



University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: <https://ije.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6101

Investigating the Relationship between Changes in Leaf Area Index and Soil Moisture Using Remote Sensing and Field Studies: A Case Study of the Beheshtabad Watershed

Elham Davoodi¹ | Khodayar Abdollahi^{2*} | Hoda Ghasemieh³

1. PhD graduate in University of Kashan and Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorramabad, Iran

2. Associate professor, Department of Nature Engineering Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: kabdolla7@gmail.com

3. Associate professor, Department of Nature engineering, Faculty of Natural Resources and Earth sciences, University of Kashan

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received April 06, 2024

Revised May 11, 2024

Accepted June 12, 2024

Keywords:

Ecohydrological dynamics,

black-box model,

Seasonal soil moisture

variations,

LAI,

Beheshtabad watershed.

ABSTRACT

This study examines the relationship between Leaf Area Index and soil moisture in the Beheshtabad watershed through field sampling, MODIS imagery, and black-box modeling based on various factors. For this purpose, climate data such as rainfall, evaporation, transpiration, number of rainy days, and temperature were collected from 2003 to 2015 in this watershed. Additionally, to determine the physical characteristics of the area and prepare maps of soil moisture, data on soil texture, land use, topography, geology, Digital Elevation Model, and drainage network were gathered. During the field visits in 2016 and 2017, data on soil moisture, Leaf Area Index, and vegetation characteristics were collected for the land use in the area. The findings indicate that vegetation cover requires time to respond to changes in soil moisture, with a developmental delay of approximately four months observed in the study area (coefficient of determination = 0.69). Land use, slope, and soil texture separation factors have differing impacts on the relationship between Leaf Area Index and soil moisture, which is nonlinear. This study highlights the importance of understanding the reciprocal effects between environmental factors and vegetation cover for water and soil resource management.

Cite this article: Davoodi, E., Abdollahi, Kh. & Ghasemieh, H. (2024). Investigating the Relationship Between Changes in Leaf Area Index and Soil Moisture Using Remote Sensing and Field Studies: A Case Study of the Beheshtabad Watershed. *ECO HYDROLOGY*. 11 (2), 207-222. Doi: doi.org/10.22059/ije.2024.378735.1831



© Elham Davoodi, Khodayar Abdollahi, Hoda Ghasemieh

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: [http://doi.org/10.22059/ije.2024.378735.1831](https://doi.org/10.22059/ije.2024.378735.1831)



بررسی ارتباط متقابل تغییرات شاخص سطح برگ و رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور و مطالعات میدانی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز بهشت آباد)

الهام داوودی^۱ | خدایار عبدالهی^{۲*} | هدی قاسمیه^۳

۱. دانش آموخته دکتری دانشگاه کاشان؛ محقق بخش حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران.
۲. دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهر کرد، ایران. رایانامه: kabdolla7@gmail.com
۳. دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

کلیدواژه‌ها:

پویایی اکوهیدرولوژیکی،

مدل‌های جعبه‌سیاه،

تغییرات فصلی رطوبت خاک،

LAI،

حوزه آبخیز بهشت‌آباد.

در مطالعه حاضر، رابطه بین شاخص سطح برگ و رطوبت خاک در حوزه آبخیز بهشت‌آباد با استفاده از نمونه‌برداری صحرایی و به‌کارگیری تصاویر مودیس و مدل‌های جعبه‌سیاه بررسی شده است. برای این منظور، داده‌های اقلیمی مانند بارندگی، تبخیر و تعرق، تعداد روزهای بارندگی و دمای مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ جمع‌آوری شدند. همچنین برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی منطقه و تهیه نقشه‌های رطوبت خاک، بافت خاک، کاربری اراضی، نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع و شبکه زهکشی تهیه شدند. طی بازدیدهای میدانی، اطلاعات صحرایی شامل رطوبت خاک، شاخص سطح برگ و مشخصات پوشش گیاهی برای کاربری موجود در منطقه مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ برداشت شدند. نتایج نشان داد که پوشش گیاهی به زمان نیاز دارد تا به تغییرات رطوبت خاک واکنش نشان دهد و در این حوضه، این تأخیر حدود ۴ ماه زمان توسعه برگ (با ضریب تبیین ۰/۶۹) رخ می‌دهد. در واقع کاربری اراضی، شیب و بافت خاک، تأثیرات متفاوتی بر رابطه بین شاخص سطح برگ و رطوبت خاک دارند و این رابطه به‌صورت غیرخطی است. این بررسی نشان‌دهنده اهمیت درک تأثیرات متقابل بین عوامل محیطی و پوشش گیاهی برای مدیریت منابع آب و خاک است.

استناد: داوودی، الهام، عبدالهی، خدایار، قاسمیه، هدی. (۱۴۰۳). بررسی ارتباط متقابل تغییرات شاخص سطح برگ و رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور و مطالعات میدانی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز بهشت‌آباد). *اکوهیدرولوژی*، ۱۱(۲)، ۲۰۷-۲۲۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2024.378735.1831>

© الهام داوودی، خدایار عبدالهی، هدی قاسمیه. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2024.378735.1831>



۱. مقدمه

یکی از پارامترهای اساسی در بسیاری از مدل‌های اکوهیدرولوژیکی و اقلیمی، شاخص سطح برگ (LAI) است که بر تبادلات انرژی و ماده بین سطح زمین و جو اثر می‌گذارد. بنابراین درک بهتر تغییرات مکانی و زمانی LAI می‌تواند باعث بهبود تخمین بیلان آب سطحی شود [۱، ۲ و ۳]. این موضوع همراه با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی، موجب برآورد دقیق‌تری از نرخ جنگل‌زدایی و تأثیر گرمایش جهانی در وضعیت آب‌وهوایی منطقه‌ای و جهانی می‌شود [۴، ۵، ۶ و ۷]. LAI به‌واسطه کنترل تبخیر و تعرق، بر روی بیلان آب تأثیر می‌گذارد؛ پس تعیین مقدار صحیح آن در تعیین بیلان هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب حائز اهمیت است [۸، ۱]. LAI و رطوبت خاک و به‌طور کلی بیلان آب رابطه‌ای پویا برقرار است [۹]؛ زمانی که رطوبت خاک به حد اشباع است، میزان تبخیر از سطح خاک بالاترین حد بوده و زمانی که میزان رطوبت خاک در زیر حد ظرفیت زراعی باشد، مقدار تبخیر خاک کم است؛ به‌طوری‌که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد [۱۰]. اما فرایند توسعه گیاهی نیز دارای تغییرات فصلی بوده و تابع زمان است [۱۱]. با توجه به تأثیرگذاری این عوامل بر روی چرخه آب، امروزه استفاده از LAI به‌عنوان فاکتور کلیدی در بیلان آب و انرژی مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱۲]. برای مثال، یان^۲ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از LAI و مدل بیلان آب، به تخمین تبخیر و تعرق در آمریکای شمالی و مرکزی اقدام نمودند و از روش سنجش از دور و مدل آر‌تس^۳ استفاده کردند [۱۲]. نیتھانی^۴ و همکاران (۲۰۱۳) در پنسیلوانیا، تغییرات مکانی و زمانی LAI و رطوبت خاک را با توزیع مکانی گونه‌های درختی غالب بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که توزیع مکانی گونه‌های درختی، باعث ایجاد الگوی مکانی- زمانی خاص برای LAI می‌شود [۹]. در اروپای مرکزی، آرکس^۵ و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر تغییر رطوبت خاک و LAI را بر میکرواقلیم‌های جنگلی بررسی کردند و به‌منظور تعیین تغییرات LAI و رطوبت خاک آنالیز رگرسیون و روش‌های آماری را پیشنهاد نمودند [۱۳]. با هدف بررسی تغییرات زمانی LAI روی رطوبت خاک در حوضه رودخانه گلبورن^۶ در استرالیا، چن^۷ و همکاران (۲۰۱۵) به این نتیجه رسیدند که برای تعیین میزان رطوبت خاک، میانگین LAI نسبت به تغییرات روزانه LAI مناسب‌تر است [۱۴]. شاه‌مردادی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تصاویر مودیس، پوشش گیاهی و نمودار پراکندگی دما، شاخص رطوبت سطحی خاک را استخراج کردند و نشان دادند که این روش دقت قابل قبولی در برآورد مقدار رطوبت خاک دارد [۷]. لی و سوادا^۸ (۲۰۲۲) اقدام به بررسی برهم‌کنش رطوبت خاک و پوشش‌های گیاهی کردند و به این نتیجه رسیدند که بین رطوبت خاک و LAI با تأخیر زمانی، همبستگی مثبت وجود دارد [۱۵]. با توجه به موارد ذکر شده، در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف، تعیین ارتباط بین LAI و تغییرات زمانی- مکانی رطوبت خاک امری بسیار مهم است و دانستن اطلاعات دقیق از آن‌ها، باعث تعیین دقیق متغیرهای هیدرولوژیکی می‌شود. در این تحقیق، ارتباط بین LAI و رطوبت خاک در مقیاس زمانی با ۳ عامل تفکیک بافت خاک، کاربری اراضی و شیب مورد بررسی قرار گرفت.

