

# مقایسه رگرسیون وزن دار جغرافیایی و رگرسیون کریگینگ برای برآورد مکانی زی توده روی زمین جنگل های بلوط زاگرس

سمیه ایزدی<sup>۱</sup>، هرمز سهرابی<sup>۲\*</sup>، مجید جعفری خالدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری جنگلداری - دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی - دانشگاه تربیت مدرس  
somayeh.izadi@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی - دانشگاه تربیت مدرس  
hsohrabi@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده علوم ریاضی - دانشگاه تربیت مدرس  
jafari-m@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۸، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۸)

## چکیده

نقشه زی توده روی زمین جنگل برای مدیریت پایدار بوم‌سازگان‌های جنگلی و گزارش انتشار کربن، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. هدف از این مطالعه مقایسه رگرسیون وزن دار جغرافیایی با رگرسیون کریگینگ با مبنای رگرسیون خطی چندگانه برای برآورد زی توده روی زمین جنگل های بلوط زاگرس با استفاده از نمونه های میدانی، اطلاعات طیفی و شاخص های پوشش گیاهی استخراج شده از تصاویر لندست ۸ است. به منظور جمع آوری اطلاعات، ۳۲ بلوک با ابعاد ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر به طور سیستماتیک با فاصله ۲ کیلومتر پیاده شد. سپس در هر بلوک تعداد ۷ قطعه نمونه با ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر روی یکی از قطرهای اصلی شبکه پیاده شد. در مجموع از ۲۲۴ قطعه نمونه ۳۰ متر در ۳۰ متر، ۱۸۴ قطعه نمونه در بخش های جنگلی قرار گرفته بود و تحلیل ها با استفاده از ۱۸۴ نمونه اجرا شد. پس از محاسبه کربن اندوخته شده در هر قطعه نمونه، کارایی دو روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی و رگرسیون کریگینگ برای برآورد و تهیه نقشه زی توده ارزیابی شد. نتایج نشان داد که رگرسیون وزن دار جغرافیایی (ضریب تبیین ۰/۶۱ و جذر میانگین مربعات خطای نسبی ۲۲) کارایی بهتری برای برآورد و تهیه نقشه زی توده روی زمین جنگل های بلوط نسبت به رگرسیون کریگینگ (ضریب تبیین ۰/۴۷ و جذر میانگین مربعات خطای نسبی ۲۸) دارد.

**واژگان کلیدی:** ناهمگنی مکانی، همبستگی مکانی، مدل سازی جنگل

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

اکوسیستم‌های جنگلی نزدیک به ۳۱ درصد سطح زمین را پوشانده‌اند [۱] و به واسطه اهمیت اقتصادی و خدمات زیست محیطی، یکی از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌ها محسوب می‌شوند. یکی از مهم‌ترین خدمات زیست محیطی بوم‌سازگان‌های جنگلی کاهش غلظت دی‌اکسید کربن هوا (گاز گلخانه‌ای) و تبدیل آن به اکسیژن و زی-توده طی فرآیند فتوسنتز است، از این رو نقش مهمی را در چرخه جهانی کربن ایفا می‌کند [۲]. در سال‌های اخیر، کمی کردن زی‌توده جنگل یکی از موضوعات تحقیقاتی مورد علاقه سیاستگذاران، مدیران جنگل و بوم‌شناسان شده است، زیرا ارزیابی زی‌توده جنگل در فراهم آوردن اطلاعات برای تجارت کربن، مدیریت پایدار جنگل و ارزیابی شرایط جنگل امری لازم و اجتناب‌ناپذیر است. آماربرداری زمینی و اندازه‌گیری مستقیم در سطح قطعات نمونه، شبیه‌سازی و اطلاعات دورسنجی، معمول‌ترین روش‌ها برای برآورد زی‌توده جنگل‌ها است.

دقیق‌ترین روش برآورد زی‌توده جنگل، آماربرداری زمینی و معادلات آلومتریک برای تک تک درختان است، اما این روش مستلزم صرف زمان، هزینه زیاد و نمونه‌برداری مخرب است [۳، ۴، ۵]. همچنین به دلیل پیچیدگی و گستردگی مناطق جنگلی برای مناطق وسیع امکان‌پذیر نبوده و نمی‌تواند توزیع مکانی از زی‌توده فراهم کند.

روش‌های مبتنی بر داده‌های دورسنجی می‌تواند جایگزینی برای تهیه نقشه و پایش توزیع مکانی زی‌توده جنگل‌ها در مقابل سایر روش‌ها باشد، زیرا اطلاعات دورسنجی به دلیل پیوستگی مکانی و پوشش سراسری، اطلاعاتی از نقاط غیر قابل دسترس که امکان نمونه‌برداری ندارند را در اختیار کاربران قرار می‌دهد [۶، ۵]. تصاویر لندست عمومی‌ترین داده‌های دورسنجی با تفکیک مکانی متوسط در مطالعات زی‌توده جنگل‌ها بوده است [۷، ۸، ۹]. تصاویر لندست از سال ۱۹۷۲ تا کنون با ثبت اطلاعات قدمت طولانی در استفاده توسط کاربران داشته، همچنین دارای تفکیک مکانی مناسب مطابق با مدیریت زمین است [۱۰].

به‌طور کلی امکان‌پذیر نبودن جمع‌آوری داده‌های مربوط به زی‌توده جنگل در تمام نقاط به‌صورت پیوسته، نیاز شدید

را برای یک روش موثر برای رسیدن به اطلاعات مکانی از زی‌توده جنگل ایجاد می‌کند. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی مقادیر زی‌توده با استفاده از تعداد نمونه‌های محدود و داده‌های دورسنجی در یک سطح پیوسته وجود دارد. گستره وسیعی از این روش‌ها شامل: روش‌های رگرسیونی (از جمله: رگرسیون خطی ساده، رگرسیون غیر خطی، مدل‌های خطی تعمیم‌یافته، درخت رگرسیون)، روش‌های زمین‌آماری (از جمله: کریگینگ معمولی<sup>۱</sup>، کوکریگینگ<sup>۲</sup> و رگرسیون کریگینگ<sup>۳</sup>) می‌باشد.

از بین روش‌های ذکر شده، رگرسیون خطی (آمار کلاسیک) و کریگینگ معمولی (آمار مکانی) متداول‌ترین روش‌ها برای برآورد متغیر هدف در نقاط نمونه‌برداری نشده است. در روش‌های مبتنی بر داده‌های دورسنجی، تحلیل رگرسیون با کمی کردن ارتباط بین داده‌های میدانی و اطلاعات ماهواره‌ها از جمله بازتاب‌های طیفی، اطلاعات رادار یا لایدار، برای برآورد زی‌توده استفاده می‌شود [۱۱، ۱۲]. از آنجایی که زی‌توده جنگل معمولاً یک رابطه غیرخطی با اطلاعات دورسنجی دارد، رگرسیون خطی اکثر مواقع برآوردی نامعقول از متغیر هدف ارائه می‌کند.

