل‌سازی و نقشه‌برداری شاخص حاصلخیزی خاک ابزار مهمی برای ارتقای بهره‌وری و دستیابی به کشاورزی پایدار است ([Yang et al., 2023](#)).

تصاویر ابرطیفی و طیفی هر دو به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند در مطالعات کشاورزی و ارزیابی خاک شناخته می‌شوند ([Billy et al., 2024](#)). تصاویر ابرطیفی، به‌دلیل دارا بودن اطلاعات طیفی گسترده و دقیق، امکان بررسی و تحلیل عمیق‌تری از ویژگی‌های خاک، از جمله ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی را فراهم می‌آورند. این تصاویر با قابلیت تفکیک بسیار بالا در باندهای طیفی مختلف، به شناسایی دقیق‌تر ویژگی‌های خاک کمک کرده و در ترکیب با داده‌های دیگر، می‌توانند تخمین دقیق‌تری از وضعیت حاصلخیزی خاک ارائه دهند ([Chabrillat et al., 2022](#)).

در این تحقیق، کارایی تصاویر ابرطیفی EnMap در تعیین حاصلخیزی خاک بررسی شده و همچنین رابطه بین حاصلخیزی خاک و ترکیب داده‌های ابرطیفی EnMap و چند طیفی Sentinel-2 در بخشی از اراضی کشاورزی شمال غرب شهرستان کارون و جنوب غرب شهرستان اهواز ارزیابی گردیده است. هدف این تحقیق، تخمین مکانی شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) با استفاده از تصاویر ابرطیفی (EnMap) و چند طیفی (Sentinel-2) به کمک الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF) است. همچنین، دقت و کارایی ترکیب داده‌های ابرطیفی EnMap و چندطیفی Sentinel-2 در ارزیابی شاخص حاصلخیزی خاک با استفاده از الگوریتم Gram-Schmidt مورد سنجش قرار گرفته است.

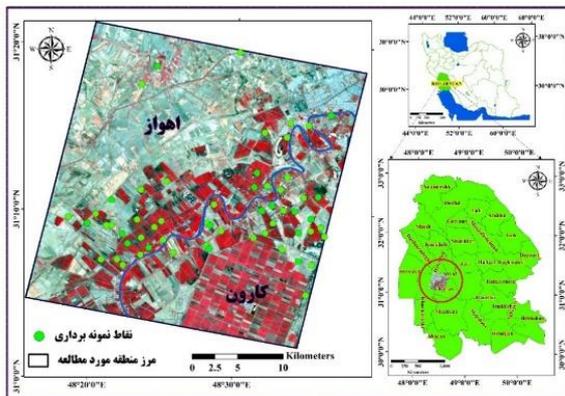
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در مختصات UTM از ۲۳۸۶۳۵ تا ۲۷۶۲۲۵ طول شرقی و ۳۴۳۵۸۸۵ تا ۳۴۷۲۰۳۵ عرض شمالی در شمال غرب شهرستان کارون و جنوب غرب اهواز، در مرکز استان خوزستان قرار دارد (شکل ۱). این منطقه به دلیل شرایط اقلیمی خاص و منابع غنی آب و خاک، برای کشت محصولات استراتژیک مانند گندم، نیشکر و برنج مناسب است. انتخاب این منطقه به دلیل استفاده عمده از زمین‌های کشاورزی و کشت محصولات کلیدی، فرصت مناسبی برای بررسی حاصلخیزی خاک و تأثیر آن بر بهره‌وری کشاورزی فراهم می‌آورد.

روش تحقیق

برای محاسبه شاخص حاصلخیزی خاک، از ۶۰ نمونه خاک سطحی (۲۵-۰ سانتی‌متر) اراضی کشاورزی گندم آبی شمال غرب شهرستان کارون و جنوب غرب اهواز استفاده شد. این نمونه‌ها با روش نمونه‌برداری تصادفی در اواخر مهر سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ جمع‌آوری و برای تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های جمع‌آوری شده همچنین با اطلاعات موجود در پایگاه داده‌های سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان تلفیق شد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

