



Detection and Analysis of Areas Affected by Vegetation Dieback in the Rangelands of Chaharmahal Va Bakhtiari Province Using Remote Sensing Data

Maryam Gholami^{1*} | Ataollah Ebrahimi¹ | Esmaeil Asadi Boroujeni¹ |
Elham Ghahsareh Ardestani¹ | Hamzeh Ali Shirmardi²

1. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2. Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Chaharmahal-va-Bakhtiari Province, Shahrekord, Iran

Correspond E-mail: maryamghollami@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 02 Jan. 2026
Revised: 04 Apr. 2026
Accepted: 07 Apr. 2026
Published online: 01 Sept. 2026

Keywords:
Change Detection,
Image Differencing,
Rangeland Degradation,
Vegetation Cover.

Abstract

Detecting vegetation changes in arid and semi-arid regions, particularly identifying areas affected by vegetation drying, remains a major challenge in remote sensing. This study aimed to identify and analyze areas affected by vegetation drying in the rangelands of Chaharmahal-va-Bakhtiari Province, Iran, using remote sensing data from 2013 and 2023. Image differencing was performed for several indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Health Index (VHI), Tasseled Cap Transformation (TCT), and Simple Ratio (SR). Thresholds were then applied to the difference values of each index to identify dried patches. To validate the results, field surveys and sampling were conducted to assess the agreement between the identified patches and actual field conditions. The results showed that the SR index performed best in identifying dried patches, achieving an overall accuracy of 75% and a Kappa coefficient of 0.75, indicating substantial agreement with the field data. The VHI index ranked second, with an overall accuracy of 60% and a Kappa coefficient of 0.40. The TCT index achieved an overall accuracy of 52% and a Kappa coefficient of 0.32, whereas the NDVI index showed the lowest performance, with an overall accuracy of 40% and a Kappa coefficient of 0.28. These findings suggest that SR was more effective than the other evaluated indices in detecting vegetation drying in the study area. The SR index could therefore serve as a useful tool for monitoring vegetation drying and supporting early warning systems and the sustainable management of rangeland resources.

Cite this article: Gholami, M., Ebrahimi, A., Asadi Boroujeni, E., Ghahsareh Ardestani, E., Shirmardi, H.A. (2026). Detection and Analysis of Areas Affected by Vegetation Dieback in the Rangelands of Chaharmahal va Bakhtiari Province Using Remote Sensing Data. *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (3), 313-327. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.407513.1858>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Rangelands in arid and semi-arid regions are highly vulnerable to climatic variability, overgrazing, and other anthropogenic pressures, which can result in the formation of dried or degraded patches. Detecting vegetation changes in these ecosystems is crucial for sustainable management, early warning, and planning interventions. Remote sensing provides a cost-effective and repeatable tool for monitoring vegetation dynamics across large areas, enabling early identification of degraded zones. Several vegetation indices, among others, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Simple Ratio (SR), Vegetation Health Index (VHI), and Tasseled Cap Transformation (TCT), are widely applied to assess vegetation condition. NDVI measures relative greenness, SR emphasizes vegetation reflectance ratios, VHI integrates temperature and vegetation stress, and TCT highlights vegetation brightness and greenness components. Despite their extensive uses, comparative evaluations in semi-arid rangelands are limited. This study investigates vegetation changes in the rangelands of Chaharmahal-va-Bakhtiari Province between 2013 and 2023 using Landsat imagery and multiple indices. The primary objective is to identify dried patches accurately and determine which indices provide the most reliable results for monitoring and managing rangeland degradation. The study also validates remote sensing results through field sampling, offering insights for practical applications in semi-arid ecosystems.

Materials and Methods: This research utilized Landsat 8 satellite imagery to evaluate rangeland vegetation changes between 2013 and 2023. Pre-processing including radiometric and atmospheric correction, as well as cloud and shadow removal, were done to enhance data quality. Rangeland areas were classified using the Classification Tree Algorithm (CTA) implemented in Google Earth Engine, and the classification was validated with ground-truth points from field visits and high-resolution Google Earth imagery. Vegetation indices including NDVI, SR, VHI, and TCT components (brightness, greenness, wetness) were computed for both years. Image differencing was applied to each index to quantify changes in vegetation cover over time. Thresholds for identifying dried patches were established based on normalized difference values specific to each index. Field validation involved sampling across identified dried patches to assess correspondence with actual ground conditions. Accuracy metrics included overall accuracy, user accuracy, and the Kappa index of coefficient. These analyses allowed comparative evaluation of index performance and identification of the most reliable indicators for detecting rangeland degradation in semi-arid environments. All analyses were conducted in a reproducible workflow to ensure the methodology could be applied to other regions with similar ecological conditions.

Results and Discussion: The analysis revealed considerable variation in the performance of different indices for detecting dried patches. The SR index demonstrated the highest reliability, achieving an overall accuracy of 75 percent and a Kappa index of coefficient of 0.75, indicating strong agreement with field observations. VHI exhibited moderate performance, with a user accuracy of 60 percent and Kappa of 0.40, capturing vegetation stress but with lower spatial precision. NDVI showed limited effectiveness, with only 40 percent accuracy and a Kappa of 0.28, suggesting that NDVI may underestimate early-stage degradation in semi-arid rangelands. TCT indices provided intermediate results, with an overall accuracy of 52 percent and Kappa of 0.32, effectively identifying general vegetation loss but lacking sensitivity to smaller or fragmented dried patches. The superior performance of SR highlights the value of reflectance ratio-based indices in detecting subtle vegetation changes under semi-arid conditions. Image differencing proved effectiveness for quantifying spatial and temporal patterns of degradation, providing actionable insights for land management. These results underscore the importance of selecting indices that consider local climatic and ecological conditions, as well as validating remote sensing outputs with field data to ensure accuracy and applicability.

Conclusion: This study demonstrates that the SR index is the most effective remote sensing tool for identifying dried patches in Chaharmahal-va-Bakhtiari rangelands. Accurate detection of vegetation degradation can support early-warning systems, sustainable management, and resource allocation. Limitations observed in NDVI and TCT indices suggest that careful selection of vegetation indices is crucial for monitoring semi-arid ecosystems decline. The proposed methodology provides a reproducible and practical framework for rangeland monitoring, guiding policy-making and mitigation strategies against climatic and anthropogenic pressures. Adoption of this approach can enhance ecological resilience, optimize rangeland management, and contribute to sustainable natural resource use.

Keywords: *Change Detection, Image Differencing, Rangeland Degradation, Vegetation Cover*

Article Type: Research Article

Conflicts of interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



دوره ۷۹ (۳)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



آشکارسازی و تحلیل پهنه‌های متأثر از خشکیدگی پوشش گیاهی در مراتع استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از داده‌های دورسنجی

مریم غلامی^{۱*} | عطاالله ابراهیمی^۱ | اسماعیل اسدی بروجنی^۱ | الهام قهساره اردستانی^۱ | حمزه علی شیرمردی^۲

۱. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ایران.
رایانامه: maryamghollami@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

آشکارسازی تغییرات پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه برای شناسایی لکه‌های خشکیده، یکی از چالش‌های مهم در سنجش از دور است. این تحقیق به‌منظور شناسایی و تحلیل پهنه‌های دچار خشکیدگی مراتع استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از داده‌های دورسنجی و تحلیل تغییرات پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ انجام شده است. پس از بدست آوردن تفاضل تصاویر سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ برای شاخص‌های مختلف نظیر NDVI، SR و TCT، آستانه‌گذاری مقادیر تفاضل برای هر شاخص به‌منظور شناسایی لکه‌های خشکیده انجام شد. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج، پس از شناسایی لکه‌های خشکیده، به عرصه‌های طبیعی مراجعه و آماربرداری میدانی انجام گردید تا تطابق مناطق شناسایی شده با وضعیت واقعی ارزیابی شود. نتایج نشان داد که شاخص SR با دقت کلی ۷۵ درصد و ضریب کاپای ۰/۷۵ بهترین عملکرد را در شناسایی لکه‌های خشکیده داشت و نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج با داده‌های میدانی است. پس از آن، شاخص VHI با دقت ۶۰ درصد و ضریب توافق ۰/۴، مناسبترین شاخص پوشش گیاهی برای تعیین مناطق خشکیده بوده است. شاخص TCT نیز توانست تغییرات پوشش گیاهی را با دقت کلی ۵۲ درصد و ضریب توافق ۰/۳۲ شناسایی نماید. در این بین، شاخص NDVI با دقت ۴۰ درصد و ضریب توافق ۰/۲۸ کمتر از حد انتظار، نتوانست تغییرات پوشش گیاهی را در مناطق خشکیده شده نشان دهد. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص SR به‌عنوان ابزاری مؤثر در تشخیص لکه‌های خشکیده در مناطق مرتعی می‌تواند به‌طور قابل توجهی در پیش آگاهی، پایش و مدیریت بهینه‌ی منابع طبیعی کمک کند.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹

کلیدواژه‌ها:

آشکارسازی تغییرات،
تفاضل تصاویر،
تخریب مراتع،
پوشش گیاهی.