کریگینگ معمولی یک پیش‌بینی با حداقل واریانس برای متغیر هدف ارائه می‌دهد، این روش، برآورد متغیر هدف را در نقاط نمونه‌برداری نشده با تکیه بر نقاط نمونه‌برداری شده (بدون در نظر گرفتن اطلاعات کمکی) انجام می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت برای یک پیش‌بینی معقول به شبکه‌ای متراکم از نقاط نمونه‌برداری شده نیاز دارد؛ تعداد و تراکم نمونه‌ها محدودیتی برای این روش به‌شمار می‌رود [۱۳]. اما در مقابل، کریگینگ معمولی رویکردی مبتنی بر محل<sup>۴</sup> برای پیش‌بینی و تهیه نقشه متغیر هدف در منطقه پژوهش است و تنها از خودهمبستگی مکانی برای برآورد متغیر هدف در فضای جغرافیایی استفاده می‌کند [۱۴]. رویکرد ترکیبی<sup>۵</sup> که وابستگی مکانی و همچنین متغیرهای کمکی را به حساب می‌آورد (مانند رگرسیون کریگینگ) می‌تواند جایگزینی مناسب برای برآورد و تهیه نقشه متغیر مورد نظر باشد.

<sup>۱</sup> Ordinary Kriging

<sup>۲</sup> Co-Kriging

<sup>۳</sup> Regression Kriging

<sup>۴</sup> Location-based approach

<sup>۵</sup> Hybrid approach

Fayad و همکاران [۲۱] برای تهیه نقشه ارتفاع تاج درختان با استفاده از داده‌های لیدار، نشان دادند رگرسیون کریگینگ دقت را ارتقا می‌دهد. Li و همکاران [۲۲] برای پیش‌بینی و تهیه نقشه درصد تاج پوشش و زی‌توده جنگل‌های معتدل با استفاده از اطلاعات لیدار و SPOT-6 نشان دادند رگرسیون کریگینگ نسبت به رگرسیون خطی ساده و کریگینگ معمولی دقت بالاتری دارد. اگرچه رگرسیون کریگینگ با استفاده از داده‌های کمکی در مواردی می‌تواند باعث بهبود برآورد و افزایش دقت نقشه تولید شده برای متغیر هدف باشد، اما این روش با فرض ایستایی سازگار است. به این معنی است که پارامترهای رگرسیون کریگینگ در موقعیت‌های مختلف تغییر نمی‌کند. با این حال، بسیاری از متغیرهای محیطی از نظر مکانی ناهمگن هستند. بنابراین استفاده از پارامترهای جهانی ممکن است رابطه بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی را به خوبی تشریح نکند.

رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی<sup>۱</sup> با اندازه‌گیری رابطه محلی<sup>۲</sup> بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی که در هر موقعیت متفاوت است، مسأله ناهمگنی و نایستایی را برطرف می‌کند [۲۳]. زمانی که همبستگی مکانی و ناهمگنی در اطلاعات مربوط به جنگل یا داده‌های اکولوژیکی وجود داشته باشد، فرض‌های استقلال و همگنی برای روش‌های اولیه آماری مانند رگرسیون حداقل مربعات (OLS) نقض می‌شود [۲۴]. در واقع روش‌های محلی (local) مانند رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی، روابط رگرسیونی را برای هر موقعیت مکانی با استفاده از نقاط همسایه، ارائه می‌دهد [۲۳]. در سال‌های اخیر رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در رشته‌های مختلف از جمله اکولوژی، جنگل‌داری، بهداشت و سلامت استفاده شده است [۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸]. روش‌های محلی برای تشریح تغییرات مکانی (ناهمگنی) در ارتباط بین متغیرها بسیار موثر هستند. در مطالعات اکولوژیکی و جنگل‌داری، روش‌های محلی می‌توانند به‌عنوان یک ابزار مفید برای بررسی وضعیت رقابت، پتانسیل رشد و فعالیت‌های مدیریتی باشد [۲۹].

Propastin در [۳۰] برای برآورد زی‌توده جنگل‌های بارانی تروپیکال با استفاده از تصاویر لندست (ETM+)، کارایی

برای بررسی ویژگی‌های مختلف جنگل در پژوهش‌های متعدد از هر دو رویکرد استفاده شده است. نتایج پژوهش‌ها در نقاط مختلف جهان متفاوت بوده برخی بیانگر کارایی بالا و برخی بیانگر ضعف رویکردهای ذکر شده هستند. Akhavan و Klein [۱۵] برای تراکم، سطح مقطع برابر سینه و ارتفاع کل در جنگل کاری ۱۸ ساله پلت، از روش کریگینگ معمولی استفاده کردند. نتایج نشان داد تراکم درختان ساختار مکانی مناسبی ندارد، اما ارتفاع کل و سطح مقطع برابر سینه دارای ساختار مکانی مناسب بوده و روش کریگینگ معمولی می‌تواند برای تهیه نقشه این دو متغیر مناسب باشد. Ahadi و همکاران [۱۶] برای تهیه نقشه توان تولید جنگل، کریگینگ، رگرسیون کریگینگ با مبنای رگرسیون خطی و جنگل تصادفی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد رگرسیون با مبنای جنگل تصادفی کارایی و دقت بیشتری داشته است. Meng و همکاران [۱۷] سطح مقطع برابر سینه، ارتفاع، سلامت و زی‌توده جنگل را در غرب جورجیا با استفاده از کریگینگ معمولی، کوکریگینگ و رگرسیون کریجینگ پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد رگرسیون کریگینگ با کمترین خطا و بیشترین ضریب تبیین، روش برتر بوده است. با استفاده از رگرسیون کریجینگ، کریگینگ معمولی و معکوس فاصله‌ی وزنی، توان تولید و ارتفاع غالب گونه‌ی *Pinus radiate* توسط Palmer و همکاران [۱۸] پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد در مقیاس محلی روش کریگینگ کارایی بالاتری دارد. Aersten و همکاران [۱۹] در بلژیک برای تهیه نقشه شاخص رویشگاه برای دو گونه درختی بلوط و راش، پنج روش کریگینگ معمولی، رگرسیون، کوکریگینگ و رگرسیون کریگینگ را با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد بسته به شرایط کارایی روش‌ها نسبت به یکدیگر متفاوت است.

برای برآورد زی‌توده تاج پوشش توده‌های *Pinus pinaster* و زی‌توده درختچه‌زارها با استفاده از داده‌های میدانی و تصاویر لندست (TM)، Viana و همکاران [۲۰] کارایی روش‌های رگرسیون، کریگینگ معمولی، کریگینگ جهانی، معکوس فاصله وزنی، رگرسیون کریجینگ و پلی-گون تیسن را بررسی کردند. نتایج نشان داد رگرسیون کریگینگ بهبودی در برآورد و تهیه نقشه زی‌توده ایجاد نکرد و نتایجی مشابه نتایج رگرسیون ارائه داد. این به دلیل همبستگی مکانی پایین مشاهدات بوده است.