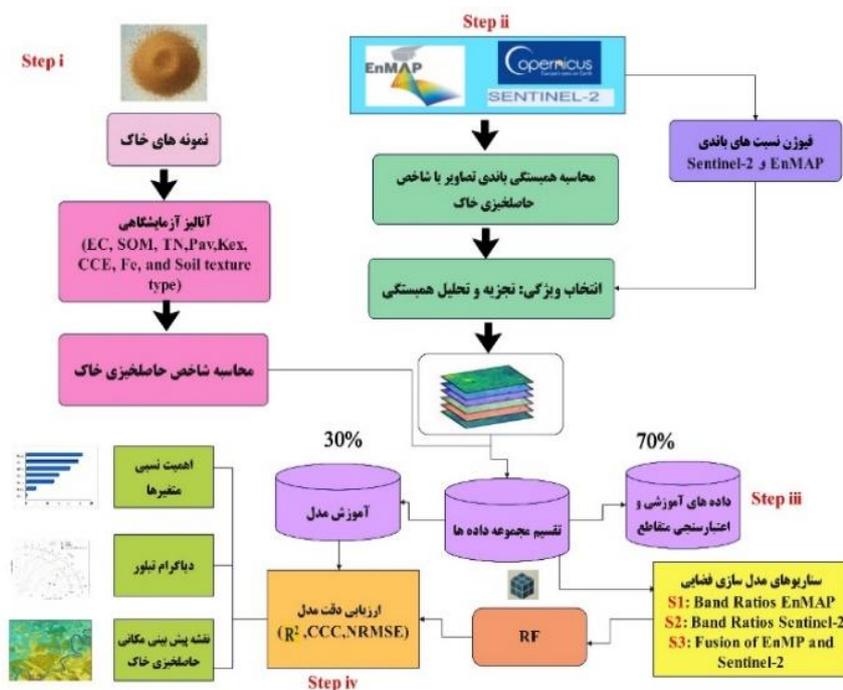
برای محاسبه شاخص SFI، هشت پارامتر مهم مؤثر بر حاصلخیزی شامل قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، ماده آلی خاک (SOM)، نیتروژن کل (TN)، فسفر در دسترس (P_{av})، پتاسیم قابل تبادل (K_{ex})، کربنات کلسیم معادل (CCE)، آهن قابل جذب (Fe) و بافت خاک مورد بررسی قرار گرفتند. این پارامترها بر اساس استانداردهای احتیاجات گیاهی گندم (مشیری و همکاران، ۱۳۹۳) و روش طبقه‌بندی ریشه دوم (Sys, 1991)، برای هر نقطه نمونه‌برداری محاسبه گردید.

مرحله انجام تحقیق در چهار مرحله‌ای اصلی ارائه شده است (شکل ۲).

۱- تعیین مکان‌های نمونه‌برداری خاک، بررسی نتایج آنالیزهای آزمایشگاهی هشت ویژگی خاک و محاسبه شاخص حاصلخیزی خاک (SFI). ۲- محاسبه همبستگی بین نسبت‌های بانندی تصاویر ماهواره‌های Sentinel-2 و EnMap با شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) و انتخاب نسبت‌های بانندی بالاترین همبستگی. ۳- استفاده از مدل جنگل تصادفی (RF) برای تولید نقشه پیش‌بینی مکانی شاخص حاصلخیزی خاک در سه سناریو: (S1) بهترین همبستگی نسبت‌های بانندی EnMap، (S2) بهترین همبستگی نسبت‌های بانندی Sentinel-2 و (S3) تلفیق باندهای دو ماهواره Sentinel-2 و EnMap. ۴- تهیه نقشه‌های پیش‌بینی مکانی شاخص حاصلخیزی خاک (SFI)، ارزیابی دقت مدل‌ها در سه سناریو و انتخاب سناریوی برتر. لازم به ذکر است که تصاویر ماهواره‌های Sentinel-2 و EnMap پیش از تحلیل شامل تصحیح اتمسفری، حذف نویز و برش به محدوده مطالعه شده‌اند تا کیفیت داده‌های ورودی مدل جنگل تصادفی (RF) تضمین شود.