۲. داده‌ها و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بهشت‌آباد واقع در استان چهارمحال و بختیاری در محدوده طول‌های جغرافیایی ۲۳° ۵۰' تا ۲۵° ۵۱' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۹° ۳۱' تا ۳۴° ۳۲' شمالی قرار دارد (شکل ۱-الف و ۱-ب). این حوضه با مساحت ۳۸۶۰ کیلومتر مربع در شمال شرقی حوزه آبخیز کارون شمالی قرار دارد. مطابق با طبقه‌بندی فائو، خاک‌های منطقه در ۶ کلاس بافت رسی، رسی‌لومی، لومی، لومی^{۱۱}

1. LAI: Leaf Area Index

2. Yan

3. ARTS

4. Naithani

5. Arx

6. Goulburn

7. ChEN

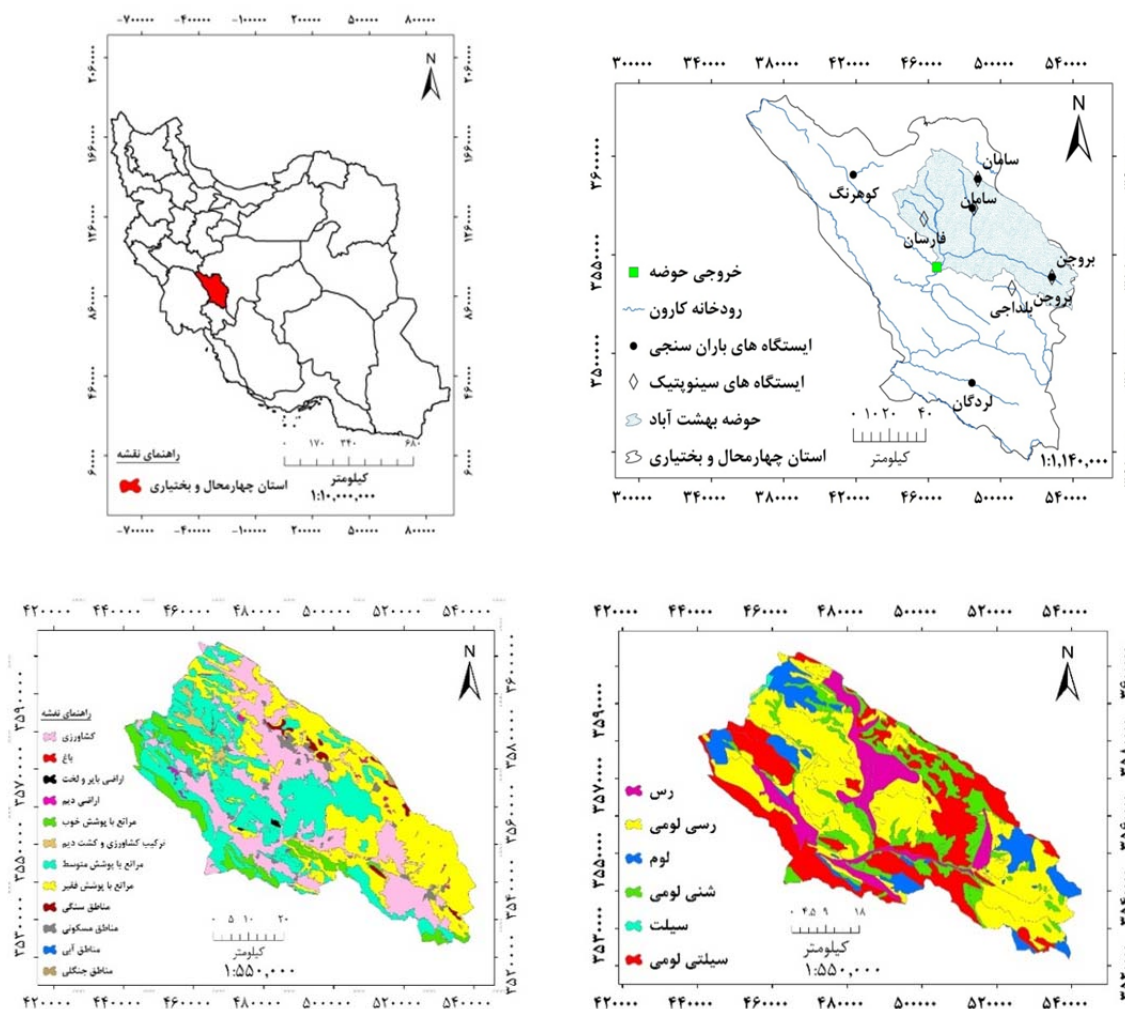
8. Li and Sawada

9. Clay

10. Clay-Loam

11. Loam

شنی لومی^۱، سیلت^۲ و سیلت لومی^۳ طبقه بندی شدند که در شکل ۱-ج ارائه شده است. بافت خاک در قسمت های عمده ای از حوضه، رسی لومی و در قسمت بسیار کوچکی، از جنس سیلت است. نقشه کاربری (شکل ۱-د) از تصویر لندست ۸ سنجنده OLI دارای دقت مکانی ۳۰ متر مربوط به تاریخ ۲۰ ژوئن ۲۰۱۵ و نرم افزار ENVI تهیه شد. مطابق با کاربری اراضی بیشترین مساحت در این حوضه به کاربری مراتع با پوشش متوسط، مراتع با پوشش فقیر و اراضی کشاورزی اختصاص دارد.



شکل ۱: الف) موقعیت حوزه آبخیز بهشت آباد در استان چهارمحال و بختیاری؛ ب) ایران؛ ج) بافت خاک؛ د) کاربری اراضی

۲.۲. روش تحقیق

در تحقیق حاضر، با هدف بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر رطوبت خاک داده های اقلیمی مانند بارندگی، تبخیر، تعداد روزهای بارندگی و دما مربوط به سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ جمع آوری شدند. برای تعیین ویژگی های فیزیکی منطقه و تهیه نقشه رطوبت خاک، نقشه های بافت خاک، کاربری اراضی، توپوگرافی، زمین شناسی، مدل رقومی ارتفاع^۴ و شبکه زهکشی استفاده شدند. طی بازدیدهای میدانی، اطلاعاتی شامل رطوبت خاک، LAI و مشخصات پوشش گیاهی برای کاربری موجود در منطقه طی سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ برداشت شدند. نمونه برداری ها با استفاده از روش سیستماتیک- تصادفی و در طول یک دوره رویشی ۹ ماهه، هم زمان با تصاویر ماهواره ای مودیس انجام شد؛ به این مفهوم که تاریخ نمونه برداری ها به گونه ای بود که سنجنده مودیس در روز نمونه برداری، تصویربرداری داشته

1. Sandy-Loam
2. Silt
3. Silty-Loam
4. DEM

باشد. تصاویر LAI مربوط به حوزه آبخیز بهشت‌آباد از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ (۶۹۰ تصویر) از سایت ارث اکسپلورر^۱ دریافت شدند. این تصاویر، دقت مکانی ۵۰۰ متری و به‌ازای هر ۸ روز یک بار وجود دارند [۱۶]. اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک نیز زمانی انجام شد که سطح زمین یخبندان نباشد. در اندازه‌گیری رطوبت خاک، از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری از دستگاه رطوبت‌سنج خاک ایمکو^۲ استفاده شد (شکل ۲). طی نمونه‌برداری، از گیاهان مورد نظر عکس‌برداری و با استفاده از نرم‌افزار دیجیمایزر^۳ و رابطه بین مساحت برگ و



شکل ۲: تصویر دستگاه

رطوبت‌سنج خاک



شکل ۳: نقشه واحد کاری تهیه‌شده مربوط به حوزه آبخیز بهشت‌آباد

تأخیر ۴ ماهه وجود دارد؛ البته این رابطه از نوع غیرخطی بوده و مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۶۹ است که با نتایج لیو^۴ و همکاران (۲۰۱۶) [۱۸] همخوانی دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که در این حوضه به‌ازای بیشترین مقدار رطوبت خاک، در فاصله زمانی ۴ ماه بعد LAI افزایش می‌یابد و رطوبت خاک با تأخیر زمانی ۴ ماهه روی LAI اثر می‌گذارد (شکل ۵) مقدار تأخیر زمانی بین رطوبت خاک و LAI در نتایج تحقیقات وانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۴) بین ۲ تا ۴ ماه [۱۹]، لی و همکاران (۲۰۲۲) به‌طور متوسط بین ۹ تا ۳۵ روز [۲۰]، نائ و همکاران (۲۰۲۱) ۳ ماه [۲۱] گزارش شده است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی تأثیر LAI بر میانگین رطوبت

