

# ارزش‌گذاری اقتصادی مناطق مختلف زوال بلوط در جنگل‌های زاگرس با استفاده از تصاویر سنتینل-۲

زهره بازوند<sup>۱</sup>، کامران عادل<sup>۲\*</sup>، جواد سوسنی<sup>۳</sup>، علی اصغر تراهی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

bazvand.zo@fa.lu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

adeli.k@lu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

soosani.j@lu.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار، گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

atorahi@khu.ac.ir

(دریافت: آبان ۱۴۰۲، تصویب: آذر ۱۴۰۲)

## چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر زوال درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) بر ذخیره کربن و ارزش اقتصادی آن در جنگل‌های زاگرس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در جنگل‌های کوه‌دشت استان لرستان انجام شد. برای انجام این مطالعه، داده‌های سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ مربوط به تاریخ ۲۵ خرداد ۱۴۰۰ استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری زمینی زی‌توده تعداد ۲۵۰ قطعه‌نمونه مربعی شکل با ابعاد ۲۰×۲۰ متر به روش منظم-تصادفی با ابعاد شبکه ۳۰۰×۲۰۰ متر برداشت و متوسط قطر تاج کلیه درختان اندازه‌گیری شد و در نهایت میزان زی‌توده روی زمینی برای هر قطعه‌نمونه محاسبه گردید. برای مدل‌سازی زی‌توده روی زمینی جنگل از روش آماری رگرسیون چندمتغیره، شبکه عصبی مصنوعی، k-نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد. به‌منظور ارزش‌گذاری میزان کربن ذخیره شده از میانگین نرخ گزارش‌شده برای هر تن گاز دی‌اکسید کربن جذب‌شده (۵۴ یورو) استفاده شد و با استفاده از رابطه میان میزان زی‌توده و میزان کربن ذخیره شده و به طبع آن میزان گاز دی‌اکسید کربن جذب‌شده، نقشه ارزش اقتصادی میزان کربن ذخیره شده (از لحاظ جذب دی‌اکسید کربن) تهیه شد. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون خطی چندمتغیره با  $R^2=0.73$  و  $RMSE(\%)=21/88$  بهترین مدل برای منطقه مورد مطالعه است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان از کارایی مناسب تصویر سنتینل-۲ جهت برآورد زی‌توده روی زمینی در جنگل‌های زوال یافته زاگرس دارد. همچنین نتایج ارزش‌گذاری اقتصادی موجودی کربن به لحاظ خدمت جذب دی‌اکسید کربن نشان داد که هر هکتار از جنگل‌های منطقه از نظر کارکرد جذب دی‌اکسید کربن از ارزشی معادل با ۲۵۴۷/۱۲ میلیون ریال برخوردار است. نتایج حاصل از ارزش‌گذاری اقتصادی مناطق زوال یافته نشان می‌دهد که هر چقدر شدت زوال بیشتر شود ارزش اقتصادی کاهش می‌یابد، به طوری که بالاترین حداکثر ارزش مربوط به منطقه سالم و پایین‌ترین مربوط به منطقه با زوال شدید است. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان با استفاده تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، نقشه میزان زی‌توده مناطق زوال یافته را با دقت مناسبی تهیه نمود و به‌عنوان نقشه پایه در تصمیم‌گیری‌ها، عملیات احیایی و مراقبتی جنگل و ارزش‌گذاری اقتصادی این منابع ارزشمند، بهره برد.

**واژگان کلیدی:** سنتینل-۲، جنگل زاگرس، زوال بلوط، زی‌توده روی زمینی، ذخیره کربن، ارزش اقتصادی

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، زوال یا خشکیدگی جنگل‌ها یکی از مسائل نگران‌کننده در جنگل‌های زاگرس شده و به نظر هر روز بیشتر شدت آن افزایش می‌یابد [۲۰۱]. گونه‌ی بلوط به طور گسترده در اکثر نواحی زاگرس وجود دارد و می‌توان گفت که این درختان بلوط نماینده‌ای برجسته از این جنگل‌ها هستند [۳]. زوال و خشکیدگی در درختان بلوط به علت عوامل متعددی ایجاد می‌شود [۴]. برخی پژوهشگران عواملی مثل دخالت مداوم انسان در جنگل‌ها را به عنوان عامل مستعدکننده معرفی کرده‌اند، در حالی که عواملی مانند شرایط اقلیمی و وقوع آفات و بیماری‌ها نیز به عنوان عوامل شروع‌کننده تأثیرگذار هستند [۵،۶،۷]. تغییرات طولانی‌مدت در شرایط اقلیمی نیز زوال جنگل‌ها را تسریع می‌کند، و یکی از مهم‌ترین عوامل این تغییرات، افزایش گازهای گلخانه‌ای است [۸]. گاز دی‌اکسید کربن به عنوان یک گاز گلخانه‌ای مسئول ۶۰ درصد از افزایش دمای جهانی و پدیده‌های گلخانه‌ای است [۹]. غلظت دی‌اکسید کربن در جو افزایش مضاعفی را نشان می‌دهد. به طور خاص، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو از حدود ۲۸۰ ppm (در سال ۱۸۸۰) به حدود ۳۹۸/۲۸ ppm (در سال ۲۰۲۲) افزایش یافته‌است. این افزایش قابل توجه به دلیل مصرف گسترده‌ای از سوخت‌های فسیلی به وجود آمده‌است [۱۰].

رهیافت ذخیره کربن یکی از اصول مدیریتی مهم در جهت کاهش تأثیرات مخرب انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این ره‌یافت به معنای ذخیره‌سازی و کنترل انتشار دی‌اکسید کربن از منابع مختلف مانند جنگل‌ها و خاک، به منظور کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و جلوگیری از افزایش دمای جهانی استفاده می‌شود [۱۱]. به طور کلی، ذخیره کربن به معنای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و انباشت آن در محیط‌های طبیعی می‌باشد و نقش مهمی در مدیریت تغییرات اقلیمی و حفاظت از محیط‌زیست دارد [۱۲].

گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) که به ویژه در استان لرستان و مناطق دیگر ایران وجود دارد، یکی از اصلی‌ترین درختانی است که در تأمین آب، حفظ خاک، تنظیم آب و هوا، و حتی تعادل اقتصادی-اجتماعی کشور نقش بسیار مهمی دارد. این درختان نقش عمده‌ای در ذخیره کربن دارند. با توجه به سطح تاج پوشش بیشتر و غالبیت اکولوژیک این گونه‌ها در هر منطقه، آن‌ها نقش

اصلی در ذخیره کربن در اکوسیستم‌های خود ایفا می‌کنند [۱۳]. به عبارت دیگر، گونه بلوط ایرانی به عنوان یکی از گونه‌های اصلی با غلبه بالایی (بیشتر از ۹۰ درصد)، یکی از مهمترین منابع ذخیره کربن در جنگل‌های طبیعی مناطق زاگرس ایران به شمار می‌آید. از طرف دیگر، گونه بلوط ایرانی به عنوان یکی از گیاهان اقتصادی، اکولوژیکی و ارزشمند جنگل‌های زاگرس شناخته می‌شود. اما متأسفانه در سال‌های اخیر، این گونه به دلیل پدیده‌هایی مانند زوال و خشکیدگی تحت تأثیر قرار گرفته و نیاز به مدیریت و حفاظت جدی‌تر دارد [۹].