استناد: شریفی، رحمان، برزگری بنادکوی، فاطمه، پاک‌پور، مجتبی (۱۴۰۵). آشکارسازی و تحلیل پهنه‌های متأثر از خشکیدگی پوشش گیاهی در مراتع استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از داده‌های دورسنجی. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۹ (۳)، ۳۱۳-۳۲۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.407513.1858>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

منابع طبیعی از مهم‌ترین دارایی‌های هر سرزمین هستند و مراتع به‌عنوان منابع تجدیدشونده، نقش کلیدی در حفظ تعادل اکولوژیکی و تأمین نیازهای زیست‌محیطی و اقتصادی جوامع ایفا می‌کنند. این بوم‌سازگان‌ها علاوه بر تأمین علوفه برای دام‌ها که بخشی از اقتصاد کشاورزی و دامداری را تشکیل می‌دهند، در تولید آب، حفاظت خاک، زیستگاه حیات وحش، تصفیه هوا و کارکردهای فرهنگی و اجتماعی نیز اهمیت دارند (Hajarian, 2023; Waterhouse et al., 2024). با وجود این کارکردها، مراتع در سال‌های اخیر تحت فشار عوامل انسانی و اقلیمی قرار گرفته‌اند. تخریب مراتع موجب گسترش گونه‌های مهاجم، از دست رفتن زیستگاه‌ها، افزایش فرسایش خاک و رواناب سطحی، کاهش ذخایر آبی و در نهایت تهدید معیشت و امنیت غذایی جوامع وابسته می‌شود. تغییرات اقلیمی همراه با فشارهای انسانی مانند چرای بی‌رویه، خشکیدگی پوشش گیاهی را تشدید کرده است (Hadinejad et al., 2025)؛ بنابراین شناسایی مناطق خشکیده برای مدیریت پایدار و حمایت از جوامع محلی ضروری است (Swain et al., 2013; Rippner et al., 2015; Dungal et al., 2020).

خشکسالی‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب مراتع محسوب می‌شوند و کاهش بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند تولید علوفه را تا ۵۰ درصد کاهش دهد و مستقیماً بر معیشت جوامع محلی اثر بگذارد (Bondaruk et al., 2022). در استان چهارمحال و بختیاری، خشکیدگی مراتع به‌ویژه در گون‌زارها به تهدیدی جدی بدل شده است. گون‌ها به دلیل نقش آن‌ها در حفظ خاک، تأمین علوفه و جذب کربن از گونه‌های استراتژیک محسوب می‌شوند و خشکیدگی آن‌ها آثار منفی گسترده‌ای به همراه دارد. گزارش‌ها حاکی از خشکیدگی حدود ۳۰۰ هزار هکتار از گون‌زارهای استان است (Shirmardi, 2013) و بخش وسیعی از گونه‌های گون (*Astragalus* spp.) و دافنه یا شوخ (*Daphne maucronata*) نیز از دهه‌ی ۱۳۹۰ تاکنون دچار خشکیدگی شده‌اند (Shirmardi, 2013; Yaghmaei et al., 2021). عوامل اقلیمی، کاهش بارندگی و مدیریت نادرست منابع طبیعی در تشدید این بحران نقش دارند.

با توجه به گستردگی و پیچیدگی این پدیده، استفاده از فناوری‌های نوین برای ارزیابی آن ضرورت دارد. سنجش از دور به‌عنوان ابزاری سریع و دقیق، امکان بررسی تغییرات پوشش گیاهی در مقیاس وسیع را فراهم می‌کند و ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با مشاهدات میدانی می‌تواند به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و پیش‌بینی روندهای آینده کمک کند (Yao et al., 2019). علاوه بر این، پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های سنجش از دور با اطلاعات GIS مانند شیب، توپوگرافی و کاربری اراضی، دقت شناسایی مناطق خشکیده را افزایش می‌دهد (Liping et al., 2018; MohanRajan et al., 2020; Almalki et al., 2022). از این رو، برای پایش تغییرات پوشش گیاهی چارچوب‌های جامعی نیز پیشنهاد شده است؛ به‌ویژه تقسیم‌بندی Lu و همکاران (۲۰۰۴) که شامل هفت گروه اصلی و بیش از ۲۹ روش فرعی است. این چارچوب از روش‌های ساده‌ی جبری تا مدل‌های پیشرفته و تلفیق با GIS را دربرمی‌گیرد و مبنای بسیاری از پژوهش‌های اخیر قرار گرفته است. بهره‌گیری از این روش‌ها، به‌ویژه روش‌های طبقه‌بندی و مدل‌های پیشرفته، به پایش تغییرات پوشش گیاهی و شناسایی دقیق‌تر مناطق خشکیده کمک کرده است. ضرورت تعیین میزان و پراکندگی خشکیدگی مراتع به‌ویژه در استان‌های خشک و نیمه‌خشک غیرقابل انکار است. در این راستا، پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که شاخص‌های گیاهی مانند NDVI و SR همبستگی بالایی با تغییرات بارندگی و پوشش گیاهی دارند و می‌توانند ابزار مناسبی برای ارزیابی خشکیدگی باشند (Mirzapour et al., 2023).

در ایران، مطالعات متعددی با استفاده از داده‌های سنجش از دور به بررسی خشکیدگی و تغییرات پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های مرتعی و جنگلی پرداخته‌اند. یغمائی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از تصاویر لندست، تغییرات پوشش گیاهی و محدوده‌های زوال مراتع و جنگل‌ها را در استان چهارمحال و بختیاری بررسی کردند. همچنین یغمایی و همکاران (۱۳۹۶) با بهره‌گیری از داده‌های MODIS نشان دادند که پوشش گیاهی مرتعی نسبت به پوشش جنگلی حساسیت بیشتری به خشکیدگی دارد. فولادی و همکاران (۱۳۹۳) در پهنه‌بندی خشکیدگی مراتع شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری، کارایی شاخص‌های گیاهی مختلف مبتنی بر داده‌های لندست را ارزیابی کردند. از سوی دیگر، ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) و عسگری و همکاران (۱۴۰۰) نیز نقش شاخص‌های پوشش گیاهی به‌ویژه NDVI را در تحلیل خشکیدگی و زوال پوشش گیاهی در مناطق غربی کشور تأیید کرده‌اند.

با وجود مطالعات انجام‌شده، مقایسه همزمان عملکرد شاخص‌های طیفی VHI، SR، NDVI و تبدیل تسلدکپ در آشکارسازی پهنه‌های متأثر از خشکیدگی مراتع، مبتنی بر تفاضل زمانی تصاویر چنددوره‌ای لندست و همراه با اعتبارسنجی میدانی، در استان چهارمحال و بختیاری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مطالعه سعی دارد این خلأ را با تمرکز بر شناسایی لکه‌های خشکیده و ارزیابی کارایی شاخص‌های مختلف پر کند. هدف این مطالعه بررسی توانایی داده‌های سنجش از دور (تصاویر OLI لندست ۸) و شاخص‌های گیاهی VHI، SR، NDVI و تبدیل Tasseled Cap در شناسایی و ارزیابی خشکیدگی مراتع استان چهارمحال و بختیاری است؛ استانی که به دلیل توپوگرافی متنوع و شرایط اقلیمی خاص، در معرض تهدید جدی خشکیدگی مراتع قرار دارد.

بر اساس این هدف، سوال‌ها و فرضیات پژوهش به شرح زیر مطرح شدند:

سوال پژوهش ۱: شاخص‌های گیاهی VHI، SR، NDVI و TCT تا چه اندازه قادر به شناسایی پهنه‌های خشکیده مراتع در استان چهارمحال و بختیاری هستند؟

سوال پژوهش ۲: کدام یک از این شاخص‌ها حساسیت و دقت بالاتری در آشکارسازی خشکیدگی مراتع دارد؟

فرضیه ۱: شاخص‌های طیفی NDVI و SR تغییرات پوشش گیاهی را در پهنه‌های خشکیده با دقت بالایی نشان می‌دهند.

