



اثر نوع پیش‌پردازش رقومی و روش مدل‌سازی بر برآورد اندوخته کربن روی زمینی جنگل‌های زاگرس با استفاده از تصویرهای لندست ۸

امیر صفری^۱، هرمز سهرابی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۹ مهر ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۷ دی ۱۳۹۷

دسترسی اینترنتی: ۳۰ بهمن ۱۳۹۷

واژه‌های کلیدی:

پیش‌پردازش تصاویر

روش مدل‌سازی آماری

لندست ۸

اندوخته کربن روی زمینی

جنگل‌های زاگرس

چکیده

هدف این مطالعه، بررسی اثر روش‌های مختلف پیش‌پردازش تصویرهای لندست و روش‌های مدل‌سازی بر صحت برآورد اندوخته کربن روی زمینی در جنگل‌های زاگرس در دو منطقه گهواره با حداقل تخریب و سرفیروزآباد با شدت تخریب بالا در استان کرمانشاه است. مقایسه روش‌های مختلف پیش‌پردازش رقومی بر روی تصویرهای لندست ۸ را در قالب سناریوهای مختلف پیش‌پردازش‌های تصحیحات رادیومتری، اتمسفری، توپوگرافی و ترکیب آن‌ها اجرا شد. برای هر سناریو چهار روش مدل‌سازی رگرسیون خطی، مدل جمعی تعمیم‌یافته، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان مورد آزمون قرار گرفتند. در اغلب موارد تصحیح رادیومتری با ضریب تبیین اصلاح شده 0.71 ($R^2_{adj}=0.71$) و درصد ریشه میانگین مربعات خطای 30% ($RMSE\%=0.30$) نتایج بهتری ارائه کرد. مقایسه چهار روش مدل‌سازی بیانگر صحت پایین‌تر برآوردها در منطقه سرفیروزآباد با شدت تخریب بیشتر ($RMSE\%=0.58$) در مقایسه با منطقه گهواره با تخریب کمتر ($R^2_{adj}=0.74$) است. روش جنگل تصادفی برای منطقه گهواره و روش رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم‌یافته برای منطقه سرفیروزآباد نتایج بهتری ارائه نمود. به‌هرحال، نتایج نشان داد که انتخاب روش پیش‌پردازش و مدل‌سازی مناسب تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر صحت برآورد مشخصه‌های کمی جنگل با استفاده از تصویرهای لندست دارد.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: hsohrabi@modares.ac.ir

مقدمه

نگرانی گسترده در جوامع بین‌المللی به دلیل افزایش انتشار کربن و نقش آن در گرمایش جهانی سبب شده تا اندازه‌گیری و پایش اندوخته کربن اکوسیستم زمینی در مقیاس ملی، منطقه‌ای و جهانی به یک موضوع پژوهشی مهم تبدیل گردد (۲۰). در طی دهه اخیر اکوسیستم جنگلی با بیشترین اندوخته کربن در بین اکوسیستم زمینی، نقش مهمی در تعادل کربن جهانی را بازی کرده است (۳۵). به‌طورکلی، کربن در جنگل‌ها در دو منبع زی‌توده و مواد آلی خاک اندوخته شده است (۲۳). کربن موجود در خاک به‌طور فیزیکی و شیمیایی حفظ‌شده و به‌آسانی اکسید نمی‌شوند (۱۳، ۱۵ و ۳۴). در مقابل کربن زی‌توده و بخصوص اندوخته کربن روی زمینی به آشوب‌های طبیعی و انسانی حساس است، از این‌رو اغلب مطالعات بر روی کمی کردن اندوخته کربن روی زمینی متمرکز شده‌اند. روش‌های مختلفی برای برآورد اندوخته کربن معرفی شده است که در بین آن‌ها استفاده از فن‌های سنجش‌از‌دور به‌عنوان یک روش سریع و کم‌هزینه برای استفاده در سطح وسیع و نقاط غیرقابل‌دسترس مورد توجه قرار گرفته است (۲۰). بسیاری از داده‌های سنجش‌از‌دوری به دلیل هزینه بالا و عدم پوشش مکانی و زمانی با چالش جدی برای استفاده روبرو هستند (۶ و ۱۷). برنامه تصویربرداری از سطح زمین توسط ماهواره لندست که از سال ۱۹۷۲ آغاز شده، اطلاعات ارزشمندی را طی چند دهه اخیر برای مطالعات مختلف فراهم آورده است (۳۳). تصویرهای لندست با ویژگی‌های منحصربه‌فردی از قبیل آرشو طولانی‌مدت و رایگان، پوشش جهانی و تفکیک زمانی مناسب فراهم آورنده یک منبع ارزشمند و مهم برای آماربرداری ویژگی‌های پوشش گیاهی است (۱۱، ۳۳، ۳۷ و ۴۰). که از سال ۲۰۰۸ برای تحقیقات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفته است (۵ و ۲۸).

اثرات مختلفی مانند جذب اتمسفری، پراکندگی تابش الکترومغناطیسی، اختلافات توپوگرافی و اثرات سایه بر نتایج برآوردها با استفاده از تصویرهای لندست و سایر تصویرهای ماهواره‌ای اثر می‌گذارد (۱۰). بنابراین، برای به حداقل رساندن

اثر این عوامل انجام پیش‌پردازش‌های مناسب برای تصحیح اثرات حس‌گر، تابش خورشیدی، اتمسفری و توپوگرافی یک اقدام لازم و ضروری است (۳۸). زیرا تمامی محاسبات بعدی به تصویرهای تولیدی بعد از اجرای مرحله پیش‌پردازش وابسته هستند (۳). این پیش‌پردازش‌ها عموماً شامل تصحیح هندسی، تبدیل به رادیانس، تصحیح اتمسفری و تصحیح توپوگرافی هستند. به‌هرحال برای استفاده از این داده‌ها یک رویکرد واحد معرفی شده وجود نداشته و تعداد زیادی رویکردهای متناقض استفاده شده است (۴۰).

تصحیح رادیومتری شامل آن دسته از تصحیحات است که بر روی درجات خاکستری اعمال شده و فقط با تغییر مقدارهای آن‌ها به‌صورت مجزا (پیکسل به پیکسل) نسبت به اصلاح برخی خطاها اقدام می‌کند (۲). این تصحیح ارزش رقومی در تصویرهای ماهواره‌ای را به رادیانس در سطح زمین ارتباط می‌دهد و نیازمند ضرایب کالبراسیون حس‌گر است، در مقابل تصحیح اتمسفری یک رویکرد معنی‌دار برای کاهش اثرات اتمسفری و تبدیل رادیانس سطح زمین به مقدار واقعی تشعشع منعکس شده از سطح زمین است (۱۰).

تصحیحات توپوگرافی مخصوصاً در مناطق کوهستانی، برای حذف اثرات شیب، جهت و ارتفاع استفاده می‌شود. تصحیح توپوگرافی سبب حذف اثر شکل نامنظم زمین بر روی انعکاسات ضبط‌شده توسط حس‌گرهای ماهواره می‌شود. این اثرات سبب یک اختلاف شدید در پاسخ طیفی برای انواع پوشش گیاهی مشابه است، به‌طوری‌که در نواحی آفتابی انعکاس بیشتر و در نواحی سایه این انعکاس کمتر خواهد بود (۵ و ۳۱).

چندین مطالعه برای ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای انجام گرفته است. فوی و همکاران (۱۴) روش‌های مختلف تصحیح اتمسفری را بر روی تصویرهای لندست در مالزی انجام داد. نتایج نشان داد روش تصاویر Actor3 از دیگر روش‌ها بهتر است. هانتسون و چوویکو (۲۰) روش‌های مختلف تصحیح توپوگرافی را بروی صحت تهیه نقشه پوشش زمین در کشور اسپانیا مورد مقایسه قرار دادند

چند متغیره بودن است (۹ و ۴۵). این تحقیق سعی دارد اثر روش های پیش پردازش مانند تصحیح رادیومتری، اتمسفری، توپوگرافی و ترکیب آن ها و روش های مختلف مدل سازی آماری را برای برآورد اندوخته کربن روی زمینی با استفاده از تصویرهای لندست باهم مقایسه نماید.

