



تخمین میزان زیست توده جنگل‌ها با استفاده از تصاویر رادار با روزه مجازی مطالعه موردی: جنگل خیرودکنار نوشهر

محمودرضا صاحبی^{۱*}، علی محمدزاده^۲

۱ و ۲. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پژوهشکده سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۳/۲۸

چکیده

تجمع گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، مهم‌ترین عامل افزایش دمای کره زمین از نیمه دوم قرن بیستم به بعد، شناخته شده است. به‌دام‌انداختن کربن در جنگل‌ها و میان درختان راه‌حلی عملی، کارآمد و ارزان برای کاهش سطح دی‌اکسیدکربن در اتمسفر است. بنابراین اندازه‌گیری زیست‌توده در بررسی تغییرات آب‌وهوایی و چرخه کربن جهانی اهمیت ویژه‌ای دارد. در پژوهش حاضر روشی بر پایه تبدیلات موجک به‌منظور تخمین زیست‌توده در منطقه‌ای جنگلی با درختان پهن‌برگ در شمال ایران ارائه شده است. تبدیلات مختلف موجک (تبدیلات دوبعدی گسسته) روی تصویر رادار با روزه مجازی سنجنده ALOS PALSAR اعمال شدند و ضرایب به‌دست‌آمده به‌عنوان داده‌های جداگانه ذخیره شدند. میزان همبستگی هریک از پارامترهای محاسبه‌شده با مقدار زیست‌توده به‌وسیله آنالیز رگرسیون چندگانه بررسی شد. نتایج نشان دادند که ضرایب به‌دست‌آمده از تبدیل موجک Db2 در مقایسه با سایر تبدیلات، همبستگی بیشتری با مقدار زیست‌توده دارند. در تجزیه یک‌مرحله‌ای، مقدار همبستگی با زیست‌توده تقریباً ۰/۵ و در تجزیه دومرحله‌ای تصاویر، مقدار همبستگی به‌دست‌آمده برای تصویر مایکروویو به بیش از ۰/۷۵ ارتقا پیدا کرد. پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از تبدیلات موجک می‌تواند روش مناسبی برای تخمین زیست‌توده - به‌ویژه در مناطقی با ساختار پوشش گیاهی پیچیده - باشد.

کلیدواژه‌ها: تصاویر آلوس پالزار، تبدیل موجک، زیست‌توده جنگل، آنالیز رگرسیون چندگانه.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پژوهشکده سنجش از دور،

تلفن: ۰۹۱۲۱۵۹۲۵۸۱

۱- مقدمه

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که جنگل‌زدایی و تخریب مناطق جنگلی تأثیرات زیادی بر تغییرات آب‌وهوایی، تنوع زیستی، چرخه آب و فرسایش خاک دارند (Houghton, 1991). یک روش عملی برای ارزیابی میزان جنگل‌زدایی یا جنگل‌کاری و ارزیابی وضعیت جنگل‌ها، شرح و بسط روش‌های تخمین زیست‌توده^۱ است. در اندازه‌گیری زیست‌توده در مقیاس‌های مختلف منطقه‌ای تا جهانی در تخمین میزان کربن انتشار یافته در جو، بررسی میزان فرسایش خاک و تغییرات گونه‌های زیستی و اکوسیستم منطقه نقش مهمی دارد (Houghton et al., 2001; Foody, 2003; LU, 2005). زیست‌توده به‌طور کلی شامل توده زنده موجود روی سطح و زیر سطح زمین - مانند درختان، بوته‌ها، و ریشه‌ها - و توده مرده به‌جامانده از بقایای فعالیت موجودات زنده در خاک است. به‌علت دشواری جمع‌آوری اطلاعات در مورد زیست‌توده موجود در زیر سطح زمین، اکثر تحقیقات و پژوهش‌ها بر زیست‌توده موجود در سطح زمین متمرکز شده‌اند (Lu, 2005). روش‌های سنتی برپایه جمع‌آوری داده‌های زمینی، دقیق‌ترین روش‌ها برای تخمین زیست‌توده به‌شمار می‌آیند. البته این روش‌ها غالباً زمان‌بر، پرهزینه و در مناطقی با توپوگرافی پیچیده با مشکلات فراوانی روبه‌رو هستند. افزون بر این، داشتن تخمین مناسبی از میزان زیست‌توده با این روش‌ها در مقیاس وسیع تقریباً غیرممکن است. به‌همین دلیل در سال‌های اخیر، استفاده از سنجش از دور در تخمین زیست‌توده مورد استقبال قرار گرفته است (Nelson et al., 2000; Steininger, 2000; Zheng et al., 2004; Lu, 2005). داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند امکان پایش مناطق وسیع را در بازه‌های زمانی کوتاه فراهم کنند و بازده و کاربرد مطالعات زمینی محدود و جمع‌آوری داده‌های زمینی را افزایش دهند. پژوهشگران باید توجه داشته باشند که داده‌های سنجش از دور نمی‌توانند به‌طور کامل جای اندازه‌گیری‌های زمینی را در تخمین زیست‌توده پر