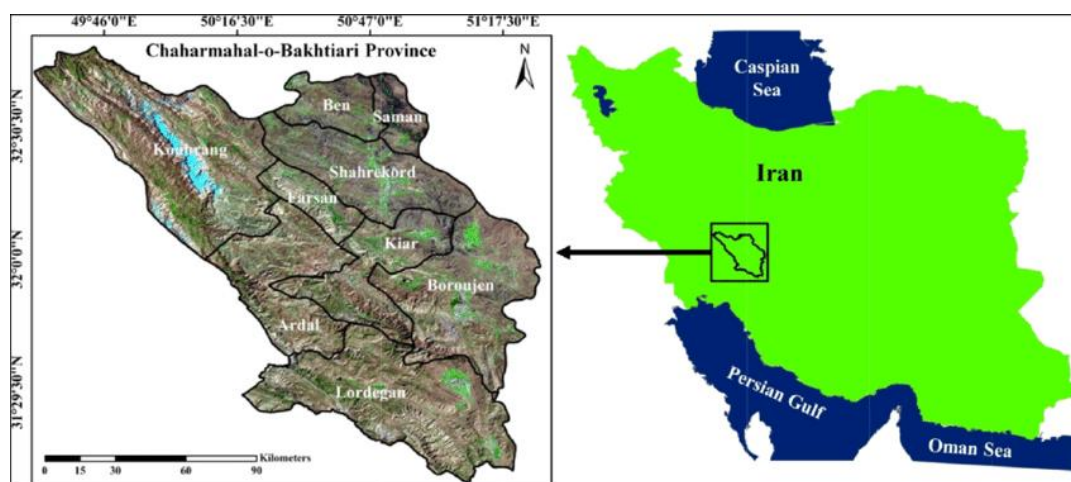
فرضیه ۲: شاخص ترکیبی VHI و مؤلفه سبزیگی TCT، با کاهش اثر پس‌زمینه خاک و ترکیب اطلاعات حرارتی، توانایی بهتری در تشخیص لکه‌های خشکیده دارند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه‌ی مورد تحقیق

استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۱۶۵۳۳ کیلومتر مربع در بخش مرکزی کوه‌های زاگرس واقع شده است. حدود ۷۰ درصد از این استان را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهند که از نظر توپوگرافی، دارای شیب و ارتفاعات قابل توجهی است (شکل ۱). بررسی نقشه‌های توپوگرافی، از جمله نقشه‌های DEM و SRTM، نشان می‌دهد که متوسط ارتفاع این استان ۲۱۵۳ متر و متوسط شیب آن ۱۸ درصد است (تهیه شده بر اساس داده‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM، SRTM) دریافت‌شده از پایگاه داده EarthExplorer متعلق به سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS). نتایج طرح شناخت مناطق اکولوژیک کشور گویای آن است که حدود ۱۰۶ تیپ گیاهی عمده با بیش از ۱۴۰۰ گونه‌ی گیاهی در سطح مراتع استان شناسایی شده است که گونه‌های مختلف جنس گون (*Astragalus spp.*) در ۵۲ تیپ گیاهی به عنوان گونه‌ی اصلی و در سایر تیپ‌ها به عنوان گونه‌های همراه با گیاهانی از تیره‌های گرامینه، لگوم، (گل) مرکبانی، چتریان و نعناعیان حضور دارند (Fayyaz et al., 2011; Mozaffarian, 2017).

انتخاب استان چهارمحال و بختیاری به عنوان منطقه مورد مطالعه، با توجه به غالب بودن اکوسیستم‌های مرتعی، تنوع بالای تیپ‌های گیاهی و حساسیت بالای این اکوسیستم‌ها به تنش‌های محیطی صورت گرفت. شرایط اقلیمی نیمه‌خشک تا سرد کوهستانی، تغییرات شدید ارتفاعی، شیب و وابستگی مستقیم پوشش مرتعی به بارش‌های سالانه، موجب شده است که مراتع این استان نسبت به فرآیندهای خشکیدگی و کاهش بنیه پوشش گیاهی واکنش‌پذیری بالایی داشته باشند. از سوی دیگر، گسترش تیپ‌های غالب گون‌دار که از گونه‌های شاخص مراتع خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند، امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات پوشش گیاهی و کارایی شاخص‌های دورسنجی در آشکارسازی خشکیدگی مراتع را فراهم می‌کند. بنابراین، ویژگی‌های اکولوژیکی و فیزیوگرافی استان چهارمحال و بختیاری این منطقه را به نمونه‌ای مناسب برای دستیابی به اهداف این پژوهش تبدیل کرده است (شکل ۱).



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی و تقسیمات سیاسی استان چهارمحال و بختیاری

۲-۲. تعیین کاربری اراضی و صحت‌سنجی نقشه‌ی آن

برای شناسایی و تفکیک کاربری اراضی در منطقه‌ی مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۳ استفاده شد. انتخاب این سال به دلیل دسترسی به داده‌های به‌روز، کیفیت مکانی مناسب (۳۰ متر) و پوشش کامل منطقه انجام گرفت. همچنین به‌منظور اجتناب از تأثیر تفاوت‌های سنجنده‌ها، تمامی تحلیل‌ها بر اساس تصاویر لندست ۸ انجام شد. فرآیند طبقه‌بندی کاربری اراضی در محیط Google Earth Engine و با استفاده از الگوریتم Classification Tree Analysis (CTA) صورت گرفت (Aghababaei *et al.*, 2022). برای آموزش و ارزیابی مدل، از داده‌های زمینی برداشت‌شده استفاده شد که در مجموع ۴۰۲ نقطه نمونه برداشت گردید. از این تعداد، ۷۰ درصد (۲۸۱ نقطه) برای آموزش مدل و ۳۰ درصد (۱۲۱ نقطه) برای صحت‌سنجی اختصاص یافت.

در این طبقه‌بندی، پنج کلاس اصلی شامل آب، جنگل، مرتع، کشاورزی و مناطق شهری و صنعتی شناسایی شدند. نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده با استفاده از نقاط مرجع برداشت‌شده از تصاویر Google Earth و داده‌های میدانی در نرم‌افزار ENVI صحت‌سنجی شدند تا شاخص‌های User Accuracy، Producer Accuracy و Kappa coefficient محاسبه گردد. با توجه به تمرکز تحقیق بر تغییرات و خشکیدگی مراتع، تنها در صورتی که دقت طبقه‌ی مرتع بالاتر از ۸۵ درصد باشد، نتایج این طبقه برای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. سایر کاربری‌ها (آب، جنگل، کشاورزی و مناطق شهری/صنعتی) از تحلیل‌های بعدی کنار گذاشته شدند. با توجه به تمرکز پژوهش بر خشکی درون مرتعی و پایدار بودن سایر کاربری‌ها، تحلیل تغییرات صرفاً بر روی کلاس مرتع انجام شد.

۲-۳. استخراج شاخص‌های گیاهی

برای ارزیابی پوشش گیاهی و وضعیت سلامت گیاهان، در این تحقیق از چند شاخص گیاهی استفاده شد. شاخص‌های NDVI و SR برای سنجش فعالیت و تراکم پوشش گیاهی به‌کار رفتند (Jordan, 1969; Tucker, 1979). به‌منظور استخراج اطلاعات تکمیلی از ویژگی‌های سطح زمین، تبدیل Tasseled Cap Transformation (TCT) بر تصاویر لندست اعمال شد و سه مؤلفه‌ی روشنایی (Brightness)، سبزی‌نگی (Greenness) و رطوبت (Wetness) بدست آمد. در ادامه، با توجه به هدف مطالعه که تمرکز بر وضعیت پوشش مرتعی و تغییرات مرتبط با خشکیدگی گیاهان است، تنها مؤلفه‌ی سبزی‌نگی (TCT-Greenness) برای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت (Baig *et al.*, 2014; Crist and Cicone, 1984). علاوه بر این، شاخص VHI (Vegetation Health Index) بر اساس ترکیب شاخص‌های NDVI و دمای سطح زمین (LST) محاسبه شد تا به‌عنوان شاخصی کمی برای بررسی وضعیت سلامت پوشش گیاهی در طول دوره‌ی

مطالعه به کار رفت (Kogan, 1995).

