نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

سال هفدهم- شماره ٦١- تابستان ١٤٠٢ Vol. 17, No. 61, Summer 2023

مدل‌سازی مکانی حداکثر ظرفیت نگهداشت بارش توسط تاج پوشش گیاهی (رویکردی جهت کاربردهای هیدرولوژیکی)

امیرحسین پارسامهر[1]، علی سلاجقه[2]، شهرام خلیقی سیگارودی[3] و خالد احمدآلی[4]

تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

چکیده

حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش، یکی از پارامترهای مهم در مدل‌های هیدرولوژیکی است. هدف از پژوهش حاضر که در محدوده‌ای از استان فارس انجام شد، مدل‌سازی حداکثر ظرفیت تاج پوشش گیاهان برای ذخیره بارش بود. بنابراین از پارامترهای شاخص سطح برگ و شاخص سطح شاخه به عنوان الگویی از توزیع عمودی تاج پوشش استفاده شد. همچنین قابلیت ۱۰ شاخص گیاهی منتج از باندهای باریک لبه قرمز در مقایسه با ۱۰ شاخص گیاهی منتج از باندهای پهن تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، در برآورد شاخص‌های سطح شاخه و سطح برگ، مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با استفاده از نمونه‌برداری در فصل‌های خزان و بهار، نتایج آزمایشگاهی و استفاده از مدل‌های رگرسیونی، نقشه‌های حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش در این فصول ترسیم شد. نتایج نشان داد شاخص CIRE که منتج از باندهای باریک لبه قرمز بود، توانست به عنوان بهترین شاخص، برآورد بسیار خوبی از مقادیر هر دو شاخص، یعنی شاخص سطح شاخه (R^2= ۰/۷٤) و شاخص سطح برگ (R^2= ۰/۹۲) داشته باشد. همچنین نتایج مدل‌سازی حداکثر ظرفیت ذخیره تاج‌پوشش نشان داد که این ظرفیت از صفر تا ۱/۳۲ میلی‌متر در واحد پیکسل در پاییز و از صفر تا ۱/۷٤ میلی‌متر در واحد پیکسل در فصل بهار متغیر است.

کلیدواژه‌ها: *مدل‌سازی هیدرولوژیکی، حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش، تصاویر سنتینل-۲، شاخص گیاهی*

مقدمه

حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی تاج پوشش، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیکی است که در تحلیل مدل‌های بارش- رواناب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برخی از مدل‌ها به طور کامل آن را نادیده گرفته‌اند (براساس این فرض که عموماً بخش کوچکی از کل تبخیر است) و یا به عنوان یک مقدار ثابت در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. این پدیده، توزیع فضایی و زمان‌بندی ورود آب باران به سطح زمین را در ناحیه تحت اثر تغییر می‌دهد که این امر به نوبه خود بر روی رواناب سطحی و پدیده نفوذ تاثیر دارد [۲۸]. بِون [۳] بیان می‌کند که بارش ذخیره شده در سطح تاج‌پوشش می‌توانَد بسیار موثر بوده و گاهی بخش قابل‌توجهی از بیلان آب را به خود اختصاص می‌دهد.

مفهوم حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی تاج پوشش برای اولین بار توسط هورتون در سال ۱۹۱۹ بیان شد [۱۲]. این اصطلاح زمانی مطرح می‌شود که تاج پوشش توسط قطرات بارانی که انرژی جنبشی تقریبا برابر با صفر دارند، مرطوب شود. این شرایط در بارش‌های با شدت کمتر از ۰/۳٦ میلی‌متر بر ساعت اتفاق می‌افتد [۵]. در واقع حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی تاج پوشش را می‌توان به صورت حداکثر پتانسیل تاج پوشش برای جذب آب بارش در هوای آرام تعریف کرد. در این شرایط آب در سطح برگ‌ها و شاخه‌ها توسط کشش سطحی تا زمانی‌که نیروهای کشش سطحی با نیروهای گرانشی در تعادل باشند، باقی می‌ماند [١٦]. لازم به ذکر است که مفهوم «حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش» با مفهوم «ظرفیت ذخیره تاج پوشش» متفاوت است. حداکثر ظرفیت ذخیره تاج‌پوشش، تابعی از توزیع عمودی تاج پوشش گیاهان بوده و مستقل از خصوصیات بارش است، در حالی که ظرفیت ذخیره تاج پوشش با تغییرات شدت بارش تغییر می‌کند [٢٤]. زمانی که تاج پوشش به حداکثر ظرفیت نگهداشت خود برسد، قطرات آب از آن شروع به چکیدن خواهد کرد، هر چند که ممکن است مثل تاج بارش مستقیم[1]، به صورت کاملا پیوسته رخ ندهد [١٦].

هیچ تکنیک استانداردی برای تخمین دقیق حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی تاج پوشش وجود ندارد. روش‌هایی که تا کنون پیشنهاد شده است بر مبنای نظرات شخصی و تصمیمات فردی بوده که این امر نشان می‌دهد محاسبه حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی تاج پوشش

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- نویسنده مسئول و استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. پست الکترونیکی: salajegh@ut.ac.ir
۳ و ٤- به ترتیب دانشیار و استادیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

1. Free Throughfall

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

ممکن است با عدم قطعیت و ابهامات زیادی همراه باشد. بی‌تردید حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش توسط ویژگی‌های تاج پوشش گیاهی کنترل می‌شود که در این میان شاخه‌ها و برگ‌ها نقش مهمی را در تعیین حداکثر ظرفیت تاج پوشش ایفا می‌کنند [۲۴]. از سوی دیگر با توجه به تغییرات برگ‌ها در طول فصل رشد و تغییر فصل‌ها (گیاهان برگ ریز)، این ظرفیت نیز همگام با این تغییرات، تغییر کرده که به فیزیولوژی گیاه و سن آن بستگی دارد [۱۴]. بنابراین در گیاهان برگ ریز، پوشش شاخه‌ها در فصل خزان، می‌تواند علیرغم عدم حضور برگ‌ها، نقش مهمی را در جذب آب باران ایفا کند. این موضوعی است که در غالب مدل‌های هیدرولوژیکی کمتر به آن پرداخته شده است. با رویش مجدد برگ‌ها در فصل بهار، علاوه بر نقش شاخه‌ها، برگ‌ها نیز در گیرش آب باران نقش خود را خواهند داشت. شاخص سطح برگ (LAI)[1] و شاخص سطح شاخه (BAI)[2] به عنوان الگویی از توزیع عمودی تاج پوشش، در بسیاری از فرآیندهای هیدرولوژیکی، تاثیرگذار بوده و به عنوان ورودی بسیاری از مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی استفاده می‌شود [۲۲]. شاخص سطح برگ در واقع نسبت مساحت سطح صاف برگ در واحد سطح زمین است. مشابه این تعریف، برای شاخص سطح شاخه نیز تعریف می‌شود؛ با این تفاوت که سطح شاخه‌ها با ضرب متوسط محیط شاخه در طول شاخه، ملاک عمل قرار خواهد گرفت [۱۵،۱۸]. اگرچه با استفاده از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری پوشش، شاخص‌های گیاهی با دقت بالایی تعیین می‌گردد، اما روشن است که اندازه‌گیری زمینی اغلب به صورت تخریبی، زمان بر و پر هزینه است و گستره مکانی وسیعی را تحت پوشش نخواهد داشت. امروزه پیشرفت‌های تکنولوژی، مشاهدات زمینی قوی را به وجود آورده که برای درک اجزای کلیدی چرخه هیدرولوژیکی در مقیاس بزرگتر بسیار مناسب هستند [۲۹]. فناوری سنجش از دور از جمله این تکنیک‌ها است که ابزاری قدرتمند برای دستیابی به تخمین متغیرهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان وحل چالش‌های ارزیابی پوشش گیاهی فراهم می‌کند.