نتایج و بحث

آمار توصیفی ویژگی‌های مؤثر بر حاصلخیزی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول‌های ۱ ارائه شده است. طبق نتایج جدول ۱، میانگین قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در منطقه ۵/۷۳ دسی‌زیمنس بر متر است. مقادیر حداقل و حداکثر آن به ترتیب برابر با ۱/۱۲ و ۱۲/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند. ماده آلی خاک (SOM) با میانگین ۱/۱ درصد یکی از شاخص‌های کلیدی سلامت خاک محسوب می‌شود (Nariyanti et al., 2022) و در این منطقه در رده متوسط قرار دارد (Cao et al., 2022). میانگین نیتروژن کل (TN) معادل ۰/۰۴ درصد است که در طبقه بسیار پایین قرار می‌گیرد. TN و SOM تأثیر مهمی بر وضعیت حاصلخیزی خاک دارند (Pual et al., 2020). همچنین، میانگین فسفر در دسترس (P_{av}) برابر با ۷/۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و میانگین پتاسیم قابل تبادل (K_{ex}) برابر با ۱۷۰/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. این شاخص‌ها بر اساس طبقه‌بندی Rayment and Bruce (1982) از کم تا متوسط متغیر هستند.



میزان کربنات کلسیم معادل (CCE) نیز با میانگین ۵۰/۸ درصد، تأثیر منفی بر وضعیت حاصلخیزی داشته و جذب مواد مغذی را کاهش داده است (Wang et al., 2022). میانگین درصد شن، سیلت و رس به ترتیب برابر با ۲۹/۷، ۴۳/۵ و ۲۶/۶ درصد است که نشان دهنده بافت غالب رسی - لومی و لومی با شرایط مطلوب حاصلخیزی است (Siqueira et al., 2024).

شکل ۲. فلوچارت مراحل تحقیق

جدول ۱. آمار توصیفی ویژگی‌های مؤثر در محاسبه شاخص حاصلخیزی خاک (n=60)

ویژگی	میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
EC (dS/m)	5.73	5.6	1.12	12.38	2.62	45.7
SOM (%)	1.10	1.10	0.26	2.48	0.51	46.4
TN (%)	0.04	0.04	0.01	0.1	0.02	50
CCE (%)	50.8	50.5	47.1	55.2	2.01	3.95
K _{ex} (mg/kg)	170.23	168	95	261	32.2	18.9
P _{av} (mg/kg)	7.94	7.51	1.82	20.33	4.37	55.0
Fe (mg/kg)	7.16	7.28	1.64	9.72	1.56	21.8
Silt (%)	43.5	44.5	31.0	52.0	4.83	11.1
Sand (%)	29.7	31.1	20.8	38.91	4.42	14.9
Clay (%)	26.6	26.2	21.8	31.9	2.42	9.1

EC: قابلیت هدایت الکتریکی، SOM: ماده آلی خاک، TN: نیتروژن کل، CCE: کربنات کلسیم معادل، K_{ex}: پتاسیم قابل تبادل، Fe: آهن قابل جذب، P_{av}: فسفر در دسترس

آهن قابل جذب: Fe، فسفر در دسترس: P_{av}

هر یک از هشت معیار با استفاده از روش پارامتری امتیازدهی شدند (Khiddiret al., 1986). میانگین امتیازات اختصاص یافته به ویژگی‌های مؤثر بر حاصلخیزی خاک نشان می‌دهد که بالاترین امتیازات به بافت خاک، شوری (EC) و آهن قابل جذب (Fe)، تعلق دارد، در حالی که پایین‌ترین امتیازات به نیتروژن کل (TN)، فسفر در دسترس (P_{av}) و کربنات کلسیم معادل (CCE) جذب

در رتبه حاصلخیزی زیاد، پتاسیم قابل تبادل در رتبه متوسط تا زیاد، ماده آلی خاک در رتبه متوسط تا کم، فسفر در دسترس و کربنات کلسیم معادل در رتبه کم و نیتروژن کل در رتبه کم تا بسیار کم قرار گرفته‌اند. دو مجموعه داده ماهواره‌ای چندطیفی Sentinel-2 و ابرطیفی EnMAP هم‌زمان با نمونه‌برداری خاک، برای بررسی روابط بین نسبت باندهای طیفی و شاخص حاصلخیزی خاک استفاده شدند، به‌منظور بهبود دقت مکانی تصویر ابرطیفی EnMAP، از داده‌های Sentinel-2 و الگوریتم Gram-Schmidt استفاده شد. مدل‌سازی در سه سناریوی جداگانه با استفاده مدل جنگل تصادفی انجام گرفت، ارزیابی عملکرد مدل‌ها در [جدول ۲](#) ارائه شده است.