زوال درختان مناطق جنگلی می‌تواند به کاهش ذخیره کربن منجر شده و در نتیجه پیامدهای زیست محیطی و مشکلات مرتبط با تغییرات اقلیمی را ایجاد کند [۱۴]. ارزیابی و برآورد زی‌توده روی زمینی جنگل به عنوان یک ابزار کلیدی در درک چرخه جهانی کربن مورد توجه قرار گرفته‌است. این برآورد میزان زی‌توده جنگل و در نهایت ذخیره کربن می‌تواند با استفاده از روش‌های میدانی و یا با استفاده از فناوری‌های سنجش از دوری و سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت گیرد [۳]. به این ترتیب، استفاده از فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان روشی کارآمد و کاربردی در ارزیابی و مدیریت جنگل‌ها برای حفظ ذخیره کربن و مقابله با تغییرات اقلیمی تلقی می‌شود.

ژانگ و همکاران [۱۵] در برآورد زی‌توده جنگل با استفاده از تصاویر نوری و SAR در شهر Kunming در جنوب غربی چین و استفاده از الگوریتم‌های جنگل تصادفی (RF) و k نزدیک‌ترین همسایه (KNN) برای برآورد زی‌توده جنگل گزارش کردند که ترکیب ویژگی دو تصویر نوری و تصویر SAR بالاترین دقت برآورد را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی دارد. اینکولو و همکاران [۱۶] اطلاعات پوشش درختی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS برای برآورد ذخیره کربن در سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ در منطقه کلمبیا - سایپرز انجام شد. نتایج نشان داد که ذخایر کربن زی‌توده از ۱۵ به ۱۸ درصد افزایش یافته و همین‌طور سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی ابزاری مناسب برای امکان ارزیابی سریع میزان موجودی کربن زمینی در مناطق وسیع می‌باشد. استرادا و همکاران [۱۷] به ارزیابی اقتصادی خدمات اکوسیستم مانگروها در جنوب شرقی برزیل در زمینه ذخیره کربن پرداختند و نتایج موید ارزش اقتصادی

بالای ذخیره‌سازی کربن بود. عسگری و همکاران [۱۴] در یاسوج نشان دادند که زی‌توده کل درختان جنگلی دانه زاد در حدود ۹۸۲ تن و درختان جنگلی شاخه زاد تقریباً ۳۴۷ تن کربن در هکتار است و ارزش تخمینی ذخیره کربن در درختان قطع شده از طبیعت برای جاده یاسوج بیش از ۲/۳ میلیارد ریال (۲۳ میلیون ریال) بوده است. جعفرزاده و همکاران [۱۸] در پژوهشی نشان دادند که کل ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی جنگل‌ها برای حوضه آبخیز میشخاص شهرستان ایلام در حوالی ۵۴۹/۵ میلیارد ریال است و همچنین ارزش اقتصادی سالانه برای هر هکتار از این جنگل‌ها ۹/۳۷ میلیون ریال بود.

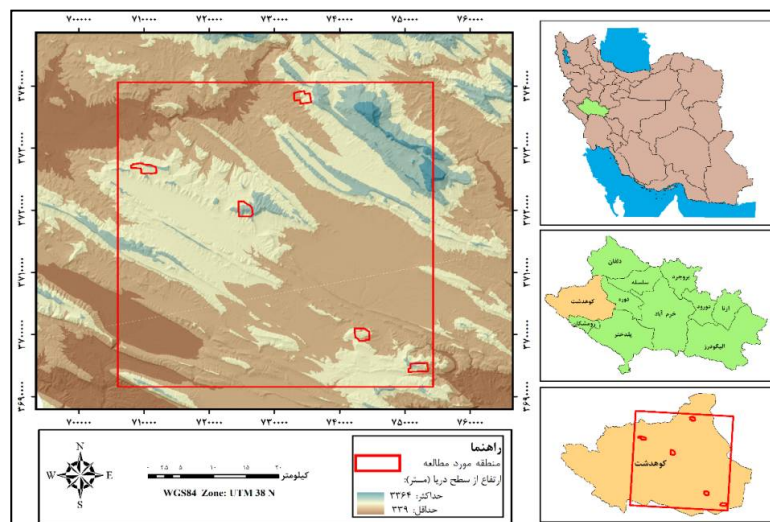
براساس مطالب فوق می‌توان اظهار داشت که کمی‌سازی، ارزش‌گذاری و قیمت‌سنجی میزان کربن ذخیره شده در جنگل به عنوان اقدامات حیاتی در رابطه با بحران گرمایش زمین بسیار اهمیت دارند. در دو دهه گذشته، تعداد زیادی مطالعه در این زمینه انجام شده است، اما یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه، نقشه‌برداری الگوی فضایی و توزیع میزان کربن ذخیره شده در جنگل و سپس ارزش‌گذاری مکانی این کارکرد مهم در بخش گیاهی و خاک جنگل است [۱۹]. این اطلاعات می‌تواند در برنامه‌ریزی موثر برای حفاظت از جنگل‌ها و استفاده پایدار از منابع آن‌ها بسیار مفید باشد. همچنین، این رویکرد به تأکید بر اهمیت مکانی ارزش‌های اکوسیستمی و نقش آن‌ها در مدیریت منابع طبیعی و حفاظت از محیط‌زیست اشاره می‌کند [۲۰]. توجه به وقوع زوال در دهه‌های گذشته در جنگل‌های زاگرس و تأثیر آن بر افت زی‌توده و توان ذخیره کربن در این مناطق، امری بسیار حیاتی است.

یکی از نقاط کلیدی در مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از این مناطق، ارزیابی دقیق زی‌توده درختان بلوط و ارزش آن‌ها در ذخیره‌سازی کربن اتمسفری می‌باشد. این اطلاعات می‌توانند به عنوان ابزار مهمی در فرآیندهای مدیریتی و تصمیم‌گیری‌های اقتصادی برای توسعه‌ی هدفمند و مدیریت پایدار در اکوسیستم‌های طبیعی مورد استفاده قرار گیرند. ارزیابی اقتصادی اثرات زوال بر کربن ذخیره شده می‌تواند کمک کند تا ارزش اقتصادی و اجتماعی حفظ جنگل‌ها در مقابل تغییرات مختلف ارزیابی و سیاست‌های مناسبی برای حفظ آن‌ها اتخاذ شود. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر زوال درختان بلوط ایرانی بر ذخیره کربن و ارزش اقتصادی آن در جنگل‌های زاگرس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در جنگل‌های کوه‌دشت استان لرستان انجام شد.