خاک - مقیاس زمانی

برای بررسی ارتباط بین LAI و رطوبت خاک در مقیاس زمانی، از داده‌های LAI (حاصل از مودیس) در مقیاس ماهانه و داده‌های رطوبت خاک برحسب میلی‌متر بر ماه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ استفاده شد. ارتباط بین LAI و رطوبت خاک در مقیاس زمانی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل، بین LAI و رطوبت خاک رابطه هم‌زمانی معنی‌داری مشاهده نشد. از طرفی، چون عموماً پوشش گیاهی با یک تأخیر زمانی به رطوبت واکنش می‌دهد، رابطه بین رطوبت خاک و LAI با تأخیرهای زمانی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ماهه بررسی شد (جدول ۱). نتایج بررسی‌ها نشان داد که بالاترین همبستگی بین رطوبت خاک و LAI با

1. <https://earthexplorer.usgs.gov>

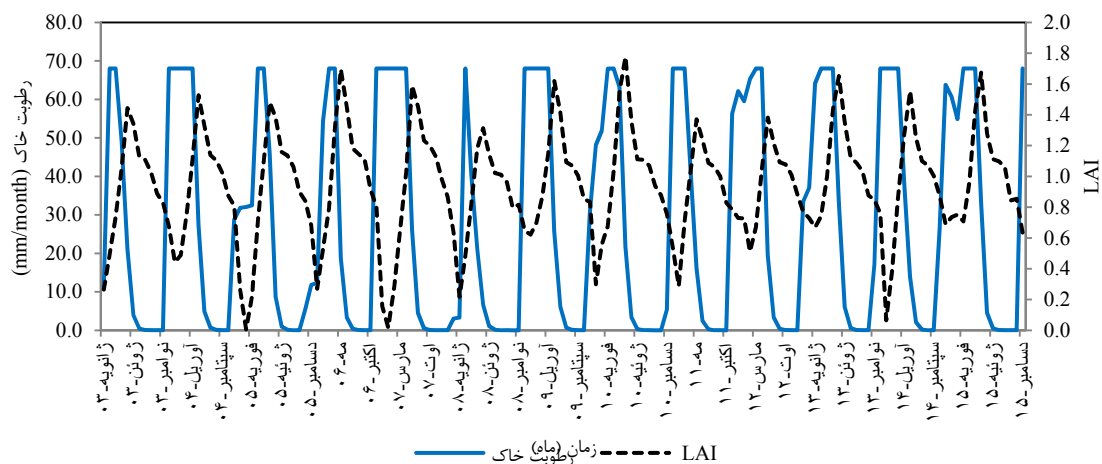
2. IMKO- HD₂ model

3. Digimizer

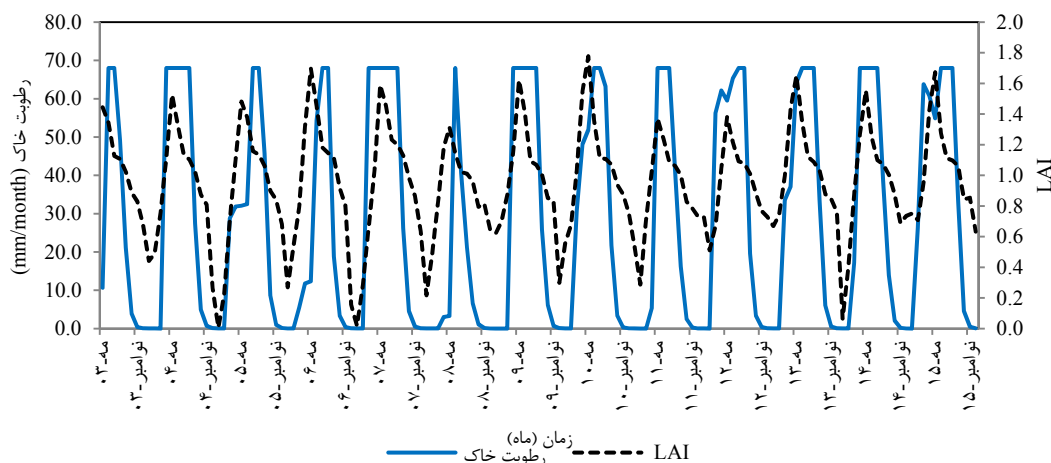
4. LIU

5. Wang

6. Na



شکل ۴: بررسی تغییرات LAI و رطوبت خاک در مقیاس زمانی (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵) در حوزه آبخیز بهشت آباد



شکل ۵: بررسی تغییرات زمانی بین LAI و رطوبت خاک با تأخیر زمانی ۴ ماه در حوزه آبخیز بهشت آباد

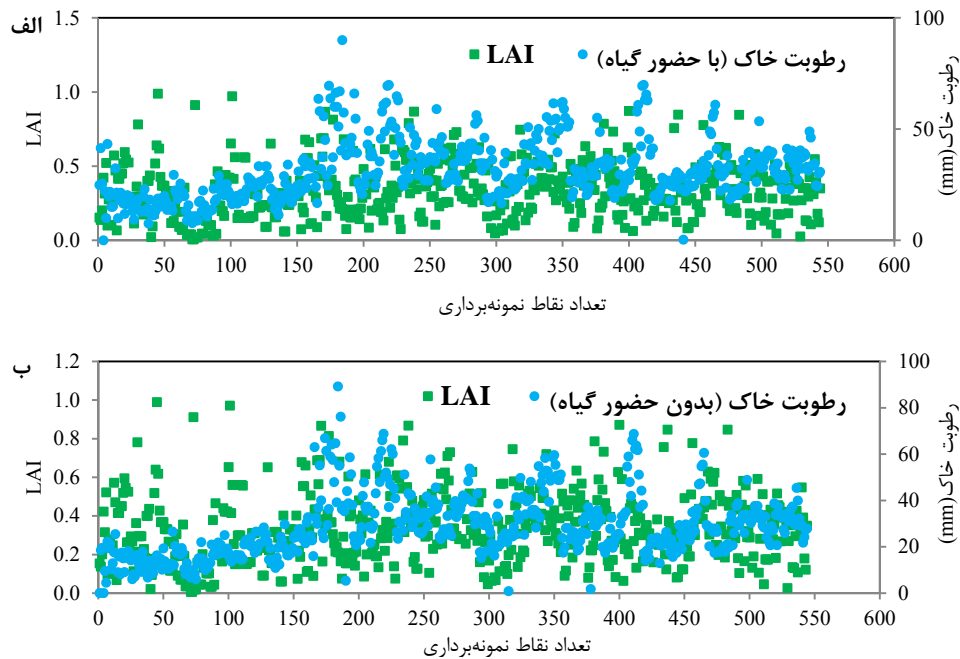
جدول ۱: رابطه بین LAI و رطوبت خاک در مقیاس زمانی با تأخیرهای زمانی مختلف

مقدار R ²	تأخیر زمانی
۰/۳۸	بدون تأخیر
۰/۲۳	۱ ماهه
۰/۳۷	۲ ماهه
۰/۵۱	۳ ماهه
۰/۶۹	۴ ماهه
۰/۶۱	۵ ماهه

۲.۳. بررسی تأثیر LAI بر میانگین رطوبت خاک - مقیاس مکانی

۳.۲.۱. رابطه بین LAI و رطوبت خاک حاصل از نمونه برداری

شکل ۶ رابطه بین LAI و رطوبت خاک حاصل از نمونه برداری در حضور گیاه (الف) و بدون حضور گیاه (ب) را نشان می دهد. مطابق با شکل، می توان گفت که LAI و رطوبت خاک از یکدیگر پیروی کرده، روند مشابهی را نشان می دهند. البته در حالت نقطه ای، تغییرات LAI و رطوبت خاک واریانس بالایی دارند؛ لذا با هدف بررسی جزئی تر این ارتباط، در مقیاس مکانی نیز بررسی ها انجام شد.



