



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال چهارم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۱
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.4, No.4, Winter 2013

۸۲-۶۹

تصاویر ماهواره‌ای نوری و راداری در مدل‌سازی زیست‌توده جنگل‌های شمال ایران

جلال امینی*^۱، یاسر صادقی^۲

۱. دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲. کارشناس ارشد سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۷/۳۰

چکیده

ارزیابی دقیق زیست‌توده به‌منظور مدیریت جنگل و درک نقش آن به عنوان منبع کربن، اهمیت بسیار دارد. از آنجا که ۵۰ درصد زیست‌توده جنگل‌ها مشتمل بر کربن است، لذا برآورد مقدار زیست‌توده جنگل‌ها، از جنبه بررسی مقدار انرژی ذخیره شده در جنگل‌ها و همچنین تغییرات آب و هوایی در کانون توجه قرار می‌گیرد. بهترین راه برای برآورد دقیق زیست‌توده، ایجاد مدل‌های تخمین براساس داده‌های محلی جمع‌آوری شده است. امروزه استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور با کمک داده‌های محدود زمینی، تحولی شگرف را در تدوین و بهره‌برداری از اطلاعات مربوط به زیست‌توده جنگل شکل داده است. نبود معادلات محلی زیست‌توده و ابهام در برآورد دقیق آن براساس معادلات جهانی، این مقاله را به سمت تکوین و توسعه معادلات زیست‌توده برای جنگل‌های گیلان - واقع در شمال ایران - رهنمون ساخته است. در این مقاله بدین منظور به نمونه‌برداری از جنگل و اندازه‌گیری پارامترهای مختلف همچون ارتفاع و قطر درخت در ۲۸ پلات با ابعاد ۳۰ × ۳۰ متر (۹۰۰ متر مربع) در منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود؛ و با استفاده از روش غیرمخرب، مقدار زیست‌توده مربوط به این پلات‌ها محاسبه می‌گردد. سپس با بهره‌گیری از تصاویر نوری و راداری ماهواره ALOS، بین اطلاعات سنجش از دور و مقدار زیست‌توده جنگل، از طریق معادلات رگرسیون چندمتغیره، ارتباط برقرار می‌شود. گفتنی است که بهترین مدل تخمین با استفاده از آنالیز رگرسیون چندمتغیره، براساس گونه درخت با ضریب تعیین ۰/۷۳۱ و $RMSE=13/88$ (ton/he) برآورد شده است.

کلیدواژه‌ها: زیست‌توده، جنگل، آنالیز رگرسیون چندمتغیره، تصاویر راداری و نوری.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، گروه مهندسی نقشه‌برداری

۱- مقدمه

زیست توده برابر نهاده^۱ واژه انگلیسی بیوماس^۱ است که تعاریف مختلفی برای آن ارائه شده است. برطبق تعریف FAO^۲، زیست توده به مواد آلی بالای سطح زمین یا زیر این سطح (زنده و مرده) از قبیل درختان، محصولات کشاورزی (ذرت، گندم)، چمن و ریشه‌ها گفت می‌شود. زیست توده بالای سطح زمین مشتمل است بر کنده، تنه، شاخه‌ها، پوست و برگ؛ و زیست توده زیر سطح زمین، شامل ریشه‌ها - جزیر ریشه‌های دارای قطر کمتر از ۲ میلی‌متر - است (Deo, 2008; Samalca, 2007).

ارزیابی دقیق زیست توده به منظور مدیریت منابع کربن اهمیت بسیار دارد. زیست توده مقدار کربن گسلی را که به علت جنگل زدایی در اتمسفر پخش می‌شود، تنظیم می‌کند. تغییرات ناحیه‌ای زیست توده نیز ارتباط بسیاری با خصوصیات مهم اکوسیستم و تغییرات آب و هوا دارد. نقش و تأثیر زیست توده روی چرخه‌های کربن، مواد معدنی خاک، تجمع سوخت و محیط‌های بومی در اکوسیستم زمینی تشخیص داده شده است. توصیفی دقیق از توزیع زیست توده در مقیاس‌های محلی و ناحیه‌ای و جهانی، به شکلی گسترده موجب کاهش ابهام در تجزیه و گسیل کربن، درک نقش کربن در باوری خاک، فرسایش و یا بازیابی زمین و پردازش محیط می‌شود (Giles M. Foody, 2003).

اکوسیستم جنگل نقش بسیار مهمی در چرخه کربن جهانی ایفا می‌کند. جنگل حدود ۸۰ درصد کربن بالای سطح زمین و حدود ۴۰ درصد کربن زیر سطح زمین را ذخیره می‌کند (IPCC, 2001). گیاهان دی‌اکسید کربن اتمسفر را جذب می‌کنند و با تجزیه گیاهان دی‌اکسید کربن به اتمسفر برمی‌گردد. بدین ترتیب از بین رفتن جنگل‌ها نیز سبب بازگشتن کربن به اتمسفر می‌شود. بنابراین لازم است جنگل به عنوان مهم‌ترین منبع کربن، در کانون توجهی بیش از دیگر منابع قرار گیرد. به همین خاطر تخمین زیست توده جنگل‌ها از نظر بررسی مقدار انرژی ذخیره شده در

جنگل‌ها و همچنین تغییرات اقلیم اهمیت فراوان دارد.

تخمین مقدار زیست توده، در سراسر جهان برای جنگل‌های زیادی انجام گرفته است. برای نمونه، مقدار زیست توده در بسیاری از مناطق مطالعاتی پوشیده شده از جنگل در دنیا، از طریق برنامه بیولوژی بین‌المللی^۳ تخمین زده شده است (Reichle, 1981). برای جنگل‌های استوایی مشتمل بر زمین‌های پست تا کوهستانی و مناطق مرطوب تا خیلی خشک نیز این کار انجام شده است (Brown S. A., 1982).

روش‌ها و منابع داده‌های گوناگونی برای تخمین زیست توده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی روش‌های تخمین زیست توده عبارت‌اند از روش‌های اندازه‌گیری زمینی و سنجش از دور (LU D., 2006)؛ و در این مقاله روش دوم مدنظر قرار گرفته است.