## ۲- داده‌ها و روش کار

### ۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

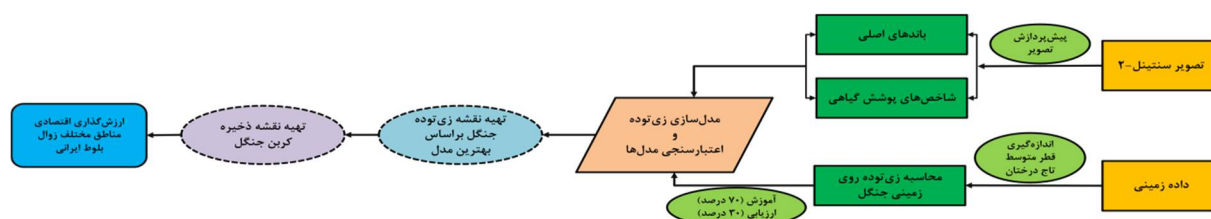
این مطالعه در شهرستان کوه‌دشت استان لرستان در پنج منطقه جنگلی با شدت زوال متفاوت (بدون زوال، کم، متوسط، زیاد، شدید) انجام شد. منطقه جنگلی پهنی با مساحت ۵۳۲۰ هکتار، منطقه جنگلی درب گنبد با مساحت ۵۵۱۳ هکتار، اشتره گل‌گل با مساحت ۵۷۸۰ هکتار، بلوران با مساحت ۵۱۹۸ هکتار و نامجو با مساحت ۵۸۵۴ هکتار در شهرستان کوه‌دشت به ترتیب شدت زوال (بدون زوال، کم، متوسط، زیاد، شدید) انتخاب شدند (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان لرستان

بر اساس اطلاعات موجود در سایت هواشناسی استان لرستان، طی دوره آماری تا پایان سال ۱۳۹۸، میانگین بارندگی سالیانه در این منطقه ۵۵۰ میلی‌متر بوده است. همچنین دمای حداکثر و حداقل سالیانه به ترتیب ۲۴/۶ و ۷/۱ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. اقلیم منطقه بر اساس طبقه بندی آمبرژه، مدیترانه‌ای سرد و حداکثر ارتفاع از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه ۲۶۱۷ متر است. منطقه مورد پژوهش به‌عنوان

بخشی از جنگل‌های ناحیه رویشی زاگرس محسوب می‌شود. در این منطقه، گونه بلوط ایرانی به‌عنوان گونه غالب جنگل‌ها واقع شده است. روند کلی چگونگی انجام یک پژوهش می‌تواند به مخاطب یک دید کلی از اجرای آن دهد. به همین منظور در شکل ۲ فرآیند گام‌به‌گام مراحل انجام پژوهش در این مطالعه آورده شده است. در بخش‌های مربوطه به هر یک از این مراحل پرداخته خواهد شد.



شکل ۲- روند نمای اجرای پژوهش حاضر

اندازه‌گیری شده در هر قطعه نمونه به‌دست آمد. در ادامه متوسط قطر تاج به‌دست آمده برای هر درخت، در معادله آلومتریک یوسفوند و همکاران [۲۱] (فرمول ۱) در جنگل مشابه، جهت محاسبه زی‌توده روی زمینی هر درخت قرار داده شد.

$$Y = 10.839X^2 - 41.683X + 65.239 \quad (1)$$

در معادله فوق،  $Y$ : زی‌توده روی زمینی بر حسب کیلوگرم و  $X$ : متوسط قطر تاج درختان یا جست‌ها بر حسب متر است. در نهایت از مجموع زی‌توده به‌دست آمده برای کلیه درختان، زی‌توده در هر قطعه نمونه محاسبه شد.

در این پژوهش سعی شد زمان اخذ داده‌های ماهواره‌ای حتی‌الامکان به تاریخ برداشت اطلاعات زمینی زی‌توده نزدیک باشد. بنابراین، یک فریم از تصویر ماهواره سنسینل-۲ مربوط به تاریخ ۲۵ خرداد ۱۴۰۰ در سطح تحصیح L2A از سایت سازمان فضایی اتحادیه اروپا دریافت شد. تصویر ماهواره سنسینل-۲ دارای ۱۳ باند طیفی با توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر که در این پژوهش باندهای ۶۰ متری (یک، نه و ده) برای ادامه تجزیه و تحلیل حذف شدند (جدول ۱).

## ۲-۲- داده‌های میدانی و ماهواره‌ای مورد استفاده

در این پژوهش، منطقه مورد مطالعه در پنج طبقه مناطق سالم، زوال کم (۲۵-۰/۱ درصد)، زوال متوسط (۵۰-۲۵/۱ درصد)، زوال زیاد (۷۵-۵۰/۱ درصد) و زوال شدید (۱۰۰-۷۵/۱ درصد) تقسیم شد. به‌منظور برداشت اطلاعات میدانی، تعداد ۲۲۴ قطعه نمونه زمینی براساس روش نمونه‌برداری تصادفی-منظم با ابعاد شبکه ۳۰۰×۲۰۰ متر در محدوده‌های طبقه‌بندی شده زوال بر روی نقشه به‌صورت نقطه‌ای طراحی شدند. برای پیاده‌سازی قطعه‌های نمونه طراحی‌شده، براساس دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) موقعیت هر یک از آن‌ها در عرصه مشخص و قطعه‌نمونه‌ها به‌صورت مربعی شکل با ابعاد ۲۰×۲۰ متر، در ماه‌های خرداد و تیر ۱۴۰۰، پیاده‌سازی و برداشت شدند. در هر قطعه نمونه قطر بزرگ و کوچک تاج درختان و یا جست‌ها بدون هیچ‌گونه محدودیت شمارشی با استفاده از متر نواری مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. به‌منظور محاسبه میزان زی‌توده روی زمینی جنگل مورد پژوهش، ابتدا متوسط قطر بزرگ و کوچک تاج هر یک از درختان یا جست‌های

جدول ۱- مشخصات داده‌های ماهواره سنتینل ۲- مورد استفاده در پژوهش

سنجنده		MSI
تاریخ		۲۰۲۰/۰۶/۱۴ (۲۵ خرداد ۱۴۰۰)
باندهای اصلی		آبی (B2)، سبز (B3)، قرمز (B4)، لبه قرمز گیاهی (B5, B6, B7)، مادون قرمز نزدیک (B8, B8A)
اندازه تفکیک		اندازه تفکیک (متر)
		باند طیفی
		B2, B3, B4, B8
		B5, B6, B8A
		۱۰
		۲۰

همسایه و شبکه عصبی مصنوعی از دسته مدل‌های ناپارامتری است که برای پیش‌بینی مقادیر نقاط ناشناخته از اطلاعات موجود در نمونه‌های مشاهده‌شده از متغیرهای مستقل استفاده می‌کند [۲۳]. در این مطالعه زیست توده به عنوان متغیر وابسته و شاخص پوشش گیاهی و باندها متغیر وابسته می‌باشند.