جدول ۲. ارزیابی عملکرد مدل RF در سه سناریو برای پیش‌بینی شاخص SFI

Modeling scenarios	R ²	CCC	RMSE	NRMSE
EnMAP (S1)	0.84	0.92	3.30	0.09
Sentinel-2 (S2)	0.72	0.85	3.69	0.11
Fusion of EnMAP and Sentinel-2 (S3)	0.90	0.95	2.45	0.07

نتایج [جدول ۲](#) نشان داد که مدل‌سازی شاخص حاصلخیزی خاک با استفاده از نسبت‌های باندهای تلفیقی (EnMAP و Sentinel-2) نسبت به دو مدل دیگر، بر اساس پارامترهای ارزیابی دقت، عملکرد بهتری داشته است. بنابراین، بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی، نقشه حاصل از سناریوی سوم به‌عنوان نقشه نهایی در نظر گرفته شد ([شکل ۳](#)). در این نقشه، بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه (۶۰٪) در کلاس حاصلخیزی متوسط قرار دارد، در حالی که کمترین مساحت به کلاس حاصلخیزی بسیار کم اختصاص دارد (۷۴٪). طبقه‌بندی شاخص حاصلخیزی خاک بر اساس مطالعه نارینتی و همکاران (۲۰۲۲) انجام شده است ([Nariyanti et al., 2022](#)).

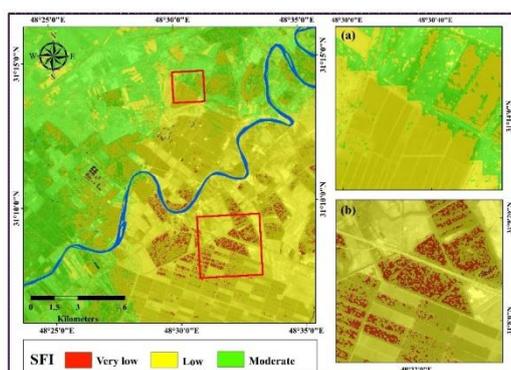
این توزیع نشان می‌دهد که بیشتر منطقه دارای حاصلخیزی متوسط است ([جدول ۳](#)). محدودیت‌های حاصلخیزی خاک در این اراضی شامل محتوای بالای CCE و سطوح پایین SOM، TN و P_{av} است. روندهای کاهش در ویژگی‌های کلیدی SFI نگرانی‌های جدی درباره روند تخریب خاک ایجاد می‌کند که ممکن است به کاهش تولید محصولات کشاورزی منجر شود و احتمالاً اراضی کشاورزی را از چرخه تولید خارج کند. نمودار اهمیت نسبی (RI) متغیرهای کمکی در [شکل ۴](#) نمایش داده شده است. نتایج این تحلیل براساس بهترین سناریو، نشان می‌دهد که نسبت‌های باندی B₄/B₁₄، B₅/B₁₅ و B₅/B₁₇ بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی حاصلخیزی خاک دارند. در مقابل، نسبت‌های باندی B₅/B₁₀ و B₄/B₁₆ کمترین تأثیر را در پیش‌بینی حاصلخیزی خاک داشتند.

نتیجه‌گیری

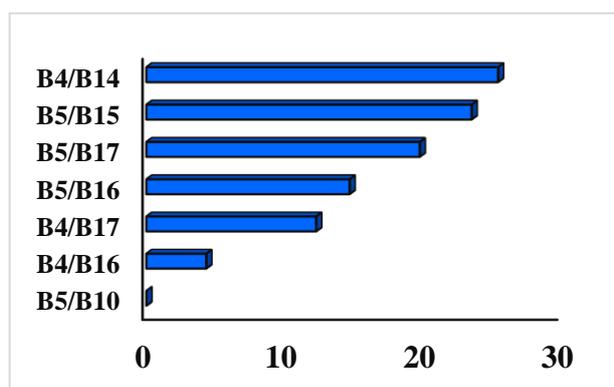
ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری R²، nRMSE، CCC نشان داد که هر سه سناریو در تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی حاصلخیزی خاک عملکرد خوبی داشتند. با این حال، توزیع مکانی SFI که از ترکیب داده‌های Sentinel-2 و EnMAP به دست آمد، نشان داد که این سناریو پیش‌بینی‌های بسیار دقیقی برای SFI در اراضی کشاورزی ارائه می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشتر اراضی در منطقه مورد مطالعه در کلاس حاصلخیزی خاک متوسط قرار دارند. استفاده از ترکیب داده‌های EnMAP و Sentinel-2 می‌تواند به طور مؤثری توزیع مکانی دقیق حاصلخیزی خاک (SFI) را تعیین کرده و بینش‌های ارزشمندی برای سیاست‌گذاران و مدیران کشاورزی فراهم آورد. این روش به درک عمیق‌تری از شرایط حاصلخیزی خاک کمک کرده و عوامل محدودکننده حاصلخیزی خاک در منطقه را شناسایی می‌کند.