انتخاب شاخص‌های گیاهی در این پژوهش بر اساس توانایی آن‌ها در نمایش جنبه‌های متفاوت پاسخ پوشش گیاهی به تنش‌های محیطی و فرآیند خشکیدگی صورت گرفت. شاخص NDVI به عنوان پرکاربردترین شاخص سبزیگی، نمایانگر وضعیت کلی فعالیت فتوسنتزی و مقدار کلروفیل پوشش گیاهی است و امکان مقایسه نتایج این مطالعه با بخش قابل توجهی از تحقیقات پیشین را فراهم می‌سازد. شاخص SR به دلیل ماهیت نسبتی خود، حساسیت بالاتری نسبت به تغییرات ساختاری پوشش گیاهی داشته و در مراتع با پوشش تنک و خاک‌نمایان، کارایی بیشتری در آشکارسازی تغییرات پوشش گیاهی از خود نشان می‌دهد. تبدیل Tasseled Cap و به‌ویژه مؤلفه سبزیگی آن (TCT-Greenness)، امکان تفکیک تغییرات تدریجی بنیه و سرزندگی پوشش گیاهی را با کاهش اثر پس‌زمینه خاک فراهم می‌کند. همچنین شاخص VHI با ترکیب اطلاعات طیفی پوشش گیاهی و دمای سطح زمین، به عنوان شاخصی تلفیقی، قادر به نمایش همزمان تنش‌های ناشی از کاهش پوشش گیاهی و تنش‌های حرارتی بوده و برای پایش وضعیت سلامت پوشش گیاهی در شرایط خشک و نیمه‌خشک مناسب است. استفاده همزمان از این شاخص‌ها امکان مقایسه عملکرد آن‌ها و شناسایی مناسب‌ترین شاخص برای آشکارسازی خشکیدگی پوشش مرتعی در منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌کند (Kogan, 1995; Crist & Ciccone, 1984; Jordan, 1969; Tucker, 1979).

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$SR = NIR / RED \quad \text{رابطه ۲}$$

$$TCT-Brightness = 0.3029 \times B2 + 0.2786 \times B3 + 0.4733 \times B4 + 0.5599 \times B5 + 0.0508 \times B6 + 0.1872 \times B7 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$TCT-Greenness = -0.2941 \times B2 - 0.0243 \times B3 - 0.5424 \times B4 + 0.7276 \times B5 + 0.0713 \times B6 - 0.1608 \times B7 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$TCT-Wetness = 0.1511 \times B2 + 0.1973 \times B3 + 0.3283 \times B4 + 0.3407 \times B5 - 0.7117 \times B6 - 0.4559 \times B7$$

$$VHI = 0.5 \times (NDVI_p - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) + 0.5 \times (T_p - T_{min}) / (T_{max} - T_{min}) \quad \text{رابطه ۵}$$

۲-۴. تفاضل تصویر بین شاخص‌های گیاهی

پس از استخراج شاخص‌های گیاهی در سال‌های مورد مطالعه، مقادیر هر شاخص به منظور هم‌مقیاس‌سازی و تسهیل در مقایسه بین دوره‌های زمانی مختلف، به روش Min-Max normalization نرمال‌سازی شدند (Jain *et al.*, 2005):

$$NormalizedValue = (Value - Min) / (Max - Min) \quad \text{رابطه ۶}$$

این روش مقادیر هر شاخص را به بازه‌ای بین صفر و یک تبدیل کرده و پایه‌ی آماری لازم برای تحلیل دقیق تغییرات و همچنین مقایسه‌ی نتایج شاخص‌های مختلف فراهم می‌سازد. برای پایش تغییرات ناشی از خشکیدگی در مراتع، از تکنیک تفریق تصویر دو زمانه استفاده شد. در این تحقیق، تصاویر شاخص‌های گیاهی شامل NDVI، SR، Tasseled Cap Transformation و VHI محاسبه شده برای سال ۲۰۲۳ از تصاویر مربوط به سال ۲۰۱۳ تفریق شدند. برای شناسایی تغییرات پوشش گیاهی (کاهش، افزایش یا بدون تغییر) و بررسی روند خشکیدگی مراتع، از روش تفاضل تصاویر استفاده شد (Lu *et al.*, 2004). نتایج این روش، تغییرات نسبی پوشش گیاهی در هر پیکسل را نسبت به خودش و کل منطقه نشان می‌دهد و مقادیر مطلق شاخص‌ها را منعکس نمی‌کند.

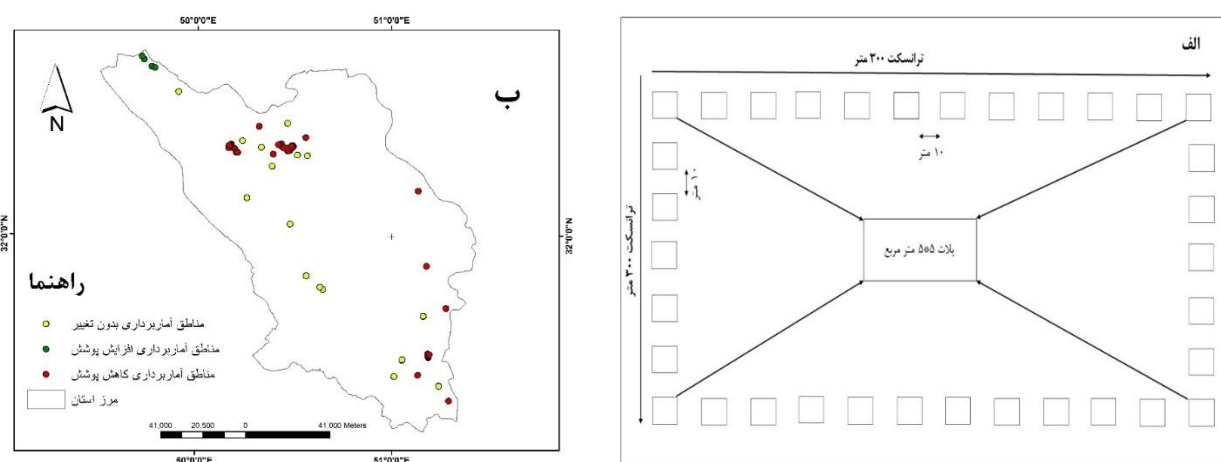
۲-۵. آستانه‌گذاری و احراز مناطق خشکیده

پس از محاسبه‌ی تفاضل شاخص‌های گیاهی بین دوره‌های زمانی منتخب، نقشه‌های حاصل به منظور تحلیل تغییرات پوشش گیاهی به سه طبقه‌ی اصلی شامل کاهش پوشش گیاهی (خشکیدگی)، بدون تغییر و افزایش پوشش گیاهی، طبقه‌بندی شدند. به منظور تعیین

آستانه‌های مربوط به این طبقات، از روش آماری میانگین $\pm$ انحراف معیار استفاده شد. در این روش، برای هر شاخص، ابتدا میانگین و انحراف معیار مقادیر تفاضلی آن در نواحی که قبلاً به عنوان مرتع تشخیص داده شده بود و تفکیک شده بودند، محاسبه شد. در این روش، محدوده‌ی تغییرات ناچیز (بدون تغییر) به صورت بازه‌ای حول مقدار میانگین تعیین شد و مقادیر پایین‌تر و بالاتر از این بازه به ترتیب به عنوان کاهش پوشش گیاهی (خشکیدگی) و افزایش پوشش گیاهی طبقه‌بندی شدند. استفاده از معیار آماری یکنواخت برای تمامی شاخص‌ها باعث شد فرآیند طبقه‌بندی غیرسلیقه‌ای، تکرارپذیر و مبتنی بر داده‌های واقعی باشد. این رویکرد مبنایی علمی برای تحلیل تغییرات خشکیدگی پوشش مرتعی فراهم می‌کند (Singh, 1989; Madasa et al., 2021).