### ۲-۳-۳- ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی مدل‌های حاصل از روش‌های آماری رگرسیون چندمتغیره، شبکه عصبی مصنوعی و  $k$ - نزدیک‌ترین همسایه، از ۲۲۴ قطعه نمونه تعداد ۶۸ قطعه نمونه تصادفی باقی‌مانده (۳۰ درصد قطعه‌نمونه‌ها) به عنوان مجموعه ارزیابی برای اعتبارسنجی مدل‌ها به کار گرفته شدند. ارزیابی عملکرد مدل‌ها براساس معیارهای ضریب تبیین ( $R^2$ )، بون جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نسبی (RMSE%)، (فرمول‌های ۲، ۳، ۴) اعتبارسنجی شدند [۲۴].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_o)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad (4)$$

در روابط فوق‌الذکر،  $N$ : تعداد قطعه‌نمونه مورد استفاده برای ارزیابی،  $i$ : مقدار زی‌توده برآورد شده از مدل‌ها،  $y_i$ : مقدار زی‌توده روی زمینی داده‌های میدانی و  $\bar{y}$ : میانگین مقادیر زی‌توده روی زمینی اندازه‌گیری شده برای ۶۸ قطعه‌نمونه است.

پس از بررسی درستی هندسه و وضعیت رادیومتری تصویر، در پژوهش حاضر براساس شناخت از منطقه مورد مطالعه و هدف پژوهش، شاخص‌های پوشش گیاهی  $^1RVI$ ،  $^2GNDVI$ ،  $^3DVI$ ،  $^4NDVI$ ،  $^5GEMI$ ،  $^6SAVI$ ،  $^7REIP$  و  $^8S2REP$  در محیط نرم‌افزار SNAP محاسبه و در ادامه تجزیه و تحلیل‌ها به کار گرفته شدند.

### ۲-۳-۲- تجزیه و تحلیل آماری

#### ۲-۳-۲-۱- بررسی همبستگی

به منظور بررسی همبستگی بین مشخصه زی‌توده روی زمینی در قطعه‌های نمونه زمینی و داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار R و به روش تحلیل همبستگی پیرسون انجام شد.

#### ۲-۳-۲-۲- مدل‌سازی زی‌توده روی زمینی

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره به روش گام‌به‌گام، شبکه عصبی مصنوعی و  $k$ - نزدیک‌ترین همسایه، مدل‌سازی زی‌توده براساس ۷۰ درصد قطعه‌نمونه‌ها (تعداد ۱۵۶ قطعه‌نمونه)، که به صورت تصادفی انتخاب شدند، انجام شد. در مدل پارامتری رگرسیون چند متغیره، یک متغیر وابسته توسط دو یا چند متغیر مستقل برآورد می‌شود [۲۲] روش  $K$  نزدیک‌ترین

۱ Ratio Vegetation Index

۲ Green Normalized Difference Vegetation Index

۳ Difference Vegetation Index

۴ Normalized Difference Vegetation Index

۵ Global Environmental Monitoring Index

۶ Soil-Adjusted Vegetation Index

۷ Red Edge Inflection Point

۸ Sentinel-2 Red-edge Position Index

## ۲-۴- تهیه نقشه زی توده روی زمینی جنگل

در پایان، پس از ارزیابی و راستی‌آزمایی مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، بهترین مدل براساس بالاترین مقدار  $R^2$  و کمترین میزان  $RMSE(\%)$  انتخاب شد. از این مدل انتخاب شده برای تهیه نقشه زی توده روی زمینی منطقه مورد مطالعه و به‌ویژه مناطق مختلف زوال بلوط براساس تصویر سنتینل-۲ استفاده شد. تهیه نقشه ذکر شده در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

## ۲-۵- برآورد کربن ذخیره شده جنگل

در این پژوهش، جهت برآورد مقدار کربن موجود در زی توده جنگل، از ضریب ۵۰ درصد برای تبدیل زی توده خشک جنگل استفاده شد و متوسط ارزش گذاری از مطالعات مختلف به مقدار ۴۹ یورو برای هر تن گاز دی‌اکسید کربن ارائه شده است. لازم به ذکر است که هر تن کربن ذخیره شده معادل با  $3/66$  تن دی‌اکسید کربن در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. با توجه به موجودی کربن در جنگل مورد مطالعه و با استفاده از نرخ ۴۹ یورو برای هر تن گاز دی‌اکسید کربن و ضریب تبدیل  $3/66$  به موجودی کربن جنگل، ارزش دارایی هر هکتار از جنگل‌های مورد تحقیق از نظر میزان کربن ذخیره شده به یورو محاسبه شده است. سپس با توجه به نرخ رسمی یورو در ایران در سال ۱۴۰۲ که برابر با ۵۴۲۰۰ ریال بود، معادل ریالی ارزش جذب هر تن گاز دی‌اکسید کربن محاسبه گردید.

## ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل همبستگی بین زی توده روی زمینی و شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه شده از تصاویر سنتینل ۲ نشان داد که زی توده روی زمینی با شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، SAVI، RVI، DVI، GNDVI، GEMI، REIP دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد می‌باشد و این مشخصه با شاخص پوشش گیاهی S2REP همبستگی منفی در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. از بین شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، شاخص پوشش گیاهی NDVI با میزان  $0/819$  و شاخص GNDVI با میزان  $0/499$ ، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان ضریب همبستگی را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۲).

همبستگی منفی زی توده با باندهای اصلی به مفهوم رابطه معکوس بین این متغیرها می‌باشد، یعنی با افزایش مقادیر زی توده میزان بازتاب در باندهای اصلی ماهواره کاهش می‌یابد. نتیجه حاصل با مطالعات مرادی و همکاران [۱] و لو [۲۶]. همبستگی مثبت ضریب همبستگی برای بیشتر شاخص‌های پوشش گیاهی بدین معنی است که با افزایش مقدار زی توده روی زمینی در منطقه، میزان بازتاب در شاخص‌های مذکور افزایش می‌یابد. پس از مدل‌سازی زی توده روی زمینی براساس ترکیب مجموعه متغیرهای باندهای اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی تصویر سنتینل-۲ با استفاده از سه مدل رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR) به روش گام‌به‌گام، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و k-نزدیک‌ترین همسایه (KNN)، آماره‌های دقت  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $RMSE(\%)$  محاسبه شد.