کنند. تحقیقات زیادی در زمینه طراحی روش‌ها و مدل‌هایی برای اندازه‌گیری پارامترهای بیوفیزیکی جنگل - مانند تاج پوشش، شاخص سطح برگ، زیست‌توده و سن درختان - از داده‌های مختلف سنجش از دور شامل عکس‌های هوایی، تصاویر چندطیفی، ابرطیفی، تصاویر با قدرت تفکیک بالا، رادار با روزنه مجازی^۲ و داده‌های لیدار^۳ انجام گرفته است. وابستگی بازتابش طیفی یا شاخص‌های گیاهی خصوصاً در مناطق جنگلی با ساختار پیچیده که مقدار بازتابش طیفی در آنها اشباع می‌شود، با زیست‌توده معمولاً ضعیف است؛ بدین معنی که با بالارفتن مقادیر زیست‌توده، مقدار بازتابش تغییر نمی‌کند. این موضوع اصلی‌ترین نقطه ضعف تصاویر نوری در زمینه تخمین زیست‌توده است (Lu, 2005; Nelson et al., 2000; Foody et al., 2001; Steininger, 2000; Lucas et al., 1998; Trotter et al., 1997; Wu & Strahler, 1994).

تکنولوژی رادار با روزنه مجازی در مطالعات پوشش گیاهی خصوصاً در مناطقی که غالباً پوشش ابر دارند، بسیار جالب است. این سیستم‌ها در محدوده امواج مایکروویو فعالیت می‌کنند و روش‌هایی که برای آنالیز داده‌ها به کار می‌گیرند، پیچیده‌تر از تصاویر نوری است. باندهای استفاده‌شده در تخمین زیست‌توده با استفاده از تصاویر رادار با روزنه مجازی عبارت‌اند از: باند L, P و C. طول موج‌های بلندتر (باند P و L) و پلاریزاسیون^۴ HV کورلیشن^۵ بیشتر و حساسیت بالاتری به زیست‌توده دارند (Kasischke et al., 2011). بازپراکنش باند C، که به‌طور عمده متناظر با لایه‌های بالاتر و رویی توده گیاهی است و در حد معینی از زیست‌توده اشباع می‌شود، برای تفکیک بین انواع گیاهان با زیست‌توده کم مفید است. برای زیست‌توده کم، میزان بازپراکنش

1. Biomass
2. SAR
3. LiDAR
4. Polarization
5. Correlation

تخمین میزان زیست توده جنگل‌ها با استفاده از تصاویر رادار با روزه مجازی (مطالعه موردی: جنگل خیرودکنار نوشهر)

بین طول‌های $51^{\circ}30'30''$ و $51^{\circ}35'30''$ و عرض‌های $36^{\circ}30'30''$ و $36^{\circ}37'30''$ واقع شده است. ارتفاع در این منطقه از صفر تا ۲۰۵۰ متر بالاتر از سطح دریا متغیر است.

پوشش گیاهی منطقه از نوع درختان پهن برگ است و جنگل‌های این نواحی از نوع جنگل‌های هیرکانی هستند. جنگل‌های هیرکانی از منحصر به فردترین انواع جنگل‌ها در دنیا هستند که حدود ۳/۷ میلیون هکتار از پوشش جنگلی ایران را در گذشته تشکیل می‌دادند و اکنون به ۱/۸ میلیون هکتار تقلیل یافته است (Sadeghi, 2008). قدمت این جنگل‌ها که از دوران ژوراسیک به جای مانده‌اند و از بقایای دوران سوم زمین‌شناسی هستند از یک سو، و وجود گونه‌های نادری مانند راش، بلوط، توسکا، نارون، گیلاس وحشی، بارانک، سرخدار، نم‌دار، انجیلی، افراپلت، لیلکی، و لرگ از سوی دیگر، این جنگل‌ها را به موزه زنده محیط زیست تبدیل کرده است. تصویر منطقه مطالعه شده در شکل ۱ دیده می‌شود.

۲-۲- داده‌های استفاده شده

۲-۲-۱- داده‌های زمینی

داده‌های آماربرداری زمینی از منطقه در تابستان سال ۱۳۸۸ به وسیله گروه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران جمع‌آوری شد. به منظور برداشت داده‌های زمینی، منطقه جنگلی به هشت پلیگون تقسیم شد و در هر پلیگون تعدادی پلات^۲ نمونه‌برداری مشخص شد. هر پلات، دایره‌ای است به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع روی زمین افقی. مختصات مرکز هر پلات به وسیله GPS ثبت شده و از مرکز هر پلات تا شعاع ۱۷/۸ متر، مشخصات تمام درختان با قطر برابر سینه بیش از ۷ سانتی‌متر ثبت شده است. مشخصات ثبت شده اینها هستند: شماره هر درخت،

باندهای P و L پایین‌تر از باند C است (Rignot et al., 1995). در مقابل، هنگامی که زیست توده از میزان معینی بیشتر می‌شود، بازپراکنش طول موج‌های بلندتر بیش از باند C افزایش می‌یابد. در باند C، بیشترین بازپراکنش مربوط به شاخ و برگ‌هاست و معمولاً در زیست توده 10 kg/m^3 اشباع می‌شود (Ranson et al., 1997). باندهای L و C در تخمین زیست توده، در مناطق جنگلی با ساختار پیچیده در حد 100 t/ha و در مناطقی که ساختار ساده‌تر و یک گونه غالب داشته باشند، در حدود 250 t/ha اشباع می‌شوند؛ در نتیجه استفاده از ترکیب باند P و باند L یا C مناسب‌تر است. بهترین نتیجه، با استفاده از نسبت بین باندهای L/C با پلاریزاسیون HV به دست آمده است. می‌توان گفت نسبت بین باندها کورلیشن بین بازپراکنش و زیست توده را افزایش می‌دهد (Santos et al., 2003).