در سال‌های اخیر، با ظهور سنجنده‌های ابرطیفی، اطلاعات طیفی گسترده‌تر و همچنین امکان ارائه شاخص‌های گیاهی دقیق برای اندازه‌گیری مشخصه‌های متنوع زیستی گیاهان در مقایسه با سنجنده‌های چند طیفی فراهم شده است [۷]. شاخص‌های گیاهی بر اساس اختلاف رفتار طیفی پوشش گیاهی در باندهای متفاوت تعریف می‌شوند. با توجه به ارتباط مستقیم شاخص‌های گیاهی به دست آمده از مشاهدات طیفی با پارامترهای فیزیکی شاخص سطح شاخه و برگ، امکان تخمین این پارامترها از طریق مدل‌سازی میسر خواهد بود. این رویکرد دربرگیرنده فرآیند آموزش یک مدل (مثلا رگرسیون) با داده‌های واقعیت زمینی و سپس استفاده از مدل آموزش داده شده برای بازیابی پارامتر مورد نظر است [۲۵].

محاسبه شاخص‌های گیاهی همیشه با چالش‌هایی همراه بوده است. یکی از این چالش‌ها اثر اشباع شاخص است. در محدوده قرمز طیف الکترومغناطیس به دلیل کلروفیل موجود در برگ‌ها و اثر جذبی آن‌ها، پدیده جذب، غالب است. در بخش مادون قرمز نزدیک، بازتاب پوشش گیاهی بالا است. شاخص‌های پوشش گیاهی متعددی بر اساس این ویژگی طیفی پوشش گیاهی طراحی شده‌اند. عموما شاخص‌هایی که در ساختار خود از این باندها استفاده می‌کنند، وقتی که شاخص گیاهی به حد معینی رسید، بازتاب تاج پوشش در محدوده مرئی همراه با رشد گیاه تغییرات محدودی خواهد داشت که به عنوان اشباع شاخص سطح برگ/سطح شاخه شناخته می‌شود [۳۰]. تصاویر ابر طیفی، امکان بررسی پوشش گیاهی را با استفاده از تصاویر باندهای باریک به جای تنها دو باند قرمز و مادون قرمز (باند پهن) فراهم کرده‌اند. مطالعات نشان داده است که باندهای باریک واقع شده در محدوده لبه قرمز (۶۸۰ تا ۷۵۰ نانومتر) توسط مقدار کلروفیل و شاخص سطح برگ تحت تاثیر قرار می‌گیرند [۱].

هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی حداکثر ظرفیت ذخیره تاج‌پوشش منطقه مورد مطالعه برای کاربردهای هیدرولوژیکی بود. فرضیات این مدل عبارتند از:

۱- پوشش گیاهی غالب در منطقه، خزان کننده باشد.

۲- تا اشباع کامل تاج پوشش، از تلفات تبخیر و تاج‌بارش غیر مستقیم صرف نظر شده است.

۳- بازتاب تاج پوشش در فصل خزان مربوط به شاخص سطح شاخه و در فصل حداکثر رشد، مربوط به شاخص سطح برگ است.

همچنین در راستای هدف اصلی پژوهش، پتانسیل باندهای سنجنده سنتینل - ۲ برای برآورد شاخص‌های سطح برگ و سطح شاخه و بررسی تطبیقی شاخص‌های گیاهی مشتق شده از باندهای باریک لبه قرمز و باندهای پهن مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحتی حدود ۲۵۰ کیلومتر مربع در استان فارس و ۲۷ کیلومتری غرب شیراز قرار دارد. این محدوده در موقعیت جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۱ دقیقه و ۱۷ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱۱ ثانیه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۳۸ دقیقه و ۴۰ ثانیه تا ۲۹ درجه و ۴۹ دقیقه و ۲۵ ثانیه عرض شمالی قرار داشته و بخشی از زاگرس چین‌خورده است (شکل ۱). متوسط بارش سالیانه محدوده مورد مطالعه ۵۴۰ میلی‌متر بوده و بارش‌ها عمدتا از اواسط آبان شروع و تا اواخر اردیبهشت ادامه دارد. متوسط دما در گرمترین و سردترین ماه سال به ترتیب ۳۴ و ۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. گونه گیاهی غالب منطقه *Crataegus azarolus* است.

1. Leaf Area Index
2. Branch Area Index

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

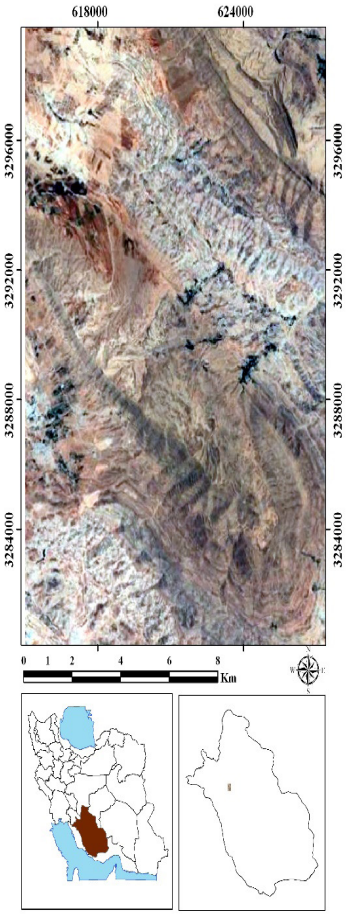
روش کار

تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش از تصاویر ماهواره سنتینل-۲، بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ میلادی استفاده شد. تصاویر این سنجنده دارای ۱۳ باند است که با توجه به توان تفکیک مکانی بالای آن (۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر)، پتانسیل عظیمی را در تهیه نقشه خصوصیات زیستی و فیزیکی گیاهان فراهم آورده است. جدول ۱ ویژگی‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ را نشان می‌دهد. این تصاویر از سایت سازمان فضایی اروپا (www.scihub.copernicus.eu) با مبنای WGS1984 دریافت شد.

بررسی‌های انجام شده مشخص کرد که تصحیحات هندسی، رادیومتریک و اتمسفری تصاویر سنتینل-۲ (Sentinel-2A_MSIL2A) توسط سازمان ارائه دهنده انجام شده و نیازی به انجام مجدد آن نیست. بنابراین با استفاده از نرم‌افزار SNAP، محدوده مورد مطالعه از سین اصلی تصویر جدا و بازنمونه‌برداری باندها برای رسیدن به یک تفکیک مکانی مشترک (۱۰ متر) انجام شد. این کار محاسبات هم‌زمان بر روی باندهای مختلف را امکان‌پذیر می‌کند.

در ادامه، ۲۰ شاخص گیاهی انتخاب و مقادیر آن‌ها برای محدوده مورده مطالعه محاسبه شد. شاخص‌های گیاهی تبدیل‌های ریاضی هستند که بر اساس باندهای گوناگون سنجنده تعریف می‌شوند. تا کنون شاخص‌های گیاهی بسیار زیادی تعریف شده است که با توجه به بررسی منابع مختلف، مهم‌ترین و پر کاربردترین آن‌ها انتخاب شد. یکی از مزایای مهم تصاویر سنتینل-۲، داشتن سه باند طیفی با پهنای باندی کم در محدوده لبه قرمز است. از آنجا که یکی از اهداف پژوهش حاضر ارزیابی کارایی شاخص‌های گیاهی منتج از باندهای باریک لبه



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Position of study area

جدول ۱- ویژگی‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ (https:// sentinel.esa.int)

Table 1. Sentinel-2 MSI satellite characteristics (https://sentinel.esa.int)