شکل ۶: ارتباط LAI و رطوبت خاک (حاصل از نمونه برداری): الف) با حضور گیاه؛ ب) بدون حضور گیاه

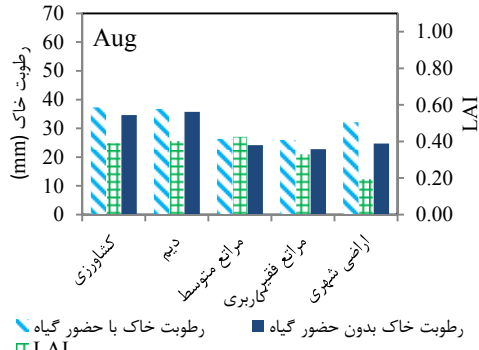
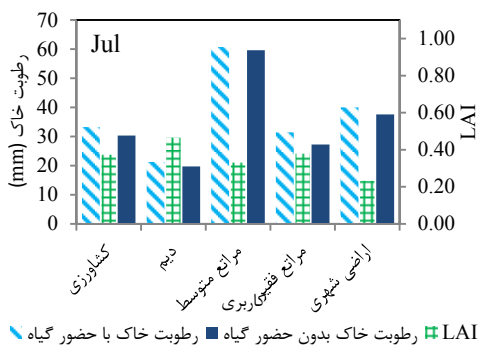
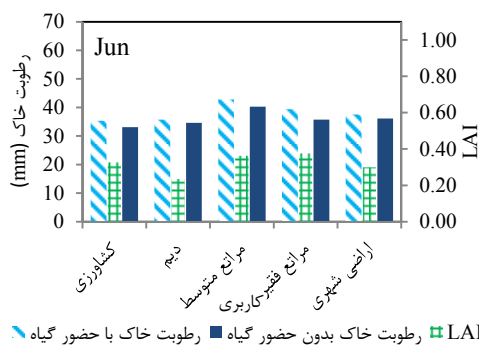
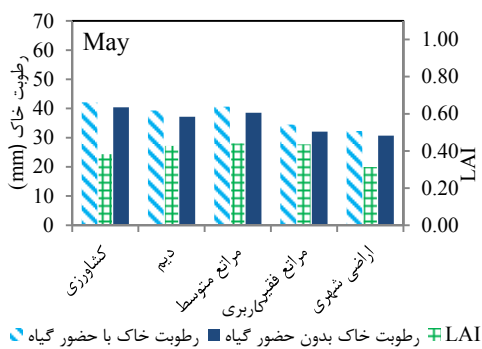
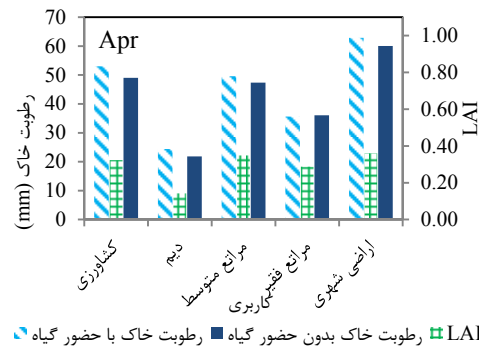
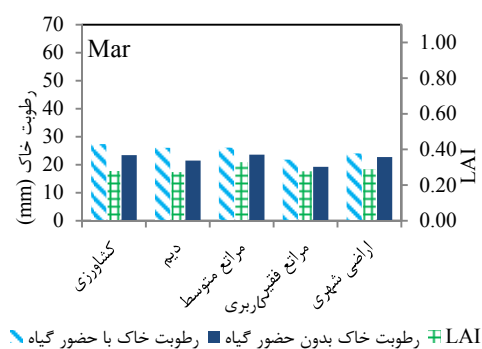
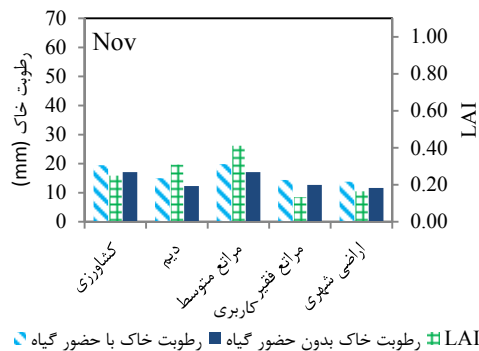
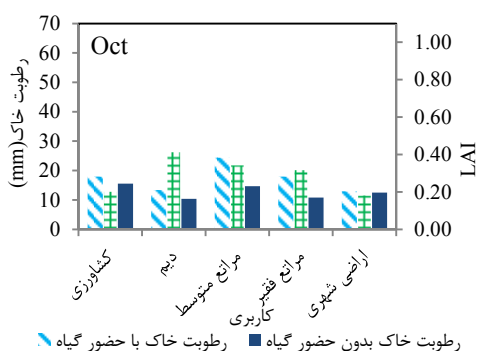
۳.۲.۲. رابطه بین LAI و رطوبت خاک حاصل از نمونه برداری از نظر تحلیل مکانی

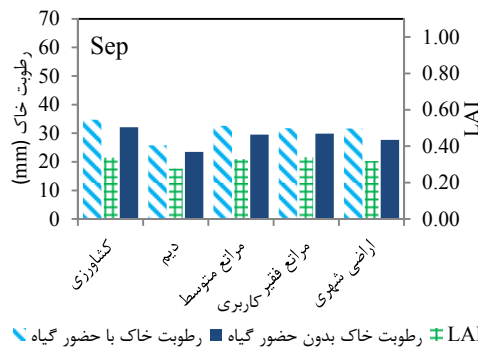
در سه عامل تفکیک کاربری اراضی، بافت خاک و شیب، رابطه بین LAI و رطوبت خاک (حاصل از نمونه برداری) بررسی شد؛ به این صورت که در هر یک از مقیاس‌های مکانی ذکر شده، روابط کمی بین LAI و رطوبت خاک در طبقه‌بندی‌های مجزا بررسی شدند.

الف) براساس عامل تفکیک کاربری اراضی

در این بخش، تأثیر LAI بر میانگین رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف کاربری اراضی بررسی شد. میانگین LAI و رطوبت خاک در هر یک از کاربری‌های اراضی، باتوجه به موقعیت نقاط نمونه برداری، تعیین و ارتباط بین این دو متغیر ارزیابی شد. در شکل ۷، مقادیر LAI و رطوبت خاک برای هر کاربری در طول دوره‌های نمونه برداری نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در اراضی کشاورزی و مراتع با پوشش متوسط، بیشترین مقدار رطوبت خاک را داریم که ممکن است به دلیل آبیاری منظم و بارندگی‌های فصلی باشد. در مقابل، در مراتع فقیر و اراضی دیم، کمترین مقدار رطوبت خاک به دلیل نبود پوشش گیاهی کافی و عدم آبیاری مشاهده شد. در مناطق شهری، به دلیل وجود سطوح نفوذناپذیر، امکان نفوذ آب به خاک کاهش یافته و در نتیجه، رطوبت خاک پایین‌تر است که بیانگر اهمیت پوشش گیاهی در حفظ رطوبت خاک و تأثیر آن بر کارایی اکوسیستم‌های طبیعی است. مقدار LAI در انواع کاربری‌ها متفاوت بوده است. برای مثال، در ماه‌های اکتبر، ژوئن و ژوئیه، بیشترین مقدار LAI در کاربری دیم مشاهده شده است. ماه‌های ژوئن و ژوئیه مصادف با پایان بهار و آغاز تابستان است که گیاهان دوره رشد خود را تکمیل می‌کنند. افزایش LAI در این ماه‌ها نشان‌دهنده فعالیت فتوسنتزی بالا و حضور پوشش گیاهی غنی است که به‌طور طبیعی در این فصل اتفاق می‌افتد. افزایش LAI در ماه اکتبر می‌تواند به دلیل وجود لاشبرگ‌ها باشد که باعث افزایش موقتی LAI می‌شود؛ در واقع لاشبرگ‌ها باعث افزایش بازتابندگی و در نتیجه افزایش مقادیر این شاخص شوند. در حالی که در ماه‌های مارس و مه، مراتع با پوشش متوسط و در ماه سپتامبر، کاربری‌های کشاورزی دارای بالاترین مقدار LAI بوده‌اند. در این ماه، بسیاری از محصولات کشاورزی به پایان دوره رشد خود می‌رسند؛ این موضوع می‌تواند تأثیر مستقیمی بر LAI داشته باشد. این الگوها ممکن است نشان‌دهنده تأثیر فصلی بر روی رشد گیاهان و تغییرات LAI باشند. در مقابل، کمترین مقدار LAI در مناطق شهری و مراتع فقیر مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر منفی کمبود رطوبت خاک بر رشد گیاهان است. این تغییرات فصلی در LAI می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر رطوبت خاک و در نتیجه بر سلامت اکوسیستم‌ها داشته باشد. علاوه بر این، تحلیل رابطه بین LAI و رطوبت خاک بر پایه عامل تفکیک کاربری نشان داد که در هر ۹ ماه اندازه‌گیری این رابطه از نوع غیرخطی است. با استفاده از نرم‌افزار کرواکسپرت^۱، انواع مختلف

مدل‌های ریاضی برازش داده شدند و بهترین مدل برای هر ماه انتخاب و پارامترهای آن به همراه ضریب همبستگی در جدول ۲ ارائه شد. تحلیل‌ها نشان دادند که در همه ماه‌ها به جز ماه مارس، رابطه معنی‌داری بین LAI و رطوبت خاک وجود دارد؛ این امر بیانگر اهمیت تعامل بین پوشش گیاهی و خصوصیات خاک در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی کاربری اراضی است.