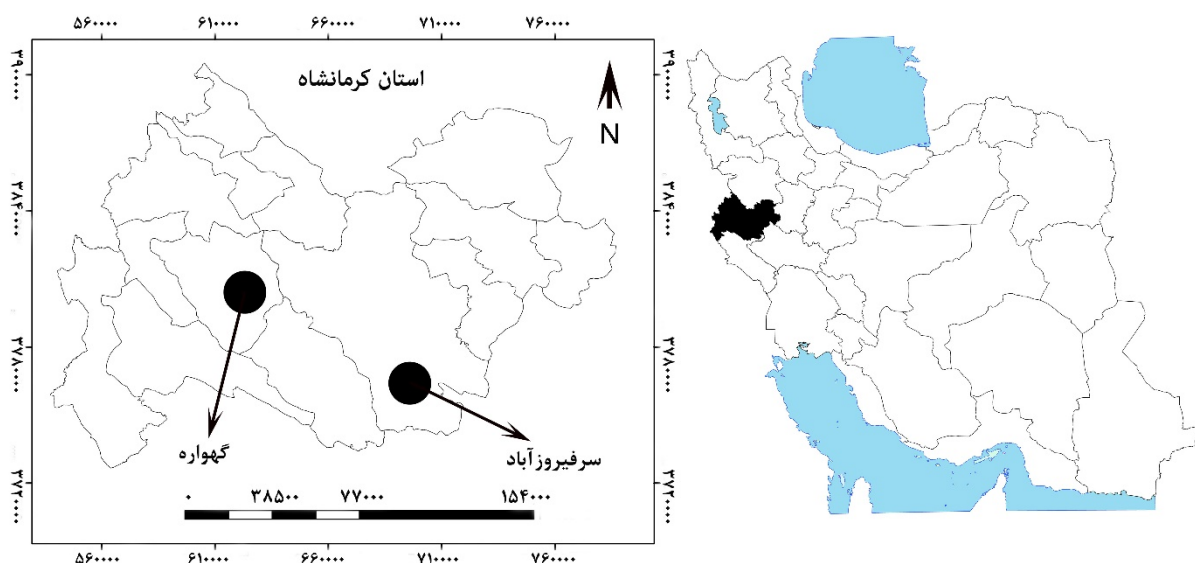
مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در بخشی از جنگل های زاگرس و در استان کرمانشاه انجام شد. برای انجام این مطالعه، دو توده یکی در جنگل های بخش سر فیروزآباد در شهرستان کرمانشاه با تخریب شدید و دیگری جنگل های بخش گهواره در شهرستان دالاهو با حداقل تخریب و دست خوردگی انتخاب شد (شکل ۱). گهواره با اقلیم نیمه مرطوب در دامنه ارتفاعی ۱۴۶۲ تا ۲۰۹۷ و منطقه سر فیروزآباد با اقلیم نیمه خشک در دامنه ارتفاعی ۱۲۳۰ تا ۲۱۲۷ قرار دارد و به ترتیب دارای متوسط دمای سالانه ۱۵/۵۰ و ۲۲/۷ درجه سانتی گراد هستند. تپ جنگل در هر دو منطقه به صورت شاخه زاد است.

که روش C بهتر از سایر روش ها بوده است. فوی و همکاران (۱۴) روش های مختلف تصحیح اتمسفری را برای طبقه بندی پوشش زمین با استفاده از تصاویر لندست ۸ را مورد آزمون قرار دادند. صحت طبقه بندی در حالت بدون استفاده از تصحیح اتمسفری ۶۸٪ بود که بعد از تصحیح اتمسفری به روش MODTRAN و تصحیح توپوگرافی به روش Cosine به ۹۳٪ افزایش پیدا کرد. به هر حال برای استفاده از تصویرهای ماهواره و از جمله لندست یک رویکرد واحد معرفی نشده و تعداد زیاد رویکردهای متناقض وجود دارد.

عامل تأثیرگذار دیگر بر صحت برآورد مشخصه های کمی جنگل از جمله اندوخته کربن، روش های مدل سازی آماری است. با توجه به اینکه عملکرد روش های مدل سازی به شرایط منطقه، مقیاس مورد مطالعه و اندازه نمونه بستگی دارد، تاکنون هیچ روش مدل سازی به عنوان بهترین معرفی نشده است (۴۲). طبق یافته پژوهش های گذشته، روابط بین متغیرهای طیفی داده های سنجنش از دور و مشخصه های کمی جنگل اغلب از نوع غیرخطی است. بنابراین الگوریتم های یادگیری ماشین به طور گسترده در دهه های اخیر توسعه یافته اند، زیرا دارای مزایای متعددی مانند عدم نیاز به پیروی از هرگونه توزیع و



شکل ۱. منطقه مورد بررسی

جمع‌آوری اطلاعات زمینی و محاسبه اندوخته کربن

مونه‌بندی (Stratification) جنگل سبب افزایش دقت برآورد ویژگی‌های جنگل می‌شود (۳۷). برای مونه‌بندی دو منطقه موردبررسی، از نقشه شاخص سطح برگ استخراج‌شده از تصویرهای لندست با استفاده از الگوریتم جهانی ارائه‌شده توسط نول و همکاران (۲۸) انجام شد. زیرا استفاده از شاخص سطح برگ در مونه‌بندی کمک می‌کند تا قطعات نمونه در کل ساختار تاج پراکنش یابد. پس از تهیه نقشه شاخص سطح برگ، این نقشه برای هرکدام از دو منطقه به‌طور مجزا به سه مونه با تراکم کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد. سپس، در هر مونه پس از جنگل‌گردشی یک چندضلعی برای برداشت نمونه‌ها انتخاب شد. نمونه‌برداری براساس طرح تصادفی-منظم با ابعاد شبکه آماربرداری 200×200 متر انجام گرفته و در نهایت در منطقه سر فیروزآباد ۶۱ نمونه و در منطقه گهواره ۶۳ نمونه برداشت شد. قطعات نمونه به شکل مربع و اندازه نمونه‌ها مطابق با پیکسل لندست (30×30 متر) انتخاب شد. اندوخته کربن روی زمینی درختان با استفاده از روابط آلومتریک ارائه‌شده توسط ایران‌منش (۱) برای درختان بلوط زاگرس محاسبه شد، و در نهایت از جمع اندوخته کربن تک‌تک درختان در نهایت مقدار کربن روی زمینی در هکتار و در قطعه‌نمونه به دست آمد.

داده‌های لندست

برای بررسی اثر پیش‌پردازش تصویرهای لندست بر برآورد اندوخته کربن روی زمینی در جنگل‌های موردبررسی، یک فریم از این تصاویر به شماره گذر ۱۶۷ و ردیف ۳۶ مربوط به تاریخ دهم آگوست برابر با ۱۹ مرداد سال ۱۳۹۴ و نزدیک به زمان آماربرداری از پایگاه USGS دانلود شد.

پیش‌پردازش تصاویر

دقت هندسی تصویرهای اخذشده با استفاده از بردارهای جاده و رودخانه کنترل گردید، با توجه به دقت تصویرها

تصحیح هندسی انجام نگرفت. برای حذف اثر توپوگرافی از باندهای طیفی در دامنه مرئی تا مادون‌قرمز با طول‌موج کوتاه تصویر لندست از روش تصحیح توپوگرافی C استفاده شد. این روش در مطالعات مختلف به‌عنوان یک روش مناسب و کارا برای تصحیح توپوگرافی تصاویر لندست معرفی شده است (۵، ۱۹، ۲۶، ۳۱، ۳۲ و ۳۶). تصحیح توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی زمین استخراج‌شده از تصاویر ASTER انجام شد. ارزش رقومی هر باند طیفی توسط ضرایب کالیبراسیون موجود در داده همراه با باندها به رادیانس در-حس‌گر (at-sensor) مورد تصحیح رادیومتری قرار گرفت. تصحیح اتمسفری تصویرهای مورد استفاده توسط روش (Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube) FLAASH انجام شد. به‌منظور بررسی اثر پیش‌پردازش مختلف بر صحت برآورد اندوخته کربن توسط تصویرهای لندست چندین سناریو در نظر گرفته شد. سناریوهای یک تا چهار به ترتیب شامل تصویرهای خام و بدون هیچ پیش‌پردازی، فقط تصحیح رادیومتری، فقط تصحیح اتمسفری، فقط تصحیح توپوگرافی بودند. ترکیب تصحیحات رادیومتری و توپوگرافی در قالب سناریو شماره پنج و ترکیبی از تصحیحات رادیومتری، اتمسفری و توپوگرافی در سناریو شماره شش موردبررسی قرار گرفتند.