Sentinel-2A			
نوع باند Band name	عرض باند(نانومتر) Band width (nm)	مرکز طول موج (نانومتر) Center of Wavelength (nm)	تفکیک زمینی (متر) Resolution (m)
باند ۱ (Coastal aerosol)	21	442.7	60
باند ۲ (Blue)	66	492.4	10
باند ۳ (Green)	36	559.8	10
باند ٤ (Red)	31	464.6	10
باند ٥ (Red edge)	15	704.1	20
باند ٦ (Red edge)	15	740.5	20
باند ۷ (Red edge)	20	782.8	20
باند ۸ (NIR)	106	832.8	10
باند A8 (Narrow NIR)	21	864.7	20
باند ۹ (Water vapor)	20	945.1	60
باند ۱۰ (SWIR-cirrus)	31	1373.5	60
باند ۱۱ (SWIR)	91	1613.7	20
باند ۱۲ (SWIR)	175	2202.4	20

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

جدول ۲- شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در پژوهش حاضر (منتج از باندهای پهن و باندهای باریک سنتینل-۲)

Table 2. Vegetation indices used in this study (derived from broad and narrow bands of Sentinel-2)

ردیف No	شاخص گیاهی Vegetation Index	اختصار Abreviation	معادله Equation
	شاخص‌های مبتنی بر باندهای پهن Vegetation indices derived from broad bands		
1	Enhanced Vegetation Index	EVI	2.5 (B8 – B4)/(B8 +6 B4 – 7.5 B2 +1)
2	Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	(B8 – B3)/(B8 +B3)
3	Normalized Difference Vegetation Index)	NDVI	(B8 – B4)/(B8 +B4)
4	Green Atmospherically Resistant Index	GARI	[B8-(B3-B2-B4)]/[B8-(B3+B2-B4]
5	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	MSAVI	[2 B8+1-[(2 B8+1)2-8(B8 – B4)]1/2]/ 2
6	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI	0.16[(B8 – B4)/(B8 + B4 +0.16)
7	Blue Normalized difference vegetation index	BNDVI	(B8 – B2)/(B8 +B2)
8	Differenced Vegetation Index	DVI	2.4(B8-B4)
9	Specific Leaf Area Vegetation Index	SIAVI	B8/B4+B12
10	Photosynthetic Vigor ratio	PVR	(B3 – B4)/(B3 +B4)
	شاخص‌های مبتنی بر باندهای باریک (لبه قرمز) Vegetation indices derived from narrow bands (Red Edge)		
11	Anthocyanin reflectance index	ARI	(1/B3)-(1/B5)
12	Canopy Chlorophyll Content Index	CCCI	[(B8-B5)/(B8+B5)]/ [(B8-B4)/(B8+B4)]
13	Red-Edge Inflection Point	REIP	700+40[(B4+B7)/2)-B5]/(B6-B5)
14	Chlorophyll Index Red Edge	CIRE	(B7/B5) -1
15	Leaf Chlorophyll Index	LCI	(B8-B5)/(B8+B5)
16	Red Edge Normalized Difference Vegetation Index-1	RENDVI-1	(B6-B4)/(B6+B4)
17	Red Edge Normalized Difference Vegetation Index-2	RENDVI-2	(B7-B4)/(B7+B4)
18	Vegetation Index 700	VI700	(B5-B4)/(B5+B4)
19	Vogelmann Indices	VOG	B6/B5
20	Chlorophyll Index Green	CIG	(B7/B3) -1

قرمز در مقایسه با شاخص‌های منتج از باندهای پهن (معمولی) تصاویر سنتینل-۲ بود، لذا از ۲۰ شاخص انتخاب شده، ۱۰ شاخص گیاهی منتج از باندهای پهن و ۱۰ شاخص گیاهی دیگر منتج از باندهای باریک لبه قرمز انتخاب شد. لیست کامل شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در این پژوهش درجدول ۲ ارائه شده است.

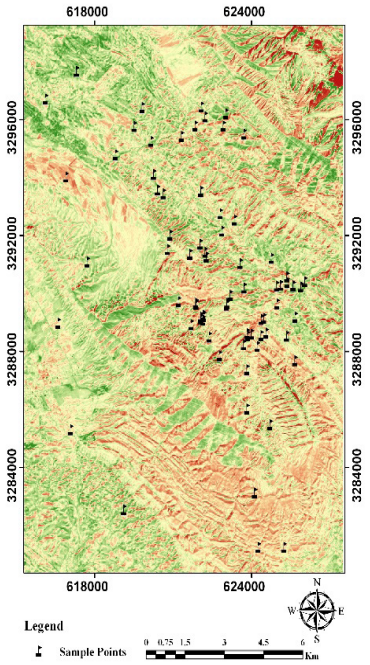
نمونه برداری جهت تخمین شاخص سطح برگ و شاخص سطح شاخه

نمونه‌برداری پوشش گیاهی در دو مقطع زمانی مختلف، هم‌زمان با گذر ماهواره و با تلفیق روش‌های تخریبی و غیر تخریبی انجام شد. اولین نمونه‌برداری در اواخر آذر ماه۱۴۰۰ و پس از اطمینان از ریزش برگ گونه‌های خزان کننده صورت پذیرفت. در این مرحله، شاخه‌های تاج‌پوشش گیاهان به منظور محاسبه شاخص سطح شاخه در ۵۸ نقطه مورد بررسی قرار گرفت. مرحله دوم نمونه‌برداری در اواسط خرداد ماه ۱۴۰۱ و پس از اطمینان از حداکثر رویش گیاه انجام شد. در این مرحله شاخص سطح برگ، در ٦٤ نقطه برداشت شد (شکل ۲). در انتخاب نقاط نمونه‌برداری دو نکته مورد توجه قرار گرفت. اول اینکه تاج پوشش گونه‌های گیاهی با هم، همپوشانی

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

نداشته باشند و دوم اینکه نقاط نمونه برداری به صورت کاملا شفاف بر روی تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی باشد. قبل از نمونه‌برداری، خطای احتمالی مختصات جغرافیایی ناشی از عدم تطابق نقاط برداشت شده با GPS و همان نقاط روی تصویرماهواره‌ای، جهت تشخیص موقعیت پیکسل‌ها بر روی زمین، مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه‌برداری

Fig 2. Location of sampling points

تجزیه و تحلیل آماری

روش‌های رگرسیونی یکی از ابزارهای متداول در مدل‌سازی و یادگیری ماشین است. در این پژوهش از رگرسیون چند جمله‌ای[1] و رگرسیون خطی چندگانه[2] استفاده شد. رگرسیون چند جمله‌ای یکی از روش‌هایی است که با استفاده از یک چند جمله‌ای بر حسب متغیر مستقل، ارتباط با متغیر وابسته را مدل‌سازی می‌کند. در واقع علاوه بر مدل‌های خطی، یک مدل غیر خطی را نیز می‌توان بین متغیرهای مستقل و وابسته به صورت یک چند جمله‌ای درجه k تعیین کرد [۲۳]. بنابراین برای انتخاب بهترین شاخص گیاهی و تعیین ارتباط آن با شاخص‌های سطح برگ و سطح شاخه، به نوبت هر یک از ۲۰ شاخص گیاهی به عنوان متغیر مستقل و شاخص سطح شاخه (سری اول داده‌ها) یا شاخص سطح برگ (سری دوم داده‌ها) به عنوان متغیر وابسته، وارد مدل‌سازی رگرسیون چند جمله‌ای شدند.

همچنین به منظور بررسی رابطه احتمالی بیش از یک شاخص گیاهی با شاخص سطح برگ یا شاخص سطح شاخه، از روش رگرسیون چندگانه استفاده شد. در واقع با این روش می‌توان وابستگی شاخص سطح برگ یا شاخه را هم‌زمان با چند شاخص گیاهی مورد بررسی قرار داد. این آنالیزها برای هر دو مجموعه داده‌ها (داده‌های برداشت شده در پاییز و بهار) به صورت مستقل انجام شد. مبنای تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین شاخص یا شاخص‌ها و استفاده از معادله رگرسیونی مربوط به آن، معنی‌دار بودن در سطح ۰/۰۵ و داشتن بیشترین ضریب رگرسیونی (R^2) بود. بعد از انتخاب بهترین شاخص گیاهی، از طریق معادلات رگرسیونی آن شاخص، مقادیرشاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ برای کل محدوده مورد مطالعه بدست آمد.