شکل ۷: مقادیر LAI و رطوبت خاک در کاربری اراضی‌های محدوده مورد مطالعه طی ماه‌های نمونه‌برداری

جدول ۲: روابط جعبه‌سیاه بین LAI و رطوبت خاک (mm) در عامل تفکیک کاربری اراضی

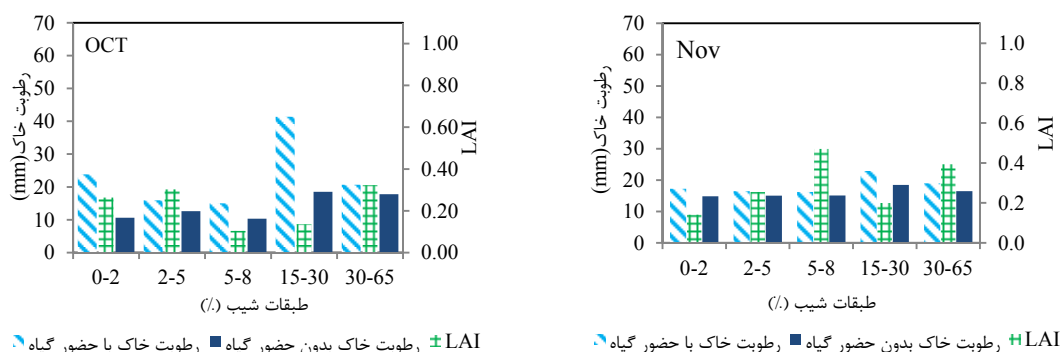
ضریب تیین	پارامترها				معادلهٔ مربوط	مدل پیشنهادی	ماه نمونه‌برداری	
	d	c	b	a				
۰/۹۹	۰/۲۶	۵۲/۲۹	۶/۸۰	۱۹/۷۴	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Oct-2016	با حضور گیاه
۰/۷۸	-۵/۴۹	۱۹۷	۸/۶۴	۱۰/۵۱	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Nov-2016	
۰/۰۵	-	-	۰/۰۵	-۰/۰۲	$y = \frac{1}{ax + b}$	معکوس ^۱	Mar-2017	
۰/۸۸	-	-	۰/۰۶	-۰/۱۲	$y = \frac{1}{ax + b}$	معکوس	Apr-2017	
۰/۷۲	-	-۱۶۶۷	۱۲۹۱	-۲۰۷	$y = a + bx + cx^2$	درجه ۲	May-2017	
۰/۹۶	۴/۰۵	۷۵/۷۵	۴/۰۲	۳۸/۵۷	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Jun-2017	
۰/۹۹	۴۱/۵۰	-۱۶/۲۲	۳۱۵	-۹۳/۹۱	$y = \frac{ax + b}{1 + cx + dx^2}$	منطقی	Jul-2017	
۰/۹۹	-۲۴۴۱۷	۲۳۴۰۱	-۷۱۴۱	۷۱۱	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	درجه ۳	Aug-2017	
۰/۹۰	-	-	-۲۴/۶۶	۰	$y = ax^{bx}$	هندسی	Sep-2017	
۰/۹۹	-۱/۹۴	۲۲۸	۲/۸۸	۱۲/۴۳	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Oct-2016	
۰/۷۲	-۵/۶۰	۱۹۷	۸/۴۵	۸/۱۸	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Nov-2016	بدون حضور گیاه
۰/۲۷	-	-	-۸/۸۸	۰/۹۲	$y = ax^{bx}$	هندسی	Mar-2017	
۰/۹۱	-	-	۰/۰۶	-۰/۱۳	$y = \frac{1}{ax + b}$	معکوس	Apr-2017	
۰/۷۰	-	-۱۷۲۱	۱۳۲۷	-۲۱۵	$y = a + bx + cx^2$	درجه ۲	May-2017	
۰/۹۸	۲/۰۶	۸۱/۷۵	۴/۰۴	۳۶/۱۱	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Jun-2017	
۰/۹۹	۵۲/۲۳	-۱۹/۸۱	۲۸۷	-۱۱۸	$y = \frac{ax + b}{1 + cx + dx^2}$	منطقی	Jul-2017	
۰/۹۸	-۲۵۴۱۰	۲۴۲۷۱	-۷۳۵۸	۷۲۰	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	درجه ۳	Aug-2017	
۰/۹۳	-	-	۰/۰۹	-۰/۱۷	$y = \frac{1}{ax + b}$	معکوس	Sep-2017	