۲-۶. آماربرداری میدانی و صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی دقت نقشه‌های حاصل از تفاضل شاخص‌های گیاهی و پهنه‌بندی خشکیدگی مراتع، آماربرداری میدانی در ۵۰ لکه‌ی شناسایی شده از نقشه‌ی نهایی انجام شد. هر لکه به عنوان یک ماکروپلات مستقل در نظر گرفته شد و شامل سه ترانسکت ۳۰۰ متری بود؛ دو ترانسکت در راستای شیب غالب و یک ترانسکت عمود بر شیب مستقر شدند. در طول هر ترانسکت، ۳۰ پلات ۵×۵ متر با فاصله‌ی ۱۰ متری به صورت تصادفی - سیستماتیک جانمایی شد، به طوری که در مجموع ۱۲۰ پلات در هر ماکروپلات مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲-الف). ابعاد پلات‌ها با توجه به اصول نمونه‌برداری اکولوژیک و برای پوشش کامل دو برابر قطر تاج گونه‌ی غالب تعیین شد (Bonham, 2013). درصد تاج پوشش و تراکم گونه‌های بوته‌ای و درختچه‌ای به تفکیک وضعیت سالم، نیمه سالم و خشک شده ثبت شد. مناطقی با بیش از ۵۰ درصد پوشش خشک یا زرد، به عنوان «خشکیده» طبقه‌بندی شدند. داده‌های سال ۲۰۱۳ نیز از گزارش پهنه‌بندی زوال گونه‌های مرتعی استان استخراج شد تا مقایسه‌ی میان دوره‌ها ممکن گردد. نقاط میدانی مربوط به مناطق خشکیده و غیرخشکیده مشخص شدند و به نقشه‌ی رستری حضور/عدم حضور (۱ = خشکیده، ۰ = غیرخشکیده) تبدیل گردیدند. صحت طبقه‌بندی با استفاده از Cross Tabulation و محاسبه‌ی ضریب کاپا و دقت کلی در ENVI 5.6 ارزیابی شد. بدین منظور، پس از تعیین مناطقی که به عنوان مناطق خشکیده تشخیص داده شد بود، با تقاطع دادن نقاط خشکیده‌ی مشاهده‌ای برداشت شده در عرصه، انجام گرفت. نقشه‌ی پراکنش نقاط نمونه‌برداری زمینی در مناطق خشکیده و غیرخشکیده در شکل ۲ (ب) ارائه شده است. تمامی مراحل طبقه‌بندی کاربری اراضی، استخراج شاخص‌های گیاهی، تفاضل تصاویر و آستانه‌گذاری بر اساس داده‌های میدانی و تصاویر لندست انجام شد و از هیچ محصول آماده‌ای استفاده نشده است. این رویکرد یکپارچه، علمی و تکرارپذیر امکان پایش تغییرات پوشش گیاهی و شناسایی مناطق دچار خشکیدگی پوشش مرتعی را فراهم می‌کند.

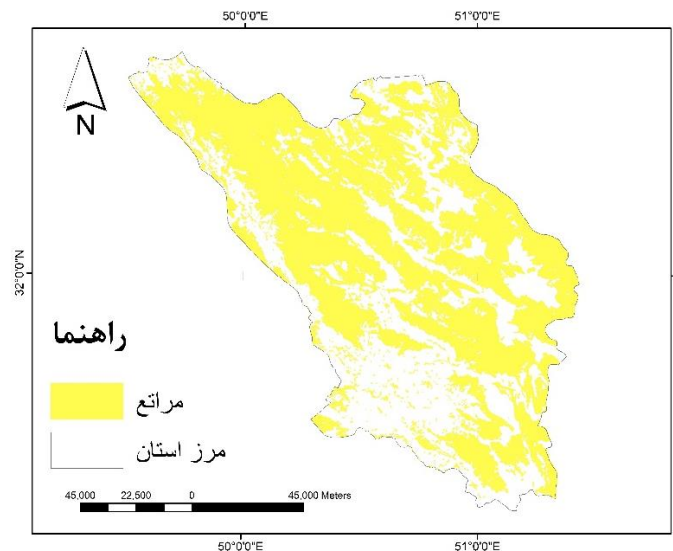


شکل ۲- (الف) شماتیک نحوه آماربرداری میدانی شامل ترانسکت‌ها و پلات‌ها در هر ماکروپلات؛ (ب) نقشه پراکنش ۵۰ ماکروپلات نمونه‌برداری شده در منطقه مورد مطالعه، شامل مناطق خشکیده (نقاط قرمز) و غیرخشکیده (نقاط سبز و زرد).

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. نتایج طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم CTA

با توجه به هدف اصلی تحقیق یعنی تمرکز بر مراتع، کاربری اراضی در سال ۲۰۲۳ به کمک الگوریتم CTA تفکیک شد. نقشه‌ی نهایی کاربری مرتع در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که دقت کلی طبقه‌بندی معادل ۸۳/۳۳ درصد با ضریب کاپای ۰/۸۰ بوده است. دقت طبقه‌ی مرتع برابر ۹۲/۱ درصد برآورد شد که نشان‌دهنده‌ی دقت قابل قبول الگوریتم در شناسایی این طبقه است. با توجه به اینکه دقت طبقه‌ی مرتع بیش از ۸۵ درصد می‌باشد، این طبقه برای انجام تحلیل‌های بعدی انتخاب شد (جدول ۱).



شکل ۳- کاربری مرتع استان چهارمحال و بختیاری

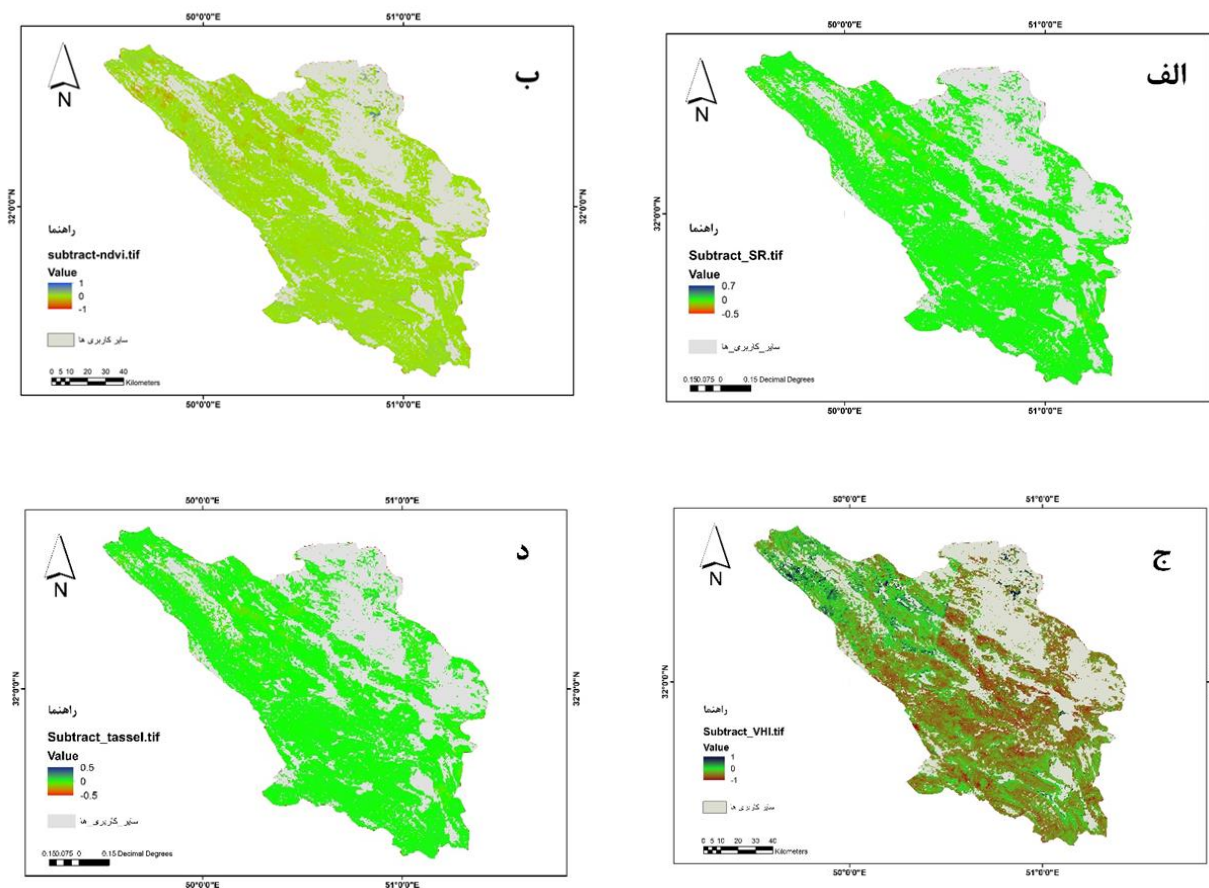
جدول ۱- صحت‌سنجی طبقات مختلف کاربری اراضی در سال ۲۰۲۳