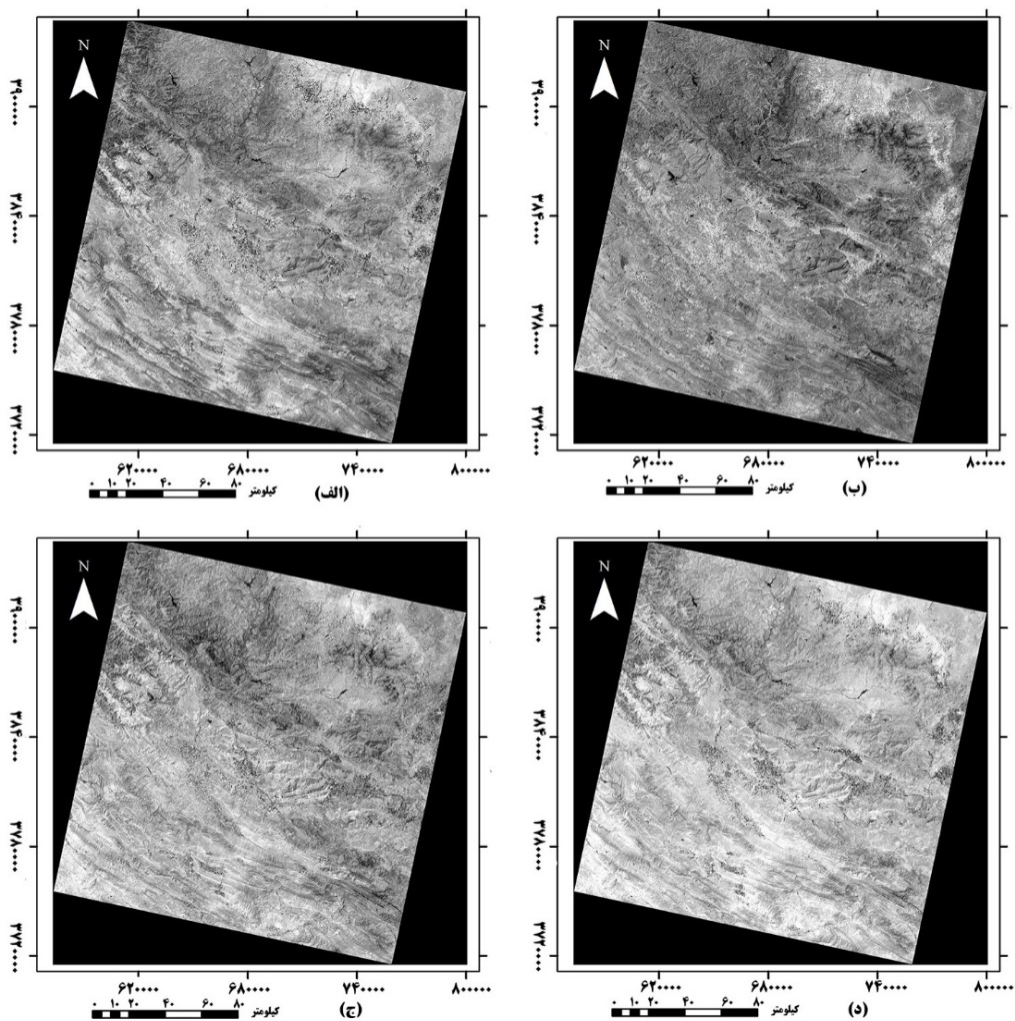
متغیرهای طیفی

متغیرهای طیفی استخراج‌شده از تصویرهای لندست ۸ که در پژوهش‌های گذشته به‌عنوان مهم‌ترین متغیر برای برآورد سنجش‌ازدوری زی‌توده معرفی شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱ و شکل‌های ۲، ۳ و ۴). گروه اول مقدارهای باندهای اصلی حس‌گر شامل باندهای قرمز (R)، مادون‌قرمز نزدیک (NIR)، مادون‌قرمز با طول‌موج کوتاه (SWIR1&2)، گروه دوم شامل نسبت‌های باندهای ساده حاصل از ۴ باند ذکرشده در گروه مقدارهای باندهای است. گروه شاخص‌های گیاهی از ۳ شاخص تشکیل شده است.

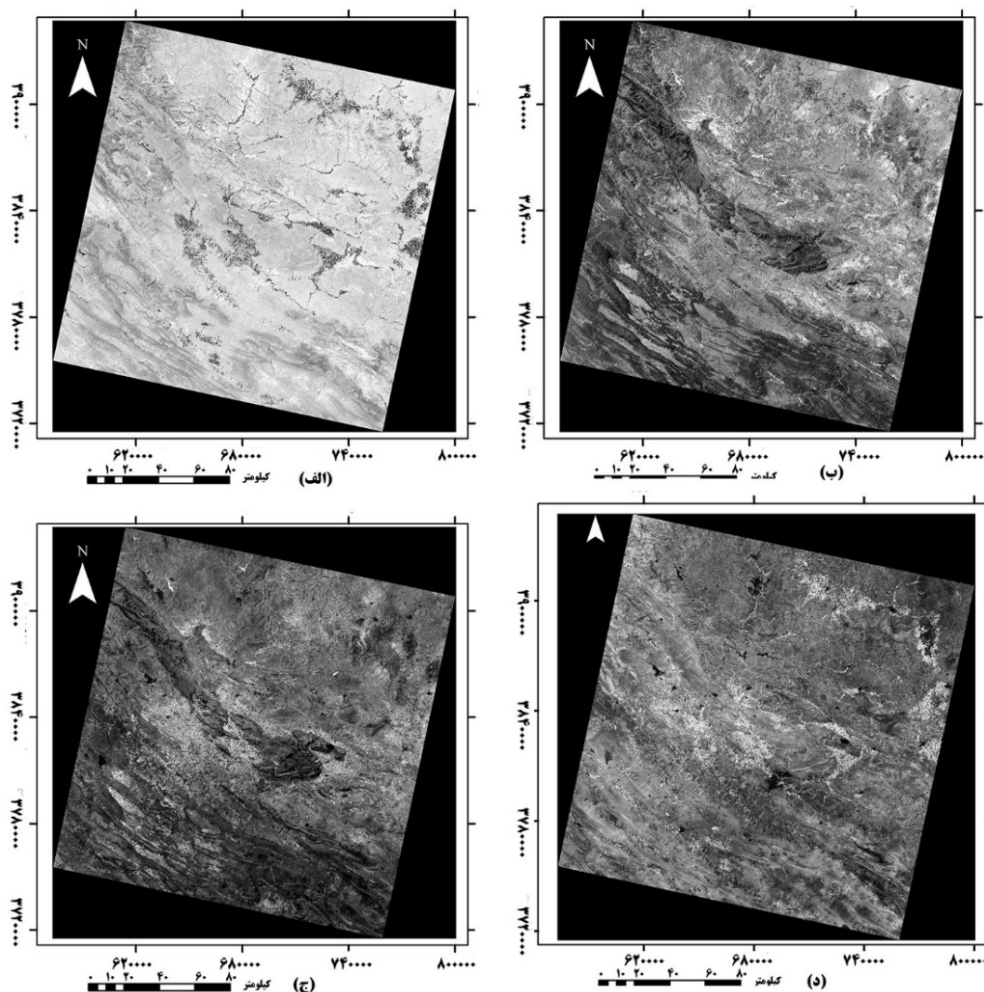
جدول ۱. متغیرهای استخراج شده از تصویر لندست برای برآورد کربن روی زمینی

جزئیات	گروه متغیرها	گروه طیفی
R, NIR, SWIR 1 & 2	مقدارهای بانندی	۱
R/NIR, R/SWIR1, R/SWIR2, SWIR1/SWIR2	نسبت‌های بانندی ساده	۲
NDVI, DVI	شاخص‌های گیاهی	۳

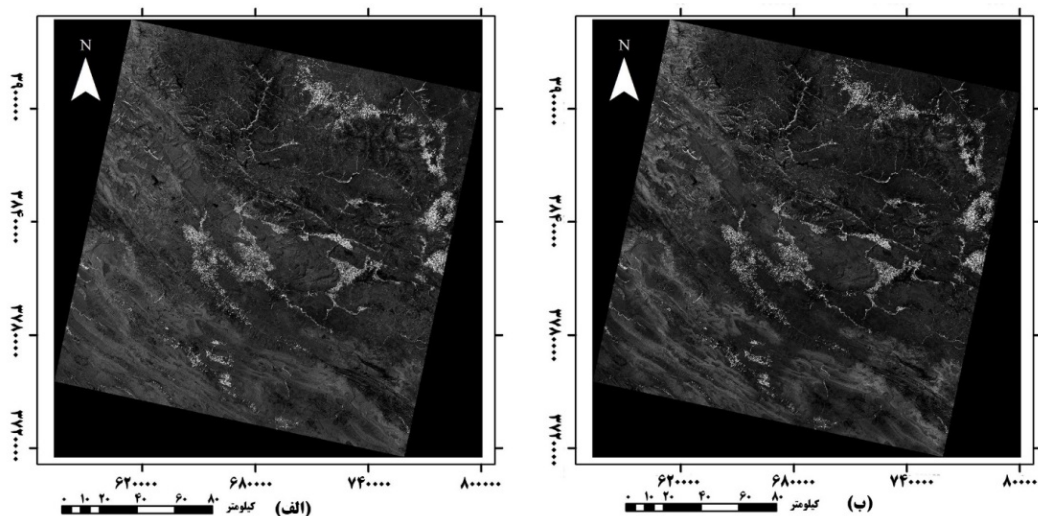
R: Red, NIR: Near infrared, SWIR 1 & 2: Short wave infrared 1 & 2, NR: NIR/R, NDVI: Normalized Difference Vegetation Index $(=(NIR-R)/(NIR+R))$, DVI: Difference Vegetation Index $(=NIR-R)$



شکل ۲. تصویر باندهای قرمز (الف)، مادون قرمز نزدیک (ب) (NIR)، مادون قرمز با طول موج کوتاه ۱ (SWIR1) (ج) و مادون قرمز با طول موج کوتاه ۲ (SWIR2) (د)



شکل ۳. تصویر نسبت‌های بانندی قرمز به مادون قرمز (R/NIR) (الف)، قرمز به مادون قرمز با طول موج کوتاه ۱ (R/SWIR1) (ب)، قرمز به مادون قرمز با طول موج کوتاه ۲ (R/SWIR2) (ج) و مادون قرمز با طول موج کوتاه ۱ به مادون قرمز با طول موج کوتاه ۲ (SWIR1/SWIR2) (د)



شکل ۴. تصویر شاخص‌های گیاهی DVI (الف) و NDVI (ب)