تخمین زیست توده از طریق اندازه‌گیری‌های زمینی مستلزم نمونه‌برداری مخرب یا اندازه‌گیری‌های مستقیم است. در این روش به قطع درختان و سپس خشک کردن آنها و اندازه‌گیری زیست توده نیاز است. این اندازه‌گیری‌ها می‌توانند برای مناطق کوچک به صورت نمونه‌برداری به کار روند و با استفاده از معادلات آلومتریک^۴ به مناطق وسیع‌تر تعمیم داده شوند. با اینکه روش مذکور برای مناطق کوچک بسیار دقیق و مستقیم است، لیکن در سطح وسیع و ملی بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است، به گونه‌ای که در واقع می‌توان گفت انجام آن ناممکن می‌نماید.

داده‌های سنجش از دور از مهم‌ترین منابع داده‌ها برای تخمین زیست توده‌اند. در این روش، زیست توده از طریق ارتباط مستقیم با پاسخ‌های طیفی، با استفاده از مدل‌های پارامتریک و غیرپارامتریک و یا از طریق ارتباط‌های غیرمستقیم با پارامترهای پوشش مانند

1. Biomass
2. Food and Agriculture Organization (FAO)
3. International Biological Program
4. Allometric

ارائه کردند. در این مطالعه، نویز لکه‌ای تصاویر SAR سنجنده JERS را با استفاده از فیلتر پیشنهادی حذف کرد، و سپس ویژگی‌های بافت پلات‌های اندازه‌گیری شده را استخراج کرد و با استفاده از تبدیل متعام گرام - اشمیت چهار ویژگی بهینه بافت را شامل کنتراست، انحراف معیار، همبستگی و حداکثر احتمال، برای تخمین زیست‌توده برگزید. سپس از ترکیب مقادیر چهار باند تصویر نوری سنجنده ALOS و چهار ویژگی بافت بهینه تصویر SAR برای تخمین زیست‌توده استفاده شد (Amini, 2009).

از آنجا که تصاویر رادار به دلیل استفاده از باندهای ماکروویو و دارا بودن هندسه پهلوگیر می‌توانند اطلاعات دقیقی را از تنه درختان به دست دهند، داده‌های نوری در تخمین زیست‌توده دربردارنده نواقصی هستند همچون پوشش ابر و اشباع سیگنال به دلیل استفاده از طول موج کوتاه. مطالعات انجام‌شده، ارتباط قوی بین زیست‌توده و بازپراکنش^۵ تصاویر رادار با روزه ترکیبی (SAR^۶) را نشان می‌دهد (Li, 2007). با توجه به اینکه حدود ۶۰ درصد زیست‌توده در مؤلفه‌های تنه ذخیره می‌شود و شاخص گیاهی در بیان آن ضعیف است، نفوذپذیری داده‌های رادار در دستیابی به اطلاعات تنه درخت یاری می‌رسانند. این نفوذپذیری برای طول موج‌های مختلف رادار متفاوت است؛ و مثلاً نفوذ باند P و L از باند K و X بیشتر است. در تصاویر رادارست (باند C) نفوذپذیری به دلیل طول موج کوتاه‌تر ضعیف است (LI, 2007).

در این مقاله با توجه به هدف نهایی که محاسبه زیست‌توده جنگل است، روند انجام کار به شکلی که در ادامه مطرح می‌شود پیشنهاد می‌گردد. الف) انتخاب پلات و اندازه‌گیری پارامترهای مختلف

شاخص سطح برگ^۱ (LAI) و قطر و ارتفاع تاج و تنه حاصل از داده‌های سنجنش از دور، تخمین زده می‌شود (LU D., 2006).

Lu در سال ۲۰۰۵ به بررسی برآورد زیست‌توده در جنگل‌های جوان و متراکم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در حوضه آمازون پرداخت. وی در این مطالعه، شاخص‌های گیاهی^۲ (VI) متفاوت و آنالیزهای بافت^۳ را بررسی کرد. مدل‌های رگرسیون چندمتغیره برای انواع داده‌های تصویر ایجاد گردیدند؛ مانند: باندهای تصویر، شاخص‌های گیاهان، ویژگی‌های بافت و داده‌های آماری گیاهان. این مطالعه نشان داد که باندهای تصویر و شاخص‌های گیاهان به تنهایی نمی‌توانند به مثابه الگویی مؤثر برای تخمین زیست‌توده به کار روند، اما مدل‌های رگرسیون چندمتغیره شامل طیف و امضای بافت، تخمین زیست‌توده را بهبود می‌بخشد و مدل‌های ایجادشده به‌ویژه برای مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم مناسب‌اند (LU D., 2005).

Li و همکاران در سال ۲۰۰۷ مدل‌های تحلیلی و رگرسیون را برای تخمین زیست‌توده تالاب در جنوب چین با استفاده از تصاویر Radarsat و TM مورد مطالعه و بررسی قرار دارند. در این مطالعه نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری تصاویر نوری TM و تصاویر راداری Radarsat برای تخمین زیست‌توده تالاب مقایسه شدند. مدل‌های تحلیلی و رگرسیون نیز برای استخراج ارتباطات بین داده‌های سنجنش از دور و زیست‌توده به کار رفتند. مطالعات نشان داد که مدل‌های استفاده‌شده در تصاویر Radarsat، نقش مهمی در بهبود خطای ریشه دوم میانگین مربعات^۴ (RMSE) - و در نتیجه، افزایش دقت - دارند، در حالی که استفاده از شاخص گیاهی NDVI به تنهایی ممکن است به خطاهایی جدی در تخمین زیست‌توده بینجامد (Li, 2007).

Amini و همکاران در سال ۲۰۰۹ روشی را برای تخمین زیست‌توده جنگل براساس تصاویر نوری و رادار

1. Leaf Area Indice
2. Vegetation Indices
3. Texture
4. Root Mean Square Error
5. Backscatter
6. Synthetic Aperture Radar

دیگر داده‌های کمکی باشد؛ ۴- در آن قطع درخت و یا اندازه‌گیری زمینی مجاز باشد؛ ۵- بتوان از راهنمای محلی و آشنا به منطقه کمک گرفت.

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، با در نظر گرفتن معیارهای یادشده، جنگل‌های کوهستانی حوزه آبریز سفارود و جنگل‌های مصنوعی (دست کاشت) شرکت چوب و کاغذ منطقه چوکا واقع در شهر رضوانشهر استان گیلان است، که شمال ایران در ساحل جنوبی دریای خزر قرار دارد. این منطقه از شمال به دریای خزر و شهرستان تالش، از غرب به شهرستان خلخال، از جنوب به شهرستان صومعه‌سرا و ماسال می‌رسد، و از شرق با بندر انزلی مرز مشترک دارد (شکل ۱).