معیارهای ارزیابی و سنجش مدل

به منظور ارزیابی و سنجش مدل (های) انتخاب شده، از سه معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ناش – ساتکلیف (NS) و کلینگ – گوپتا (KGE) استفاده شد که از طریق روابط زیر بدست می‌آیند [۱۰]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(LAI_{O_i} - LAI_{S_i}\right)^2}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(LAI_{S_i} - LAI_{O_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(LAI_{O_i} - \overline{LAI}_O\right)^2}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc-1)^2 + (\propto -1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

که در آنها LAI_{O_i} شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده، LAI_{S_i} شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده با استفاده از شاخص‌های گیاهی، $\overline{LAI}_O$ میانگین شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده، n تعداد داده‌ها، cc ضریب همبستگی خطی بین LAI_{O_i} و LAI_{S_i}، $\propto$ نسبت انحراف معیار LAI_{S_i} به LAI_{O_i}، β نسبت میانگین LAI_{S_i} به LAI_{O_i} می‌باشد. مشابه همین آنالیز، برای شاخص سطح شاخه (BAI) نیز تکرار شد. نزدیک بودن مقدار معیار ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به صفر و مقادیر معیارهای ارزیابی ناش – ساتکلیف (NS) و کلینگ – گوپتا (KGE) به یک نشان دهنده این است که مدل مورد نظر توانسته است برآورد بهتری (در مقایسه با مقادیر واقعی) داشته باشد[۱۰].

محاسبه حداکثر ظرفیت ذخیره تاج‌پوشش

با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه دارای پوشش گیاهی خزان کننده بود، در فاز اول، حداکثر پتانسیل ذخیره‌سازی آب بر روی شاخه‌های عاری از برگ، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور در آذرماه ۱۴۰۰، تعداد ۱۰۰ قطعه شاخه از گیاهان جدا و پس از انتقال به آزمایشگاه و شماره‌گذاری نمونه‌ها، طول شاخه‌ها با استفاده از متر (۰/۱ ± سانتی‌متر) و قطر متوسط آن‌ها با استفاده از کولیس (۰/۰۱ ± میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. در ادامه سطح موثر هر یک از

1. Multiple Linear Regression
2. Polynomial Regression

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

آن‌ها از ضرب طول شاخه در محیط آن بدست آمد. سپس هر یک از نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در یک استوانه مدرج با حجم مشخصی از آب غوطه‌ور شدند. بعد از اشباع شدن نمونه‌ها، آن‌ها را از ظرف خارج کرده و مدتی به صورت معلق در بالای استوانه نگه داشته تا آب مازاد از طریق ثقل به داخل استوانه مدرج چکه کند. تغییرات حجم استوانه مدرج در قبل و بعد از آزمایش، معادل حداکثر ظرفیت شاخه‌ها در نگهداشت آب خواهد بود. این کار را برای تمام نمونه‌ها تکرار و میانگین حداکثر ظرفیت ذخیره آب در واحد سطح شاخه‌ها محاسبه شد.

در فاز دوم که در خرداد ماه ۱۴۰۱ انجام شد، ۵۸۰ برگ از منطقه مورد مطالعه برداشت شد. پس از محاسبه سطح برگ‌ها، تمام مراحل غوطه‌ورسازی در استوانه مدرج و محاسبه حداکثر ظرفیت ذخیره آب، برای برگ‌ها نیز تکرار شد. با توجه به تغییرات بسیار کم حجم آب پس از اشباع یک برگ، هر ۱۰ برگ به عنوان یک نمونه در نظر گرفته شد. پس از اتمام ۵۸ نمونه، میانگین حداکثر ظرفیت ذخیره آب در واحد سطح برگ‌ها محاسبه شد.

در گام آخر، حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش برای فصل خزان (حداقل تاج پوشش) و فصل بهار (حداکثر تاج پوشش) با استفاده از معادلات زیر بدست آمد:

$$CSC_{\max_Aut} = \bar{x}_{csc}.BAI \quad (۱)$$

$$CSC_{\max_Spr} = CSC_{\max_Aut} + \bar{y}_{csc}.LAI \quad (۲)$$

که در آن $CSC_{\max_Aut}$ ماتریس حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش برای فصل خزان، $\bar{x}_{csc}$ میانگین حداکثر ظرفیت ذخیره آب در واحد سطح شاخه، BAI ماتریس شاخص سطح شاخه، $CSC_{\max_Spr}$ حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش در فصل بهار، $\bar{y}_{csc}$ میانگین حداکثر ظرفیت ذخیره آب در واحد سطح برگ و LAI شاخص سطح برگ است.

لازم به یادآوری است که کلیه محاسبات مربوط به محاسبات ماتریس‌ها در محیط برنامه‌نویسی متلب و نمایش گرافیکی نقشه‌ها در محیط Arc GIS انجام شد.

نتایج

در این پژوهش از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ به عنوان ابزاری برای برآورد تاج پوشش (شاخ و برگ) گیاهان منطقه مورد مطالعه استفاده شد. برای این منظور لازم بود از میان ۲۰ شاخص گیاهی که در ساخت آن‌ها از ترکیب باندی متنوعی استفاده شده بود، شاخص یا شاخص‌هایی انتخاب شود که بیشترین و بهترین ارتباط را با شاخص‌های سطح شاخه و سطح برگ نشان دهد. لذا برای نیل به این هدف از روش‌های آماری رگرسیون چند جمله‌ای و رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد.

برای انتخاب بهترین شاخص گیاهی با استفاده از روش رگرسیون چند جمله‌ای، مدل‌های خطی، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس معیار معنی‌دار بودن (سطح ۰/۰۵) و ضریب رگرسیونی (R^2)، بهترین شاخص گیاهی برای شاخص‌های سطح شاخه و سطح برگ انتخاب شد. نتایج این بررسی در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در این جدول مشخص است، شاخص CIRE به عنوان بهترین شاخص گیاهی برای برآورد هر دو پارامتر یعنی شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ انتخاب شد. معادله رگرسیونی مدل‌های انتخاب شده در برآورد شاخص سطح شاخه به صورت خطی و در برآورد شاخص سطح برگ از نوع درجه ۳ بود برای مقایسه و آگاهی از وضعیت دیگر شاخص‌های گیاهی، نمودار گرافیکی ضرایب رگرسیونی (R^2) هر یک از شاخص‌های گیاهی در ارتباط با شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ به ترتیب در شکل شماره ۳-الف و ۳-ب نشان داده شده است. در واقع این شکل پس از انتخاب بهترین معادله رگرسیونی از میان مدل‌های خطی، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی به واسطه معنی‌دار بودن در سطح ۰/۰۵ و داشتن بیشترین ضریب رگرسیونی (R^2) ترسیم شد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، حداقل ۳ شاخص اول که بهترین برآورد را در هر دو پارامتر مورد نظر یعنی شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ داشتند، جزء شاخص‌های گیاهی بودند که در ساختار آن‌ها از ترکیب باندهای باریک لبه قرمز استفاده شده بود.