<sup>۱</sup> Geographically Weighted Regression

<sup>۲</sup> Local

زی‌توده جنگل در بخشی از جنگل‌های بلوط زاگرس است. با توجه به ناهمگنی موجود در جنگل‌های بلوط زاگرس همچنین، مرور منابع در داخل، تاکنون پژوهشی که مبنی بر ارزیابی کارایی رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی برای زی‌توده جنگل باشد، صورت نگرفته است.

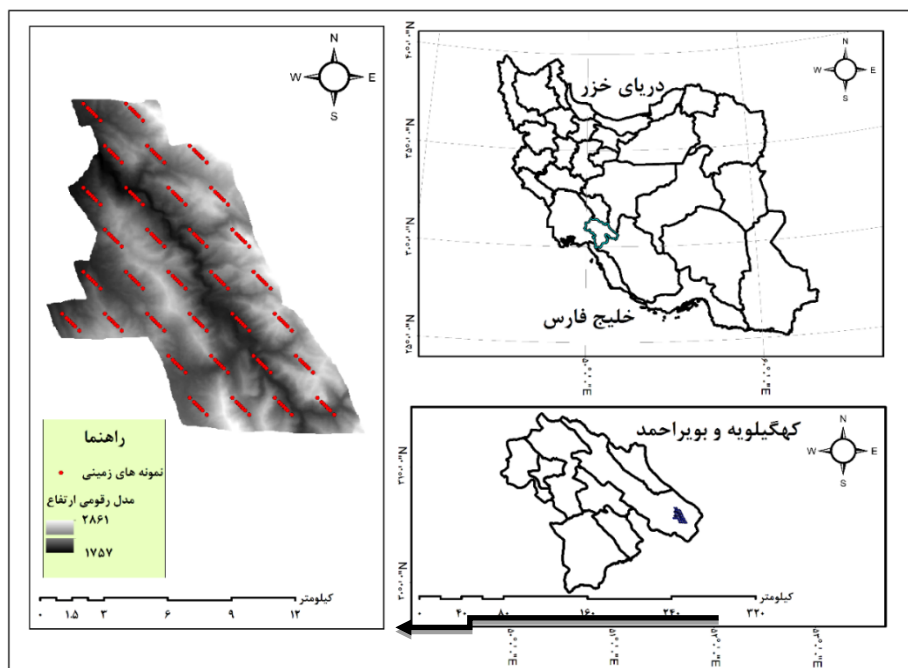
## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- منطقه پژوهش

پژوهش حاضر در بخشی از جنگل‌های بلوط زاگرس در استان کهگیلویه و بویراحمد صورت گرفت (۳۴° ۳۶' ۳۰" شمالی، ۵۲° ۳۸' ۵۱" شرقی). مساحت منطقه در حدود ۱۳۰۰۰ هکتار است (شکل ۱). ساختار جنگل در منطقه، شاخه و دانه‌زاد است. منطقه مورد پژوهش از نظر آب و هوایی، نیمه خشک محسوب می‌شود. دامنه ارتفاعی منطقه از ۱۸۰۰ الی ۲۸۵۰ متر است. همچنین از نظر شیب، حداقل و حداکثر شیب منطقه به ترتیب، ۰ و ۸۰ درصد می‌باشد.

رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی را در مقابل رگرسیون جهانی حداقل مربعات (OLS) ارزیابی کرد. نتایج نشان از کارایی رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در برابر رگرسیون حداقل مربعات بود. Wang و همکاران [۳۱] برای برآورد توزیع مکانی مواد آلی خاک، کارایی رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی و رگرسیون کریجینگ را با هم مقایسه کردند. نتایج نشان از کارایی بالاتر رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی نسبت به رگرسیون کریجینگ داشت. Liu و همکاران [۳۲] برای مدل‌سازی مکانی زی‌توده در سطح درختان در چین، سه روش رگرسیون خطی (OLS)، رگرسیون خطی ترکیبی (LMM) و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی نسبت به دو روش جهانی، کارایی بالاتری دارد. Ou و همکاران [۳۳] با استفاده از تصاویر سنتینل، الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ANN, SVR, RF) و رگرسیون جغرافیایی وزن‌دار را برای برآورد زی‌توده ارزیابی کردند. نتایج نشان داد SVR برای پیش‌بینی و تهیه نقشه کربن نسبت به روش‌های دیگر کارایی بیشتری دارد.

هدف این مطالعه مقایسه کارایی رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی و رگرسیون کریجینگ برای برآورد و توزیع مکانی



شکل ۱- منطقه پژوهش در ایران و استان کهگیلویه و بویراحمد

### ۲-۲- پیاده‌سازی شبکه نمونه‌برداری میدانی

متر به صورت سیستماتیک در مساحتی حدود ۱۳۰۰۰ هکتار با دامنه ارتفاعی ۱۸۰۰ تا ۲۸۵۰ متر از سطح دریا جمع‌آوری شد. پس از پیاده کردن قطعات نمونه در جنگل، ۱۸۴ قطعه در مناطق داری جنگل قرار گرفته

اطلاعات لازم از ۲۲۴ قطعه نمونه ۳۰ متر در ۳۰ متر روی یک قطر اصلی از ۳۲ بلوک ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰

شد. پیش‌پردازش تصاویر شامل تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی بود. کنترل دقت هندسی تصویر با استفاده از نقشه‌های رقومی ۱:۲۵۰۰۰ انجام گرفت. تصحیح رادیومتری با استفاده از مشخصات حس‌گر اخذ‌کننده تصویر انجام گرفت و تصویر به انعکاس بالای اتمسفر تبدیل شد. پس از انجام تصحیحات در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3، ۳۴ متغیر برای برآورد و مدل‌سازی زی‌توده از تصاویر پردازش شده استخراج شد. متغیرها شامل: مقادیر باندهای طیفی، نسبت‌های باندهای ساده، شاخص‌های گیاهی و تبدیل تسلدکپ بود (جدول ۱).

بودند. در هر قطعه نمونه، قطر بزرگ و کوچک تاج تک تک درختان، ارتفاع، گونه و قطر برابر سینه اندازه‌گیری شد. برآورد میزان زی‌توده در هر قطعه نمونه برای هر گونه (غالب بلوط ایرانی) با استفاده از مطالعات معادلات آلومتریکی [۳۴، ۳۵، ۳۶]، مختص هر گونه صورت گرفت.