منطقه مذکور از دو بخش جلگه‌ای و کوهستانی تشکیل شده است، واقع در بین عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 54'$ تا $37^{\circ} 61'$ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی $49^{\circ} 3'$ تا $49^{\circ} 12'$ درجه شرقی. وسعت منطقه مورد مطالعه حدود ۲۵۰۰۰۰ هکتار است.

منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوایی بسیار مرطوب است به طوری که میزان بارندگی سالانه آن در ایستگاه پیلیم برا (در چهار کیلومتری شمال رضوانشهر) بیش از ۱۸۰۰ میلیمتر است. کمترین درجه حرارت ۵- درجه سانتی‌گراد و بیشترین میزان آن $34/4$ درجه سانتی‌گراد است.

در منطقه مورد بحث، گونه‌های درختی شناسایی شده در نواحی مربوط به جنگل مصنوعی (دست کاشت) مشتمل‌اند بر درختان صنوبر و درختان سوزنی برگ مانند کاج و کریبتوریا؛ و در منطقه جنگلی کوهستانی، شامل درختان توسکا، راش، افرا، ممرز، آزاد و بلوط. سه گونه غالب صنوبر و توسکا و کاج در منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

درخت همچون ارتفاع و قطر و زیست‌توده آن لازم به ذکر است از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم زیست‌توده مستلزم قطع درختان و انجام اندازه‌گیری‌های مختلف در آزمایشگاه است، این فرآیند موجب صرف وقت و هزینه بسیار زیادی می‌شود. به همین خاطر روش‌های غیرمستقیم محاسبه زیست‌توده درخت، همچون استفاده از معادلات موجود و یا استفاده از حجم برای تعیین زیست‌توده درختان نمونه به کار می‌رود.

ب) تهیه تصاویر و استخراج ویژگی‌های طیفی از قبیل نسبت‌های بانندی مختلف و شاخص‌های گیاهی تصاویر نوری و همچنین استخراج بازپراکنش و ویژگی‌های بافت تصاویر رادار. در این مرحله با استفاده از آنالیز رگرسیون تک متغیره، به برقراری ارتباط بین این ویژگی‌های استخراجی از تصاویر ماهواره‌ای و زیست‌توده اندازه‌گیری شده در پلات‌ها پرداخته می‌شود.

ج) استفاده از آنالیز رگرسیون چندمتغیره به منظور ترکیب ویژگی‌های طیف، ترکیب ویژگی‌های بافت، و ترکیب ویژگی‌های طیف و بافت. به عبارتی در این مرحله با کمک آنالیز رگرسیون چندمتغیره در به‌کارگیری توأم و تلفیق این دو دسته اطلاعات (جداگانه و یا با ترکیب آنها با هم) الگوریتم تخمین زیست‌توده با دقت بالاتر به دست می‌آید.

مزیت عمده روش ارائه‌شده در این مقاله، استفاده توأم و تلفیق اطلاعات طیفی تصویر نوری و اطلاعات بافت تصویر راداری در محاسبه زیست‌توده جنگل است. به علاوه، روش مذکور با توجه به داده‌های مورد استفاده در آن، بسیار ارزان‌تر از روش‌هایی است که در آنها از اطلاعات لیزر و لایدار استفاده می‌شود.

۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

چندین معیار برای انتخاب منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود، همچون: ۱- نمایانگر خوبی برای جنگل باشد؛ ۲- دسترسی به آن با ماشین و یا پیاده میسر باشد؛ ۳- دارای داده‌های ماهواره‌ای و نیز نقشه‌ها و

تصاویر ماهواره‌ای نوری و راداری در مدل‌سازی زیست‌توده جنگل‌های شمال ایران



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان گیلان واقع در شمال ایران.



(ج)

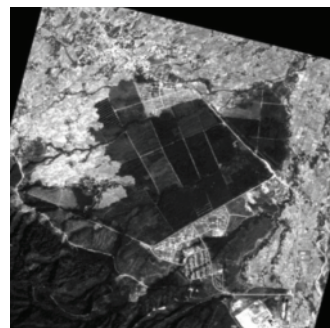
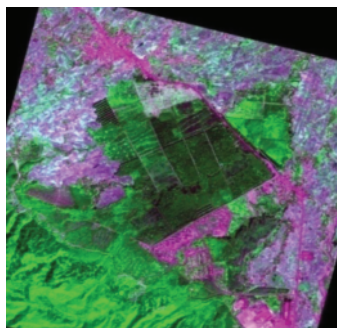


(ب)



(الف)

شکل ۲. نمونه‌ای از گونه‌های غالب در منطقه مورد مطالعه: الف) صنوبر؛ ب) توسکا؛ و ج) کاج



شکل ۳. داده‌های تصویری مورد استفاده: الف) تصویر پانکروماتیک ماهواره ALOS؛ ب) تصویر چندطیفی ماهواره ALOS؛ و ج) تصویر رادار ماهواره ALOS

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

تصویر	ماهواره (سنجده)	تعداد باند	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک طیفی (بیت)	مختصات مرکز تصویر		تاریخ گرفتن تصویر
					λ	φ	
					(درجه)	(درجه)	
پانکروماتیک	PRISM (ALOS)	۱	۲/۵	۸	۴۸/۹۷۵	۳۷/۵۱۴	۲۰۰۶/۸/۲۱
چندطیفی	AVNIR-2 (ALOS)	۴	۱۰	۸	۴۹/۲۲۵	۳۷/۷۳۳	۲۰۰۶/۸/۲۱
SAR	PALSAR (ALOS)	۱	۱۰	5	۴۹/۰۱۸	۳۷/۳۲۰	۲۰۰۸/۷/۵