جدول ۲- ضریب همبستگی بین زی توده در قطعه‌های نمونه زمینی و ارزش‌های طیفی متناظر آن‌ها در باندهای اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی

باند های اصلی و مصنوعی	r	باند های اصلی و مصنوعی	r
B2	-0/585**	B12	-0/655**
B3	-0/599**	NDVI	0/819**
B4	-0/685**	SAVI	0/816**
B5	-0/635**	DVI	0/80**
B6	-0/238**	RVI	0/773**
B7	-0/091 <sup>ns</sup>	GNDVI	0/499**
B8	-0/038 <sup>ns</sup>	GEMI	0/731**
B8a	-0/026 <sup>ns</sup>	REIP	0/767**
B11	-0/621**	S2REP	-0/756**

\*\* معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد، <sup>ns</sup> عدم معنی‌داری زی توده با داده‌های سنتینل-۲، علامت (-): همبستگی منفی و بدون علامت: یعنی همبستگی مثبت

در جدول ۳ نتایج مدل‌سازی سه مدل مورد استفاده در برآورد زی‌توده روی زمینی ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده مدل رگرسیون خطی چندمتغیره، بهترین برآورد را نسبت مدل شبکه عصبی مصنوعی و نزدیک ترین همسایه (با توجه به کمترین میزان  $RMSE\%$  و بیشترین مقدار  $R^2$ ) دارد. در این مدل رگرسیون چندمتغیره بهترین تحلیل، با میزان  $R^2$  و  $RMSE$  (%) به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۲۱/۸۸ درصد به دست آمد و برای اعتبارسنجی انتخاب شد.

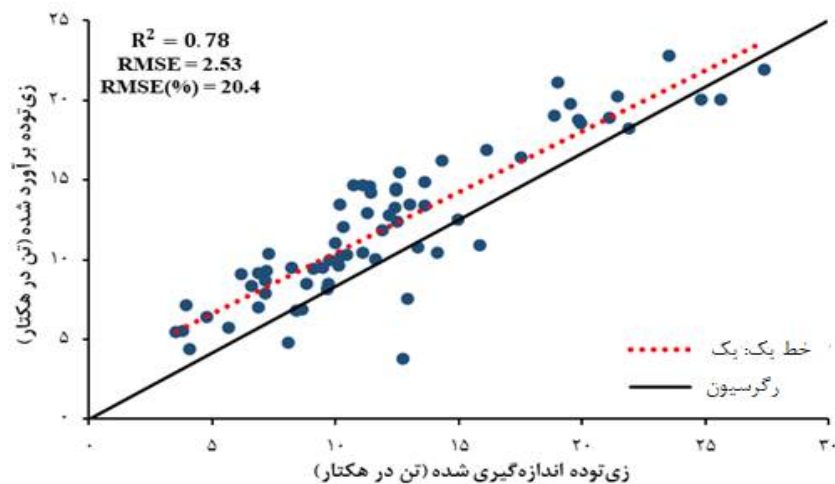
جدول ۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی سه مدل ANN، MLR و KNN در برآورد زی‌توده روی زمینی

مدل	$R^2$	RMSE (ton.ha <sup>-1</sup> )	RMSE (%)
MLR	۰/۷۳	۲/۶	۲۱/۸۸
ANN	۰/۵۹	۴/۴۱	۳۳/۱۲
KNN	۰/۷۱	۲/۷۸	۲۳/۱۸

در مطالعات هال و همکاران [۲۷]؛ و کالبی و همکاران [۹] نیز مشاهده کرد. در بهترین حالت دقت برآورد میزان زی‌توده با میزان  $R^2$  و  $RMSE$  به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۲/۶ درصد همراه است؛ که نسبت به مطالعه عطارچی و گلوآگون

[۲۸] که از تصاویر Landsat استفاده کرده‌اند و میزان  $R^2$  برابر با ۰/۵۹ به دست آمده است، از دقت بیشتری برخوردار است که از دلایل بهبود دقت کسب شده می‌توان به تفکیک مکانی بالاتر تصاویر سنتینل ۲ نسبت به تصاویر لندست و همچنین روند محاسبه میزان زی‌توده صورت گرفته در این مطالعه نسبت به روابط آلومتریک جهانی اشاره داشت.

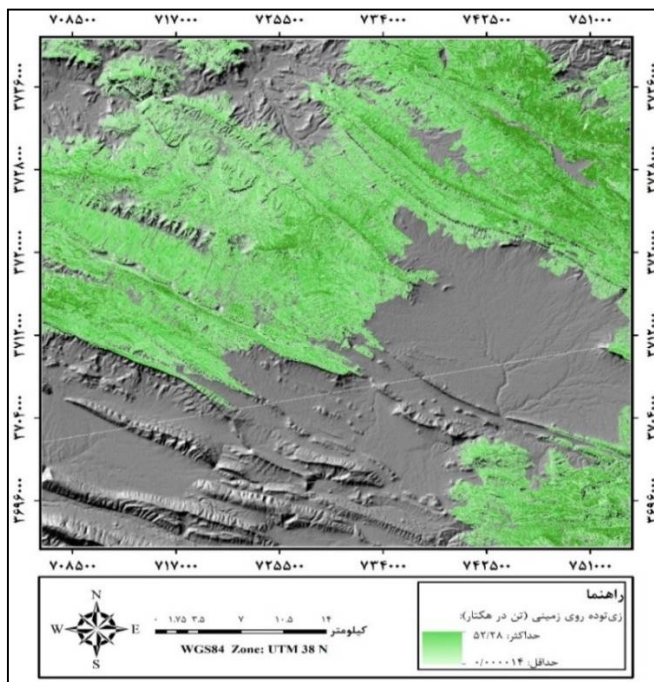
به منظور اطمینان از مدل ارائه شده جهت برآورد زی‌توده روی زمینی جنگل مورد مطالعه براساس تحلیل رگرسیون چندمتغیره خطی به روش گام‌به‌گام بین زی‌توده روی زمینی، مدل به دست آمده با استفاده از ۳۰ درصد قطعه‌نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی مدل از آماره‌های  $R^2$ ،  $RMSE$ ،  $RMSE\%$  استفاده شد؛ در مدل انتخاب شده مقادیر آماره‌های مذکور به ترتیب ۰/۷۸، ۲/۵۳ تن در هکتار و ۲۰/۴ درصد محاسبه شد. نتایج حاصل از مقادیر آماره‌های محاسبه شده نشان از کارایی تقریباً مناسب مدل انتخاب شده جهت برآورد زی‌توده روی زمینی در جنگل‌های زاگرس دارد. در شکل ۳ ابرنقاط مقادیر زی‌توده روی زمینی داده‌های اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده برای داده‌های تست ارائه شده است.



شکل ۳- مقادیر زی‌توده روی زمینی جنگل اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده

روی زمینی برای جنگل مورد مطالعه با استفاده از مدل به دست آمده براساس بسته Raster در محیط برنامه‌نویسی R تهیه شد (شکل ۴). میزان حداقل و حداکثر زی‌توده روی زمینی برای جنگل مورد مطالعه حاصل از مدل ارائه شده، به ترتیب برابر با صفر و ۵۲/۲۸ تن در هکتار می‌باشد.