رگرسیون خطی چندگانه، دیگر روش آماری بود که امکان انتخاب بهترین شاخص یا ترکیب خطی چند شاخص را به صورت هم‌زمان امکانپذیر می‌ساخت. معیار انتخاب بهترین شاخص، همچون روش رگرسیون چند جمله‌ای، معنی‌دار بودن روش‌های مختلف

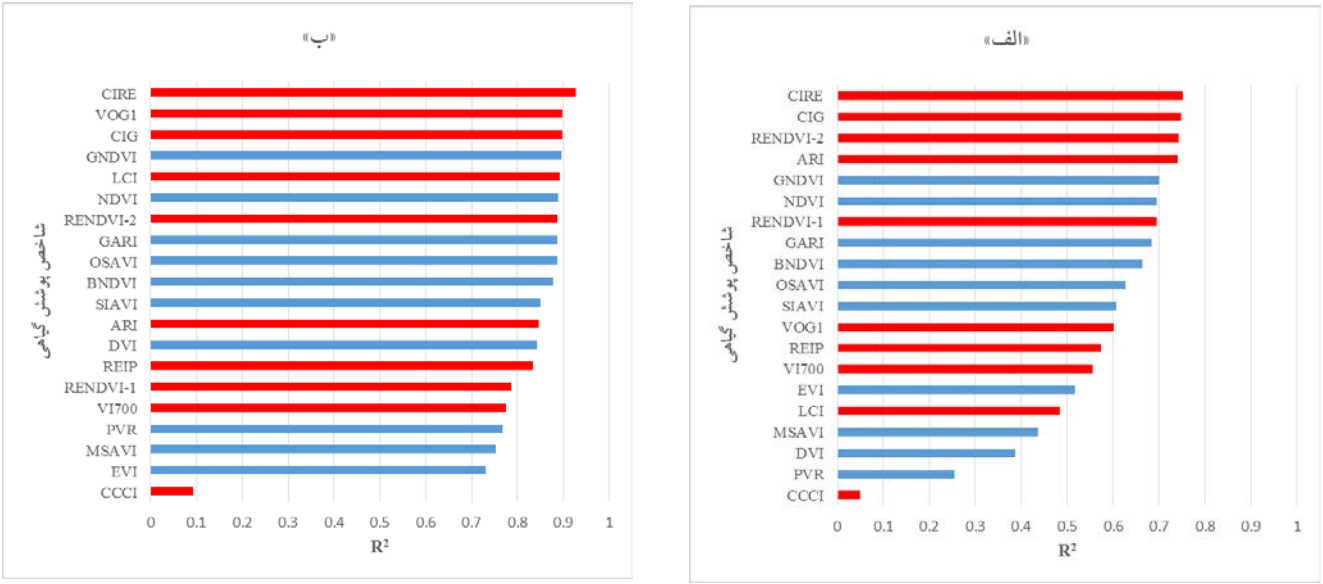
جدول ۳- مدل رگرسیونی چند جمله‌ای شاخص‌های گیاهی انتخاب شده

Table 3. Polynomial Regression model of selected vegetation indices

ردیف No	شاخص گیاهی منتخب Selected Vegetation Index	فصل نمونه‌برداری Season of Sampeling	مدل رگرسیونی چند جمله‌ای Polynomial Regression Model	R^2	Error
1	CIRE	پاییز Fall	BAI=0.809 CIRE	0.743	0.04
2	CIRE	بهار Spring	$LAI=0.325CIRE+0.842CIER^2-0.245CIRE^3+0.11$	0.927	0.15

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]



شکل ۳- الویت انتخاب شاخص‌های گیاهی در برآورد شاخص سطح شاخه (الف) و شاخص سطح برگ (ب) در روش رگرسیون چند جمله‌ای (نوارهای قرمز شاخص‌های گیاهی منتج از باندهای لبه قرمز و نوارهای آبی شاخص‌های گیاهی منتج از باندهای پهن)

Fig 3. Priority of vegetation indices selection to estimate the Branch Area Index (Right) and Leaf Area Index (Left) in polynomial regression (Red strips indicate vegetation indices resulting from red edge bands and blue strip indicate vegetation indices resulting from broad bands)

جدول ٤- مدل رگرسیونی خطی چندگانه شاخص‌های گیاهی انتخاب شده

Table 4. Multiple Linear Regression model of selected vegetation indices

ردیف No	فصل نمونه‌برداری Season of Sampeling	روش Method	مدل رگرسیونی خطی چندگانه Multiple Linear Regression Model	R^2	Error
1	پاییز Fall	Forward	$BAI=0.91CIRE^{a}+0.018ARI^{a}-0.55VOG^{a}+0.53$	0.705	0.053
		Backward	$BAI=0.55CIRE-4.1EVI+4.16OSAVI-.82BNDVI-1.04PVR+0.135$	0.724	0.049
2	بهار Spring	Forward	$LAI=0.96CIRE+0.047$	0.913	0.187
		Backward	$LAI=0.77CIRE-2.69BNDVI-3.19PVR-2.53GARI+7.11NDVI-.01$	0.921	0.169

مورد استفاده در سطح ۰/۰۵ و دارا بودن بیشترین ضریب رگرسیونی (R^2) بود. از میان روش‌های مورد بررسی، تنها روش‌های Forward و Backward معنی‌دار بودند. نتایج این آنالیز در جدول شماره ٤ ارائه شده است. همانگونه که در این جدول دیده می‌شود، استفاده از روش Backward در رگرسیون خطی چندگانه، نتایج بهتری را برای برآورد هر دو پارامتر شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ، به دنبال خواهد داشت. از آنجا که نتایج هر یک از مدل‌های رگرسیون چند جمله‌ای و رگرسیون خطی چندگانه معادله متفاوتی را پیشنهاد می‌داد و از طرف دیگر برای ادامه کار لازم بود تنها از یک مدل رگرسیونی (بهترین مدل) برای برآورد پارامترهای مورد نظر استفاده شود، لذا با مقایسه مقادیر ضریب رگرسیونی معادلات منتخب، مدل رگرسیونی چند جمله‌ای ساده و مدل رگرسیونی درجه ۳ به ترتیب به عنوان مدل نهایی تبدیل شاخص CIRE به شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ انتخاب شدند.

با توجه به نزدیک بودن مقادیر ضرایب رگرسیونی مدل‌های مختلف، به منظور اطمینان بیشتر از صحت انتخاب شاخص CIRE و مدل‌های رگرسیون چند جمله‌ای، نتایج دیگر مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه Forward و Backward نیز بررسی شد. در ادامه از معیارهای ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ناش – ساتکلیف (NS) و کلینگ – گوپتا (KGE) برای ارزیابی مدل‌ها و مقایسه نتایج استفاده شد. نتایج این ارزیابی در جدول شماره ۵ ارائه شده است. همانگونه که در این جدول نشان داده شده است، هر سه

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

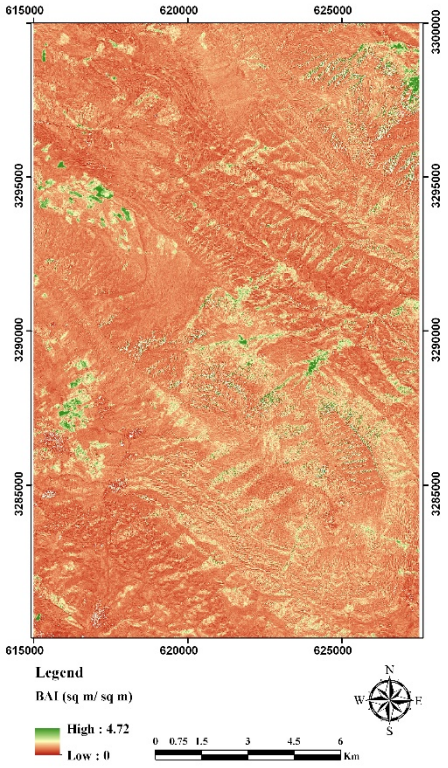
جدول ۵- ارزیابی مدل‌های رگرسیونی با استفاده از معیارهای ارزیابی

(PR: مدل رگرسیون چند جمله‌ای، F: مدل رگرسیون خطی چندگانه Forward، B:مدل رگرسیون خطی چندگانه Backward)