در تصاویر شود. رفع این مشکل مستلزم پردازش‌های انعطاف‌پذیر و پیشرفته‌ای است که هر یک می‌تواند در مراحل مختلف انجام گیرد. یکی از این روش‌ها که معمولاً در ایستگاه‌های گیرنده تصاویر راداری در زمان گرفتن سیگنال انجام می‌شود، پردازش چنددیده^۴ است. این روش می‌تواند تا اندازه‌ای مقدار نویز لکه‌ای را کاهش دهد، اما مشکل عمده‌اش این است که باعث کاهش جدی قدرت تفکیک مکانی می‌شود و به دلیل اینکه کاربران نمی‌توانند این پردازش را انجام دهند، در مورد آن بحث و استدلال نیز نمی‌شود. روش دیگری که معمولاً کاربران به آن بیشتر توجه دارند، استفاده از فیلترهای حوزه مکان است. فیلترهای مختلف کاهش نویز لکه‌ای بر روی منطقه مورد مطالعه برای تصویر SAR اعمال گردید. به منظور بررسی عملکرد و کارایی هر فیلتر، به محاسبه تصویر نسبت (درواقع نسبت تصویر اصلی به تصویر فیلترشده) برای هر فیلتر، و سپس محاسبه معیارهای میانگین و انحراف معیار آن پرداخته می‌شود.

در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمودارهای مقادیر میانگین و انحراف معیار تصاویر نسبت برای منطقه مورد مطالعه پس از اعمال فیلترها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در حالتی که فیلترها روی تصویر اعمال شده‌اند، فیلتر لی بهبودیافته

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده نیز شامل دو دسته داده‌های نوری و راداری هستند. تصاویر نوری شامل تصویر پانکروماتیک^۱ و تصویر چندطیفی^۲ و تصویر راداری گرفته شده به وسیله ماهواره ALOS از منطقه مورد مطالعه است (شکل ۳). اطلاعات تفصیلی‌تر درباره تصاویر مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- پیش‌پردازش داده‌های سنجش از دور

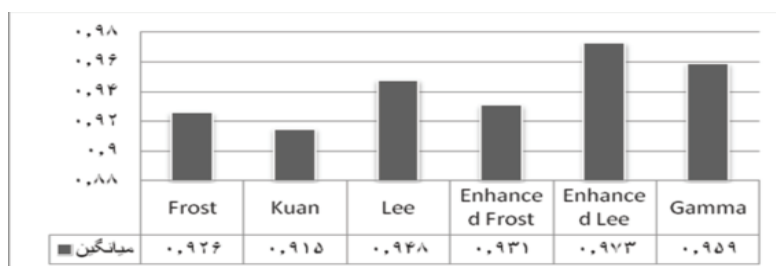
به‌طور کلی مهم‌ترین عملیات پیش‌پردازشی مربوط به تصاویر ماهواره‌ای سنجش از دور، عبارت‌اند از تصحیحات رادیومتریکی و هندسی. دو عامل اصلی خطاهای رادیومتری نیز عبارت‌اند از خطای دستگاهی و خطای اتمسفری. از آنجا که خطاهای مذکور پیش‌تر به‌وسیله سازمان ارائه‌کننده تصاویر نوری مورد مطالعه اصلاح شده است، بنابراین اعمال تصحیح این خطاها برای تصویر نوری ضروری نیست.

در تصاویر SAR، تداخل امواج و نیز عوامل توپوگرافی سطح زمین تأثیر نامطلوبی بر تصاویر می‌گذارند که به نویز لکه‌ای^۳ معروف است. این نویز اساسی‌ترین عامل کاهش کیفیت رادیومتریکی تصاویر در سیستم‌های SAR است. نویز اشاره‌شده باعث بروز خطا در نتایج الگوریتم‌هایی می‌شود که از مقادیر پیکسل‌ها برای استخراج نتایج استفاده می‌کنند. ساده‌ترین تأثیر نویز لکه‌ای در تصاویر SAR به‌صورت بافت دانه دانه یا لکه‌های سفید و سیاه است. البته در صورتی که منطقه تصویربرداری دارای بافت ناهمسان باشد، نویز لکه‌ای می‌تواند باعث بروز ابهامات شدیدی

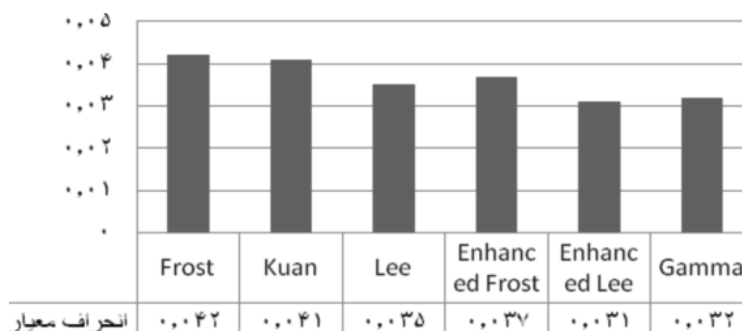
1. Speckle noise
2. Multilooking
3. Panchromatic
4. Multispectral

در این تحقیق تصحیح هندسی و زمین‌مرجع کردن^۱ دقیق تصاویر دارای اهمیت ویژه‌ای است. در تصاویر راداری، بخشی از تصحیح هندسی، تبدیل تصویر Stant Range به Ground Range با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی زمین است، که با به‌کارگیری مدل ارتفاعی رقومی دقیق منطقه انجام می‌شود. در اینجا چون داده‌های راداری در سطح ۱/۵ به کار می‌روند، این تصحیح روی تصویر مورد استفاده اعمال شده است. به‌منظور زمین‌مرجع کردن تصویر، با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه و نیز وجود جنگل‌های انبوه در سطح آن، یافتن عوارض نقطه‌ای به عنوان نقاط کنترل برای اندازه‌گیری مختصات جهانی آنها، امری دشوار و زمان‌بر و فاقد دقت کافی می‌نماید. به همین خاطر با استفاده از GPS دستی ماژلان و ردیابی جاده‌ها و مسیرهای موجود در منطقه، تصاویر مورد مطالعه زمین‌مرجع شدند.