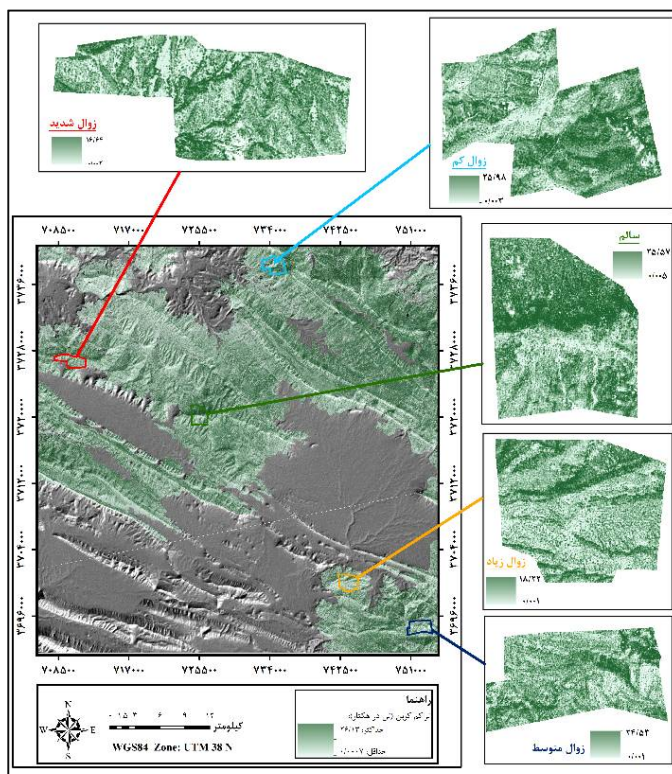
پس از ارائه مناسب‌ترین مدل حاصل از تحلیل رگرسیون چندمتغیره خطی بین زی‌توده روی زمینی در قطعه‌های نمونه و ارزش‌های طیفی متناظر با باندهای اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی داده‌های سنتینل-۲ براساس بالاترین میزان ضریب تبیین ( $R^2=0/73$ )، نقشه زی‌توده



شکل ۴- نقشه زی توده روی زمینی حاصل از مدل رگرسیون چندمتغیره برای جنگل مورد مطالعه

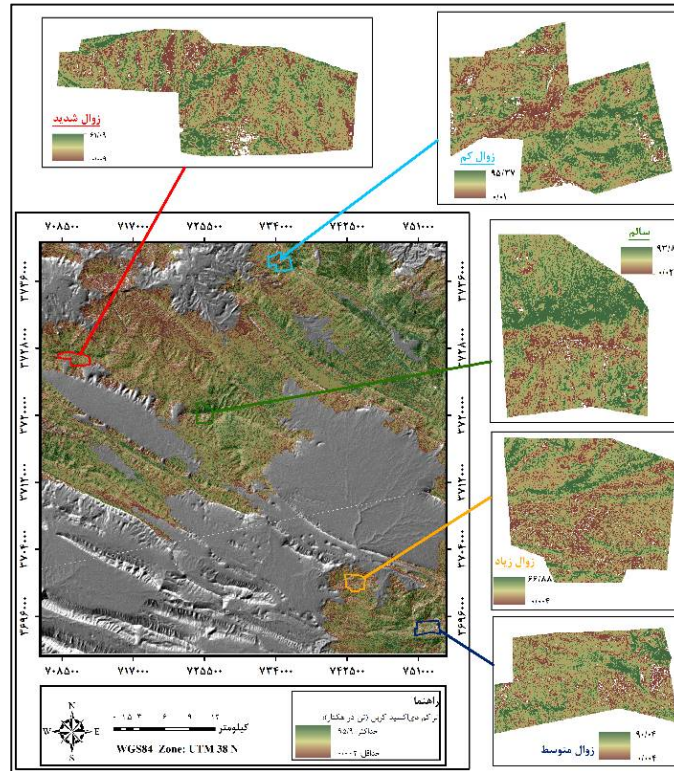
منطقه بین ۰/۰۰۰۷ تا ۲۶/۱۳ تن در هکتار است. در پژوهش حاضر هر تن کربن ذخیره یافته معادل با ۳/۶۶ تن دی اکسید کربن در نظر گرفته شد. از این رو با استفاده از نقشه موجودی کربن به دست آمده برای جنگل مورد مطالعه، نقشه گاز دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) برای منطقه جنگل و زوال های مختلف تهیه شد (شکل ۶).

برای تهیه نقشه موجودی کربن کل جنگل مورد مطالعه و در نهایت مناطق پنج گانه زوال، نقشه زی توده روی زمینی به دست آمده در میزان ۰/۵۰ ضرب شد و نقشه ذخیره کربن برای کل جنگل پژوهش و مناطق زوال در نرم افزار ArcGIS 10.8.1 تهیه شد (شکل ۵). نتایج حاصل از ذخیره کربن نشان داده که موجودی کربن برای کل