## ۲-۳- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸

یک فریم از تصاویر لندست به شماره گذر ۱۶۳ و ردیف ۳۹ مربوط به ۶ اکتبر ۲۰۱۷ نزدیک به زمان آماربرداری از وبسایت earthexplorer.usgs.gov دانلود

جدول ۱- متغیرهای طیفی استخراج شده از تصویر لندست ۸

نوع متغیر	جزئیات
مقادیر طیفی باندها	آبی (B)، سبز (G)، قرمز (R)، مادون قرمز نزدیک (NIR)، مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR1)، مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR2)
نسبت‌های باندهای	B/G, B/R, B/NIR, B/SWIR1, B/SWIR2, G/R, G/NIR, G/SWIR1, G/SWIR2, R/SWIR1, R/SWIR2, N/SWIR1, N/SWIR2, SWIR1/SWIR2
شاخص‌های گیاهی	NDVI, GNDVI, DVI, SAVI, MSAVI, EVI, EVI2
تسلدکپ	BRIGHTNESS, GREENESS, WETNESS, TCD=(TCG <sup>2</sup> +TCB <sup>2</sup> ) <sup>0.5</sup>

سازی دیگر (پارامتری و ناپارامتری)، رابطه بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی مشخص شده، سپس روی باقی‌مانده مدل، کریجینگ اعمال می‌شود. با مجموع مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از کریجینگ معمولی روی باقی‌مانده مدل، مقادیر نهایی پیش‌بینی به دست می‌آید. معادله روش کریجینگ با مدل مبنای رگرسیون خطی چندگانه به صورت رابطه ۱ است [۳۸]:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{k=0}^p \beta_k + q_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e(s_i) \quad (1)$$

در این معادله،  $\beta_k$  ضرایب برآورد شده مدل رگرسیون؛  $q_k(s_0)$  مقادیر متغیرهای کمکی در محل  $s_0$ ؛  $p$  تعداد متغیرهای کمکی؛  $n$  تعداد مشاهدات؛  $\lambda_i$  وزن کریجینگ است که توسط ساختار مکانی باقی‌مانده‌ها تعیین می‌شود؛  $e(s_i)$  مقدار باقی‌مانده در محل  $s_i$  است.

بخش اول رابطه ۱ از سمت چپ، نشان دهنده رگرسیون خطی و بخش دوم رابطه کریجینگ اعمال شده روی باقی‌مانده‌ها است. در واقع رگرسیون کریجینگ ترکیبی از رگرسیون متغیر هدف (زی‌توده جنگل) بر اساس متغیرهای کمکی (اطلاعات استخراج شده از تصاویر

رهیافت‌های متعددی برای برآورد و تهیه نقشه و توزیع مکانی زی‌توده جنگل با استفاده از داده‌های دورسنجی وجود دارد، اما تا کنون هیچ روشی به‌عنوان بهترین روش معرفی نشده است، زیرا بسته به شرایط منطقه مورد پژوهش، مقیاس مورد پژوهش، اندازه و تعداد نمونه‌ها نتایج مختلفی ارائه شده است. در این مطالعه برای برآورد و تهیه نقشه زی‌توده جنگل در منطقه پژوهش دو روش چند متغیره (رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی و رگرسیون کریجینگ) اجرا و ارزیابی شد.

## ۲-۴- روش‌های بررسی شده

### ۲-۴-۱- رگرسیون کریجینگ

در آمار مکانی فرض بر این است که نمونه‌های انتخاب شده از جامعه مستقل نیستند، بلکه تا فاصله معینی به صورت مکانی به هم وابستگی دارند [۳۷]. به‌طور کلی زمین‌آمار دو بخش اصلی واریوگرافی (Variography) و کریجینگ است [۱۶]. رگرسیون کریجینگ نوعی روش هیبرید است که ترکیبی از یک مدل رگرسیونی با کریجینگ معمولی است. در این روش ابتدا با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه یا سایر روش‌های مدل-

لندست ۸) و کریجینگ باقی مانده های رگرسیون است [۳۹]. قبل از پیش بینی با استفاده از کریجینگ باید یک مدل نظری بر واریوگرام تجربی برازش داد. مدل های متفاوتی از جمله خطی، کروی، نمایی و گوسی وجود دارد که می توان از آنها استفاده کرد. این روش در محیط نرم افزار R نسخه 3.5.2 و با استفاده از بسته های gstat، raster، ggplot2 اجرا شد.

## ۲-۲-۴- رگرسیون وزن دار جغرافیایی

رگرسیون جغرافیایی وزن دار، مدل توسعه یافته ای از رگرسیون جهانی است که ضرایب رگرسیون بر حسب موقعیت متفاوت است [۴۰]. رگرسیون جهانی، یک رابطه ثابت بین متغیرهای مکانی برای الگوسازی منطقه ای فرض می کند. در رگرسیون جهانی فرض بر ایستایی مکانی برای برآورد پارامترهای رگرسیون است؛ به این معنی که یک مدل برای برای مجموعه داده ها در کل منطقه پژوهش بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی ارائه می کند و تمام ضرایب برای کل منطقه یکسان خواهد بود.

به هر حال تغییرات یا ناپایداری مکانی در رابطه بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی به طور معمول در داده های مکانی وجود دارد، در این شرایط فرض ایستایی یا پایداری مکانی در فضا نقض می شود [۴۱]. بنابراین هنگام آنالیز داده های مکانی ناپایداری مکانی باید محاسبه شود. رگرسیون وزن دار جغرافیایی پارامترهای رگرسیون را به عنوان تابعی از موقعیت برآورد می کند و نایستایی مکانی را در محاسبه ضرایب لحاظ می کند. در واقع یک برآورد موضعی (local) ارائه می دهد. برآورد محلی پارامترها با استفاده از رگرسیون جغرافیایی وزن دار از رابطه (۲) بیان می شود:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^n \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (2)$$

$(u_i, v_i)$  موقعیت مکانی مشاهده نام؛  $\beta_0(u_i, v_i)$  و  $\beta_j(u_i, v_i)$  پارامترهای برآورد شده در موقعیت نام؛  $x_{ij}$  و  $\varepsilon_i$  به ترتیب متغیر مستقل و میزان خطا در موقعیت نام است. برای رگرسیون جغرافیایی وزن دار پارامترها در موقعیت نام با استفاده از معادله (۳) برآورد می شوند:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (3)$$

$\hat{\beta}(u_i, v_i)$  پارامترهای رگرسیون در موقعیت نام،  $W(u_i, v_i)$  ماتریس وزن دهی برای مشاهدات اطراف نقطه نام،  $X^T$  ماتریس متغیرهای مستقل می باشد. برای محاسبه ماتریس وزن دهی توابع متفاوتی وجود دارد [۲۳]. تابع گوسی متداول ترین تابع برای محاسبه وزن در هر نقطه به عنوان تابعی پیوسته از فاصله و به صورت معادله (۴) است:

$$w_{ij} = \exp\left[-\frac{1}{2(d_{ij}/b)^2}\right] \quad (4)$$

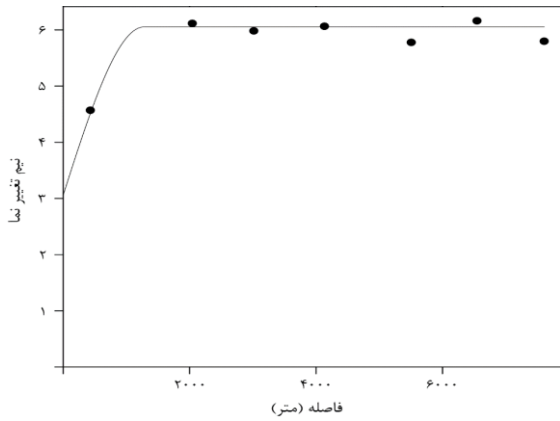
$w_{ij}$  وزن وزن مشخص شده برای مشاهده در موقعیت  $i$ ،  $d_{ij}$  فاصله اقلیدسی (بر حسب  $x$  و  $y$ ) بین دو موقعیت  $i$  و  $j$  و  $b$  یک پارامتر مثبت به عنوان پهنای باند (bandwidth) است. کالیبراسیون رگرسیون وزن دار جغرافیایی می تواند بر اساس کرنل مکانی ثابت یا تطبیقی انجام شود. در این تحقیق از تابع گوسی برای وزن دهی و کرنل ثابت در محیط نرم افزار GWR4 و نرم افزار R نسخه 3.5.2 و با استفاده از بسته های spgwr، GWmodel، spdep و gstat استفاده شد.