Table 5. Assessment of regression model using evaluation criteria

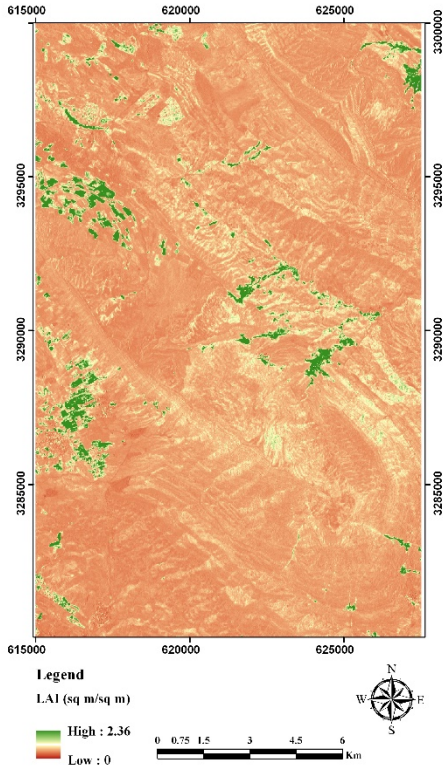
(PR: Polynomial Regression, F: Multiple Linear Regression-Forward, B: Multiple Linear Regression-Backwars)

معیارهای ارزیابی evaluation criteria	شاخص سطح شاخه(BAI) Branch Area Index (BAI)			شاخص سطح برگ(LAI) Leaf Area Index (LAI)		
	PR	F	B	PR	F	B
RMSE	0.047	0.058	0.051	0.161	0.184	0.169
NS	0.823	0.743	0.803	0.933	0.912	0.926
KGE	0.876	0.805	0.852	0.951	0.936	0.948



شکل ٤- نقشه شاخص سطح شاخه در منطقه مورد مطالعه

Fig 4. Branch area index map in study area



شکل ۵- نقشه شاخص سطح برگ در منطقه مورد مطالعه

Fig 5. Leaf area index map in study area

معیار ارزیابی، برتری روش رگرسیون چند جمله‌ای و شاخص CIRE در برآورد هر دو پارامتر، یعنی شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ را تایید می‌کند. پس از اطمینان از انتخاب شاخص گیاهی، نقشه شاخص سطح شاخه و نقشه شاخص سطح برگ منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل‌های مربوطه ترسیم شد (شکل٤ و ٥).

در گام آخر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و آنالیزهای مربوط به آن، متوسط حداکثر ظرفیت ذخیره شاخه‌ها و برگ‌ها بدست آمد و در ادامه با استفاده از معادلات ۱ و ۲، حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش در فصل خزان و فصل بهار به صورت جداگانه محاسبه شد. خلاصه آمار توصیفی نتایج آزماشگاهی در جدول شماره ٦ و نقشه ظرفیت ذخیره تاج پوشش در فصل خزان و بهار به ترتیب در شکل‌های ٦ و ٧ ارائه شده است.

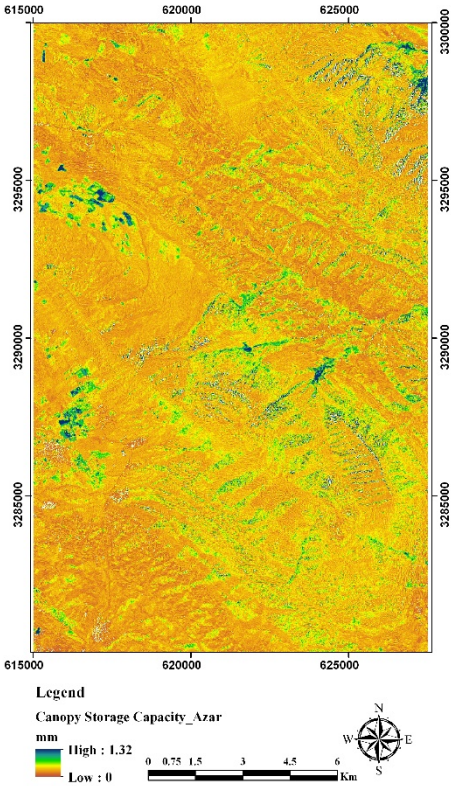
[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

جدول ٦- خلاصه آمار توصیفی اندازه‌گیری حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش

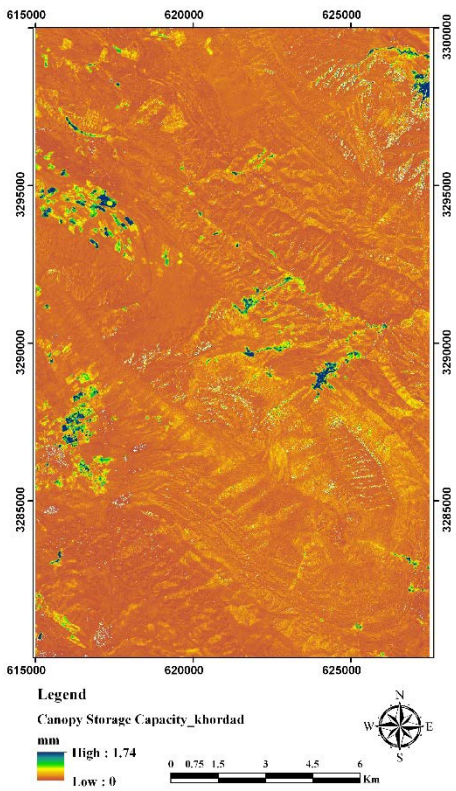
Table 6. Summary of descriptive statistics for measuring the maximum canopy storage capacity

نوع نمونه Sample type	تعداد نمونه Number of samples	میانگین ظرفیت ذخیره (میلی‌متر در واحد سطح) Average of storage capacity(mm per surface unit)	انحراف معیار Standard deviation	خطای استاندارد Standard Error
نمونه شاخه‌ها Branches	100	0.287	0.02	0.002
نمونه‌برگ‌ها leaves	58 (580 leaves)	0.171	0.03	0.004



شکل ٦- نقشه حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش در فصل خزان

Fig 6. Map of the maximum canopy storage capacity in spring



شکل ٧- نقشه حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش در فصل بهار

Fig 7. Map of the maximum canopy storage capacity in fall

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، در ابتدا سعی شد تا قابلیت باندهای باریک لبه قرمز ماهواره سنتینل- ٢ به عنوان رویکردی موثر در تهیه نقشه توزیع مکانی شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ ارزیابی شود. باندهای لبه قرمز در واقع فصل تمایز منحنی رفتار طیفی گیاهان در مقایسه با سایر عوارض طبیعی و مصنوعی است. برای این کار شاخص‌های گیاهی مختلفی مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های گیاهی می‌توانند به صورت کلی، از باندهای پهن و یا باندهای باریک تهیه شوند. شاخص‌های مستخرج از باندهای پهن، به علت انجام میانگین‌گیری طیفی در محدوده وسیع‌تری از طیف الکترومغناطیس، محتوای اطلاعاتی کمتری را در مقایسه با باندهای باریک لبه قرمز عرضه خواهند کرد [١].

همانگونه که در بخش نتایج بیان شد، برای انتخاب بهترین شاخص گیاهی جهت برآورد شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ، از مدل‌های رگرسیون چند جمله‌ای و رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد. با توجه به ضرایب رگرسیونی مدل‌های مختلف، شاخص CIRE به عنوان بهترین شاخص گیاهی برای برآورد هر دو پارامتر یعنی شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ انتخاب شد. اگرچه

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

شاخص گیاهی انتخاب شده برای برآورد هر دو پارامتر یکی بود، اما مدل‌های انتخاب شده و توابع آن‌ها با یکدیگر فرق داشت؛ بطوری‌که در برآورد شاخص سطح شاخه از معادله خطی و در برآورد شاخص سطح برگ از معادله درجه ۳ استفاده شد. معیارهای ارزیابی مدل نیز انتخاب مدل مورد استفاده را تایید می‌کرد.