میانگینی با بیشترین نزدیکی به ۱ و با انحراف معیار پایین، نسبت به بقیه فیلترها بیشترین کارایی را در کاهش نویز و بازیابی تصویر منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این حالت فیلترهای گاما و لی از نظر کارایی به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند. با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان این را مطرح کرد که فیلترهای کاهش نویز لکه‌ای ممکن است برای مناطق مختلف با پوشش و بافت متفاوت، از نظر عملکرد یکسان نباشد. بدین ترتیب انتخاب فیلتر مناسب بستگی به نوع منطقه دارد و لازم است با آزمون فیلترها و ارزیابی عملکرد آنها، فیلتر مناسب برای استفاده در منطقه مورد نظر انتخاب گردد. همان‌گونه که اشاره شد، در تصویر راداری مورد استفاده در این مقاله، فیلتر لی بهبودیافته با میانگین نزدیک‌تر به یک (۰/۹۷۳) و انحراف معیار پایین‌تر (۰/۰۳۱) عملکردی بهتر از بقیه فیلترها دارد.



شکل ۴. نمودار میانگین تصاویر نسبت منطقه جنگلی مورد مطالعه



شکل ۵. نمودار انحراف معیار تصاویر نسبت منطقه جنگلی مورد مطالعه

1. Georeferencing

نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ موجود منطقه و با انتخاب نقاط بیشتر (علاوه بر نقاط GPS) و با پراکندگی یکنواخت در منطقه، به زمین مرجع کردن دقیق‌تر تصویر پرداخته شد و دقت به دست آمده در قیاس با روش قبلی بهبود داده شد. در جدول ۳، RMSE نقاط کنترل و نقاط چک هر تصویر با استفاده دو گروه داده‌ها، یعنی نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ و نقاط GPS، نشان داده شده است.

در جدول ۲، RMS^۱ نقاط کنترل و نقاط چک برای هر تصویر با استفاده از نقشه GPS نشان داده شده است.

با توجه به اینکه روش زمین مرجع کردن تصاویر به وسیله ردیابی مسیر با GPS با محدودیت نقاط GPS و پراکندگی مناسب نقاط در سطح منطقه مواجه بود، لذا در مناطقی با نقاط کنترل اندک، عمل زمین مرجع کردن با خطای بالایی همراه است. بنابراین با استفاده از

جدول ۲. مقادیر RMSE به دست آمده برای تصحیح هندسی تصاویر مورد استفاده، با بهره‌گیری از نقشه به دست آمده از برداشت مسیر با GPS

تصویر	تعداد نقاط کنترل	تعداد نقاط چک	نقاط کنترل RMSE (پیکسل)	نقاط چک RMSE (پیکسل)
PRISM	۲۰	۱۵	۰/۸۴۲	۰/۹۲۳
AVNIR-2	۲۰	۱۵	۰/۸۷۱	۱/۰۱۲
SAR(PALSAR)	۲۰	۱۵	۱/۲۳۲	۱/۴۲

جدول ۳. مقادیر RMSE به دست آمده برای تصحیح هندسی تصاویر مورد مطالعه با استفاده از نقشه ۱/۲۵۰۰۰ و نقاط GPS

تصویر	تعداد نقاط کنترل	تعداد نقاط چک	نقاط کنترل RMSE (پیکسل)	نقاط چک RMSE (پیکسل)
PAN(PRISM)	۵۰	۲۰	۰/۶۷۸	۰/۷۸۴
MS(AVNIR-2)	۵۰	۲۰	۰/۷۳۹	۰/۸۵۶
SAR(PALSAR)	۵۰	۲۰	۰/۹۷۶	۰/۹۹۲



شکل ۶. پلات‌های اندازه‌گیری شده (رنگ زرد) منطقه مطالعاتی و مسیرهای حرکت برای اندازه‌گیری پلات‌ها

1. Root Mean Square Error (RMSE)

۴- نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

با توجه به هدف مقاله، یعنی اندازه‌گیری مقدار زیست‌توده جنگل، اندازه‌گیری‌های مرتبط با جنگل و متغیرهای مرتبط با درخت کار دشوار و پرهزینه‌ای است.

به‌منظور نمونه‌برداری، ابتدا هماهنگی‌های لازم با پردیس ۳ دانشکده فنی دانشگاه تهران واحد چوکا (واقع در منطقه مورد مطالعه) برای استقرار انجام گرفت، و سپس تجهیزاتی مانند GPS دستی به منظور ثبت مختصات محدوده نمونه‌برداری، یک دستگاه دوربین توتال استیشن Leica مدل TC407 برای اندازه‌گیری ارتفاع درختان نمونه، یک عدد منشور، متر نواری ۵۰ متری و کمری، قطب‌نما و نیز طناب تهیه شد. پس از مستقر شدن در محل، پلات‌هایی مطابق شکل ۶ انتخاب و پارامترهای مختلف درختان در این پلات‌ها اندازه‌گیری شد.

پس از انتخاب پلات‌ها (رنگ زرد در شکل ۶)، متغیرهای همه درختان داخل هر پلات (ارتفاع و قطر درخت) اندازه‌گیری می‌شود. سپس علاوه بر اندازه‌گیری ارتفاع و قطر درخت، مقدار زیست‌توده هر درخت در پلات‌ها نیز اندازه‌گیری و یا محاسبه می‌گردد. براساس زیست‌توده به‌دست‌آمده از درختان نمونه و متغیرهای درختان نمونه از قبیل ارتفاع و قطر، به برقراری ارتباط بین زیست‌توده و متغیرهای درخت پرداخته می‌شود. درواقع در این مرحله، معادله زیست‌توده برای درختان نمونه به دست می‌آید. سپس با اعمال معادله زیست‌توده به‌دست‌آمده برای همه درختان پلات، مقدار زیست‌توده کل پلات به‌دست می‌آید.

درختان اندازه‌گیری شده در منطقه شامل ۷ گونه متفاوت است، و در مجموع ۱۱۸۶ درخت در پلات‌های نمونه شمارش شد، که در آن میان گونه صنوبر، ۳۱ درصد گونه توسکا، ۲۹ درصد کاج، ۱/۴۵ درصد کریپ توریا، ۰/۶۷ درصد افرا، ۰/۴۸ درصد ممرز و ۰/۴ درصد بلوط بوده است. این آمار نشان می‌دهد که بیشترین درختان اندازه‌گیری شده، گونه‌های صنوبر و توسکا و

کاج هستند که حدود ۹۷ درصد، درختان مذکور را شامل می‌شوند. به این دلیل معادلاتی که براساس متغیرهای درختان به دست می‌آید، برای این سه گونه معتبر و دقیق‌تر از دیگر گونه‌هاست. با توجه به زمان محدود اندازه‌گیری و در نظر گرفتن هزینه بالا و مواجهه با مشکلات متعدد در جنگل، ۲۸ پلات مربعی شکل (شکل ۶) به ابعاد ۳۰ × ۳۰ متر انتخاب و اندازه‌گیری شد. با انتخاب هر پلات، چهار طرف آن با بستن طناب به درختان مرزی مشخص می‌گردد و سپس تعداد درختان داخل پلات شمارش می‌شوند. از آنجا که درختان داخل هر پلات قطرهای متفاوتی دارند، لذا درختان براساس قطرشان در ارتفاع ۱/۳ متر به کلاس‌هایی تقسیم می‌گردند و تعداد درخت در هر کلاس شمارش می‌شود. برای اندازه‌گیری پارامتر ارتفاع درخت نیز روش نقشه‌برداری با استفاده از دوربین نقشه‌برداری (توتال استیشن) به کار می‌رود.