طبقه	دقت تولیدکننده (درصد)	دقت کاربر (درصد)	خطای کمسیون (درصد)	خطای حذف (درصد)	تعداد پیکسل (واقعیت زمینی)	پیکسل‌های پیش‌بینی شده (مدل)
جنگل	۸۷/۸	۸۷/۸	۴/۹	۲/۴	۸۲	۷۲
مرتع	۹۲/۱	۹۲/۱	۹/۵	۳/۲	۱۹۰	۱۷۵
شهر	۷۳/۵	۱۰۰	۰	۲۸/۶	۳۴	۲۵
کشاورزی	۸۲/۶	۸۲/۶	۲/۱	۱۷/۴	۴۶	۳۸
آب	۸۰	۹۵/۷	۰	۱۸	۵۰	۴۰
مجموع	۸۳/۳۳	-	-	-	۴۰۲	۳۵۰
ضریب کاپا	۰/۸۰					

۳-۲. تفاضل تصاویر شاخص‌های گیاهی

ابتدا نتایج تفاضل تصاویر شاخص‌های گیاهی شامل NDVI، SR، Tasseled Cap Transformation و VHI بین سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ استخراج شد. نقشه‌های حاصل (شکل ۴) بیانگر تغییرات نسبی در وضعیت پوشش گیاهی هستند، به‌طوری‌که مقادیر مثبت بیانگر افزایش پوشش گیاهی، مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی کاهش پوشش و مقادیر نزدیک به صفر معرف تغییرات ناچیز یا بدون تغییر می‌باشند. این

نقشه‌ها پایه‌ی اولیه برای شناسایی تغییرات و پهنه‌بندی مناطق خشکیده را فراهم کردند.



شکل ۴- الف) شاخص تفاضل گیاهی (SR) (۲۰۱۳-۲۰۲۳). ب) شاخص تفاضل گیاهی (NDVI) (۲۰۱۳-۲۰۲۳). ج) شاخص تفاضل گیاهی (VHI) (۲۰۱۳-۲۰۲۳). د) شاخص تفاضل گیاهی (TCT) (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

پهنه‌بندی خشکیدگی بر اساس شاخص‌های پوشش گیاهی نتایج حاصل از تفاضل تصاویر شاخص‌های گیاهی بین سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳، الگوهای مکانی متفاوتی از تغییرات پوشش مرتعی را در استان چهارمحال و بختیاری آشکار ساخت. تحلیل بصری نقشه‌ها (شکل‌های ۵-الف تا ۵-د) نشان داد که علی‌رغم تفاوت در حساسیت شاخص‌ها، یک الگوی مشترک در شناسایی مناطق بحرانی وجود دارد. کانون اصلی کاهش پوشش گیاهی (خشکیدگی) به‌طور مشخص در نواحی شمال غربی و تا حدودی بخش‌های مرکزی استان متمرکز شده است. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر، چهار شاخص NDVI، SR، VHI و مؤلفه‌ی سبزی‌نگی شاخص TCT به‌صورت جداگانه تحلیل شدند که نتایج آن در ادامه تشریح می‌گردد.

۳-۲-۱. شاخص NDVI

نقشه‌ی تغییرات شاخص NDVI (شکل ۵-ب) بیانگر پایداری نسبی پوشش گیاهی در بیشتر مناطق مرتعی استان است. بخش عمده‌ای از سطح استان در طبقه‌ی بدون تغییر (رنگ سبز) قرار دارد و تنها لکه‌های پراکنده‌ای از کاهش سبزی‌نگی (رنگ قرمز) در نواحی شمال غربی و مرکزی مشاهده می‌شود. میزان دقت کلی این شاخص در تشخیص لکه‌های خشکیده ۴۰ درصد و ضریب کاپا ۰/۲۸ برآورد شد (جدول

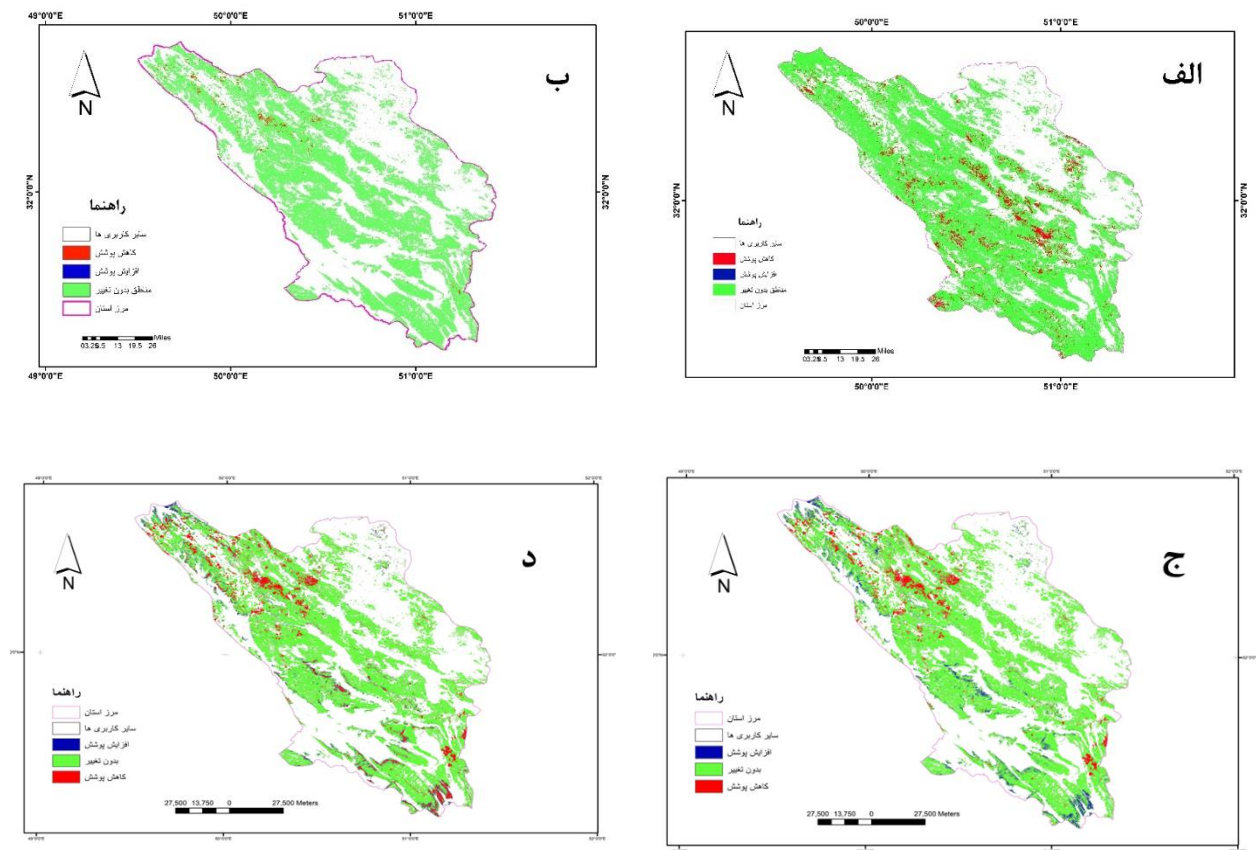
۳). به دلیل اشباع طیفی در نواحی با تراکم متوسط پوشش گیاهی، NDVI در این مطالعه توان محدودی برای تفکیک دقیق خشکیدگی داشته و صرفاً به عنوان شاخص پایه جهت مقایسه به کار رفت.

جدول ۲- مقایسه‌ی شاخص‌های توافقی حاصل از تقاطع متناظر بین نقاط خشکیده‌ی زمینی و نقشه‌ی تفاضلی هر یک از شاخص‌ها

شاخص	دقت کلی (درصد)	دقت تولیدکننده (درصد)	دقت کاربر (درصد)	ضریب کاپا
SR	۷۵	۸۰	۱۰۰	۰/۷۵
VHI	۶۰	۵۰	۸۳/۳	۰/۴۰
NDVI	۴۰	۳۳/۳	۷۶/۹	۰/۲۸
TCT	۵۲	۴۸	۶۰	۰/۳۲

۳-۲-۲. شاخص SR

نقشه‌ی حاصل از شاخص SR (شکل ۵-ج) گسترده‌ترین سطح تغییرات پوشش مرتعی را نشان می‌دهد. کاهش پوشش گیاهی (رنگ قرمز) به صورت لکه‌های بزرگ و پیوسته در شمال غرب و مناطق مرکزی استان مشاهده می‌شود. این شاخص با دقت کلی ۷۵ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۵، بهترین عملکرد را در میان شاخص‌های مورد بررسی داشت. حساسیت طیفی بالاتر این شاخص به تغییرات ساختاری پوشش، آن را به ابزاری قدرتمند برای پهنه‌بندی خشکیدگی در این منطقه تبدیل کرده است.