هابودان و همکاران[1] [۱۱] بیان داشتند که رابطه یکتایی بین پارامترهای گیاهی و شاخص‌های گیاهی وجود ندارد. هر کدام از مدل‌های ایجاد شده، تابعی از مقدار بازتاب طیف الکترومغناطیس هستند که می‌توانند در مقیاس مکان و زمان تغییر کرده و معادلات جدیدی را به همراه داشته باشد. بنابراین با تغییر شرایط، لازم است معادلات جدیدی تعریف شود. بهی‌فر و همکاران [۲] در بررسی عملکرد شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی در مقادیر مختلف شاخص سطح برگ نشان دادند که شاخص‌های CIRE و CIG در مقایسه با سایر شاخص‌ها، بهترین عملکرد را داشته و حساسیت کمتری به اشباع از خود نشان داده‌اند.

شاخص CIRE از جمله شاخص‌هایی است که در ساختار آن از باندهای باریک لبه قرمز (باندهای ۵ و۷) استفاده شده است. باندهای لبه قرمز در محدوده ۶۷۰ تا ۶۸۰ نانومتر به رفتار جذبی کلروفیل حساس هستند [۸]. با افزایش مقدار کلروفیل، شیب موقعیت لبه قرمز به سمت طول موج‌های بلندتر متمایل می‌شود. عریض شدن عارضه جذبی کلروفیل، موجب حساسیت طول موج‌های ۶۹۰ تا ۷۳۰ نانومتر به تغییرات کلروفیل می‌شود. بنابراین با در اختیار داشتن شاخص‌های پوشش گیاهی که از باندهای لبه قرمز با موقعیت‌های متفاوت استفاده می‌کنند، می‌توان نسبت به شناسایی پوشش گیاهی در دوره‌های مختلف رویش اقدام کرد [۶].

علاوه بر این، باندهای لبه قرمز از نظر طیفی در حد فاصل بین طول موج قرمز و مادون قرمز نزدیک واقع شده‌اند. در محدوده قرمز طیف الکترومغناطیس، کلروفیل، جذب شدیدی دارد. در محدوده مادون قرمز نزدیک، ساختار سلول‌های برگ، موجب بازتاب شدید می‌شوند. تغییر از جذب شدید به بازتاب حداکثر، در محدوده لبه قرمز طیف الکترومغناطیس اتفاق می‌افتد. تاثیر توام جذب و بازتاب در این ناحیه می‌تواند سبب به تاخیر افتادن اشباع شاخص‌های مبتنی بر باندهای لبه قرمز در مقادیر بالای شاخص سطح برگ شود [۲]. بولکاک و جوایت[2] [۴]، سیباندا و همکاران[3] [۲۰، ۲۱] و ایمران و همکاران[4] [۱۳] در تحقیقات خود به برتری شاخص‌های منتج از باندهای باریک لبه قرمز اشاره کرده‌اند.

در ادامه بر اساس مدل‌های بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی، نقشه حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش در فصل خزان و بهار تهیه شد. با توجه به نقشه‌های تهیه شده، مقادیر بالای شاخص سطح شاخه و شاخص سطح برگ و به تبع آن حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش، بیشتر در اراضی حاشیه رودخانه‌ها و آبراهه‌های فصلی دیده شد. این موضوع را می‌توان تراکم بالای درختان در کنار رودخانه‌ها به دلیل فراهم بودن شرایط رطوبتی موجود دانست. همچنین ظرفیت ذخیره‌سازی بالای تاج‌پوشش در این مناطق نشان می‌دهد که درصد قابل‌توجهی از باران در دقایق اولیه بارش، توسط تاج پوشش گیاهان جذب خواهد شد.

اگرچه مطالعات اندکی بر روی بررسی ظرفیت ذخیره‌سازی آب گیاهان در مقیاس گسترده انجام شده‌است، اما برخی از پژوهش‌های مشابه که بر روی گونه‌های منفرد و در مقیاس محدود انجام شده بود، نشان داده‌اند که ظرفیت ذخیره‌سازی آب در گیاهان، به طور عمده با شرایط تاج پوشش مرتبط است [۲۷]. وانگ و همکاران[5] [۲۶] دریافتند که ظرفیت نگهداری آب تاج پوشش همبستگی بالایی با سطح شاخه و برگ دارند. گونه‌های بزرگ‌تر با سطح شاخ و برگ بیشتر، قادر به ذخیره بیشترِ آب بودند. گارسیا استرینگانا و همکاران[6] [۹] نشان دادند که مهمترین عامل تعیین ظرفیت نگهداری آب در گیاهان، ساختار فیزیولوژیکی شاخه‌ها و برگ‌ها است.

حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی محاسبه‌شده تاج پوشش در این مطالعه، حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی آب در شرایط ایده‌آل است. در بسیاری از موارد، ظرفیت واقعی ذخیره‌سازی تاج پوشش، نمی‌تواند به حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی آب برسد.

نتایج حاصل از مطالعه لورنز و گالارت[7] [۱۷] نشان داد که ظرفیت ذخیره تاج پوشش گیاهی اندازه‌گیری شده با استفاده از روش حجمی، کمی بیشتر از روش مستقیم بارندگی است، چرا که جذب آب، به ویژه توسط بافت چوبی پوشش گیاهی، به صورت اجتناب‌ناپذیری منجر به جذب آب بیشتر توسط نمونه‌ها نسبت به بارش‌های طبیعی خواهد شد.

با توجه به فرضیات مدل، بازتاب طیف الکترومغناطیسی در فصل خزان به دلیل ریزش برگ‌ها فقط مربوط به بازتاب شاخه‌های تاج پوشش است. در فصل بهار، این بازتاب مربوط به بازتاب سطح برگ‌ها است. با توجه به عدم نفوذ سنجش از دور اپتیک در عمق، حضور برگ‌ها در سطح تاج‌پوشش، اجازه بازتاب شاخه‌های پوشیده شده از برگ‌ها را نخواهند داد. اما حضور شاخه‌های تاج پوشش نقش مهمی در جذب بارش و ذخیره آن دارند. بنابراین برای محاسبه حداکثر ظرفیت ذخیره تاج‌پوشش، از مجموع ظرفیت ذخیره برگ‌ها و شاخه‌ها استفاده شده است. اگر چه این مسئله در پاره‌ای از موارد می‌تواند با خطاهایی نیز همراه باشد، اما تاثیر معنی‌داری در تغییر نتایج کلی نخواهد داشت.

در پایان می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از شاخص‌های گیاهی منتج از باندهای باریک لبه قرمز سنتینل -۲، در برآورد دقیق پارامترهای گیاهی مورد استفاده برای کاربردهای هیدرولوژی از

1. Haboudane et al.
2. Bulcock and Jewitt
3. Sibanda et al.
4. Imran rt al.
5. Wang et al.
6. Garcia- Estringana et al
7. Lorens and Gallart

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]
[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

جمله مدل‌سازی حداکثر ظرفیت ذخیره تاج پوشش، می‌تواند بسیار سودمند باشد. همچنین علی‌رغم نادیده گرفتن نقش تاج پوشش گیاهی در فصل خزان در بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی، حضور شاخه‌های عاری از برگ‌ها می‌تواند ظرفیت قابل توجهی از ذخیره آب باران را در مقایسه با شرایط فصل بهار داشته باشد.

منابع

1. Abkar, A. Safdarinejad, A. R. Zamani, M. Sofbaf, R. Gholami, N. and Ghaffari, O. 2016. Analyzing and Modeling of Correlation between LAI and Vegetation Indices using Spectroradiometric Observations. Iranian Journal of Remote Sensing & GIS. 7(2): 69-88. (In Persion)

2. Behifar, M. Azadbakht, M. Hadadi, F. and Matkan, A. 2019. Investigation of the saturation effect of vegetation indices in LAI estimation of crops. Iranian Journal of Remote Sensing & GIS. 11(1): 33-48. (In Persion)

3. Beven, K. J. 2011. Rainfall-Runoff modelling: the primer. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 488 p.

4. Bulcock, H. and Jewitt, G. 2010. Spatial Mapping of Leaf Area Index Using Hyperspectral Remote Sensing for Hydrological Applications with a Particular Focus on Canopy Interception. Hydrology and Earth System Sciences, 14 (2): 383–392.