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

از آنجا که اندازه‌گیری مقدار زیست‌توده درخت به روش مستقیم (مخرب) بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است، لذا از روش غیرمستقیم (غیرمخرب) استفاده شده است. در این روش با محاسبه حجم هر درخت و استفاده از معادلات تعیین‌شده در [۱۳]، مقدار زیست‌توده هر درخت به‌دست می‌آید؛ و با توسعه آن به کل پلات، مقدار زیست‌توده برای هر پلات محاسبه می‌شود. پس از آن، با قرار دادن موقعیت کلیه پلات‌ها روی تصاویر زمین‌مرجع شده، ویژگی‌های متناظر با پلات‌ها شامل باندهای مختلف تصویر نوری و اندیس‌های گیاهی و ویژگی‌های بافت استخراج می‌شود. آن‌گاه با مدل‌های رگرسیون چندمتغیره به برقراری ارتباط بین مقدار زیست‌توده پلات و اطلاعات استخراجی و محاسبه مدلی که بیان‌کننده قوی‌ترین ارتباط باشد، پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی زیست‌توده جنگل با استفاده از آنالیز رگرسیون، زیست‌توده به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود؛ و باندهای طیفی تصویر نوری،

۱ مبین این نکته است که تمامی تغییرات در y به وسیله مدل رگرسیون بیان شدند است. با توجه به جدول ۵ بهترین مدل برای تخمین زیست توده درخت براساس مقادیر طیفی باندها و اندیس های گیاهی با بالاترین مقدار ضریب تعیین 0.547 و کمترین مقدار $RMSE$ ، $17/45$ برآورد شد.

به منظور مدل سازی زیست توده با اطلاعات مربوط به تصویر رادار از قبیل ویژگی های بافت و مقدار بازپراکنش، در صورت استفاده از رگرسیون چند متغیره، شکل کلی مدل بدین صورت است:

$$Biomass = a_0 + a_1 \times Backscatter + a_2 \times Correlation + \dots + a_{16} \times Skewness$$

در این حالت مقادیر ویژگی های بافت و مقدار بازپراکنش به روش قدم به قدم وارد مدل شدند و بعد از حذف متغیرهایی که تأثیری در بهبود مدل نداشتند، در نهایت این متغیرها باقی ماندند: بازپراکنش، همبستگی، یکنواختی و واریانس. در واقع در مدل مذکور ضرایب برای سایر باندها صفر است. ترکیب نهایی مدل تعیین شده در جدول ۴ بیان شده است.

دوباره به منظور انتخاب بهترین مدل برازش، دو معیار ضریب تعیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) به کار می روند. با توجه به جدول ۴، بهترین مدل برای تخمین زیست توده درخت براساس مقادیر ویژگی های بافت و مقدار بازپراکنش با بالاترین مقدار ضریب تعیین 0.639 و کمترین مقدار $RMSE$ ، $15/23$ برآورد می شود.

به منظور مدل سازی زیست توده با ترکیبی از اطلاعات مربوط به تصویر نوری (۴ باند تصویر نوری و اندیس های گیاهی متفاوت) و تصویر رادار (ویژگی های بافت و مقدار بازپراکنش) در صورت استفاده از رگرسیون چندمتغیره، شکل کلی مدل بدین صورت است:

شاخص های گیاهی تصویر نوری، ویژگی های بافت و مقدار بازپراکنش^۱ تصویر SAR، به عنوان متغیر مستقل. پس از آنالیز تک متغیره، باندهای ۲ و ۴ از تصویر چندطیفی، اندیس های گیاهی EVI ، $VIS123$ و DVI از تصویر نوری؛ و واریانس، یکنواختی، همبستگی و انترویی از تصویر SAR، به عنوان بهترین باندها و ویژگی های انتخاب می گردند.

برای تخمین زیست توده با استفاده از آنالیز رگرسیون چندمتغیره، زیست توده به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد؛ و ویژگی های بافت، مقدار بازپراکنش ($Backscatter$)، باندهای طیفی و اندیس های گیاهی به عنوان متغیر مستقل. با توجه به مجموع ۲۸ پلات اندازه گیری شده، ۶ نمونه به صورت تصادفی برای مرحله تست یا آزمون مدل و محاسبه متوسط باقی مانده ها ($RMSE$) انتخاب شدند. بدین ترتیب، ضریب تعیین با ۲۲ پلات آموزشی محاسبه می شود.

به منظور مدل سازی زیست توده با اطلاعات مربوط به تصویر نوری از قبیل ۴ باند تصویر نوری و اندیس های گیاهی متفاوت، در صورت استفاده از رگرسیون چندمتغیره، شکلی کلی مدل بدین صورت است:

$$Biomass = a_0 + a_1 \times B_1 + a_2 \times B_2 + a_3 \times B_3 + a_4 \times B_4 + a_5 \times NDVI + \dots + a_{13} \times ND32$$

در این حالت مقادیر طیفی باندها و اندیس های گیاهی به روش قدم به قدم وارد مدل می شوند و بعد از حذف متغیرهایی که تأثیری در بهبود مدل ندارند، در نهایت متغیرهای B_1 ، B_2 ، B_4 و DVI و SRI باقی ماندند. در واقع در مدل مذکور ضرایب برای دیگر باندها صفر است. جدول ۴ ترکیب نهایی مدل را نشان می دهد.