شکل ۵- پهنه‌بندی خشکیدگی. الف) شاخص VHI، ب) شاخص NDVI، ج) شاخص SR، د) شاخص TCT.

راهبنا: قرمز (کاهش پوشش گیاهی و استرس خشکی)، سبز (مناطق بدون تغییر)، آبی (افزایش پوشش) و سفید (سایر کاربری‌ها/خارج از محدوده مورد مطالعه)

۳-۲-۳. شاخص Tasseled Cap Transformation (TCT)

تحلیل مؤلفه‌ی سبزی‌نگی شاخص TCT-Greenness (شکل ۵-د) نشان داد که این شاخص کاهش سبزی‌نگی را در گستره‌ی وسیعی نمایش می‌دهد. لکه‌های قرمز عمدتاً در بخش‌های شمال‌غربی و مرکزی استان مشاهده می‌شوند. دقت کلی این شاخص ۵۲ درصد و ضریب کاپا ۰/۳۲ محاسبه شد (جدول ۲). اگرچه TCT توان شناسایی نواحی تغییر را دارد، اما به دلیل حساسیت به شرایط پس‌زمینه، نتایج آن باید با احتیاط و در کنار سایر شاخص‌ها، به‌ویژه SR، تفسیر گردد.

۳-۲-۴. شاخص VHI

شاخص VHI (شکل ۵-الف) که تلفیقی از اطلاعات پوشش گیاهی و دمای سطح زمین است، تصویر جامعی از استرس خشکی ارائه داد. لکه‌های قرمز با تراکم بالا عمدتاً در نواحی شمال‌غربی و مرکز و به‌صورت پراکنده در سایر مناطق مشاهده می‌شوند که بیانگر افت هم‌زمان سبزی‌نگی و افزایش تنش حرارتی است. دقت کلی شاخص VHI معادل ۶۰ درصد و ضریب کاپا ۰/۴ برآورد گردید (جدول ۲). ماهیت دوپارامتری این شاخص، الگوی واقعی‌تری از خشکیدگی را نسبت به شاخص‌های تک‌پارامتری مانند NDVI شناسایی کرد، هرچند عملکرد آن از SR ضعیف‌تر بود.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کارایی چهار شاخص سنجش از دور شامل SR، VHI، TCT-Greenness و NDVI در شناسایی پهنه‌های خشکیده مراتع استان چهارمحال و بختیاری و مقایسه عملکرد آن‌ها بود. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تمرکز اصلی آن‌ها بر پایش کلی خشکیدگی بوده است، این پژوهش با تمرکز بر شناسایی لکه‌های خشکیده و تغییرات مکانی پوشش گیاهی، تلاش کرد ابزاری دقیق‌تر برای مکان‌یابی مناطق آسیب‌دیده ارائه دهد. نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی نشان داد که الگوریتم درخت طبقه‌بندی (Classification Tree Analysis) قابلیت مناسبی در تفکیک مراتع در مناطق کوهستانی دارد؛ موضوعی که با نتایج مطالعات پیشین در زمینه طبقه‌بندی پوشش اراضی با داده‌های لندست همخوانی دارد (Lu et al., 2012). همچنین، تحلیل تفاضل تصاویر نشان داد که شاخص‌های مورد بررسی توانایی مناسبی در آشکارسازی تغییرات مکانی پوشش گیاهی طی دوره زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ دارند (Singh, 1989).

نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم درخت طبقه‌بندی (CTA) توانمندی قابل قبولی در تفکیک اراضی مرتعی از سایر کاربری‌ها در منطقه کوهستانی استان چهارمحال و بختیاری دارد. دقت کلی طبقه‌بندی برابر با ۸۳/۳۳ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۰ به‌دست آمد که بیانگر توافق بالا بین نتایج طبقه‌بندی و داده‌های مرجع است. دقت تولیدکننده و کاربر برای طبقه مرتع هر دو برابر با ۹۲/۱ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده توان بالای این الگوریتم در جداسازی دقیق مراتع است. این نتایج با یافته‌های مطالعاتی که از الگوریتم‌های درختی برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر لندست استفاده کرده‌اند، همخوانی دارد (Lu et al., 2012). بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم، به دلیل سادگی ساختار، تفسیرپذیری بالا و انعطاف‌پذیری در مواجهه با داده‌های ناهمگن، گزینه‌ای مناسب برای مناطق کوهستانی محسوب می‌شوند. بنابراین، نتایج این بخش، زیرساختی قابل اعتماد برای تحلیل‌های بعدی مربوط به پایش خشکیدگی مراتع فراهم می‌آورد (Aghababaei et al, 2022).

روش تفاضل تصاویر به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال مؤثرترین روش‌های آشکارسازی تغییرات در سنجش از دور، در این پژوهش برای شناسایی تغییرات پوشش گیاهی مراتع بین سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ مورد استفاده قرار گرفت. این روش با محاسبه اختلاف مقادیر شاخص‌های گیاهی در دو مقطع زمانی، امکان کمی‌سازی و مکان‌یابی مناطق دارای کاهش، افزایش یا عدم تغییر پوشش گیاهی را فراهم کرد. کارایی این روش در مطالعات متعدد پیشین برای پایش تغییرات پوشش گیاهی و کاربری اراضی تأیید شده است (Singh, 1989). در این پژوهش، اعمال آستانه‌گذاری آماری بر اساس میانگین و انحراف معیار بر روی نقشه‌های تفاضلی، امکان تفکیک

سه طبقه تغییر را به روشی عینی و قابل تکرار فراهم آورد. با وجود سادگی، این رویکرد توانست اطلاعات ارزشمندی درباره الگوهای مکانی و شدت خشکیدگی مراتع ارائه دهد که با نتایج مطالعات جدیدتر در حوزه آشکارسازی تغییرات سنجش از دور نیز هم‌راستا است (Jiang et al., 2020).

شاخص NDVI با وجود کاربرد گسترده در مطالعات پوشش گیاهی، در این پژوهش کمترین دقت را در شناسایی پهنه‌های خشکیده نشان داد (دقت کلی ۴۰ درصد و ضریب کاپا ۰/۲۸). این نتیجه با یافته‌های مطالعات مروری که به محدودیت‌های NDVI در مناطق با پوشش گیاهی تنک اشاره کرده‌اند، همخوانی دارد. حساسیت بالای NDVI به پس‌زمینه خاک و پدیده اشباع در تراکم‌های متوسط پوشش گیاهی از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های این شاخص محسوب می‌شود (Bannari et al., 1995). همچنین، در مناطق کوهستانی، تغییرات توپوگرافی و سایه‌اندازی می‌توانند موجب کاهش دقت این شاخص شوند. کاهش ناچیز میانگین NDVI مراتع در بازه زمانی مورد مطالعه، نشان‌دهنده ناتوانی این شاخص در ثبت تغییرات معنی‌دار خشکیدگی در این منطقه است (Rouse et al., 1974).

شاخص Tasseled Cap Transformation – Greenness با دقت کلی ۵۲ درصد و ضریب کاپا ۰/۳۲، عملکردی متوسط در آشکارسازی تغییرات پوشش گیاهی داشت. اگرچه این شاخص توانست الگوی کلی کاهش سبزی‌نگی را نمایش دهد، اما در تفکیک دقیق لکه‌های خشکیده عملکرد ضعیف‌تری نسبت به SR و VHI نشان داد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مؤلفه‌های تبدیل Tasseled Cap به‌شدت تحت تأثیر بازتاب پس‌زمینه خاک و مؤلفه روشنایی قرار دارند (Bannari et al., 1995). در مناطق مرتعی با پوشش گیاهی پراکنده و خاک روشن، این ویژگی می‌تواند منجر به تفسیر نادرست تغییرات خاک به‌عنوان تغییر پوشش گیاهی شود. این مسئله ضرورت استفاده از شاخص‌هایی با تعدیل اثر خاک را در چنین محیط‌هایی برجسته می‌سازد (Huete, 1988).

شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) با دقت کلی ۶۰ درصد و ضریب کاپا ۰/۴۰، عملکرد بهتری نسبت به NDVI و TCT-Greenness از خود نشان داد. این شاخص با ترکیب اطلاعات شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI) و شاخص شرایط دمایی (TCI)، ارزیابی جامع‌تری از وضعیت سلامت گیاهان ارائه می‌دهد (Kogan, 1995). مطالعات متعددی کارایی VHI را در پایش خشکیدگی و تنش‌های گیاهی تأیید کرده‌اند. با این حال، وابستگی ذاتی این شاخص به NDVI می‌تواند در مناطق با پوشش گیاهی تنک یا تغییرات سریع فنولوژیکی، موجب کاهش دقت آن شود (Jiang et al., 2020).