## ۲-۵- ارزیابی روش ها

به منظور ارزیابی صحت روش ها از روش اعتبارسنجی متقابل 10-fold استفاده شده است. در این روش کل داده ها به ۱۰ قسمت تقسیم شده و هر بار یکی از قسمت ها به منظور اعتبارسنجی کنار گذاشته می شود و با ۹ قسمت دیگر مدل سازی انجام می شود. نتایج روش ها با استفاده از شاخص های ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE) و اریبی نسبی (Bias) مقایسه شدند.

## ۳- نتایج

اطلاعات اولیه آماری زی توده روی زمین جنگل در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به اینکه در روش رگرسیون کریجینگ ابتدا باید مدل رگرسیون خطی چندگانه اعمال شود سپس، با استفاده از کریجینگ ساده یا معمولی پیش بینی روی باقی مانده های مدل رگرسیونی انجام شود، ابتدا با استفاده از رگرسیون گام به گام (stepwise) مهم ترین متغیرها انتخاب شدند سپس، مدل رگرسیون خطی چندگانه اعمال شد. پس از بررسی نرمال



شکل ۲- نیم تغییر نمای باقی مانده مدل رگرسیون خطی چندگانه برازش داده شده با مدل کروی

نتایج محاسبه ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطای نسبی و اریبی نسبی با استفاده از رگرسیون کریجینگ و رگرسیون وزن دار جغرافیایی در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج، هر دو روش برآوردی ناریب ارائه کردند. با مقایسه مقادیر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطای نسبی، رگرسیون وزن دار جغرافیایی با مقادیر  $0/61$  و  $22$  برای ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات، نتایج بهتری نسبت به رگرسیون کریجینگ با مقادیر  $0/47$  و  $28$  درصد برای ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطای نسبی داشت. با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت، رگرسیون وزن دار جغرافیایی بخش بیشتری از تغییرپذیری زی توده روی زمین را توانسته توجیه کند. از این رو می توان نتیجه گرفت که استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی نسبت به روش رگرسیون کریجینگ سبب بهبودی معنی دار در برآورد و تهیه نقشه زی توده روی زمین شد.

جدول ۴- مشخصه های آماری محاسبه شده به روش اعتبارسنجی 10-fold با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون کریجینگ و رگرسیون وزن دار جغرافیایی

روش	ضریب تبیین	جذر میانگین مربعات خطای نسبی (%)	اریبی (%)
رگرسیون کریجینگ	$0/47$	۲۸	$-0/6$
رگرسیون وزن دار جغرافیایی	$0/62$	۲۲	$-0/5$

نمودار اعتبارسنجی متقابل به همراه بهترین خط برازش یافته برای زی توده روی زمین با استفاده از رگرسیون کریجینگ و رگرسیون وزن دار جغرافیایی به ترتیب در شکل (۳) ارائه شده است. همان طور که مشاهده

بودن باقی مانده های مدل رگرسیونی، نتایج نشان داد که باقی مانده ها از توزیع نرمال تبعیت نمی کنند بنابراین داده ها با استفاده از BoxCox تبدیل شد، مشخصه های داده های تبدیل شده در جدول (۲) نمایش داده شده است. پس از تبدیل داده ها، مجدد رگرسیون گام به گام برای انتخاب مهم ترین متغیرها اعمال شد، سپس مدل رگرسیون خطی چندگانه با متغیرهای انتخاب شده اجرا شد. در روش رگرسیون کریجینگ برای پیش بینی زی توده روی زمین با استفاده از باقی مانده های مدل رگرسیون خطی چندگانه با کمک کریجینگ معمولی، ابتدا باید وابستگی مکانی باقی مانده ها بررسی شود. بعد از اعمال رگرسیون خطی چندگانه، واریوگرام تجربی باقی مانده های مدل محاسبه و رسم شد و سپس برای انتخاب بهترین مدل (کروی، نمایی، گوسی) برازش داده شده به واریوگرام تجربی بر اساس معیار مجموع مربعات خطا (SSErr) مدل کروی که متداول ترین مدل نیز می باشد، انتخاب شد. درصد ساختار مکانی واریوگرام باقی مانده های مدل رگرسیون خطی چندگانه،  $49$  درصد محاسبه شد که نشان دهنده ساختار مکانی متوسط برای باقی مانده ها است. مشخصه های واریوگرام برازش داده شده با استفاده از مدل کروی در جدول (۳) ارائه شده است. در شکل (۲) واریوگرام باقی مانده های رگرسیون خطی چندگانه نمایش داده شده است.

جدول ۲- خلاصه مشخصه های آماری زی توده روی زمین اندازه گیری شده در قطعه نمونه (تن در هکتار) و تبدیل شده

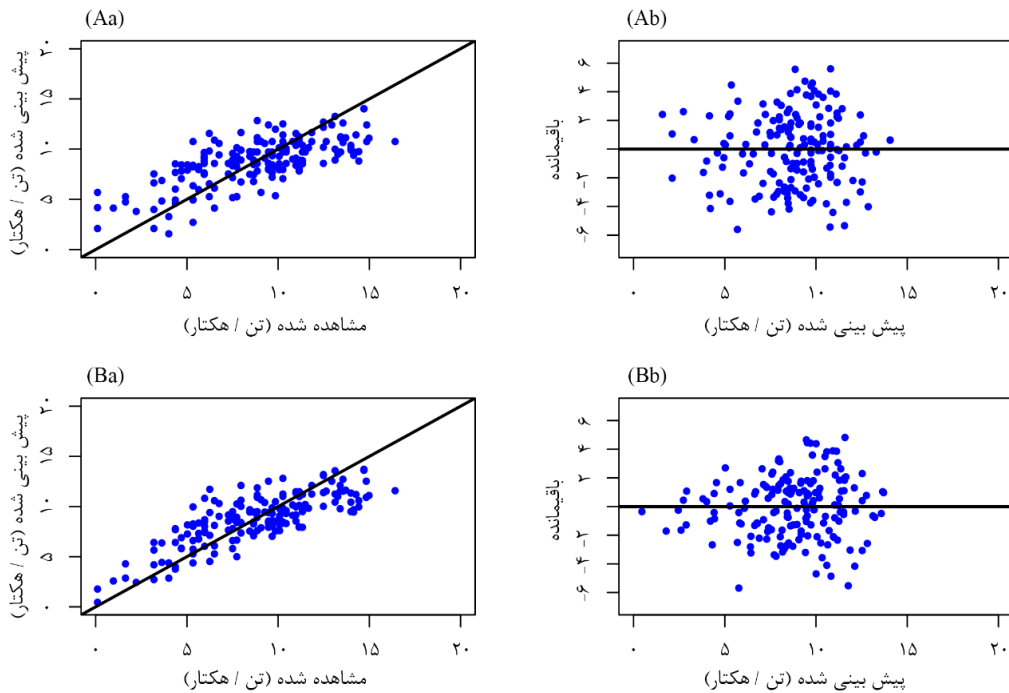
متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
زی توده روی زمین	۱/۱	۹۲/۲	۳۱/۹	۱۹/۴
تبدیل BoxCox	$0/09$	۱۷/۵	۸/۸	۳/۶