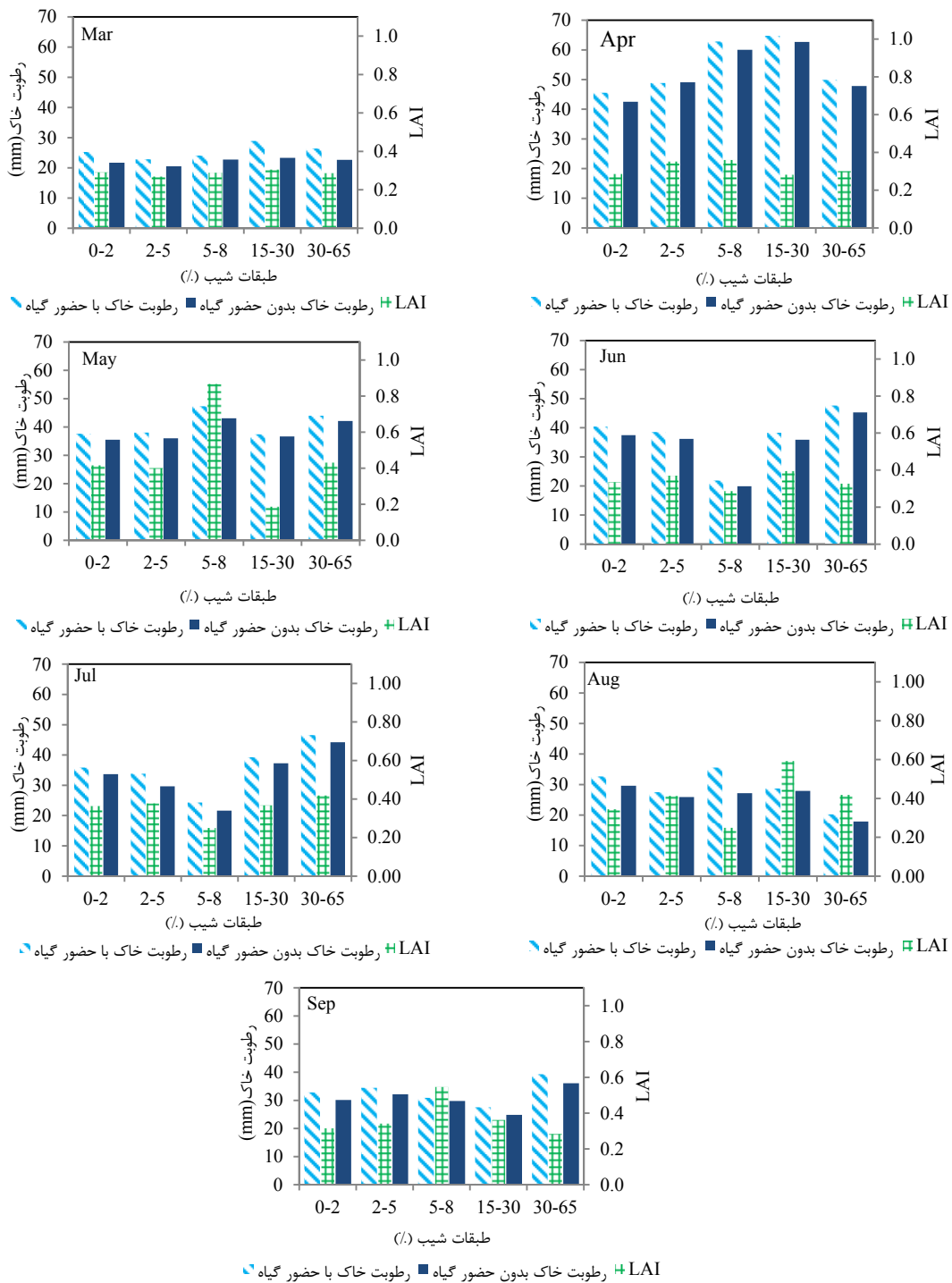
X: LAI و Y: رطوبت خاک

ب) براساس عامل تفکیک شیب

برای بررسی رابطه بین LAI و رطوبت خاک براساس عامل شیب با استفاده از طبقه‌بندی شیب ارائه‌شده توسط محمدی مطلق [۲۲] و با در نظر گرفتن نقاط نمونه‌برداری، برای هر طبقه شیب مقادیر LAI و رطوبت خاک تعیین شد. در شکل ۸، داده‌های مربوط به LAI و رطوبت خاک برای هر طبقه شیب در طول دوره نمونه‌برداری ارائه شده است. تحلیل این داده‌ها نشان داد که با تغییرات فصلی دمای هوا، رفتار متفاوتی از رطوبت خاک در شیب‌های مختلف مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار رطوبت خاک، در شیب‌های بین ۱۵ تا ۳۰ درصد در ماه‌های سرد و در شیب‌های بالاتر در ماه‌های گرم مشاهده می‌شود. حوزه آبخیز بهشت‌آباد (منطقه کوهستانی) به دلیل برف‌گیر بودن، در فصول سرد شاهد تجمع برف و تشکیل زهاب است که می‌تواند به‌طور چشمگیری رطوبت خاک را افزایش دهد؛ به‌ویژه در شیب‌های بالا که آب ذوب‌شده برف به‌آرامی به سمت پایین حرکت و به خاک نفوذ می‌کند. این افزایش رطوبت می‌تواند تأثیر مثبتی بر LAI داشته باشد، زیرا رطوبت بیشتر به رشد گیاهان کمک می‌کند و در نتیجه می‌تواند منجر به افزایش LAI شود. بنابراین تغییرات مشاهده‌شده در LAI در ماه اکتبر تا حد زیادی به این پدیده‌های طبیعی ارتباط دارد. این امر نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن تأثیرات فصلی و ویژگی‌های جغرافیایی خاص در تحلیل‌های اکولوژیکی است. این نتایج بیانگر تأثیر قابل توجه شیب بر جریان آب و توزیع رطوبت در خاک و تأثیر آن بر پویایی اکوسیستم‌هاست. کمترین مقدار رطوبت خاک در شیب‌های پایین‌تر از ۸ درصد وجود دارد که نشان‌دهنده تأثیر منفی کمبود رطوبت خاک بر رشد گیاهان بوده که به دلیل بارندگی‌های فصلی و توزیع نامتوازن رطوبت در منطقه است. بیشترین LAI در ماه‌های سرد بین شیب‌های ۱۵ تا ۶۵ درصد و در ماه‌های گرم بین شیب‌های ۵ تا ۳۰ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار LAI در ماه‌های سرد در شیب‌های پایین‌تر از ۸ درصد ثبت گردید. این امر نشان‌دهنده تأثیر شیب بر توزیع پوشش گیاهی و در نتیجه بر LAI و رطوبت خاک حوزه آبخیز مورد مطالعه هستند. به‌طور کلی می‌توان تأیید کرد که در شیب‌های پایین‌تر، رطوبت خاک بیشتری مشاهده می‌شود. در حوزه آبخیزی که شیب تندی دارد، زمان نفوذ، نکته درخور توجهی محسوب می‌شود. این امر به دلیل جمع‌آوری آب‌های سطحی و زیرزمینی در مناطق با شیب کمتر است که به نفوذ بیشتر و حفظ رطوبت در خاک کمک می‌کند. با این حال، مقادیر پایین LAI در ماه‌های سرد در شیب‌های کمتر از ۸ درصد می‌تواند ناشی از عواملی چون کاهش یا فقدان پوشش گیاهی، کم بودن تراکم گیاهی، یا نبود تکامل رشد گیاهی باشد. این وضعیت در اواخر بهار و اوایل تابستان تغییر می‌کند. زمانی که گیاهان دوره رشد خود را آغاز می‌کنند و به اوج تکامل می‌رسند، این امر منجر به افزایش LAI می‌شود. این تغییرات فصلی در پوشش گیاهی و LAI، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی و ویژگی‌های فیزیکی حوزه آبخیز بر سلامت اکوسیستم و توانایی آن در حفظ رطوبت و پشتیبانی از رشد گیاهان است؛ لذا درک این تعاملات برای مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی برای حفاظت از محیط‌زیست حائز اهمیت است.

علاوه بر این، برای درک بهتر رابطه بین LAI و رطوبت خاک در تفکیک شیب، از مدل‌های آماری مختلف استفاده شد. تحلیل رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار کرواکسپرت نشان داد که رابطه بین این دو متغیر در هر طبقه شیب غیرخطی است. براساس ضریب تبیین، بهترین مدل برای هر ماه انتخاب شد و پارامترهای مربوط به همراه ضریب همبستگی در جدول ۳ ارائه گردید. تحلیل‌ها نشان دادند که به‌جز در ماه آوریل بدون حضور گیاه، همبستگی قوی و معنی‌داری بین LAI و رطوبت خاک وجود دارد؛ این موضوع، اهمیت تعامل بین پوشش گیاهی و خصوصیات خاک را برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی حوزه‌های آبخیز تأیید می‌کند.





شکل ۸: مقادیر LAI و رطوبت خاک (mm) در هر یک از طبقات شیب در محدوده مورد مطالعه طی ماه‌های نمونه‌برداری

جدول ۳: روابط جعبه‌سیاه بین LAI و رطوبت خاک (mm) در عامل تفکیک شیب

ضریب تبیین	پارامترها				معادله	مدل پیشنهادی	ماه نمونه‌برداری	حضور گیاه
	d	c	b	a				
۰/۹۹	۲۵۹۶۵	-۱۸۱۲۷	۳۸۸۷	-۲۱۸	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	درجه ۳	Oct-2016	
۰/۹۵	۱/۷۲	۱۵۱	۳/۹۶	۱۹/۸۴	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Nov-2016	
۰/۸۶	-	-	۰/۱۱	-۰/۲۴	$y = \frac{1}{ax + bx + cx^2}$	معکوس	Mar-2017	
۰/۸۰	-	-۵/۴۹	۳/۵۰	-۰/۵۴	$y = \frac{1}{ax + bx + cx^2}$	معکوس	Apr-2017	

۰/۷۱	-	-	۰/۰۲	-۰/۰۰۸	$y = \frac{1}{ax + b}$	معکوس	May-2017
۰/۸۵	-	-۲۴/۷۸	-۱۱۸۲	-۶۶۰	$y = a + bx + \frac{c}{x^2}$	ظرفیت گرمایی ^۱	Jun-2017
۰/۹۹	۴/۴۳	-۴/۳۲	-۳۷/۳۱	۱۴/۰۶	$y = \frac{ax + b}{1 + cx + dx^2}$	منطقی	Jul-2017
۰/۸۶	۳۶۳۲	-۴۲۶۳	۱۵۳۳	-۱۳۸	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	درجه ۳	Aug-2017
۰/۸۱	-	۴۸۸	-۴۳۷	۱۲۳	$y = a + bx + cx^2$	درجه ۲	Sep-2017
۰/۹۹	۱۲۴۶۶	-۷۹۳۸	۱۵۶۷	-۷۹/۵۱	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	درجه ۳	Oct-2016
۰/۹۴	۱/۱۱	۱۵۳	۱/۹۴	۱۶/۷۰	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Nov-2016
۰/۸۴	-	-	-۱۳/۴۰	۰/۱۸	$y = ax^{bx}$	هندسی	Mar-2017
۰/۶۵	-	-۶/۱۶	۳/۹۴	-۰/۶۰	$y = \frac{1}{ax + bx + cx^2}$	معکوس	Apr-2017
۰/۷۹	۱/۸۱	۳۵/۵۹	۷/۲۳	۴۱/۶۲	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	May-2017
۰/۹۲	۱۳۸۵۹۱	۱۴۶۵۵۵	۵۱۴۱۰	-۸۹۴۳	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	درجه ۳	Jun-2017
۰/۸۳	-	-	۰/۰۷	-۰/۱۳	$y = \frac{1}{ax + b}$	معکوس	Jul-2017
۰/۹۵	-۰/۰۷	-۲/۳۳	-۶۷/۶۵	۲۸/۵۲	$y = \frac{1}{1 + cx + dx^2}$	منطقی	Aug-2017
۰/۷۴	-	۴۷۹	-۴۲۲	۱۱۷	$y = a + bx + cx^2$	درجه ۲	Sep-2017