به منظور انتخاب بهترین مدل برازش، از دو معیار ضریب تعیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) استفاده شد. R^2 معمولاً نسبت تغییرات برآورد شده y به وسیله متغیر رگرسیونی x نامیده می شود و همیشه بین صفر تا یک است. R^2 نزدیک به

1. Backscatter

و نیز راداری و ترکیبی از این اطلاعات، ضریب تعیین مدل حاصل از اطلاعات تصاویر رادار به مقدار ۸ درصد از ضریب تعیین مدل حاصل از اطلاعات نوری بیشتر است. بدین ترتیب در واقع اطلاعات راداری، مقدار زیست‌توده جنگل‌های مورد مطالعه را بهتر از اطلاعات نوری بیان می‌کنند. از آنجا که ضریب تعیین مدل حاصل از ترکیب اطلاعات نوری و رادار به مقدار ۷ درصد از ضریب تعیین مدل حاصل از اطلاعات رادار بیشتر است، لذا ترکیب اطلاعات نوری و رادار به منظور تخمین مقدار زیست‌توده، با دقت بیشتری از اطلاعات رادار همراه است (شکل ۷).

با مقایسه ضریب تعیین و RMSE مدل‌های مختلف حاصل از آنالیز رگرسیون چندمتغیره، بهترین مدل از ترکیب ویژگی‌های به‌دست‌آمده از تصویر نوری عبارت‌اند از: B_1, B_2, B_4, DVI ؛ و ویژگی‌های به‌دست‌آمده از تصویر رادار مشخص می‌گردد، که مشتمل است بر Correlation و Backscatter. در شکل ۸، نقشه زیست‌توده حاصل از این مدل نشان داده شده است. مطابق شکل ۸ نقشه حاصل برحسب مقدار زیست‌توده به ۵ کلاس طبقه‌بندی گردیده است. در جدول ۵ مساحت و مقدار زیست‌توده برحسب واحد تن بر هکتار برای هر کلاس محاسبه شده است.

$$\text{Biomass} = a_0 + a_1 \times B_1 + a_2 \times B_2 + a_3 \times B_4 + a_4 \times B_4 + a_5 \times \text{NDVI} + \dots + a_{13} \times \text{NDVI} + a_{14} \times \text{Backscatter} + a_{15} \times \text{Correlation} + \dots + a_{29} \times \text{Skewness}$$

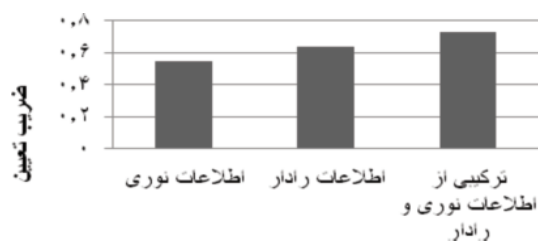
در این حالت اطلاعات مربوط به تصویر نوری (۴ باند تصویر نوری و اندیس‌های گیاهی متفاوت) و تصویر رادار (ویژگی‌های بافت و مقدار بازپراکنش) به روش گام به گام وارد مدل شد. و بعد از حذف متغیرهایی که تأثیری در بهبود مدل نداشتند، در نهایت این متغیرها باقی ماندند: $B_1, B_2, B_4, DVI, \text{Correlation}$ و در واقع ضرایب برای دیگر باندها صفر است. ترکیب نهایی مدل تعیین‌شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

باز هم به منظور انتخاب بهترین مدل برازش، از دو معیار ضریب تعیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده می‌شود. با توجه به جدول ۴ بهترین مدل برای تخمین زیست‌توده درخت براساس ترکیب اطلاعات تصویر نوری و رادار با بالاترین مقدار ضریب تعیین ۰/۷۳۱ و کمترین مقدار RMSE، ۱۳/۸۸ برآورد گردید.

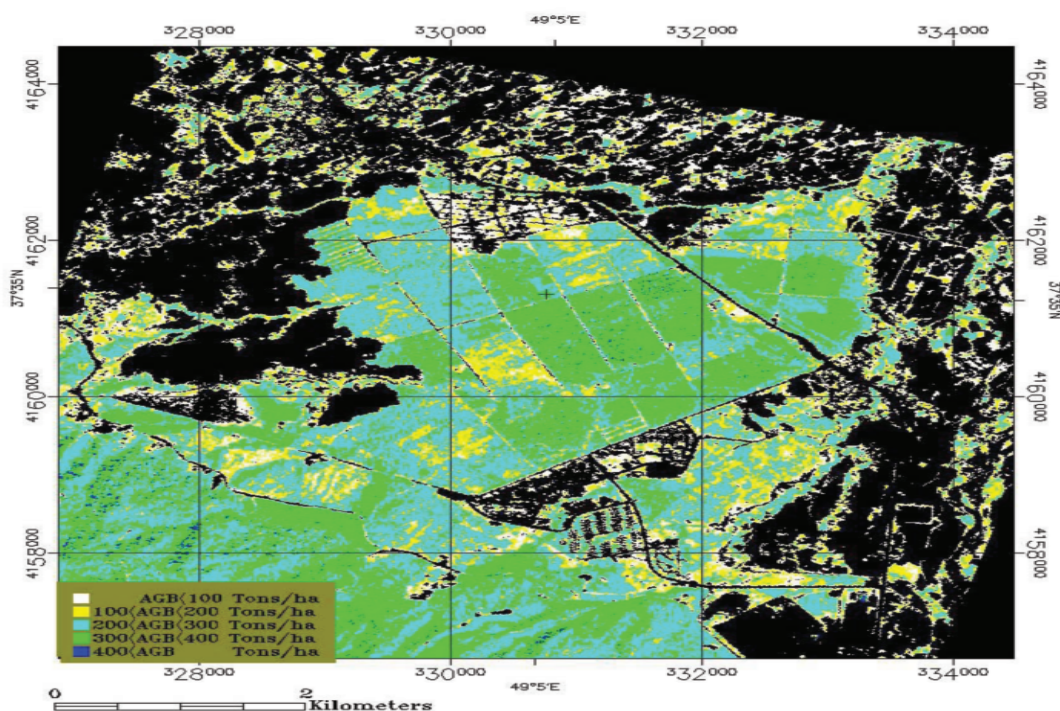
با توجه به مدل‌سازی‌های انجام‌شده به منظور تخمین زیست‌توده با استفاده از اطلاعات تصاویر نوری