روش های مدل سازی

دامنه گسترده ای از روش ها، شامل روش های پارامتریک، نیمه پارامتریک و ناپارامتریک برای کمی سازی اندوخته کربن با استفاده از سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق از یک روش پارامتریک (رگرسیون خطی چندگانه)، یک روش نیمه پارامتریک (مدل جمعی تعمیم یافته) و دو روش ناپارامتریک (جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان) استفاده شد. رگرسیون خطی چندگانه توسط حداقل مربعات برازش می یابد و عموماً در برآورد مشخصه های کمی جنگل مورد استفاده قرار می گیرد. مدل جمعی تعمیم یافته یک روش نیمه پارامتری بوده و براساس چارچوب کلی مدل خطی تعمیم توسعه یافته است. روش بسیار مناسبی برای کشف روابط پیچیده غیرخطی بدون هیچ گونه پیش فرض در مورد شکل مدل است. چارچوب مدل سازی توسط این روش به این شکل است که، (۱) روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته از یک رابطه خطی یا غیرخطی تبعیت می کند، و (۲) مدل می تواند این روابط را به طور هم زمان تخمین زده و سپس با استفاده از آن برآوردها را انجام دهد (۳۹). جنگل تصادفی یک روش مدل سازی ناپارامتری و درخت پایه است که یک مجموعه درختان رگرسیون و طبقه بندی است و گسترش یافته مدل رگرسیون درختی است (۴ و ۷). درختان جنگل از رویکرد Bagging توسط یک زیرمجموعه از نمونه های آموزشی با جایگزینی ایجاد می شوند. یعنی در زمان های مختلف، نمونه مشابه می تواند انتخاب شود درحالی که نمونه هایی هم وجود دارد که ممکن است اصلاً انتخاب نشوند. جنگل با افزایش درختانی با واریانس بالا و اریبی پایین توسعه می یابد. در واقع این مدل از یک مجموعه تصمیم گیری قانون-مبنا برای ارزیابی رابطه های بین متغیرهای وابسته و مستقل استفاده می کند (۱۷). ماشین بردار پشتیبان که به ماشین کرنل هم معروف است، یک الگوریتم آماری است. این مدل با این فرض اجرا می شود که هر مجموعه از متغیرهای مستقل یک رابطه منحصر به فرد با متغیر وابسته دارد و گروهی از متغیرهای مستقل می توانند برای تشخیص قوانین جهت پیش بینی متغیر هدف به کار برده شوند.

این روش با تبدیل داده های ورودی به یک فضای ابر صفحه چندبعدی توسط تابع کرنل عمل می کند که سبب گروه بندی داده های ورودی برای برآورد متغیر هدف استفاده می شوند. ایده اصلی روش ماشین بردار پشتیبان به حداقل رساندن ریسک ساختاری برای بهینه سازی و تعدیل مشکل بیش برازش است (۱۷).

ارزیابی مدل ها

برای ارزیابی صحت مدل ها از روش ارزیابی متقابل به روش Leave-one-out استفاده شد. برای مقایسه روش های آماری مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از مقادیرهای حقیقی اندازه گیری شده و برآوردی توسط اجرای مدل ها از شاخص های ضریب تبیین اصلاح شده (رابطه ۱)، جذر میانگین مربعات خطا و درصد جذر میانگین مربعات خطا (رابطه های ۲ و ۳)، اریبی و درصد اریبی (رابطه های ۴ و ۵) استفاده شده است.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1-R^2) \times (m-1)}{n-(k-1)} \quad [1]$$

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

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad [3]$$

$$Bias = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad [4]$$

$$Bias\% = \frac{Bias}{\bar{y}} \times 100 \quad [5]$$

در این رابطه ها؛ R_{adj}^2 ضریب تبیین اصلاح شده، y_i مقدار مشاهده شده، \hat{y}_i مقدار برآورد شده، \bar{y} مقدار میانگین مشاهدات، n تعداد مشاهدات، m تعداد متغیرهای مستقل و k تعداد متغیرهای وابسته وارد شده در مدل.

نتایج

مشخصه های آماری محاسبه شده از ۱۲۴ قطعه نمونه برای مقدار اندوخته کربن روی زمینی در هر دو منطقه مورد بررسی نشان می دهد که جنگل گهواره میانگین اندوخته کربن بالاتری

کربن روی زمینی در جنگل گهواره ۳۸ درصد بیشتر از این مقدار در جنگل سرفیروز آباد است. (۹/۹۳ تن در هکتار) نسبت به جنگل سرفیروزآباد (۶/۱۲ تن در هکتار) دارد (جدول ۲). به عبارت دیگر میانگین اندوخته

جدول ۲. مشخصه‌های آماری اندازه‌گیری شده اندوخته کربن روی زمینی در جنگل‌های مورد مطالعه

منطقه	مونه	تعداد نمونه	اندوخته کربن روی زمینی (تن در هکتار)		
			کمینه	میانگین	بیشینه
سرفیروزآباد	۱	۲۱	۲/۳	۴/۶	۸/۹
	۲	۲۰	۲/۵	۶/۶	۱۲/۹
	۳	۲۰	۴/۱	۷/۴	۱۰/۲
	کل	۶۱	۲/۳	۶/۲	۱۲/۹
گهواره	۱	۲۴	۰	۴/۴	۹/۶
	۲	۲۰	۳/۸	۱۱/۱	۲۲/۰
	۳	۱۹	۱۱/۳	۱۵/۸	۲۵/۷
	کل	۶۳	۰	۹/۹	۲۵/۷
مجموع دو منطقه		۱۲۴	۰	۸/۱	۲۵/۷

یافته است. روش ماشین بردار پشتیبان برآوردهای با اریبی بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها ارائه نموده است.

سناریو ۲: فقط تصحیح رادیومتری لندست ۸

برآوردهای اندوخته کربن روی زمینی برای سناریو ۲ (فقط تصحیح رادیومتری) برای دو منطقه مورد بررسی سرفیروزآباد و گهواره و کل دو منطقه باهم نشان می‌دهد که مدل رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم‌یافته (ضریب تبیین اصلاح شده ۰/۵۸ و درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۵/۸۴ درصد) در منطقه سرفیروزآباد برآورد بهتری نسبت به روش‌های ناپارامتریک جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (ضریب تبیین اصلاح شده ۰/۴۶ و درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۸/۵۱ درصد) ارائه کرده است. روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده برآوردهای با اریبی جزئی ارائه نموده‌اند به استثناء روش ماشین بردار پشتیبان در منطقه گهواره که اریبی نسبتاً بالاتری (۳/۰۹ درصد) محاسبه نموده است (جدول ۴).

مقایسه اثر پیش‌پردازش‌های مختلف تصاویر و روش‌های مدل‌سازی بر برآورد اندوخته کربن روی زمینی

برآوردهای اندوخته کربن روی زمینی برای منطقه‌های مورد بررسی با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا، درصد جذر میانگین مربعات خطا، اریبی و درصد اریبی با استفاده از پیش‌پردازش‌های مختلف و روش‌های مدل‌سازی مختلف در جدول‌های ۳ تا ۸ ارائه شده است.

سناریو ۱: تصویرهای خام لندست ۸

برآوردهای اندوخته کربن روی زمینی برای سناریو ۱ (تصویرهای خام و بدون هیچ پیش‌پردازی) برای دو منطقه مورد بررسی سرفیروزآباد و گهواره و کل دو منطقه باهم در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اندوخته کربن روی زمینی در توده کمتر دست‌خورده گهواره (ضریب تبیین اصلاح شده ۰/۷۱) نسبت به توده دست‌خورده سرفیروزآباد (ضریب تبیین اصلاح شده ۰/۵۷) بهتر برازش

جدول ۳. مقادیر ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا و اریبی محاسبه شده برای برآورد اندوخته کربن روی زمینی توسط روش های مدل سازی رگرسیون خطی، مدل جمعی تعمیم یافته، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در سناریو ۱

روش	منطقه	ضریب تبیین اصلاح شده	جذر میانگین مربعات خطا (ton/ha)	درصد جذر میانگین مربعات خطا	اریبی (ton/ha)	درصد اریبی
رگرسیون خطی	سرفیروزآباد	۰/۵۷	۱/۶۰	۲۵/۸۴	۰/۰۰	-۰/۰۵
	گهواره	۰/۷۰	۳/۱۶	۳۱/۸۳	۰/۰۰	۰/۰۰
	کل	۰/۷۱	۲/۶۰	۳۲/۰۹	-۰/۰۱	-۰/۱۲
مدل جمعی تعمیم یافته	سرفیروزآباد	۰/۵۸	۱/۵۸	۲۵/۵۲	۰/۰۱	۰/۲۲
	گهواره	۰/۷۱	۳/۱۳	۳۱/۳۵	-۰/۰۱	-۰/۱۳
	کل	۰/۷۱	۲/۶۱	۳۲/۲۲	-۰/۰۲	-۰/۲۳
جنگل تصادفی	سرفیروزآباد	۰/۴۶	۱/۷۷	۲۸/۵۱	-۰/۰۱	-۰/۱۲
	گهواره	۰/۷۵	۲/۸۶	۲۸/۷۸	-۰/۰۵	-۰/۵۲
	کل	۰/۷۱	۲/۵۷	۳۱/۷۹	-۰/۰۱	-۰/۱۲
ماشین بردار پشتیبان	سرفیروزآباد	۰/۵۵	۱/۶۴	۲۶/۴۱	-۰/۱۴	-۲/۲۹
	گهواره	۰/۷۳	۲/۹۸	۳۰/۰۵	-۰/۲۴	-۲/۴۷
	کل	۰/۷۱	۲/۶۰	۳۲/۰۶	-۰/۱۳	-۱/۵۶