جدول ۳- مشخصه های واریوگرام برازش داده شده باقی مانده های مدل رگرسیون خطی چندگانه با مدل کروی

روش	طول گام (متر)	اثر قطعه ای	حد آستانه	دامنه تاثیر (متر)	ساختار مکانی (%)
رگرسیون خطی چندگانه	۱۰۰۰	$3/06$	۶	۱۲۲۰	۴۹

دلالت بر کارایی بیشتر رگرسیون وزن دار جغرافیایی نسبت به رگرسیون کریجینگ دارد.

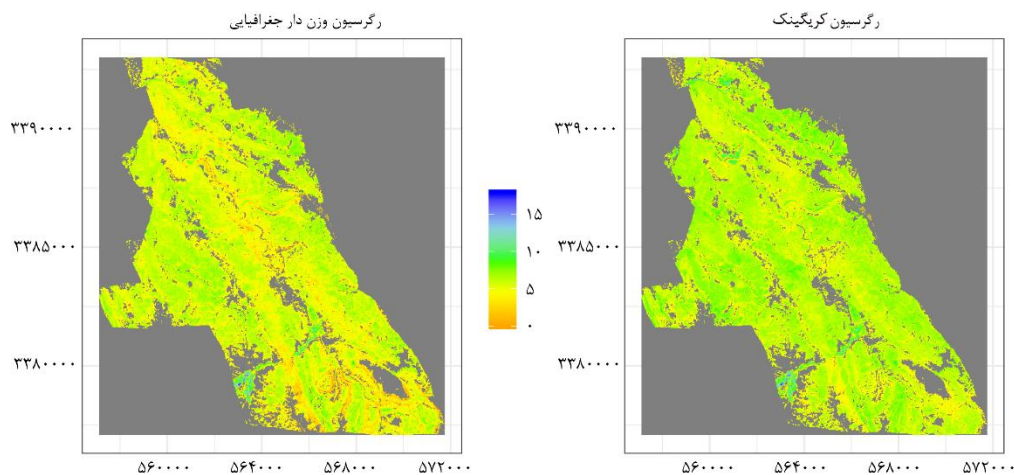
می شود پراکندگی نقاط حاصل از اعتبارسنجی متقابل نسبت به خط برازش یافته با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی نسبت به رگرسیون کریجینگ کمتر است که



شکل ۳- ابر نقاط مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده (Aa و Ba) و باقی‌مانده (Ab و Bb) با استفاده از رگرسیون کریجینگ (Aa و Bb) و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (Ba و Ab)

شده است، دامنه مقادیر پیش‌بینی شده توسط رگرسیون وزن دار جغرافیایی به داده‌های اصلی (تبدیل شده که تحلیل‌ها بر اساس این داده انجام گرفت) نزدیک‌تر است.

نقشه حاصل از برآورد با استفاده از دو روش رگرسیون کریجینگ و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده



شکل ۴- نقشه پیش‌بینی شده زی‌توده روی زمین با استفاده از رگرسیون کریجینگ (سمت راست) و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (سمت چپ)

رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی با استفاده از اطلاعات استخراج شده از تصاویر لندست ۸ برای زی‌توده روی زمین در بخشی از جنگل‌های بلوط غرب بود. بررسی عملکرد دو روش ذکر شده با استفاده از معیارهای ارزیابی

#### ۴- بحث

هدف تحقیق حاضر، ارزیابی کارایی دو روش رگرسیون کریجینگ (با مدل مبنا رگرسیون خطی چندگانه) و



بنابراین با ناپایداری مکانی و ناهمگنی متغیرها در محدوده مورد مطالعه سازگار نیست. با این حال، رگرسیون وزن دار جغرافیایی این محدودیت را برطرف کرده که در هر موقعیت مکانی ضرایب متغیرهای موجود در مدل متفاوت است و این می تواند دلیلی محکم بر کارایی بهتر رگرسیون وزن دار جغرافیایی نسبت رگرسیون کریگینگ برای پیش بینی زی توده روزی زمین در این پژوهش باشد. این تحقیق نشان از کارایی خوب رگرسیون وزن دار جغرافیایی برای پیش بینی زی توده روی زمین داشت که حتی نسبت به رگرسیون کریگینگ نتایج قابل قبول تری را نیز ارائه داد. نتایج در این تحقیق با نتایج Mishra و همکاران [۴۳] و Wang و همکاران [۳۱] مطابقت داشت.

## ۵- نتیجه گیری کلی

با وجود نتیجه به دست آمده در این تحقیق، رگرسیون کریگینگ و رگرسیون وزن دار جغرافیایی هر کدام می توانند در زمینه های مختلف کارایی متفاوت داشته باشند. رگرسیون کریجینگ ممکن است برای پیش بینی مکانی در محیط هایی که نسبتا همگن هستند مناسب تر باشد، مخصوصا جایی که همبستگی مکانی شدیدی بین داده ها وجود داشته باشد. به عنوان مثال جنگل های هیرکانی نسبت به جنگل های زاگرس دارای ساختار یکنواخت تری است، از طرفی در اکثر بخش های جنگل های زاگرس ناهمگنی ساختاری جنگل به چشم می خورد. در مقابل، رگرسیون وزن دار جغرافیایی برای محیط هایی که پیچیدگی و تغییرات بیشتری از جهت روابط بین متغیر وابسته و متغیرهای کمکی وجود داشته باشد، می تواند عملکرد مناسب تری نشان دهد. در پایان می توان گفت رگرسیون کریجینگ روشی انعطاف پذیر است که می تواند با استفاده از باقی مانده مدل های مختلف نتایج مختلفی را ارائه کند. با توجه به نتیجه مناسب رگرسیون وزن دار جغرافیایی، بررسی عملکرد رگرسیون کریگینگ با استفاده از باقی مانده های رگرسیون وزن دار جغرافیایی موضوع مناسبی برای پژوهش بیشتر در ساختار جنگل های ایران (هیرکانی، زاگرس و...) است. اگرچه نتیجه به دست آمده حاکی از عملکرد مناسب تر رگرسیون وزن دار جغرافیایی بوده است اما باز تأکید می شود با توجه به تفاوت ساختاری جنگل های ایران این نتیجه تنها به جنگل های زاگرس قابل

(ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطای نسبی و اریبی) نشان داد رگرسیون وزن دار جغرافیایی نسبت به رگرسیون کریگینگ در پیش بینی و تهیه نقشه زی توده روی زمین کارایی بهتری دارد.