شکل ۵- نقشه موجودی کربن منطقه مورد مطالعه و شدت های زوال مختلف



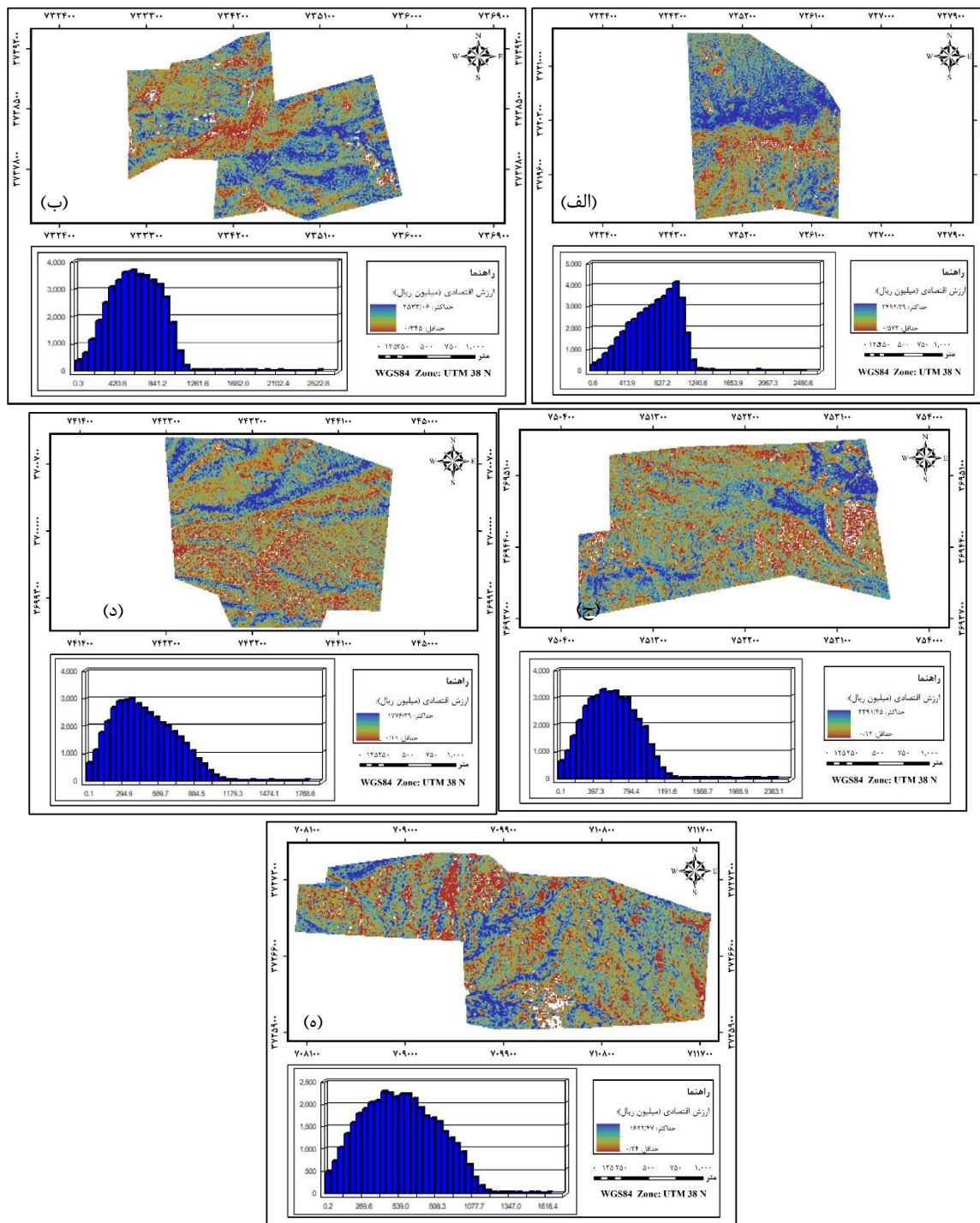


شکل ۶- نقشه دی اکسید کربن کل منطقه و مناطق با شدت زوال مختلف

کربن توسط زی توده گیاهی را حدود  $3/9$  میلیون ریال در هر هکتار در سال محاسبه کردند. همچنین، باده یان و همکاران [۴] با استفاده از روش هزینه‌های خسارت اجتناب شده و در نظر گرفتن هزینه  $27/9$  هزار ریال برای انتشار هر تن گاز دی‌اکسید کربن، ارزش کارکرد ذخیره کربن توسط زی توده روی زمین را ارزیابی کردند. نتایج نشان دادند که توده خالص راش ارزش اقتصادی معادل  $178$  هزار ریال (هکتار در سال) دارد، و همچنین عرصه توده آمیخته راش ارزشی معادل  $121$  هزار ریال (هکتار در سال) از نظر کارکرد ذخیره کربن توسط زی توده روی زمینی دارا است. عسگری و همکاران [۳۰] با استفاده از روش‌های مبتنی بر هزینه و با در نظر گرفتن میانگین نرخ مالیات گزارش شده برای انتشار هر تن کربن در دوره زمانی  $1379-1388$  (از  $113$  تا  $244$  هزار ریال)، متوسط ارزش اقتصادی جذب کربن توسط زی توده روی زمین جنگل‌های خیرودکنار شمال را حدود  $0/84$  میلیون ریال در هکتار در سال تخمین زدند. در یک برآورد دیگر، که بر اساس بررسی چندین گزارش ارزش‌گذاری کربن انجام شده بود، مشخص شد که این تغییرات در محدوده  $500$  تا  $2,000$  دلار برای هر تن کربن متغیر است [۳۰].

با استفاده از نقشه دی اکسید کربن منطقه مورد مطالعه و مناطق زوال ارزش‌گذاری شدند (شکل‌های ۷). ارزش‌داری هر هکتار از جنگل‌های مورد تحقیق به یورو در سال  $1402$  ( $542000$  ریال) با توجه به نرخ رسمی یورو در ایران، به ریال معادل ارزش جذب هر تن گاز دی‌اکسید کربن محاسبه شد. ارزش ریالی جنگل منطقه مورد پژوهش در محدوده  $0/068$  تا  $2547/12$  میلیون ریال برآورد شده‌است. نتایج حاصل از ارزش‌گذاری اقتصادی مناطق زوال یافته نشان می‌دهد که هر چقدر شدت زوال بیشتر شود ارزش اقتصادی کاهش می‌یابد، به طوری که بالاترین حداکثر ارزش مربوط به منطقه سالم و پایین‌ترین مربوط به منطقه با زوال شدید است.

لازم به ذکر است که مبلغ ذکر شده تنها از لحاظ کارکرد میزان کربن ذخیره شده منابع جنگلی محاسبه شده‌است. استاندارد جهانی برای ارزیابی قیمت کربن هنوز به صورت کامل وجود ندارند؛ به همین دلیل، قیمت‌گذاری برای انتشار کربن در مناطق، کشورها، و حتی زمان‌های مختلف متفاوت است. به عنوان مثال، در یک تحقیق انجام شده در جنگل‌های خزری، مبرقی و همکاران [۲۹] با استفاده از روش هزینه جایگزینی و با تخمین ارزش  $64$  دلار (معادل  $590$  هزار ریال) برای هر تن ذخیره کربن، ارزش ترسیب



شکل ۷- نقشه ارزش گذاری اقتصادی برای منطقه جنگلی الف (سالم، ب) زوال کم، ج) زوال متوسط، د) زوال زیاد و ه) زوال شدید

#### ۴- نتیجه گیری

است که مدل رگرسیون خطی چندمتغیره بهترین برآورد را دارد با دقت بالاتر از مدل های دیگر به اساس معیارهای  $R^2$ , RMSE و  $RMSE(\%)$ , که به ترتیب برابر با  $0.78$ ,  $2/53$  تن در هکتار و  $20/4$  درصد است. بررسی ها نشان می دهد که دقت برآورد زی توده با استفاده از این مدل رگرسیون چندمتغیره نسبت به مدل های مشابه از تصاویر Landsat بهبود یافته است. این بهبود از ناحیه تفکیک مکانی بالاتر

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ برای مدل سازی زی توده روی زمینی استفاده شده است. سه مدل رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، و k-نزدیک ترین همسایه (KNN) برای این مدل سازی به کار گرفته شده اند. نتایج حاکی از این

تصاویر سنتینل-۲ نسبت به تصاویر Landsat و روش‌های محاسبه میزان زی‌توده نشات می‌گیرد. در نهایت، با استفاده از مدل به‌دست آمده، نقشه زی‌توده روی زمینی جنگل تهیه شده و ارزش‌گذاری اقتصادی بر اساس ذخیره کربن در جنگل و مناطق زوال انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهند

که با افزایش شدت زوال، ارزش اقتصادی کاهش می‌یابد. این پژوهش به عنوان یک مقدمه برای ارزیابی اقتصادی و حساسیت‌های مرتبط با جنگل‌ها در زمینه جذب کربن و حفاظت از محیط زیست می‌تواند مفید باشد.