شاخص Simple Ratio (SR) با دقت کلی ۷۵ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۵، به‌عنوان مؤثرترین شاخص در شناسایی پهنه‌های خشکیده مراتع استان چهارمحال و بختیاری شناخته شد. این شاخص که نسبت بازتاب باند مادون قرمز نزدیک به باند قرمز است، حساسیت بالایی به تغییرات ساختار پوشش گیاهی و بیوماس دارد. کاهش بازتاب NIR و افزایش بازتاب Red در اثر خشکیدگی گیاهان، توسط SR با وضوح بیشتری ثبت می‌شود. همچنین، ماهیت نسبتی این شاخص موجب کاهش اثرات روشنایی و توپوگرافی می‌شود که این ویژگی در مناطق کوهستانی بسیار حائز اهمیت است (ArcGIS Documentation, 2024). سهولت تفسیر و آستانه‌گذاری، از دیگر مزایای SR در پایش خشکیدگی مراتع به‌شمار می‌رود.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از شاخص SR می‌تواند ابزار مؤثری برای پایش خشکیدگی مراتع و مدیریت پایدار منابع طبیعی باشد. این شاخص قابلیت کاربرد در سامانه‌های هشدار اولیه، اولویت‌بندی مناطق نیازمند مداخله حفاظتی، پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و برنامه‌ریزی بهینه چرای دام را داراست.

References

- Aghababaei, M., Ebrahimi, A., Naghipour, A. A., Asadi, E., Pérez-Suay, A., Morata, M., & Verrelst, J. (2022). Introducing ARTMO's machine-learning classification algorithms toolbox: Application to plant-type detection in a semi-steppe Iranian landscape. *Remote Sensing*, 14(18), 4452.
- Almalki, R., Khaki, M., Saco, P. M., & Rodriguez, J. F. (2022). Monitoring and mapping vegetation cover changes in arid and semi-arid areas using remote sensing technology: A review. *Remote Sensing*, 14(20), 5143.

- ArcGIS Documentation. (2024). Simple Ratio (SR) vegetation index. *Esri ArcGIS Documentation*. <https://pro.arcgis.com>
- Asgari, S., Rezaei, T., Jafari, M., & Hosseini, A. (2021). Assessing the relationship between forest dieback and drought using statistical models in Ilam Province. *Journal of Environmental Hazard Analysis*, 9(1), 1–20. (In Persian).
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1–2), 95–120.
- Bondaruk, V. F., Oñatibia, G. R., Fernández, R. J., Agüero, W., Blanco, L., Bruschetti, M., & Yahdjian, L. (2022). Forage provision is more affected by droughts in arid and semi-arid than in mesic rangelands. *Journal of Applied Ecology*, 59(9), 2404–2418.
- Bonham, C. D. (2013). *Measurements for terrestrial vegetation* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Crist, E. P., & Cicone, R. C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data—The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22(3), 256–263.
- Dangal, S. R. S., Tian, H., Pan, S., Zhang, L., & Xu, R. (2020). Greenhouse gas balance in global pasturelands and rangelands. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaa7>.
- Ebrahimzadeh, S., Bezarafshan, J., & Ghorbani, K. (2013). Feasibility assessment of vegetation cover change detection based on ground-based and satellite drought indices (Case study: Kermanshah Province). *Journal of Agricultural Meteorology*, 1, 37–48. (In Persian).
- Fayyaz, M., Zare, S., Nemati, H., Ashuri, P., & Shirmardi, H. A. (2011). Plan to identify the country's ecological regions: Plant types of Chaharmahal and Bakhtiari province. National Forest and Rangeland Research Institute, 200 pages (In Persian).
- Fouladi, Z., Ebrahimi, A., & Shirmardi, H. A. (2014). Zoning of rangeland vegetation dieback using Landsat ETM+ satellite data in northwestern rangelands of Chaharmahal and Bakhtiari Province. Master's thesis, University of Shahrekord, Iran. (In Persian).
- Hadianejad, M., Naghipour, A. A., Ebrahimi, A., et al. (2025). Modeling the effect of climate change on the distribution of plant communities in Zayandeh-Rud basin, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 479.
- Hajarian, A. (2023). Analysis of barriers and challenges of rangeland management (Case study: Rangelands of Kermanshah province). *Journal of Watershed Management Research*, 13(24), 125–134. (In Persian)
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- Jain, A. K., Nandakumar, K., & Ross, A. (2005). Score normalization in multimodal biometric systems. *Pattern Recognition*, 38(12), 2270–2285.
- Jiang, X., Li, G., Liu, Y., et al. (2020). Change detection in heterogeneous optical and SAR remote sensing images. *Remote Sensing*, 12(6), 1008. <https://doi.org/10.3390/rs12061008>
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663–666.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100.
- Liping, C., Yujun, S., & Saeed, S. (2018). Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques: A case study of Jiangle, China. *PLoS ONE*, 13, e0200493.
- Lu, D., Hetrick, S., & Moran, E. (2012). Land-cover classification in the Brazilian Amazon. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(6), 629–641.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2407.

- Madasa, A., Orimoloye, I. R., & Ololade, O. O. (2021). Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area. *Journal of African Earth Sciences*, 175, 104108.
- Mirzapour, S., Kheirkhah Zarkash, M. M., & Azizi, Z. (2023). Investigation and forecasting of the drought situation in the Zagros region based on remote sensing indicators and general circulation models (20-year period). *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 20(2), 317–335. (In Persian)
- MohanRajan, S. N., Loganathan, A., & Manoharan, P. (2020). Survey on land use/land cover change analysis in remote sensing and GIS environment: Techniques and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 29900–29926.
- Mozaffarian, V., (2017). Flora of Chaharmahal and Bakhtiari Province (Volume 1). Meamarkhaneh Nazar, 1224 pages (In Persian).
- Rippner, D. A., Maguire, R. O., Shang, C., & Knowlton, K. F. (2015). Phytate in runoff from surface applied animal manures. *Soil Science*, 180(2), 67–73.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1, 309–317.
- Shirmardi, H. M. (2013). *Rangeland and forest decline zonation report of Chaharmahal and Bakhtiari province*. Agricultural and Natural Resources Research Center. (Research Report). (In Persian)
- Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989–1003.
- Swain, H. M., Boughton, E. H., Bohlen, P. J., & Lollis, L. O. (2013). Tradeoffs among ecosystem services and disservices on a Florida ranch. *Rangelands*, 35(5), 75–87.
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Vicca, S., Balzarolo, M., Filella, I., Chrysoulakis, N., Fensholt, R., Galvagno, M., ... Nijs, I. (2016). Remotely-sensed detection of effects of extreme droughts on vegetation productivity using EVI and simple ratio (SR). *Scientific Reports*, 6, 28269.
- Waterhouse, H., Aburto, F., Rees, G., Griffin-LaHue, D. E., Salls, W. B., Rippner, D. A., ... & O'Geen, A. T. (2024). Diversified vegetation types on rangelands promote multiple soil-based ecosystem services. *Land Degradation & Development*, 35(3), 1011–1028.
- Yaghmaei, L., Jafari, R., Soltani, S., & Hadian, F. (2021). Monitoring vegetation decline in forest and rangeland areas of Chaharmahal and Bakhtiari province using satellite images. *Applied Ecology*, 10(2), 1–15. (In Persian)
- Yaghmaei, L., Soltani, S., Jafari, R., Boshri, H., & Jahanbazi Gouchani, H. (2017). Assessing the effects of drought on rangeland and forest vegetation changes in Chaharmahal and Bakhtiari Province using MODIS sensor data. *Iranian Scientific-Research Journal of Forest and Rangeland Protection and Support*, 15(1), 91–108. (In Persian).
- Yao, Y., Zhang, Y., & Zhang, X. (2019). Estimation of vegetation water stress based on satellite and meteorological data in arid region. *IEEE Access*, 7, 35327–35336.
- Zhang, M., & Shi, W. (2020). A feature difference convolutional neural network-based change detection method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(10), 7232–7246.
- Zhi, L., Yu, X., Liu, B., & Wei, X. (2019). A dense convolutional neural network for hyperspectral image classification. *Remote Sensing Letters*, 10(1), 59–66.
- Zhi, N., Niu, Z., Li, J., Zhou, X., Gong, P., & Li, A. (2019). Dynamic monitoring of land-use and land-cover change using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 235, 111420.