رگرسیون کریگینگ از جمله روش هایی است که برای بررسی تغییرات مکانی متغیرها به کار می رود که با استفاده از یک مدل مانند رگرسیون خطی به بررسی روند موجود در داده ها می پردازد، در واقع برای پیش بینی در نقاط نمونه برداری نشده از مقادیر باقی مانده مدل استفاده می کند. از این نظر با رگرسیون وزن دار جغرافیایی متفاوت است، زیرا رگرسیون وزن دار جغرافیایی بر اساس رگرسیون محلی است و معمولا مقادیر پیش بینی شده به ضرایب رگرسیون بستگی دارد. در واقع نقشه پیش بینی شده با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی کمتر تحت تاثیر مقادیر نمونه به خصوص مقادیر پرت داده ها می باشد.

در برخی مطالعات که با هدف مقایسه روش های مختلف صورت گرفته، برای متغیرهای مختلف همچنین، مناطق مختلف نتایج متفاوتی ارائه شده است. با توجه به انعطاف پذیری رگرسیون کریگینگ در برخی مطالعات کارایی این روش تایید [۱۷، ۲۰، ۴۲، ۲۲] و در برخی [۱۸، ۳۱] نیز رد شده است. با توجه به این نکته که رگرسیون کریگینگ توسط فرض هایی محدود می شود، از طرفی عدم یکنواختی و ناهمگنی موجود در منطقه باعث پایین آمدن کارایی این روش خواهد شد. در مقابل رگرسیون وزن دار جغرافیایی چنین محدودیتی را ندارد.

نقشه های تولید شده برای زی توده روی زمین با استفاده از رگرسیون کریگینگ و رگرسیون وزن دار جغرافیایی همچنین ارزیابی دو روش ذکر شده نشان داد بین مقادیر پیش بینی شده با استفاده از این دو روش تفاوت هایی وجود دارد. نقشه تولید شده با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی با نزدیک بودن به دامنه مقادیر داده اصلی، دقت بیشتری را نشان داد. رگرسیون وزن دار جغرافیایی نه تنها اثر موقعیت متغیرها را روی متغیر اصلی مدنظر قرار می دهد، بلکه اثر موقعیت نقاط در همسایگی نقطه مورد نظر را در پیش بینی لحاظ می کند. رگرسیون کریگینگ اگرچه با تلفیق دو روش کریگینگ معمولی و رگرسیون خطی چندگانه همبستگی مکانی و متغیرهای کمکی را در پیش بینی مدنظر قرار می دهد، اما این روش بر اساس فرضیه پایداری مکانی استوار است.

تعمیم است، انتظار نمی‌رود که در سایر جنگل‌ها نتیجه مشابه حاصل شود. علاوه بر ساختار، الگوی نمونه‌برداری نیز عاملی تأثیرگذار در بررسی عملکرد روش‌های مکانی است که باید مدنظر قرار گیرد.

## مراجع

- [1] FAO. Global Forest Resources Assessment 2010: Main Report. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 340 p.
- [2] Pavlic, G., Chen, W. Fernandes, Cihlar, R. J. Price, D. T. Latifovic, R. Fraser, R. and Leblanc, S.G. (2007). "Canada-wide maps of dominant tree species from remotely sensed and ground data." *Geocarto International*. Vol. 22, No.3, PP.185-204.
- [3] Zheng, G., Chen, J. M. Tian, Q. J. Ju, W. M. and Xia, X. Q. (2007). "Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping." *Journal of Environmental Management*. Vol.85, No.3, PP.616-623.
- [4] Mandal, G., and Joshi, S.P. (2015). "Biomass accumulation and carbon sequestration potential of dry deciduous forests." *International Journal of Ecology and Development*. Vol.30, No.1, PP. 64-82.
- [5] Safari, A., Sohrabi, H. Powell, S. L. and Shataee, Sh. (2017). "A Comparative Assessment of Multi-Temporal Landsat 8 and Machine Learning Algorithms for Estimating Aboveground Carbon Stock in Coppice Oak Forests" *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 38, No. 3, PP. 6407-6432.
- [6] Zhu, X., and Liu, D. (2014). "Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol.102, No.8, PP. 222-231.
- [7] Powell, S.L., Healey, S.P. Cohen, W.B. Kennedy, R.E. Moisen, G.G. Pierce, K.B. and Ohmann, J. L. (2010). "Quantification of Live Aboveground Forest Biomass Dynamics with Landsat Time-Series and Field Inventory Data: A Comparison of Empirical Modeling Approaches." *Remote Sensing of Environment*. Vol.114, No.5, PP. 1053-1068.
- [8] Main-Knorn, M., Cohen, W.B. Kennedy, R. F. Grodzki, W. Griffiths, P. Hostert, P. and Pflugmacher, D. (2013). "Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach." *Remote Sensing of Environment*. Vol.139. PP. 227-290.
- [9] Dube, T., and Mutanga, O. (2015). "Evaluating the utility of the medium-spatial resolution Landsat 8 multispectral sensor in quantifying aboveground biomass in uMgeni catchment, South Africa." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol.101, PP. 36-46.
- [10] Cohen, W.B. and Goward, S. N. (2004). "Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing." *BioScience*. Vol.54, No.6, PP. 535-545.
- [11] Lu, D., Chen, Q. Wang, G. Liu, L. Li, G. and Moran, E. (2016). "A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems." *International Journal of Digital Earth*. Vol.9, No.1, PP. 1-43.
- [12] Sinha, S., Jeganathan, C. Sharma, L.K. and Nathawat, M.S. (2015). "A review of radar remote sensing for biomass estimation." *International Journal of Environmental Science and Technology*. Vol.12, No.7, PP. 1779-1792.
- [13] Pang, S., Li, T. Wang, Y. Yu, H. and Li, X. (2009). "Spatial Interpolation and Sample Size Optimization for Soil Copper (Cu) Investigation in Cropland Soil at County Scale Using Cokriging." *Agriculture Sciences in China*. Vol. 8, No. 11, PP. 1369-1377.
- [14] Lehmann, A., Overton, J.M. and Leathwick, J.R. (2002). "GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction." *Ecological modelling*. Vol. 160, No. 2, PP. 198-207.
- [15] Akhavan, R., and Kleinn, C. (2009). "On the potential of kriging for estimation and mapping of forest plantation stock (Case study: Beneshki plantation)." *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. Vol. 17, No. 2, 303 -318.
- [16] Ahadi, Z., Alavi, S.J. and Hoseini, S.M. (2017). "Beech forest site productivity mapping using ordinary kriging and IDW (Case study: research forest of Tarbiat Modares University)," *Iranian Journal of Forest and Wood Product*, vol. 70, no. 1, pp. 93-102.
- [17] Meng, Q., Cieszewski, C.J. and Madden, M. (2009). "Large area forest inventory using Landsat ETM+: a geostatistical approach." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 64, No. 1, PP. 27-36.
- [18] Palmer, D.J., Höck, B.K. Kimberley, M.O. Watt, M.S. Lowe, D.J. and Payn, T.W. (2009). "Comparison of spatial prediction techniques for developing *Pinus radiata* productivity surfaces across New Zealand." *Forest Ecology and Management*. Vol. 258, No. 9, PP. 2046-2055.