جدول ۴. بهترین مدل‌های تخمین به دست آمده از آنالیز رگرسیون چندمتغیره برای: اطلاعات نوری و رادار و ترکیب این دو

متغیر	مدل	R^2	RMSE (tons/ha)
اطلاعات تصویر نوری	$\text{Biomass} = -40/46(B1) - 26/008(B2) + 14/761(B4) - 13/152(DVI) - 24/535(SRI) + 3292/626$	۰/۵۴۷	۱۷/۴۵
اطلاعات تصویر رادار	$\text{Biomass} = 4/393(\text{Backscatter}) + 2/899(\text{Correlation}) - 321/661(\text{Homogeneity}) - 4/183(\text{Variance}) + 149/077$	۰/۶۳۹	۱۵/۲۳
ترکیبی از اطلاعات نوری و رادار	$\text{Biomass} = -30/92(B1) - 14/298(B2) + 12/763(B4) + 10/731(DVI) + 2/22(\text{Backscatter}) + 3/221(\text{Correlation}) + 2088/844$	۰/۷۳۱	۱۳/۸۸



شکل ۷. مقایسه ضرایب تعیین به دست آمده از مدل سازی مقدار زیست توده بر اساس اطلاعات نوری و رادار، و نیز ترکیبی از این دو



شکل ۸. نقشه زیست توده منطقه مطالعاتی

جدول ۵. مقدار زیست توده و مساحت هر کلاس برای منطقه مورد مطالعه

کلاس	سیاه (غیر جنگل)	سفید	زرد	فیروزه‌ای	سبز	آبی
مقدار زیست توده (تن بر هکتار)	۰	کمتر از ۱۰۰	۱۰۰ - ۴۰۰	۲۰۰ - ۳۰۰	۳۰۰ - ۴۰۰	بیشتر از ۴۰۰
مساحت (هکتار)	۲۴۷۵/۷۵	۵۸۱/۷۴	۶۵۵/۰۹	۱۲۸۵/۰۲	۹۳۲/۶	۲۰/۶

۶- نتیجه گیری

محاسبه زیست توده در جنگل‌ها بسیار هزینه‌بر و مستلزم صرف زمان زیاد هستند، ارائه روش‌های مبتنی بر استفاده از تصاویر سنجنش از دور در نظر گرفته شد.

در مطالعه حاضر، نحوه محاسبه زیست توده جنگل مطرح گردید. با توجه به اینکه روش‌های زمینی

Brown, S.A., 1982, **The Storage and Production of Organic Matter in Tropical Forests and Their Role in the Global Carbon Cycle**, Biotropica 14, PP. 161-187.

Brown, S.A., 1992, **Above Ground Biomass Estimates for Tropical Moist Forests of the Brazilian Amazon**, Interciencia 17, PP. 8-18.

Deo, R.K., 2008, **Modelling and Mapping of Above-ground Biomass and Carbon Sequestration in the Cool Temperate Forest of North-east China**, M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-Information science and earth observation (ITC), Enschede, Netherlands,.

Giles M. Foody, D. S., 2003, **Predictive Relations of Tropical Forest Biomass from Landsat TM data and their transferability between regions**, Remote Sensing of Environment 85 , PP. 463-474.

IPCC., 2001, **Climate Change**, New York: Working group I: The scientific basis Cambridge university press.

LI, X. G.O., 2007, **Regression and Analytical Models for Estimating Mangrove Wetland Biomass in South China Using Radarsat Images**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, No. 24, PP. 5567-5582.

LU, D., 2005, **Aboveground Biomass Estimation Using Landsat TM Data in the Brazilian Amazon**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 12, PP. 2509-2525.

گفتنی است که امواج نوری توان نفوذ در لایه‌های زیرین تاج درختان را ندارند و فقط اطلاعات مربوط به بخش فوقانی تاج درخت را ثبت می‌کنند. در عین حال بیشترین مقدار زیست‌توده مربوط به تنه درخت است، و امواج رادار دارای نفوذ بیشتری هستند و اطلاعات دقیق‌تری را از تنه درخت به دست می‌دهند. در این مقاله کوشش شد تا با در نظر گرفتن اطلاعات بافت و طیف حاصل از سنجنده SAR، تخمین نسبتاً دقیقی از مقدار زیست‌توده به دست آید.

در این تحقیق از تصاویر نوری و SAR ماهواره ALOS استفاده شد، و با بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره به برقراری ارتباط بین مقدار زیست‌توده مربوط به ۲۸ پلات زمینی و اطلاعات سنجنش از دور شامل انعکاس طیفی همه باندها (۴ باند)، اندیس‌های گیاهی و ویژگی‌های بافت تصویر رادار، پرداخته شد. در نهایت از ترکیب همه متغیرهای به‌دست‌آمده از تصویر نوری و رادار با استفاده از آنالیز رگرسیون چندمتغیره، برای ایجاد ارتباط بین داده‌های سنجنش از دور و مقدار زیست‌توده استفاده شد و پس از حذف متغیرهای دارای تأثیر ناچیز، مدلی با متغیرهای B_1 , B_2 , B_4 , DVI، بازپراکنش و همبستگی به‌دست آمد.

۷- تقدیر و تشکر

در اینجا شایسته است از حمایت مالی دانشگاه تهران از تحقیق حاضر در قالب طرح پژوهشی شماره ۱۳۹۰/۰۶/۲۰ قدردانی گردد. به علاوه، از مهندسان سازمان مراتع و جنگل‌داری استان گیلان (رضوانشهر) برای نمونه‌برداری از جنگل نیز بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

۸- منابع

Amini, J., A., 2009, **Employing a Method on SAR and Optical Images for Forest Biomass Estimation**, IEEE Trans. Image Process, vol.47, No.12, PP. 4020-4026.

LU, D., 2006, **The Potential and Challenge of Remote Sensing-based Biomass Estimation**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 27, No. 7, PP. 1297–1328.

Reichle, D.E., 1981, **Dynamic Properties of Forest Ecosystems**, International Biological Programme 23, Cambridge University Press, UK.

Samalca, I.K., 2007, **Estimation of Forest Biomass and its Error, a Case in Kalimantan, Indonesia, Enschede, Netherlands**, M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-Information science and earth observation (ITC).

<http://www.weather.ir/Farsi>.

<http://www.alos-restec.jp>