## مراجع

- [1] Molaei, M. & Kavooosi Kalashami, M. (2011). Estimating the preservation value of *Lilium Ledebourii* using single bounded dichotomous choice contingent valuation method. *Journal of Economy and Agricultural Development (Agricultural Sciences and Industries)*, 25(3), 322-329, (in Persian).
- [2] Mafi-Gholami D., Pirasteh S., Ellison J.C., Jaafarid A. (2021). Fuzzy-based vulnerability assessment of coupled social-ecological systems to multiple environmental hazards, *Journal of Environmental Management*. 299 (2021) 113573. doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113573.
- [3] Murphy, M., T. Balsler, N. Buchmann, V. Hahn, and C. Potvin. 2008. Linking tree biodiversity to Agriculture Sciences and Technology, *Natural Resources. Water and Soil Science*. 52:14-19.
- [4] Badehian, Z. & Mansouri, M. (2019). Comparing the economic value of market function and un-market function of some populus species. *Iranian Journal of Wood and Paper*, 10(1), 217-222, (in Persian).
- [5] Zarafshar, M., Rousta, M., Matinizadeh, M., Bordbar, S.K., Enayati, K., Negahdarsaber, M. & Abassi, A. (2020). Comparison of the amount of Carbon and Nitrogen storage in the soil of hand-planted forest, natural forest and watershed agricultural lands of Arjan plain in Fars province. *Iranian Forest Ecology Journal*, 8(16), 165-172, (in Persian).
- [6] Li W., Zhu J., Pirasteh S., Zhu Q., Fu L., Wu J. (2022). Investigations of disaster information representation from geospatial perspective: progress, challenges, and recommendations. *Transactions in GIS*. DOI: 10.1111/tgis.12922, 00:1-23.
- [7] Pirasteh S., Zenner E.K., Mafi-Gholami D., Jaafarid A., Nouri Kamarie A., Liu G., Zhu Q., Li J. (2021). Remote sensing of multi-decadal spatial extents and biomass changes of mangroves in response to climate change and anthropogenic impacts, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 102, https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102390.
- [8] Ghanbari, M., Kafaky, S., Mataji, A. & Akhavan, R. (2020). Estimation of forest above ground biomass in Hyrcanian forests using satellite imagery. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 22 (3), 63-78.
- [9] Katani, J.Z. 2013. Allometric models for prediction of above-and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 310: 87-101.
- [10] Sarouie, S., Darvish-Sefat, A., & Namirian, M. (2021). Modeling the estimation of woody ground biomass of Zagros oak high forest trees using Sentinel-1 satellite radar data. *Iranian Remote Sensing and GIS Journal*, 12(4), 32-52, (in Persian).
- [11] IPCC 2007: Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: Metz, B., O. R. Davidson, P. R Bosch, R. Dave, and L.A Meyer. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [12] Gunawardena, A. R., S.P. Nissanka, and N.D.K. Dayawansa. 2006. Relationship between above ground live biomass and satellite image spectral responses (Landsat ETM+) of *Pinus caribaea* morelet at lower Hantana region in Sri Lanka. *Tropical Agricultural Research*, 18.
- [13] Li W., Zhu J., Pirasteh S., Zhu Q., Fu L., Wu J. (2022). Investigations of disaster information representation from geospatial perspective: progress, challenges, and recommendations. *Transactions in GIS*. DOI: 10.1111/tgis.12922, 00:1-23.
- [14] Asgari, H. (2013). Economic valuation of oak forests in Ilam province. *Journal of Natural Resources Economy*, 2(2), 77-88, (in Persian).
- [15] Zhang, W., L Zhao, Y. Li, J. Shi, M. Yan, and Y. Ji. 2022. Forest Above-Ground Biomass Inversion Using Optical and SAR Images Based on a Multi-Step Feature Optimized Inversion Model. *Remote Sensing*, 14(7): 1608.
- [16] Aynekulu, E., M. Suber, M. Van Noordwijk, J. Arango, J.M. Roshetko, and T.S. Rosenstock. 2020. Carbon storage potential of silvopastoral systems of Colombia. *Land*, 9(9), 309.
- [17] Estrada, G. C. D., M. L. Soares, V. Fernandez, and P. M. de Almeida. 2015. The economic evaluation of carbon storage and sequestration as ecosystem services of mangroves: a case study from southeastern Brazil. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(1): 29-35.

- [18] Jafarzadeh, A., Mahdavi, A., Shamsi, S.R. & Yousefpour, R. (2020). Economic evaluation of some of the most important ecosystem services in Zagros forests. *Environmental Sciences*, 18(1), 137-150, (in Persian).
- [19] Sohrabi, H., Hosseini, S.M. & Zobeiri, M. (2010). Estimation of forest stand volume using textural indices of aerial images, *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* 12(4), 297-306, (in Persian).
- [20] Gol-Mohammadi, F., Hassanzad Navroodi, I., Bonyad, A., & Mirzaee, J. (2017). Effects of some environmental factors on dieback severity of trees in middle Zagros forests of Iran: Case Study, strait Daalaab, Ilam Province. *Journal of Plant Research (Journal of Iran Biology)*, 30(3), 644-655, (in Persian).
- [21] Yusof vand, M., Soosani, J., & Nagavi, H. (2023). Estimation of biomass and its reduction in forests affected by deterioration in Dadabad region of Lorestan province. *Iranian Journal of Forest*, 13(5), 17-28.
- [22] Balan, B., Mohaghegh, S., & Ameri, S. (1995). State-of-the-art in permeability determination from well log data: part 1-A comparative study, model development. *Paper SPE*, 30978, 17-21.
- [23] Werner D, Francisco J A, *Artifitial intelligence in the life sciences*, *Artif Intell Rev* 2003; 20: 7-11.
- [24] Häyhä, T., P.P Franzese, A. Paletto, and D.F. Brian. 2015. Assessing, valuing, and mapping ecosystem services in Alpine forests, *Ecosystem Services*, 14: 12–23.
- [25] Sinha S.K., H. Padalia, A. Dasgupta, J. Verrelst and J.P. Rivera. 2020. Estimation of leaf area index using PROSAIL based LUT inversion, MLRAGPR and empirical models: Case study of tropical deciduous forest plantation, North India. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 86.
- [26] Li, X, and C. Liu. 2011. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11 (2): 121–128.
- [27] Hall, R.J., R.S. Skakun, E.J. Arsenault, and B.S. Case. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest ecology and management*, 225(1-3):378-390.
- [28] Katani, J.Z. 2013. Allometric models for prediction of above-and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 310: 87-101.
- [29] Mobraghi, N., Sharzehee, Gh, Makhdoom, M., Yavari, A., & Ja'fari, H. (2009). Presenting a spatial evaluation model of carbon dioxide absorption performance in the Caspian forests of Iran. *Journal of Environmental Science*, 51, 68-57, (in Persian).
- [30] Pato, M., Salehi, A., Zahedi Amiri, G. & Banj Shafie, A. (2016). The economic values of carbon storage functions in different land uses of Northern Zagros forest. *Forest Research and Development*, 2(4), 367-377, (in Persian).