جدول ۴. مقادیر ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا و اریبی محاسبه شده برای برآورد اندوخته کربن روی زمینی توسط روش های مدل سازی رگرسیون خطی، مدل جمعی تعمیم یافته، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در سناریو ۲

روش	منطقه	ضریب تبیین اصلاح شده	جذر میانگین مربعات خطا (ton/ha)	درصد جذر میانگین مربعات خطا	اریبی (ton/ha)	درصد اریبی
رگرسیون خطی	سرفیروزآباد	۰/۵۶	۱/۶۳	۲۶/۱۸	۰/۰۰	-۰/۰۴
	گهواره	۰/۷۱	۳/۰۷	۳۰/۹۵	۰/۰۱	۰/۱۵
	کل	۰/۷۱	۲/۵۹	۳۱/۹۳	-۰/۰۱	-۰/۱۲
مدل جمعی تعمیم یافته	سرفیروزآباد	۰/۵۸	۱/۵۹	۲۵/۶۸	۰/۰۱	۰/۲۳
	گهواره	۰/۷۱	۳/۰۹	۳۰/۹۸	-۰/۰۱	-۰/۰۹
	کل	۰/۷۰	۲/۶۶	۳۲/۸۲	-۰/۰۱	-۰/۱۶
جنگل تصادفی	سرفیروزآباد	۰/۴۶	۱/۷۸	۲۸/۶۵	۰/۰۰	۰/۰۵
	گهواره	۰/۷۵	۲/۸۷	۲۸/۹۵	۰/۰۴	۰/۴۰
	کل	۰/۷۳	۲/۵۰	۳۰/۸۹	-۰/۰۶	-۰/۸۰
ماشین بردار پشتیبان	سرفیروزآباد	۰/۵۱	۱/۷۱	۲۷/۵۴	۰/۰۲	۰/۲۸
	گهواره	۰/۷۴	۲/۹۲	۲۹/۴۵	-۰/۳۱	-۳/۰۹
	کل	۰/۷۲	۲/۵۷	۳۱/۷۰	۰/۱۵	-۱/۸۷

سناریو ۳: فقط تصحیح اتمسفری لندست ۸

ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا و اریبی محاسبه شده برای برآوردهای اندوخته کربن روی زمینی در سناریو ۳ (فقط تصحیح اتمسفری) برای دو منطقه مورد بررسی سرفیروزآباد و گهواره و کل دو منطقه باهم در

جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که روش جنگل تصادفی نتایج بهتری نسبت به دو روش رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم یافته ارائه کرده است. بهترین ضریب تبیین اصلاح شده و درصد جذر میانگین مربعات خطای محاسبه برای منطقه سرفیروزآباد ۰/۳۲ و ۳۱/۹۰٪ است. در منطقه

دست‌خورده سرفیروزآباد بالاترین مقادیر ضریب تبیین اصلاح‌شده و پایین‌ترین درصد جذرمیانگین مربعات خطابه ترتیب ۰/۶۴ و ۳۴/۴۰٪ توسط روش‌های ناپارامتریک جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان محاسبه شد (جدول ۵).

جدول ۵. مقادیر ضریب تبیین اصلاح‌شده، جذر میانگین مربعات خطا و اریبی محاسبه‌شده برای برآورد اندوخته کربن روی زمینی توسط روش‌های مدل‌سازی رگرسیون خطی، مدل جمعی تعمیم‌یافته، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در سناریو ۳

روش	منطقه	ضریب تبیین اصلاح‌شده	جذر میانگین مربعات خطا (ton/ha)	درصد جذر میانگین مربعات خطا	اریبی (ton/ha)	درصد اریبی
رگرسیون خطی	سرفیروزآباد	۰/۲۴	۲/۰۴	۳۳/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰
	گهواره	۰/۵۸	۳/۷۴	۳۷/۷۵	۰/۰۶	۰/۶۱
	کل	۰/۵۴	۳/۲۹	۴۰/۷۲	۰/۰۰	۰/۰۱
مدل جمعی تعمیم‌یافته	سرفیروزآباد	۰/۲۸	۲/۰۳	۳۳/۳۵	۰/۰۴	۰/۶۷
	گهواره	۰/۶۱	۳/۵۷	۳۵/۸۳	-۰/۰۳	-۰/۲۶
	کل	۰/۵۶	۳/۲۱	۳۹/۷۰	۰/۰۱	۰/۱۲
جنگل تصادفی	سرفیروزآباد	۰/۳۲	۱/۹۵	۳۱/۹۰	-۰/۰۵	-۰/۷۹
	گهواره	۰/۶۴	۳/۴۱	۳۴/۴۰	-۰/۰۷	-۰/۷۵
	کل	۰/۶۰	۲/۹۴	۳۶/۴۸	۰/۰۲	۰/۱۹
ماشین بردار پشتیبان	سرفیروزآباد	۰/۲۵	۲/۰۵	۳۳/۵۴	-۰/۱۱	-۱/۸۴
	گهواره	۰/۶۴	۳/۴۶	۳۴/۸۷	-۰/۴۷	-۴/۷۳
	کل	۰/۶۳	۲/۹۴	۳۶/۵۳	-۰/۳۴	-۴/۱۸

سناریو ۴: فقط تصحیح توپوگرافی لندست ۸

برآوردهای اندوخته کربن روی زمینی برای سناریو ۴ برای دو منطقه موردبررسی سرفیروزآباد و گهواره و کل دو منطقه باهم در جدول ۶ نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای منطقه سرفیروزآباد و گهواره به ترتیب مدل جمعی تعمیم‌یافته (ضریب تبیین اصلاح‌شده ۰/۵۷ و درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۵/۹۰ درصد) و جنگل تصادفی (ضریب تبیین اصلاح‌شده ۰/۵۷ و درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۹/۷۶ درصد) نتایج بهتری حاصل کرده‌اند (جدول ۶). روش رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم‌یافته برآوردهای با اریبی کمتری ارائه نموده است.

سناریو ۵: تصحیح رادیومتری + توپوگرافی لندست ۸

مقادیر ضریب تبیین اصلاح‌شده و جذر میانگین مربعات خطای برآورد شده برای اندوخته کربن روی زمینی برای

سناریو ۵ در منطقه موردبررسی سرفیروزآباد دو روش رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم‌یافته نتایج بهتری ارائه نموده است (ضریب تبیین اصلاح‌شده ۰/۵۵ و درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۶/۳۲ درصد). یافته‌ها در منطقه گهواره بیانگر این مطلب است که جنگل تصادفی با اختلاف جزئی نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها محاسبه کرده است (ضریب تبیین اصلاح‌شده ۰/۷۴ و درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۹/۷۶ درصد). روش‌های مدل‌سازی مختلف استفاده‌شده نتایج نسبتاً مشابهی در بخش ضریب تبیین اصلاح‌شده و درصد جذر میانگین مربعات خطا ارائه کرده‌اند. روش‌های رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم‌یافته نتایجی با اریبی کمتر محاسبه نموده‌اند (جدول ۷). تمامی روش‌های مدل‌سازی استفاده‌شده به‌استثنا ماشین بردار پشتیبان برآوردهای با اریبی پایین داشته‌اند.

جدول ۶. مقادیر ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا و اریبی محاسبه شده برای برآورد اندوخته کربن روی زمینی توسط روش های مدل سازی رگرسیون خطی، مدل جمعی تعمیم یافته، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در سناریو ۴

روش	منطقه	ضریب تبیین اصلاح شده	جذر میانگین مربعات خطا (ton/ha)	درصد جذر میانگین مربعات خطا	اریبی (ton/ha)	درصد اریبی
رگرسیون خطی	سرفیروزآباد	۰/۵۵	۱/۶۳	۲۶/۳۲	-۰/۰۲	-۰/۱۹
	گهواره	۰/۷۰	۳/۱۴	۳۱/۶۷	-۰/۰۲	-۰/۱۶
	کل	۰/۷۰	۲/۶۴	۳۲/۶۱	۰/۰۰	-۰/۰۴
مدل جمعی تعمیم یافته	سرفیروزآباد	۰/۵۷	۱/۶۰	۲۵/۹۰	۰/۰۴	۰/۵۸
	گهواره	۰/۷۰	۳/۱۴	۳۱/۴۹	-۰/۰۱	-۰/۰۹
	کل	۰/۷۱	۲/۶۲	۳۲/۳۳	-۰/۰۲	-۰/۲۲
جنگل تصادفی	سرفیروزآباد	۰/۵۴	۱/۶۶	۲۶/۶۹	-۰/۰۸	-۱/۲۷
	گهواره	۰/۷۴	۲/۹۵	۲۹/۷۶	-۰/۰۵	-۰/۵۲
	کل	۰/۷۲	۲/۵۳	۳۱/۱۸	-۰/۰۲	-۰/۲۷
ماشین بردار پشتیبان	سرفیروزآباد	۰/۴۷	۱/۷۹	۲۸/۷۷	-۰/۲۱	-۳/۳۹
	گهواره	۰/۷۱	۳/۱۲	۳۱/۴۰	-۰/۱۶	-۱/۶۰
	کل	۰/۶۸	۳/۲۷	۳۲/۹۸	-۰/۲۴	-۲/۴۴