- [19] Aertsen, W., Kint, V. Von Wilpert, K. Zirlwagen, D. Muys, B. and Van Orshoven, J. (2012). "Comparison of location-based, attribute-based and hybrid regionalization techniques for mapping forest site productivity." *Forestry: An International Journal of Forest Research*. Vol. 85, No. 4, PP. 539-550.
- [20] Viana, H., Aranha, J. Lopes, D. and Cohen, W.B. (2012). "Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models." *Ecological Modelling*. Vol. 226, No. 4, PP. 22-35.
- [21] Fayad, I., Baghdadi, N. Bailly, J.S. Barbier, N. Gond, V. Hérault, B. and Perrin, J. (2016). "Regional scale rain-forest height mapping using regression-kriging of spaceborne and airborne LiDAR data: application on French Guiana." *Remote Sensing*. Vol. 8. No. 3, PP. 1-18, 2016.
- [22] Li, W, Niu, Z. Liang, X. Li, Z. Huang, N. Gao, S. Wang, C. Shakir, M. (2015). "Geostatistical modeling using LIDAR-derived prior knowledge with SPOT-6 data to estimate temperate forest canopy cover and above-ground biomass via stratified random sampling." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 41. No. 4, PP. 88-98.
- [23] Fotheringham, A.S., Brunson, C.A. and Charlton, M.E. (2002). "Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships." New York, NY: John Wiley & Sons.
- [24] Green, J.L., Hastings, A. Arzberger, P. Ayala, F.J. Cottingham, K.L. Cuddington, K. Davis, F. Dunne, J.A. Fortin, M.J. Gerber, L. and Neubert, M. (2005). "Complexity in ecology and conservation: mathematical, statistical, and computational challenges." *Bioscience*. Vol. 55. No. 4, PP. 501-510.
- [25] McMillen, D.P. (2003). "Neighbourhood house price indexes in Chicago: a Fourier repeat sales approach." *Journal of Economic Geography*. Vol. 3, No. 1, PP. 57- 73.
- [26] Foody, G.M. "Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: An example focused on the NDVI-rainfall relationship." *Remote Sensing of Environment*. Vol.88, No.3, PP. 283-293.
- [27] Zhang, L. and Shi, H. (2004). "Local modeling of tree growth by geographically weighted regression," *Forest Science*, Vol.50, No.2, PP.225-244.
- [28] Lin, C.H., and Wen, T.H. (2011). "Using geographically weighted regression (GWR) to explore spatial varying relationships of immature mosquitoes and human densities with the incidence of dengue," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol.8, No.7, PP. 2798-2815.
- [29] Subedi, N. Zhang, L. and Zhen, Z. (2018). "Bayesian geographically weighted regression and its application for local modeling of relationships between tree variables." *iForest Biogeosciences and Forestry*. Vol.11, PP. 542-552.
- [30] Propastin, P.A. (2012). "Modifying geographically weighted regression for estimating aboveground biomass in tropical rainforests by multispectral remote sensing data," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol.18, No.1, PP. 82-90.
- [31] Wang, K., Zhang, C. and Li, W. (2012). "Comparison of Geographically Weighted Regression and Regression Kriging for Estimating the Spatial Distribution of Soil Organic Matter," *GIScience & Remote Sensing*. Vol.49, No.6, PP. 915-932.
- [32] Ou, G., Lv, Y., Xu, H. and Wang, G. (2019). "Improving Forest Aboveground Biomass Estimation of *Pinus densata* Forest in Yunnan of Southwest China by Spatial Regression using Landsat 8 Images." *Remote Sensing*, Vol.11, No. 23, PP. 1-27.
- [33] Chen, L., Ren, C. Zhang, B. Wang, Z. and Xi, Y. (2018). "Estimation of Forest Above-Ground Biomass by Geographically Weighted Regression and Machine Learning with Sentinel Imagery." *Forests*. Vol.9, No.582, PP. 1-20.
- [34] Sohrabi, H., and Shirvani, A. (2012). "Allometric equations for estimating standing biomass of Atlantic Pistache (*Pistacia atlantica* var. *mutica*) in khojir National Park." *Iranian Journal of Forest*. Vol.4. No.1, PP. 55-64.
- [35] Iranmanesh, Y., Sagheb, KH. Sohrabi, H. Jalali, S.Gh. and Hosseini, S.M. (2014). "Biomass and carbon Stocks of Brants oak (*Quercus brantii* Lindl.) in two vegetation forms in Lordegan, Chaharnahal & Bakhtiari Forests." *Iranian Journal of Forest and Research*. Vol.22, No.4, PP. 762-749.
- [36] Afrozandeh, A., Kiani, B. and Atarod, P. (2015). "Modelling the Standing Traits to Estimate Tree Volume and Biomass of *Acer monspessulanum* Subsp. *Cinerascens* (Boiss.) using Regression." *Ecology of Iranian Forests*. Vol.3, No.6, PP. 9-18.
- [37] Goovaerts, P., (1997). "Geostatistics for natural resources evaluation," Oxford university press. New York.1997, Vol. 42, P. 496.
- [38] Minasny, B., and McBratney, A.B. (2007). "Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function." *Geoderma*. Vol.140, No.4, PP. 324-336.
- [39] Odeh, I.O.A., McBratney, A.B. and Chittleborough, D.J. (1995). "Further Results on Prediction of Soil Properties from Terrain Attributes: Heterotopic Cokriging and Regression-Kriging," *Geoderma*, Vol.67, No.5, PP. 215-226.

- [40] Brunson, C., Fotheringham, A. and Charlton, M. (1998). "Spatial Nonstationarity and Autoregressive Models." *Environment and Planning A*. Vol.30, No.6, PP. 957-973.
- [41] Fotheringham, A., Charlton, M. and Brundson, C. (1998). "Geographically Weighted Regression: A Natural Evolution of the Expansion Method for Spatial Data," *Environment and Planning A*, Vol.30, No.11, PP. 1905-1927.
- [42] Nussbaum, M., Papritz, A. Baltensweiler, A. and Walthert, L. (2014). "Estimating soil organic carbon stocks of Swiss forest soils by robust external-drift kriging." *Geoscientific Model Development*. Vol.7, No.3, PP. 1197-1210.
- [43] Mishra, U., Lal, R. Liu, D. and Meirvenne, M.V. (2010). "Predicting the Spatial Variation of the Soil Organic Carbon Pool at a Regional Scale." *Soil Science Society of America Journal*. Vol.74, No.3, PP. 906-914.