بدون حضور گیاه

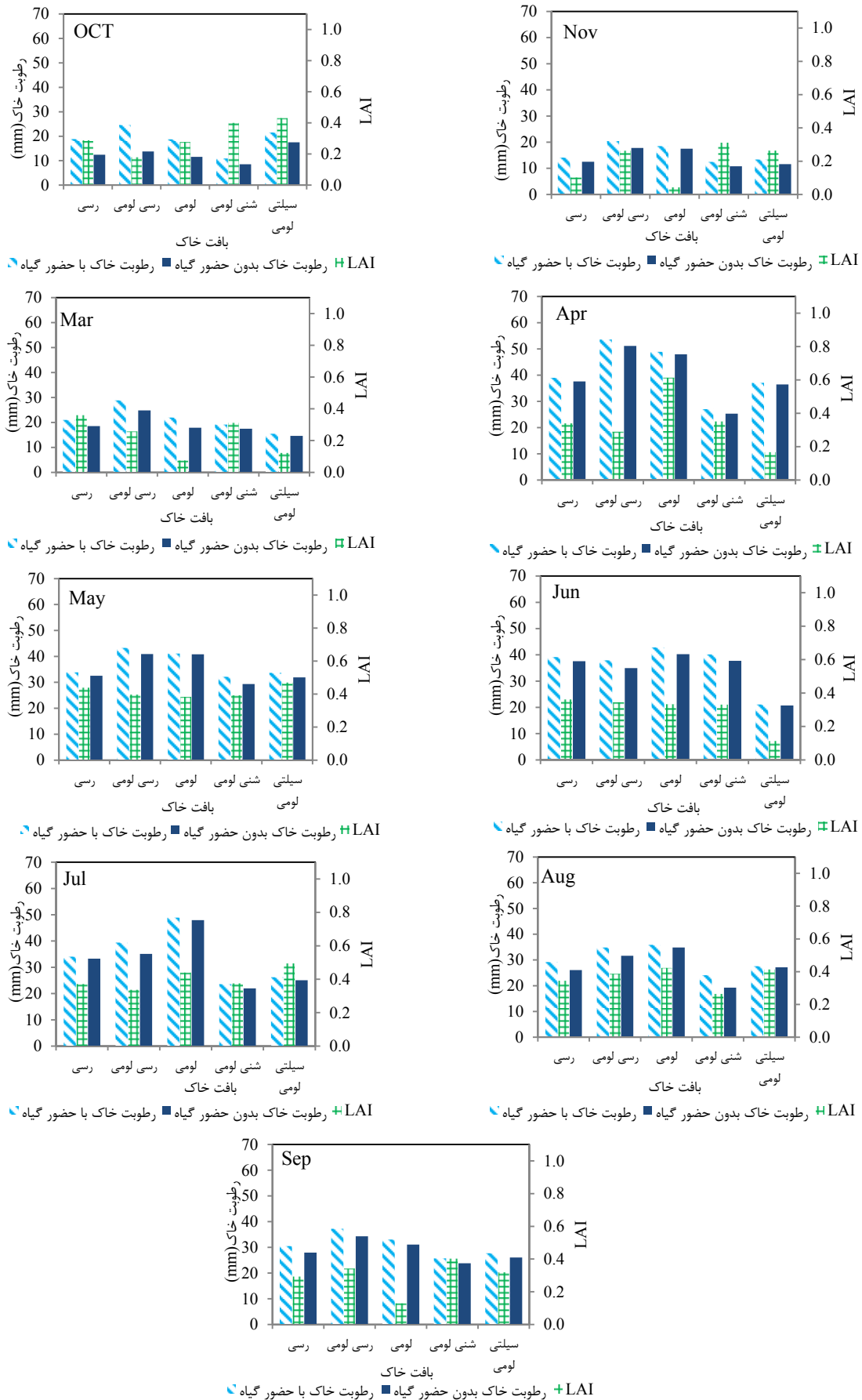
X: LAI و Y: رطوبت خاک

ج) براساس عامل تفکیک بافت خاک

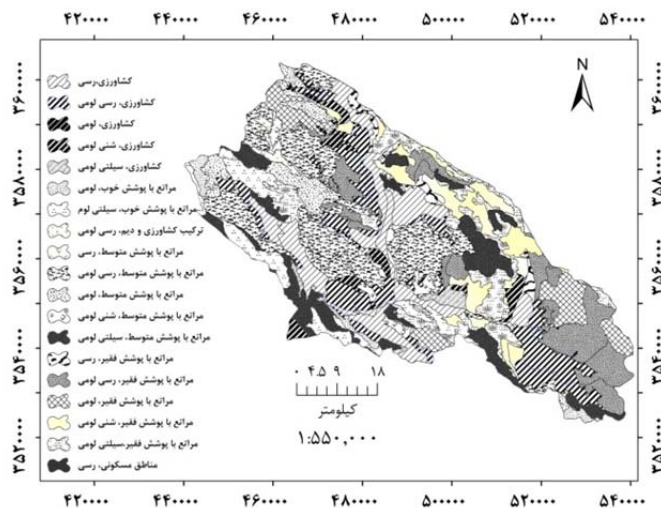
به منظور مطالعه رابطه بین LAI و میانگین رطوبت خاک در بافت‌های مختلف خاک باتوجه به موقعیت نقاط نمونه برداری، برای هر بافت خاک، میانگین مقادیر LAI و رطوبت خاک مشخص شد. در شکل ۹، داده‌های مربوط به LAI و رطوبت خاک در طول دوره‌های نمونه برداری نمایش داده شده است. تحلیل این داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار رطوبت خاک در بافت رسی لومی مشاهده شده است؛ به جز در فصل تابستان که بیشترین رطوبت در بافت لومی ثبت شده است؛ این موضوع به دلیل تخلخل بالا و ظرفیت نگهداری آب ذرات سیلت و رس است. در فصل تابستان، بافت لومی به دلیل وجود لاشبرگ‌های گیاهی و آبیاری‌های انجام شده، بیشترین رطوبت را دارد. در مقابل، کمترین مقدار رطوبت خاک عمدتاً در بافت شنی لومی رخ می‌دهد که ناشی از ظرفیت نگهداری پایین آب ذرات درشت‌دانه و فاصله زیاد بین ذرات است. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت بافت خاک در تعیین ظرفیت نگهداری آب، تأثیر قابل توجه بر توانایی حفظ رطوبت و تأثیر بر رشد گیاهان و پویایی اکوسیستم‌هاست. با تلفیق نقشه‌های بافت خاک و کاربری اراضی در این حوضه (شکل ۱۰)، مشخص شد که بیشتر بافت لومی تحت کاربری کشاورزی قرار دارد؛ این موضوع می‌تواند بر توزیع رطوبت خاک و در نتیجه بر LAI تأثیر بگذارد. در این مطالعه، تحلیل دقیقی از ارتباط میان بافت خاک، رطوبت، شیب زمین و LAI انجام شده است. مشاهدات نشان داد که بافت خاک به طور قابل توجهی بر میزان رطوبت موجود در خاک و در نتیجه بر LAI تأثیر می‌گذارد. خاک‌های رسی با قدرت نگهداری آب بالا می‌توانند رطوبت بیشتری را حفظ کنند؛ این امر به رشد گیاهان و افزایش LAI کمک می‌کند. در مقابل، خاک‌های شنی به دلیل قدرت نگهداری آب پایین‌تر، ممکن است LAI کمتری را نشان دهند. علاوه بر این، شیب زمین نیز در توزیع رطوبت خاک و در نتیجه در LAI نقش دارد. مناطق با شیب کمتر، احتمال دارد که آب بیشتری در خود نگه دارند و به این ترتیب، شرایط مساعدتری برای رشد گیاهان فراهم آورند؛ در حالی که مناطق با شیب تند ممکن است به سرعت آب را از دست داده و LAI پایین‌تری داشته باشند.

در ادامه، رابطه بین LAI و رطوبت خاک در بافت‌های مختلف خاک با استفاده از مدل‌های جعبه سیاه متفاوت ارزیابی شد. نتایج حاصل از برازش مدل‌های رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار کرواکسپرت نشان داد که رابطه بین LAI و رطوبت خاک در هر بافت خاک، غیرخطی است. بهترین مدل برای هر ماه براساس میزان همبستگی و تحلیل چشمی پراکندگی نقاط انتخاب شد و پارامترهای مربوط به همراه ضریب همبستگی در جدول ۴ ارائه گردید. تحلیل‌ها نشان داد که به جز در ماه‌های نوامبر و سپتامبر، رابطه قوی و معنی‌داری بین LAI و رطوبت خاک در تمامی ماه‌ها وجود دارد؛ این موضوع، اهمیت تعامل بین پوشش گیاهی و خصوصیات خاک را تأیید می‌کند.

1. Heat Capacity Model



شکل ۹: مقادیر LAI و رطوبت خاک (mm) در هریک از بافت‌های خاک در محدوده مورد مطالعه طی ماه‌های نمونه‌برداری



شکل ۱۰: نقشه تلفیق بافت خاک و کاربری اراضی در حوزه آبخیز بهشت آباد

جدول ۴: روابط جعبه سیاه بین LAI و رطوبت خاک (mm) در عامل تفکیک بافت خاک

ضریب تبیین	پارامترها				معادله	مدل پیشنهادی	ماه نمونه برداری	
	d	c	b	a				
۰/۹۹	-۱۲/۵۵	۲/۸۴	-۱۱۷	۴۸/۲۵	$y = \frac{ax + b}{1 + cx + dx^2}$	منطقی	Oct-2016	با حضور گیاه
۰/۱۶	-	-	-۰/۰۰۲	۱۴/۷۹	$y = ax^{\frac{b}{x}}$	هندسی اصلاحی ^۱	Nov-2016	
۰/۹۵	-۰/۰۹	۲۹/۰۶	۸/۸۷	۲۵/۵۳	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Mar-2017	
۰/۹۹	-۰/۸۰	۵۸/۲۶	۲۳/۷۳	۴۳/۷۲	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Apr-2017	
۰/۸۷	-۳/۱۴	۱۴۵	۱۲/۴۹	۴۲/۷۳	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	May-2017	
۰/۹۷	-	-۲/۵۲	-۰/۵۶	۲/۶۴	$y = \exp\left(\frac{a + b}{x + c \ln x}\right)$	فشار بخار ^۲	Jun-2017	
۰/۹۷	۳/۷۹	۷۸/۱۵	۱۷/۷۹	۳۱/۴۰	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Jul-2017	
۰/۹۸	-۴/۷۴	۱۷۵	۶/۰۶	۳۰/۲۳	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Aug-2017	
۰/۶۹	۰/۱۵	۱۸۲	۵/۴۸	۳۱/۹۰	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Sep-2017	
۰/۹۸	-۳/۵۶	-۰/۸۷	-۴۲/۳۳	۱۷/۶۳	$y = \frac{ax + b}{1 + cx + dx^2}$	منطقی	Oct-2016	
۰/۳۰	-	-	-۰/۰۰۳	۱۲/۷۷	$y = ax^{\frac{b}{x}}$	هندسی اصلاحی	Nov-2016	
۰/۹۲	۰/۱۸	۲۸/۰۴	۷	۲۲/۳۰	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Mar-2017	بدون حضور گیاه
۰/۹۹	۰/۸۱	۵۸/۳۲	۲۲/۳۹	۴۲	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Apr-2017	
۰/۹۳	-۳/۷۲	۱۴۶/۴۱	۱۳/۶۸	۴۱/۶۱	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	May-2017	
۰/۹۸	۶۶۸۶۴	-۵۴۰۱۳	۱۳۳۳۱	-۸۸۱	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	درجه ۳	Jun-2017	
۰/۹۶	۳/۱۱	۷۹/۷۴	۱۹/۲۷	۲۸/۹۳	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Jul-2017	
۰/۷۹	-	-	۰/۷۰	۷۳/۸۲	$y = ab\left(\frac{1}{x}\right)$	پایه ^۳	Aug-2017	
۰/۷۴	۰/۳۰	۱۸۱	۵/۰۸	۲۹/۵۸	$y = a + b \cos(cx + d)$	سینوسی	Sep-2017	