جدول ۷. مقادیر ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا و اریبی محاسبه شده برای برآورد اندوخته کربن روی زمینی توسط روش های مدل سازی رگرسیون خطی، مدل جمعی تعمیم یافته، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در سناریو ۵

روش	منطقه	ضریب تبیین	جذر میانگین مربعات خطا (ton/ha)	درصد جذر میانگین مربعات خطا	اریبی (ton/ha)	درصد اریبی
رگرسیون خطی	سرفیروز	۰/۵۵	۱/۶۳	۲۶/۱۸	۰/۰۰	-۰/۴۲
	گهواره	۰/۷۱	۳/۰۷	۳۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۱۵
	کل	۰/۷۱	۲/۵۹	۳۱/۹۳	۰/۰۱	-۰/۱۲
مدل جمعی تعمیم یافته	سرفیروز	۰/۵۵	۱/۶۶	۲۶/۷۵	۰/۰۴	۰/۶۳
	گهواره	۰/۷۱	۳/۱۲	۳۱/۳۰	۰/۰۰	۰/۰۱
	کل	۰/۷۱	۲/۵۹	۳۱/۹۳	۰/۰۱	-۰/۰۹
جنگل تصادفی	سرفیروز	۰/۵۰	۱/۷۲	۲۷/۷۷	۰/۰۱	۰/۲۴
	گهواره	۰/۷۲	۳/۰۲	۳۰/۴۳	۰/۰۶	-۰/۶۱
	کل	۰/۷۰	۲/۶۴	۳۲/۵۷	۰/۰۸	-۱/۰۴
ماشین بردار پشتیبان	سرفیروز	۰/۵۱	۱/۷۲	۲۷/۶۶	۰/۱۴	-۲/۲۱
	گهواره	۰/۷۳	۲/۹۷	۲۹/۹۱	۰/۰۷	-۰/۷۰
	کل	۰/۷۲	۲/۵۳	۳۱/۲۲	۰/۱۷	-۲/۱۵

سناریو ۱: تصحیح رادیومتری + تصحیح اتمسفری + توپوگرافی لندست ۸

نتایج محاسبه شده در مورد سناریو مشابه نتایج سناریو ۵ است، و مدل های رگرسیون خطی و جمعی تعمیم یافته نتایج با صحت بالاتر ارائه کرده اند (ضریب تبیین اصلاح شده ۰/۵۱ و

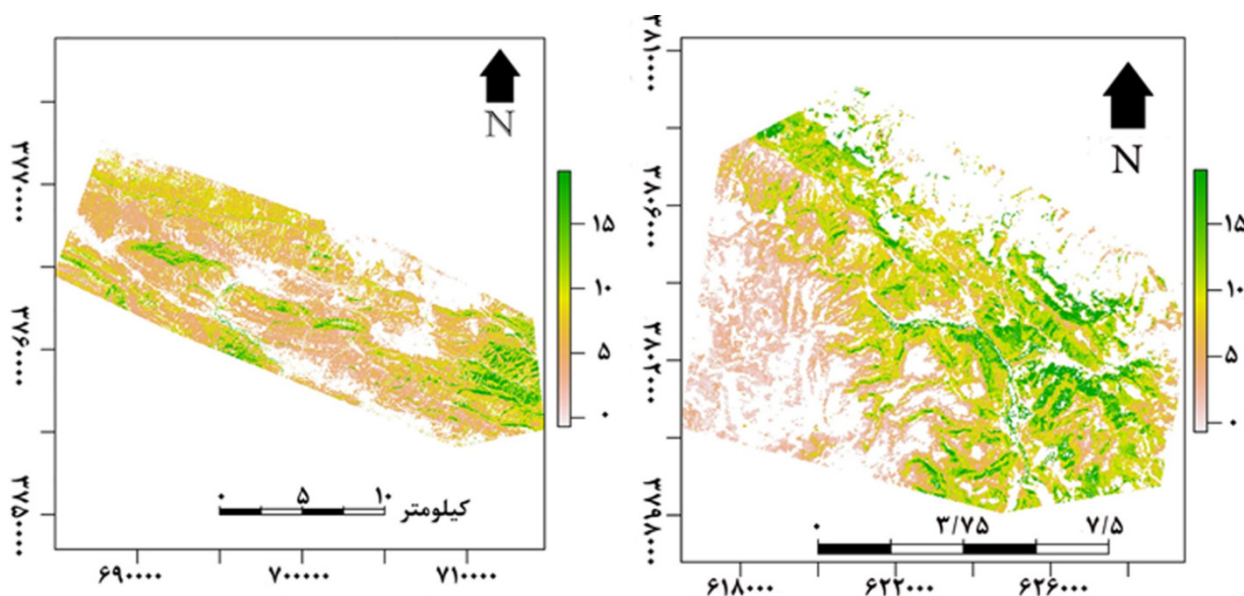
درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۷/۲۱ درصد). یافته ها در مورد منطقه گهواره بیانگر نتایج بهتر با اختلاف جزئی توسط روش جنگل تصادفی است (ضریب تبیین اصلاح شده ۰/۵۵ و درصد ریشه میانگین مربعات خطا ۲۶/۳۲ درصد) (جدول ۸).

جدول ۸. مقادیر ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا و اریبی محاسبه شده برای برآورد اندوخته کربن روی زمینی توسط روش های مدل سازی رگرسیون خطی، مدل جمعی تعمیم یافته، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در سناریو ۶

روش	منطقه	ضریب تبیین اصلاح شده	جذر میانگین مربعات خطا (ton/ha)	درصد جذر میانگین مربعات خطا	اریبی (ton/ha)	درصد اریبی
رگرسیون خطی	سرفیروزآباد	۰/۵۱	۱/۶۹	۲۷/۲۱	۰/۰۰	-۰/۰۹
	گهواره	۰/۷۰	۳/۱۶	۳۱/۸۴	۰/۰۰	۰/۰۰
	کل	۰/۶۸	۲/۷۴	۳۳/۷۹	-۰/۵۲	-۰/۰۷
مدل جمعی تعمیم یافته	سرفیروزآباد	۰/۵۱	۱/۷۱	۲۷/۶۶	۰/۰۴	۰/۵۷
	گهواره	۰/۶۶	۳/۳۷	۳۳/۷۶	۰/۰۰	-۰/۰۴
	کل	۰/۶۶	۲/۷۸	۳۴/۳۰	-۰/۰۱	-۰/۰۸
جنگل تصادفی	سرفیروزآباد	۰/۴۰	۱/۹۰	۳۰/۶۷	-۰/۰۸	۱/۴۲
	گهواره	۰/۷۲	۳/۰۵	۳۰/۷۰	-۰/۲۱	-۲/۱۱
	کل	۰/۷۱	۲/۶۴	۳۲/۵۹	۰/۰۱	۰/۱۳
ماشین بردار پشتیبان	سرفیروزآباد	۰/۴۰	۱/۸۸	۳۰/۳۱	-۰/۰۱	-۰/۱۱
	گهواره	۰/۶۹	۳/۱۹	۳۲/۱۸	-۰/۲۹	-۲/۹۴
	کل	۰/۶۲	۲/۹۹	۳۷/۰۲	-۰/۲۴	-۲/۹۷

و گهواره با استفاده از بهترین پیش پردازش و روش مدل سازی در مقیاس تن در هکتار تهیه شد (شکل ۵).

در نهایت نقشه های اندوخته کربن روی زمینی تهیه شده از هر دو منطقه مورد بررسی به ترتیب برای دو منطقه سرفیروزآباد



شکل ۵. نقشه اندوخته کربن روی زمینی برآورد شده در منطقه سرفیروزآباد (سمت چپ) و منطقه گهواره (سمت راست)

مدل سازی می تواند گام های مهم برای بهبود صحت برآوردهای اندوخته کربن با استفاده از تصویرهای لندست باشند. در حالت تصویرهای خام و بدون انجام هیچ پیش پردازشی ضریب تبیین

بحث و نتیجه گیری

یافته های تحقیق حاضر نشان می دهد که انتخاب روش مناسب برای پیش پردازش تصویرهای لندست و روش مناسب

بدون داشتن چنین اطلاعاتی، تصحیح اتمسفری سبب افزایش عدم قطعیت‌ها در برآوردهای سنجش‌ازدوری می‌شود (۴۳).