جدول ۳. مساحت و درصد کلاس‌های شاخص SFI بر اساس بهترین سناریو (S3)

SFI class	Area (ha)	Area (%)
Very low	699.63	0.74
low	36630.94	38.7
Moderate	57331.88	60.6
Total	94662.45	100



شکل ۳. نقشه پیش‌بینی مکانی شاخص SFI با استفاده از مدل RF بر اساس سناریوی S3 (a) مناطق با حاصلخیزی کم و متوسط، (b) مناطق با حاصلخیزی کم و بسیار کم



شکل ۴. اهمیت نسبی متغیرهای کمکی در سناریوی سوم

فهرست منابع

۱- باقری بداغ آبادی، م. ۱۳۹۹. بررسی شاخص اصلاح شده سرزمین در ارزیابی تناسب سرزمین و تصحیح روابط آن، آب و خاک، جلد ۳۴، شماره ۶، ص ۱۲۹۸-۱۲۸۷.

2- Billy., G. Ram., P. Oduor., C. Igathinathane., KH, Xin Sun., A. Systematic review of hyperspectral imaging in precision agriculture: Analysis of its current state and future prospects, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 222, 2024, 109037, ISSN 0168-1699. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109037>.

3- Brady, N.C., & Weil, R.R. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education. 15th Edition. ISBN: 978-0133254488.

4- Bruce, R.C., Rayment, G.E. (1982). *Analytical methods and interpretations used by the Agricultural Chemistry Branch for soil and land use surveys*. Queensland Department of Primary Industries.

5- Cao, C., Wang, J., Kwok, D., Cui, F., Zhang, Z., Zhao, D., Li, M. J., & Zou, Q. (2022). webTWAS: A resource for disease candidate susceptibility genes identified by transcriptome-wide association study. *Nucleic Acids Research*, 50(D1), D1123–D1130. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab957>.

6- Chabrilat, S.; Guanter, L.; Kaufmann, H.; Foerster, S.; Beamish, A.; Brosinsky, A.; Wulf, H.; Asadzadeh, S.; Bochow, M.; Bohn N.; Boesche, N.; Bracher, A.; Brell, M.; Buddenbaum, Cerra, D.; H.; Fischer, S.; Hank, T.; Heiden, U.; Heim, B.; Heldens, W.; Hill, J.; Hollstein, A.; Hostert, P.; Krasemann, H.; LaPorta, L.; Leitão, P.J.; van der Linden, S.; Mauser, W.; Milewski, R.; Mottus, M.; Okujeni, A.; Oppelt, N.; Pinnel, N.; Roessner, S.; Röttgers, R.; Schneiderhan, T.; Schickling, A.; Soppa, M.; Staenz, K.; Segl, K. (2022) *EnMAP Science Plan*. EnMAP Technical Report, GFZ Data Services. <http://doi.org/10.48440/enmap.2022.001>

7- Hudson, B.D. (1994) Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49, 189-194.

8- Jena, R.K., Bandyopadhyay, S. Pradhan, U.K., Moharana, P.C., Kumar, N., Sharma, G.K. (2022). Geospatial modeling for delineation of crop management zones using local terrain attributes and soil properties. *Remote Sens.* 14, 2101. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs14092101>.

9- Jin, J., Wang, L., Muller, K., Wu, J., Wang, H., Zhao, K., Berninger, F., & Fu, W. (2021). A 10-year monitoring of soil properties dynamics and soil fertility evaluation in Chinese hickory plantation regions of southeastern China. *Scientific Reports*, 11(1), 23531. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02947-z>.