X: LAI و Y: رطوبت خاک

1. Modified Geometric Fit
2. Vapor Pressure Model
3. Root Fit

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی ارتباط بین LAI و رطوبت خاک در حوزه آبخیز بهشت‌آباد پرداخت که با هدف درک بهتر از دینامیک اکوسیستمی و تأثیرات متقابل بین پوشش گیاهی و خصوصیات فیزیکی خاک انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مقیاس زمانی، رابطه معنادار هم‌زمانی بین LAI و رطوبت خاک وجود ندارد. این موضوع بیانگر آن است که واکنش پوشش گیاهی به تغییرات رطوبت خاک، فرایندی تدریجی بوده و نیازمند زمان برای تجمع رطوبت و استفاده از آن برای رشد گیاهی است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که تأثیر رطوبت خاک بر LAI با یک تأخیر زمانی چهارماهه همراه است؛ به عبارت دیگر، پوشش گیاهی بیشترین مقدار آب را در زمانی دریافت می‌کند که رطوبت خاک در بالاترین سطح خود قرار دارد، و این آب به توسعه توده گیاهی و افزایش LAI کمک می‌کند. در تحلیل بر مبنای زمان، نتایج نشان داد که تغییرات رطوبت خاک در طول دوره نمونه‌برداری، تا حدودی از الگوی تغییرات LAI پیروی می‌کنند. با این حال، به دلیل واریانس بالای مشاهده‌شده در تغییرات LAI و رطوبت خاک، همبستگی قوی بین این دو متغیر در مقیاس نقطه‌ای مشاهده نشد. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات متغیرهای دیگری مانند تأثیرات آب‌وهوایی، فعالیت‌های انسانی و دیگر عوامل اکولوژیکی تأثیرگذار بر رطوبت خاک و LAI باشد. در تحلیل‌های بر مبنای ویژگی‌های مکانی، تأثیرات متفاوتی از کاربری اراضی، شیب و بافت خاک بر رابطه بین LAI و رطوبت خاک ملاحظه شد. این نتایج نشان دادند که تغییرات مکانی، مبین رابطه‌ای غیرخطی بین LAI و رطوبت خاک است. در حوزه آبخیز بهشت‌آباد نتایج تلفیق نقشه‌های بافت خاک و کاربری اراضی نشان‌دهنده تأثیر مستقیم بافت خاک بر توانایی پوشش گیاهی برای توسعه و رشد است.

منابع

- [1] Jia Q, Wang YP. Relationships between Leaf Area Index and Evapotranspiration and Crop Coefficient of Hilly Apple Orchard in the Loess Plateau. *Water*. 2021; 13: 1957.
- [2] Huete A, Didan K, Shimabukuro Y, Ratana P, Saleska S, Hutya L, Yang W, Nemani R, Myneni R. Amazon rainforests green-up with sunlight in the dry season. *Geophysical Research Letters*. 2006; 33 (6): 4.
- [3] Wright I, Nobre CA, Tomasella J, Da Rocha HR, Roberts J, Vertamatti E, Culf A, Alvala R., Hodnett M, Ubarana V. *Towards a GCM surface parameterization for Amazonia*, In: Gash, J., Nobre, C., Roberts, J., Victoria, R. (Eds.), *Amazon Deforestation and Climate*. J. Wiley & Sons, Chichester, UK. 1996; 473–504.
- [4] Costa MH, Foley J. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*. 2000; 13: 18–34.
- [5] Nobre CA, Silva Dias MAF, Culf A, Polcher J, Gash JH, Marengo J, Avissar R. The Amazonian climate. In: Kabat, P., et al. (Eds.), *Vegetation, Water, Humans and the Climate*. Springer Verlag, New York. 2004; 79–92.
- [6] Li Y, Li Z, Wu H, Zhou C, Liu X, Leng P, Yang P, Wu W, Tang R, Shang G. Ma L. Biophysical impacts of earth greening can substantially mitigate regional land surface temperature warming. *Nature Communications*. 2023; 14: 121.
- [7] Shahmordadi S, Ghafarian Malmiri H. Amini M. Extraction of soil moisture index (TVDI) using a scatter diagram temperature / vegetation and MODIS images. *RS & GIS for Natural Resources*. 2021; 12 (1): 38-62. [In Persian]
- [8] Chen B, Wu Z, Wang J, Dong J, Guan L, Chen J, Yang K, Xie G. Spatio-temporal prediction of leaf area index of rubber plantation using HJ-1A/1B CCD images and recurrent neural network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015; 102: 148–160.
- [9] Naithani KJ, Baldwin DC, Gaines K P, Lin H, Eissenstat DM. Spatial distribution of tree species governs the spatio-temporal interaction of leaf area index and soil moisture across a forested landscape. *Vegetative Controls on Hydrology*. 2013; 8 (3): 12.
- [10] Gigante V, Iacobellis V, Manfreda S, Milella P, Portoghese I. Influences of leaf area index estimations on water balance modeling in a mediterranean semi-arid basin. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2009; 9 (3): 979-991.
- [11] Nearing GS, Crow WT, Thorp KR, Moran MS, Reichle R.H, Gupta HV. Assimilating remote sensing observations of leaf area index and soil moisture for wheat yield estimates: An observing system simulation Experiment. *Water Resources Research*. 2012; 48: 13 pp.

- [12] Yan H, Wang SQ, Billesbach D, Oechel W, Zhang J H, Meyers T, Martin TA, Matamala R, Baldocchi D, Bohrer G, Dragoni D, Scott R. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. *Remote Sensing of Environment*. 2012; 124: 581–595.
- [13] Arx G v, Pannatier E G, Thimonier A, Rebetez M. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: Potential Implications for Seedling Establishment in a Changing Climate. *Journal of Ecology*. 2013: 1201–1213.
- [14] Chen M, Willgoose G R, Saco P M. Investigating the impact of leaf area index temporal variability on soil moisture predictions using remote sensing vegetation data. *Journal of Hydrology*. 2015; 522: 274–284.
- [15] Li S, Sawada Y. Soil moisture-vegetation interaction from near-global in-situ soil moisture measurements. *Environmental Research Letters*. 2022; 17: 114028
- [16] MODIS Web. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod15.php> (accessed on 21 November 2017).
- [17] Davoodi E, Ghasemieh H, Abdollahi Kh, Batelaan O. Evaluation of temporal-spatial variations of soil moisture balance by Thorenthwaite Matter method (Case study: Behesht Abad basin). *RS & GIS for Natural Resources*. 2018; 9 (1): 74-92. [In Persian]
- [18] Liu L, Zhang R, Zuo Z. The Relationship between Soil Moisture and LAI in Different Types of Soil in Central Eastern China. *Journal of Hydrometeorology*. 2016; 17 (11): 2733–2742
- [19] Wang J, Bao Z, Wang G, Liu C, Xie M, Wang B, Zhang J. The Time Lag Effects and Interaction among Climate, Soil Moisture, and Vegetation from In Situ Monitoring Measurements across China. *Remote Sensing*. 2024; 16: 2063.
- [20] Li W, Wang Y, Yang J, Deng Y. Time-Lag Effect of Vegetation Response to Volumetric Soil Water Content: A Case Study of Guangdong Province, Southern China. *Remote Sensing*. 2022; 14: 1301.
- [21] Na L, Na R, Bao Y, Zhang J. Time-Lagged Correlation between Soil Moisture and Intra-Annual Dynamics of Vegetation on the Mongolian Plateau. *Remote Sensing*. 2021; 13(8):1527.
- [22] Mohammadi Motlagh R. GIS applied training. *Barg sabz Publications*. Third edition. 2016. 464 pages. [In Persian]