به دلیل مقیاس مکانی وسیع پوشش تصویرهای ماهواره‌ای، ضبط داده از سطوح ناهموار زمین در مقیاس دوبعدی سبب اعوجاج و تحریف هندسی می‌شود. تصحیح رادیومتری امکان ارتباط دادن مقادارهای رقومی در تصویرهای ماهواره‌ای را به رادیانس در سطح زمین را فراهم می‌آورد (۱۰). علاوه بر این، تصحیح رادیومتری اثرات اتمسفری روشنایی‌های مختلف را به خاطر زمان روز، موقعیت بر روی زمین و توپوگرافی را کاهش دهد (۸ و ۲۹). اطلاعات لازم برای تصحیح رادیومتری بر روی تصویرهای لندست کمتر بوده و فقط مستلزم داشتن ضرایب کالبراسیون حس‌گر است، که این مشخصات همراه با تصویر ارائه می‌شود. این موضوع در پژوهش حاضر روشن بود، زیرا طبق سناریو ۲ و جدول ۵ بالاترین صحت مربوط به شرایطی بود که فقط تصحیح رادیومتری در آن انجام شده بود. به‌هرحال، طبق نتایج در وضعیت استفاده از تصحیح اتمسفری انجام تصحیح توپوگرافی لازم و ضروری به نظر می‌رسد. اغلب مطالعات ابتدایی در زمینه برآورد زی‌توده براساس فرض وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته انجام شده است. اما با توجه به روشن شدن وجود روابط غیرخطی بین متغیرهای مستقل استخراج شده از تصویرهای ماهواره‌ای و متغیر وابسته اندازه‌گیری شده در روی زمین، فرضیه قبلی مبنی بر خطی بودن روابط متوقف شد (۱۶). در مطالعه حاضر از انواع روش‌های پارامتری، نیمه پارامتری و ناپارامتری استفاده شد که بتواند با وجود فرض روابط خطی و غیرخطی وجود هر کدام از آنها را بررسی کند. در منطقه سرفیروزآباد با مقدار زی‌توده کمتر (حدود ۶۲ تن در هکتار) روش‌های رگرسیون خطی و مدل جمعی تعمیم‌یافته نتایج بهتری نسبت به دو روش جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان ارائه نمودند. که دلیل آن را می‌توان به تراکم کم زی‌توده در منطقه سرفیروزآباد و وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته است. علاوه بر این، این موضوع می‌تواند به دلیل معادله آلودگی مورد استفاده است

اصلاح شده و درصد جذر میانگین مربعات خطا برای هر دو منطقه به ترتیب ۰/۷۱ و ۳۲/۵۹ درصد محاسبه شد، درحالی‌که با انجام تصحیح اتمسفری این آماره‌ها به ترتیب ۰/۶۰ و ۳۶/۵۳ درصد تعیین شدند. انجام تصحیح توپوگرافی بر روی تصویرهای تصحیح شده فقط با تصحیح اتمسفری سبب بهبود صحت برآورد و افزایش آن به مقدارهای ۰/۷۱ برای ضریب تبیین اصلاح شده و ۳۲/۵۹ درصد برای درصد جذر میانگین مربعات خطا شد. انجام فقط تصحیح توپوگرافی بر روی تصویر مورد استفاده نشان داد که انجام این تصحیح به‌تنهایی نسبت به تصویرهای خام هیچ بهبود قابل‌توجهی بر روی صحت برآورده ایجاد نکرده است. در حالت تصحیح رادیومتری به‌تنهایی بر روی تصویر لندست مقادارهای محاسبه شده برای ضریب تبیین اصلاح شده و درصد جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۷۳ و ۳۰/۹۳ درصد بود که بعد از انجام تصحیح توپوگرافی بر روی این تصویر این آماره‌ها به ترتیب ۰/۷۱ و ۳۰/۹۳ محاسبه شدند.

تصحیح توپوگرافی در این مطالعه صحت برآوردهای اندوخته کربن روی زمینی را بهبود نداد، این موضوع ممکن است به دلیل همگنی پوشش جنگل باشد که مناطق کوهستانی را پوشش می‌دهد (۲۸). نتایج تحقیقات فریزمن و همکاران (۱۲)، پیمپل و همکاران (۳۱)، آهیکاری و همکاران (۵) و هانتسون و چوویکو (۲۰) نشان داد که تفکیک مکانی و صحت مدل رقومی ارتفاعی اثر قابل‌توجهی بر اجرای تصحیح توپوگرافی دارند. در نتیجه، تفکیک مکانی ۳۰ متری مدل رقومی ارتفاعی استفاده شده در این تحقیق برای تصحیح توپوگرافی مؤثر نبوده است. نتایج مربوط به حالتی که در آن فقط تصحیح اتمسفری انجام شده است نسبت به سایر روش‌ها دارای پایین‌ترین صحت برآورد بودند. تصحیح اتمسفری انجام گرفته در این مطالعه مانند سایر تصحیحات از این دسته، نیازمند اطلاعات مختلف ورودی مانند آزیموت و ارتفاع خورشید و حس‌گر، موقعیت مرکزی حس‌گر، مدل گرد و گاز موجود در هوا (روستایی، شهری و غیره) و اندازه‌گیری مشخصات دقیق شرایط اتمسفری در عرصه هم‌زمان با زمان اخذ تصویر است.

برداشت شده با مقدار متناظر آن در تصویر لندست به دلیل خطای دستگاه موقعیت یاب GPS و خطای هندسی تصویر، و استفاده از معادله آلومتری که سبب خطای برآورد اندوخته کربن درختان تا حدود ۲۰ درصد می شود (۲۷ و ۳۸).

منابع مورد استفاده

۱. ایران منش، ی. ۱۳۹۲. ارزیابی روش های برآورد زی توده و ترسیب کربن گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii Lindle.*) در جنگل های استان چهارمحال و بختیاری، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۰۶ صفحه.
۲. رستم زاده، ه.، ص. دارابی و ه. شهابی. ۱۳۹۶. آشکارسازی تغییرات جنگل بلوط با استفاده از طبقه بندی شیء گرای تصاویر چند زمانه لندست (مطالعه موردی: جنگل های شمال استان ایلام). کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی، ۸(۲): ۹۲-۱۱۰.
۳. میرزایی زاده، و.، م. نیک نژاد و ج. اولادی قادی کلائی. ۱۳۹۴. ارزیابی الگوریتم های طبقه بندی نظارت شده غیر پارامتریک در تهیه نقشه پوشش زمین با استفاده از تصاویر لندست ۸ کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی، ۶(۳): ۴۴-۲۹.
۴. یزدانی، م.، ش. شتایی جویباری، ج.، محمدی و ی. مقصودی. ۱۳۹۶. بررسی مقایسه ای امکان برآورد برخی مشخصه های کمی ساختار توده های جنگل های خزری با استفاده از داده های رادار و تلفیق داده های رادار با لیدار. کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی، ۶(۴): ۱۰۹-۱۲۶.
5. Adhikari H, Heiskanen J, Maeda EE, Pellikka PK. 2016. The effect of topographic normalization on fractional tree cover mapping in tropical mountains: An assessment based on seasonal Landsat time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 20-31.
6. Attarchi S, Gloaguen R. 2014. Improving the estimation of above ground biomass using dual polarimetric PALSAR and ETM⁺ data in the Hyrcanian mountain forest (Iran). *Remote Sensing*, 6(5): 3693-3715.
7. Barrachina M, Cristóbal J, Tulla A. 2015. Estimating above-ground biomass on mountain meadows and pastures through remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38: 184-192.
8. Chen X, Liu S, Zhu Z, Vogelmann J, Li Z, Ohlen D.

در این پژوهش است که بر مبنای تاج درختان است. زیرا مقادیر طیفی ثبت شده توسط حسگرهای نوری مانند لندست وابسته به تاج پوشش جنگل است، و این مشخصه و سایر ویژگی های وابسته به آن بهتر برآورد می شوند (۱۸ و ۲۵). در منطقه گهواره و مجموع دو منطقه با تراکم اندوخته کربن بالاتر (به ترتیب ۹/۲ و ۸/۱ تن در هکتار) نسبت به منطقه سرفیروزآباد، برآورد اندوخته کربن روی زمینی توسط روش های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان با صحت بالاتری انجام گرفته است. تحقیق حاضر نشان می دهد که نتایج برآورد شده توسط روش جنگل تصادفی دارای اریبی کمتری نسبت به ماشین بردار پشتیبان بوده و به عنوان روش بهتر معرفی می شود. روش جنگل تصادفی توانایی کشف روابط پیچیده غیرخطی در بین متغیرها، محاسبه مقادیرهای گمشده و اندازه گیری دقیق نسبت خطا در مقایسه با سایر روش های مدل سازی است (۴). هر درخت در جنگل تصادفی مستقل است، بنابراین روندهای اهمیت بین متغیرهای پیشگو تقسیم می شود و اگر آنها همبستگی بالایی داشته باشند، یک متغیر مهم به تعدادی درخت و دیگر متغیرهای مهم در درختان دیگر حضور پیدا می کنند (۱۲ و ۱۶). نتایج ضعیف تر روش ماشین بردار پشتیبان نسبت به روش جنگل تصادفی می تواند به دلیل این مطلب باشد که این روش به شدت تحت تأثیر پارامترهای بهینه برای اجرای مدل است (۲۴). اگرچه مقایسه مطالعات مختلف به دلیل شرایط مختلف جنگل و روش نمونه برداری کار ساده ای نیست (۴۱ و ۴۳)، اما در بهترین نتایج این تحقیق ضریب تبیین اصلاح شده بالاتر از ۰/۷۰ است که از نتایج تحقیقات دیگر در رابطه برآورد سنجش از دوری اندوخته کربن با استفاده از تصویرهای لندست بهتر محسوب می شود (۱۱، ۱۶، ۲۱ و ۳۰). نتایج بهتر این تحقیق می تواند به دلیل تراکم کم کربن و عدم رسیدن به نقطه اشباع نوری، ساختار همگن جنگل با یک گونه غالب و معادله آلومتری استفاده شده که بر مبنای اندازه تاج درختان است. با وجود نتایج نسبتاً خوب، هنوز مقداری از واریانس تشریح نشده وجود دارد که می تواند به دلیل چند عامل تشریح شود؛ عدم تطابق دقیق مختصات قطعه نمونه