10- Khiddir S.M. 1986. A statistical approach in the use of parametric systems applied to the FAO framework for land evaluation. Unpublished thesis. State University Ghent.

11- Moshiri F (2013) *Guidelines for Integrated Management of and Wheat Plant Nutrition, Soil and Water Research Institute (In Persian)*.

- 12-Munnaf, M.A., Mouazen, A.M., (2021). Development of a soil fertility index using on-line Vis-NIR spectroscopy. *Comput. Electron. Agric.* 188, 106341 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106341>.
- Paul, G.C., Saha, S., Ghosh, K.G. (2020). Assessing the soil quality of Bansloi river 800 basin, eastern India using soil-quality indices (SQIs) and Random Forest machine learning 801 techniques. *Ecological Indicators*, 118, 106804. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106804>.
- 13-Nariyanti, S., Herawati, A., Herdiansyah, G., Irianto, H., Riptanti, E. W., & Qonita, A. (2022). Soil fertility index based on altitude: A comprehensive assessment for the cassava development area in Indonesia. *Annals of Agricultural Sciences*, 67(2), 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2022.10.001>.
- 14-Siqueira, R.G., Moquedace, C.M., Fernandes-Filho, E.I., Schaefer, C.E., Francelino, M.R., Sacramento, I.F., Michel, R.F. (2024). Modeling and prediction of major soil chemical properties with Random Forest: Machine learning as tool to understand soil-environment relationships in Antarctica. *CATENA*, 235, 107677. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107677>.
- 15-Sys, C., Van Ranst, E. and Dedaveye, J. (1991). Land evaluation. Part II: Methods in Land Evaluation. General Administration for Development Cooperation. Agriculture Publishing, No: 7, Brussels, Belgium.
- 16-Tunçay, T., Kılıç, Ş., Dedeoğlu, M., Dengiz, O., Başkan, O., Bayramin, I. (2021). Assessing soil fertility index based on remote sensing and gis techniques with field validation in a semiarid agricultural ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 190, 104525. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104525>.
- 17-Wang, S., Xu, L., Hao, M. (2022). Impacts of Long-Term Micronutrient Fertilizer Application on Soil Properties and Micronutrient Availability. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19: 16358. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316358>.
- 18-Wilding L.P.(1985). Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 30 November-1 December 1984: 166-194. <https://doi.org/10.12691/env-3-1-4>
- 19-Yang, R., Song, S., Chen, S., Du, Z., Kong, J. (2023). Adaptive evaluation of green manure rotation for a low fertility farmland system: Impacts on crop yield, soil nutrients, and soil microbial community. *CATENA*, 222, 106873. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106873>.

Modeling and Mapping the Soil Fertility Index Using a Remote Sensing and Machine Learning Approach

Zeinab Zaheri Abdehvand^{1*}, Kazem Rangzan², Danya Karimi², Seyed Roohollah Mousavi³

¹Ph.D. in Remote Sensing and GIS, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.

²Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

³Ph.D. in Soil Resource Management, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

Abstract

This study aimed to develop a Soil Fertility Index (SFI) map for agricultural lands in the central region of Khuzestan province, with a focus on irrigated wheat cultivation. Three scenarios were evaluated using the Random Forest (RF) model and satellite data from hyperspectral EnMAP and multispectral Sentinel-2 sensors. The SFI was calculated by integrating eight key parameters: soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (P_{av}), exchangeable potassium (K_{ex}), electrical conductivity (EC), extractable iron (Fe), equivalent calcium carbonate (CCE), and soil texture. In the first scenario, the RF model based on EnMAP data showed high accuracy ($R^2 = 0.84$). In the second scenario, using Sentinel-2 data, accuracy slightly decreased ($R^2 = 0.72$). The third scenario combined both data sources using the Gram-Schmidt algorithm, delivering the best results and improving spatial resolution to 10 meters ($R^2 = 0.90$). The resulting SFI map from the third scenario showed that 60.6% of the area falls within the medium fertility class. The main limitations identified were the high CCE content and the low levels of SOM, TN, and P_{av} . These results indicate a declining trend in SFI for some of the studied soils, which could potentially lead to increased soil degradation risk and yield reduction. This highlights the importance of utilizing remote sensing data for precision agriculture and sustainable soil management.

Keywords: Soil Fertility Index (SFI), EnMAP, Sentinel-2, Remote sensing, Wheat cultivation