5. Calder, I.R. 1996. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two layer stochastic model. Journal of Hydrology, 170: 79-86.

6. Cho, M.A. Skidmore, A.K. and Atzberger, C. 2008. Towards red-edge positions less sensitive to canopy biophysical parameters for leaf chlorophyll estimation using properties optique spectrales des feuilles (prospect) and scattering by arbitrarily inclined leaves (sailh) simulated data. International Journal of Remote Sensing. 29(8): 2241–2255.

7. Darvishzadeh, R. Skidmore, A. K. Atzberger, C. and Stip van W. 2008. Estimation of vegetation LAI from Hyperspectraal Reflectance data: Effects of soil type and plant architecture. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10(3): 358-373. (In Persion)

8. Dawson, T.P. Curran, P.J. North, P.R.J. and Plummer, S. E. 1999. The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: A theoretical analysis. Remote Sensing of Environment. 67(2): 147-159.

9. Garcia-Estringana, P. Alonso-Blázquez, N. and Alegre, J. 2010. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. Journal of Hydrology. 389(3-4): 363–372.

10. Golnarkar S. Pourreza Bilondi, M. Khashei Siuki, A. and Amirabadizadeh M. 2017. Assessment of Basin Hydrological Components by Modified Conceptual Continuous Rainfall-runoff scs-cn. Journal of water and soil conservation (Journal of agricultural sciences and natural resources). 24(1): 1-23. (In Persion)

11. Haboudane, D. Tremblay, N. Miller, J.R. and Vigneault, P. 2008. Remote estimation of crop chlorophyll content using spectral indices derived from hyperspectral data. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. 46(2): 423-437.

12. Horton, R.E. 1919. Rainfall interception. Monthly Weather Review. 47: 603–623.

13. Imran, A. Khan, K. Ali, N. Ahmad, N. Ali, A. and Shah, K. 2020. Narrow band based and broadband derived vegetation indices using Sentinel-2 Imagery to estimate vegetation biomass. Global Journal of Environmental Science and Management. 6(1): 97-108

14. Jewitt, G. P. W. 2005. Water and forests. In: ed. Anderson, M.G. Encyclopedia of Hydrological Science, John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, UK, 186: 1–15.

15. Jonckheere, I. Fleck, S. Nackaerts, K. Muys, B. Coppin, P. Weiss, M. and Baret, F. 2004. Review of Methods for in Situ Leaf Area Index Determination. Part I. Theories, Sensors and Hemispherical Photography. Agricultural and Forest Meteorology. 121 (1–2): 19–35.

16. Leonard R.E. 1965. Mathematical theory of interception. In Forest Hydrology. Sopper WE, Lull HW (eds). Pergamon: Oxford; 131–136.

17. Lorens, P. and Gallart, F. A. 2000. Simplified method for forest water storage capacity measurement. Journal of Hydrology. 240(2): 131–144.

18. Macnae, W. A. 1969. General Account of the Fauna and Flora of Mangrove Swamps and Forests in the Indo-West-Pacific Region. Advances in Marine Biology, vol. 6, Johannesburg: University of the Witwatersrand. 73–270.

19. Savenije, H.H.G. 2004. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. Hydrological Processes. 18(8): 1507-1511.

20. Sibanda, M. Mutanga, O. and Rouget, M. 2017. Testing the Capabilities of the New WorldView-3 Spaceborne Sensor's Red-Edge Spectral Band in Discriminating and Mapping Complex Grassland Management Treatments. International Journal of Remote Sensing. 38 (1): 1–22.

21. Sibanda, M. Mutanga, O. Dube, T. Vundla, T.S. and Mafongoya. P. 2019. Estimating LAI and mapping canopy storage capacity for hydrological applications in wattle infested ecosystems

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

using Sentinel-2 MSI derived red edge bands. GIScience & Remote Sensing. 56(1): 68-86.

22. Sprintsin, M. Karnieli, A. Berliner, P. Rotenberg, E. Yakir, D. and Cohen, S. 2007. The effect of spatial resolution on the accuracy of leaf area index estimation for a forest planted in the 25 desert transition zone. Remote Sensing of Environment. 109(4): 416–428.

23. Uyanık, G. and Güler, N. 2013. A Study on Multiple Linear Regression Analysis. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 106: 234-240.

24. Van Dijk, A.I.J.M., and Bruijnzeel, L.A. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an updated analytical model. Part 1. Model description. Journal of Hydrology. 247: 230-238.

25. Verrelst, J. Malenovský, Z. and Van der Tol, C. 2019. Quantifying Vegetation Biophysical Variables from Imaging Spectroscopy Data: A Review on Retrieval Methods. Surveys in Geophysics. 40(3): 589–629.

26. Wang, L. Chang, Q. Yang, J. Zhang, X. and LI, F. 2018. Estimation of Paddy Rice Leaf Area Index Using Machine Learning Methods Based on Hyperspectral Data from Multi-year Experiments. PloS One. 13(12): e0207624.

27. Wang, X.P. Zhang, Y.F. Hu, H. Pan, Y.X. Berndtsson, R. 2012. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. Journal of Hydrology. 454, 152–159.

28. Wietzke, L. M. and Zimmermann. A. 2014. Estimating Canopy Water Storage Capacity: What Do We Really Know? EGU General Assembly Conference Abstracts. In EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 16. 2014

29. Wirion, C. K. Ho, N. Bauwens, W. and Verbeiren, B. 2015. Using Remote Sensing to Describe Urban Surface Properties for Improved Hydrological Modelling. International Urban Drainage Modelling Conference. Mont-Sainte-Anne, Quebec, Canada.

30. Zhao, J. Li, J. and Liu, Q. 2013. Analysis on inversion saturation of leaf area index based on muti-layer models. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International. IEEE. 3048-3051.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 17, No. 61, Summer 2023
سال هفدهم- شماره ٦١- تابستان ١٤٠٢

Spatial Modeling of Maximum Capacity Values of Rainfall Retention by Vegetation Cover (A New Approach for Hydrological Applications)

A. H. Parsamehr[1], A. Salajegheh[2], Sh. Khalighi Sigaroodi[3] and Kh. Ahmadaali[4]
Received: 23-12-2022 Accepted: 12-03-2023

Abstract

The maximum canopy storage capacity is an important parameter in hydrological models. The aim of the present study, which was conducted in a region of Fars province, was to model the maximum canopy storage capacity for storing rainfall. Therefore, the parameters of leaf area index and branch area index were used as a pattern of the vertical distribution of canopy. Additionally, the ability of 10 vegetation indices produced from narrow- red edge bands compared to 10 vegetation indices produced from broad bands that resulted from Sentinel-2 satellite imagery in estimating branch and leaf area indices was investigated. Subsequently, using sampling in autumn and spring seasons, laboratory results and regression models, maps of maximum canopy storage capacity were drawn for these seasons. The results showed that the CIRE index, which was produced from narrow- red edge bands, was able to estimate both branch area index (R2=0.74) and leaf area index (R2=0.92) values very well and was the best index. Additionally, the modeling results of maximum canopy storage capacity showed that this capacity varied from zero to 1.32 mm per pixel in autumn and from zero to 1.74 mm per pixel in spring.

Keywords: Hydrological modelling, Maximum canopy storage capacity, Sentinel-2 image, Vegetation index.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-17]

[DOR: 20.1001.1.20089554.1402.17.61.7.1]

1- PhD. Student of Watershed Science and engineering, Faculty of Natural Resources, Department of Reclamation of Arid and Mountanous Region, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Corresponding Author and Professor, Faculty of Natural Resources, Department of Reclamation of Arid and Mountanous Region, University of Tehran, Tehran, Iran. E_mail:salajegh@ut.ac.ir
3, 4 -Associate Professor and Assistant Professor Respectively, Faculty of Natural Resources, Department of Reclamation of Arid and Mountanous Region, University of Tehran, Tehran, Iran.