2011. Estimating aboveground forest biomass carbon and fire consumption in the US Utah High Plateaus using data from the Forest Inventory and Analysis Program, Landsat, and LANDFIRE. *Ecological Indicators*, 11(1): 140-148.
9. Du H, Cui R, Zhou G, Shi Y, Xu X, Fan W, Lü Y. 2010. The responses of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocyclus* var. *pubescens*) forest aboveground biomass to Landsat TM spectral reflectance and NDVI. *Acta Ecologica Sinica*, 30(5): 257-263.
10. Du Y, Teillet PM, Cihlar J. 2002. Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote Sensing of Environment*, 82(1): 123-134.
11. Frazier RJ, Coops NC, Wulder MA, Kennedy R. 2014. Characterization of aboveground biomass in an unmanaged boreal forest using Landsat temporal segmentation metrics. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92: 137-146.
12. Freeman EA, Moisen GG, Coulston JW, Wilson BT. 2015. Random forests and stochastic gradient boosting for predicting tree canopy cover: comparing tuning processes and model performance. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(3): 323-339.
13. Fu L, Zhao Y, Xu Z, Wu B. 2015. Spatial and temporal dynamics of forest aboveground carbon stocks in response to climate and environmental changes. *Journal of Soils and Sediments*, 15(2): 249-259.
14. Fuyi T, Mohammed S, Abdullah K, Lim H, Ishola K. 2013. A comparison of atmospheric correction techniques for environmental applications. In: 2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace). IEEE, pp 233-237.
15. Gagliasso D, Hummel S, Temesgen H. 2014. A comparison of selected parametric and non-parametric imputation methods for estimating forest biomass and basal area. *Open Journal of Forestry*, 4(1): 42.
16. García M, Riaño D, Chuvieco E, Danson FM. 2010. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 816-830.
17. Ghosh SM, Behera MD. 2018. Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*, 96: 29-40.
18. Gleason CJ, Im J. 2012. Forest biomass estimation from airborne LiDAR data using machine learning approaches. *Remote Sensing of Environment*, 125: 80-91.
19. Güneralp İ, Filippi AM, Randall J. 2014. Estimation of floodplain aboveground biomass using multispectral remote sensing and nonparametric modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33: 119-126.
20. Hantson S, Chuvieco E. 2011. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(5): 691-700.
21. Kwak D-A, Lee W-K, Cho H-K, Lee S-H, Son Y, Kafatos M, Kim S-R. 2010. Estimating stem volume and biomass of *Pinus koraiensis* using LiDAR data. *Journal of Plant Research*, 123(4): 421-432.
22. Labrecque S, Fournier R, Luther J, Piercey D. 2006. A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management*, 226(1-3): 129-144.
23. Latifi H, Fassnacht FE, Hartig F, Berger C, Hernández J, Corvalán P, Koch B. 2015. Stratified aboveground forest biomass estimation by remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38: 229-241.
24. Lin D, Lai J, Muller-Landau HC, Mi X, Ma K. 2012. Topographic variation in aboveground biomass in a subtropical evergreen broad-leaved forest in China. *PloS one*, 7(10): e48244.
25. López-Serrano PM, López-Sánchez CA, Álvarez-González JG, García-Gutiérrez J. 2016. A comparison of machine learning techniques applied to landsat-5 TM spectral data for biomass estimation. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(6): 690-705.
26. Lu D, Chen Q, Wang G, Liu L, Li G, Moran E. 2016. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1): 63-105.
27. Moreira EP, Valeriano MM. 2014. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32: 208-217.
28. Nolè A, Law B, Magnani F, Matteucci G, Ferrara A, Ripullone F, Borghetti M. 2009. Application of the 3-PGS model to assess carbon accumulation in forest ecosystems at a regional level. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(9): 1647-1661.
29. Oubrahim H, Boulmane M, Bakker MR, Augusto L, Halim M. 2015. Carbon storage in degraded cork oak (*Quercus suber*) forests on flat lowlands in Morocco. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9(1): 125-137.

30. Phiri D, Morgenroth J, Xu C, Hermosilla T. 2018. Effects of pre-processing methods on Landsat OLI-8 land cover classification using OBIA and random forests classifier. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 170-178.
31. Pimple U, Sitthi A, Simonetti D, Pungkul S, Leadprathom K, Chidthaisong A. 2017. Topographic correction of Landsat TM-5 and Landsat OLI-8 imagery to improve the performance of forest classification in the mountainous terrain of Northeast Thailand. *Sustainability*, 9(2): 258.
32. Powell SL, Cohen WB, Healey SP, Kennedy RE, Moisen GG, Pierce KB, Ohmann JL. 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*, 114(5): 1053-1068.
33. Riaño D, Chuvieco E, Salas J, Aguado I. 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types (2003). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(5): 1056-1061.
34. Richter R, Kellenberger T, Kaufmann H. 2009. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*, 1(3): 184-196.
35. Saarinen N, White JC, Wulder MA, Kangas A, Tuominen S, Kankare V, Holopainen M, Hyypä J, Vastaranta M. 2018. Landsat archive holdings for Finland: Opportunities for forest monitoring. *Silva Fennica*, 52: 1-11.
36. Shao Z, Zhang L. 2016. Estimating forest aboveground biomass by combining optical and SAR data: a case study in Genhe, Inner Mongolia, China. *Sensors*, 16(6): 834.
37. Su Y, Guo Q, Xue B, Hu T, Alvarez O, Tao S, Fang J. 2016. Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: Estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 173: 187-199.
38. Vanonckelen S, Lhermitte S, Van Rompaey A. 2013. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 24: 9-21.
39. Vicente-Serrano SM, Pérez-Cabello F, Lasanta T. 2008. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3916-3934.
40. Wang X, Shao G, Chen H, Lewis BJ, Qi G, Yu D, Zhou L, Dai L. 2013. An application of remote sensing data in mapping landscape-level forest biomass for monitoring the effectiveness of forest policies in northeastern China. *Environmental Management*, 52(3): 612-620.
41. Wood SN. 2017. *Generalized additive models: an introduction with R*, vol 2nd Edition. Chapman and Hall/CRC, 496 pp.
42. Wu C, Shen H, Wang K, Shen A, Deng J, Gan M. 2016. Landsat imagery-based above ground biomass estimation and change investigation related to human activities. *Sustainability*, 8(2): 159.
43. Young NE, Anderson RS, Chignell SM, Vorster AG, Lawrence R, Evangelista PH. 2017. A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4): 920-932.
44. Zandler H, Brenning A, Samimi C. 2015. Quantifying dwarf shrub biomass in an arid environment: comparing empirical methods in a high dimensional setting. *Remote Sensing of Environment*, 158: 140-155.
45. Zhu X, Liu D. 2015. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102: 222-231.



The effect of digital preprocessing and modeling method on an estimation of aboveground carbon stock of Zagros forests using Landsat 8 imagery

A. Safari ¹, H. Sohrabi ^{2*}

1. PhD Graduated Student of Forestry, Department of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University

2. Assoc. Prof. College of Forestry, Department of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 October 2018

Accepted 17 January 2018

Available online 19 February 2019

Keywords:

Images preprocessing

Statistical modeling method

Landsat 8

Aboveground carbon stock

Zagros forests

ABSTRACT

The aim of this study, was to evaluate the effectiveness of different preprocessing methods and modeling techniques on the accuracy of aboveground carbon stock estimates in two forest stands with different degradation levels (Gahvareh forest and SarfiruzAbad), in Zagros forests in Kurdistan province. Comparison of different digital pre-processing methods on Landsat 8 images was carried out in different scenarios of radiometric, atmospheric, topographic and their combination. In each scenario, we used four modeling methods included linear regression, generalized additive model, random forest, and support vector machine. In most cases, radiometric correction with improved correction coefficient was 0.71 ($R^2_{adj}=0.71$) and the root means square error of 30% ($RMSe\%=0.30$) was outperformed. Comparison of four modeling methods indicates the lower accuracy of estimates in the SarfiruzAbad area with more degradation severity ($R^2_{adj}=0.58$) compared to the less damaged Gahvareh area ($RMSe\%=0.74$). The random forest method for Gahvareh area and linear regression and a generalized additive model for SarfiruzAbad provides better results, respectively. However, our findings showed that selection of suitable preprocessing and modeling method have a noticeable effect on the accuracies of characteristics estimates in forest ecosystems by Landsat imagery.

* Corresponding author e-mail address: hsohrabi@modares.ac.ir