به علت در دسترس نبودن داده‌های آماربرداری زمینی از مناطق مختلف جنگلی در ایران و همچنین محدودیت دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده‌های گوناگون با پوشش زمانی و مکانی مورد نیاز، متأسفانه تحقیقات انجام گرفته در زمینه تخمین زیست توده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در سطح کشور بسیار محدوده (Sadeghi, 2009; Falahati, 2008). هدف اصلی تحقیق حاضر، ایجاد مدلی برای تخمین زیست توده در منطقه جنگلی‌ای در شمال ایران با استفاده از داده‌های رادار با روزه مجازی است. در این مطالعه از آنالیز موجک^۱ برای استخراج اطلاعات مورد نیاز از تصویر استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

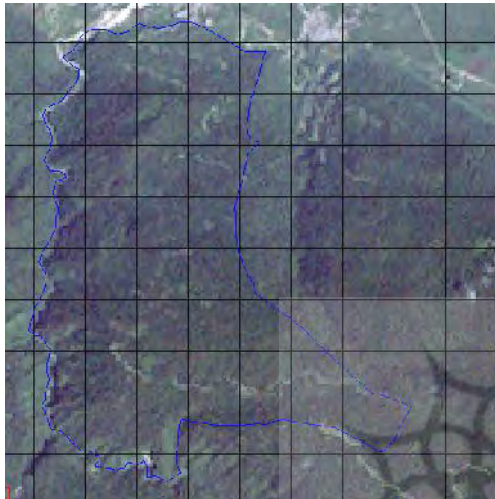
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعه شده در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در هفت کیلومتری شرق شهرستان نوشهر در منطقه خیرودکنار در استان مازندران، با وسعتی در حدود ۸۰۱۷ هکتار و

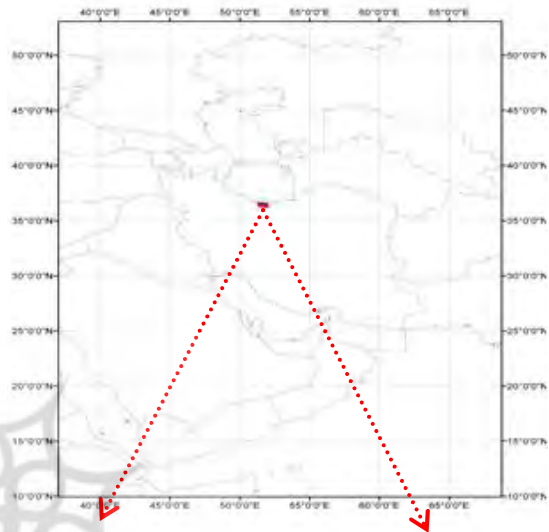
1. Wavelet
2. Plot

دید می‌شود که گروه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران آن را در اختیار نگارندگان قرار داده‌اند.

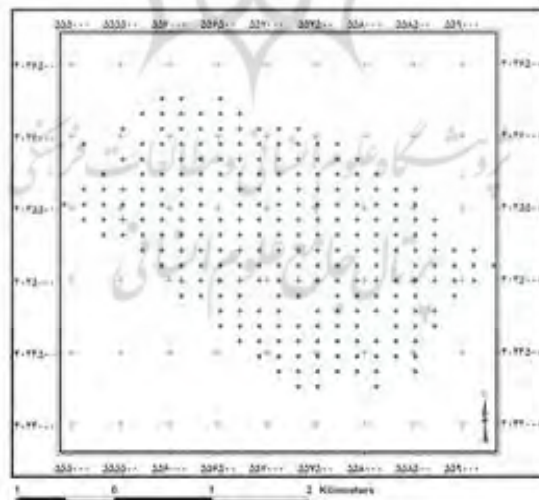
شماره پلات مربوط به آن، نوع گونه گیاهی، مساحت پایه و قطر برابر سینه. زیست توده به دست آمده براساس داده‌های آماربرداری زمینی برای هر پلات در جدول ۱



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱. منطقه مطالعه شده (الف) روی نقشه؛ (ب) تصویر ALOS AVNIR-2 دریافت شده در ۶ ژوئن ۲۰۰۸؛ (ج) نقشه پلات‌های زمینی موجود در منطقه

تخمین میزان زیست توده جنگل‌ها با استفاده از تصاویر رادار با روزه مجازی (مطالعه موردی: جنگل خیرودکنار نوشهر)

جدول ۱. زیست توده به دست آمده براساس آماربرداری زمینی برای یک پلات

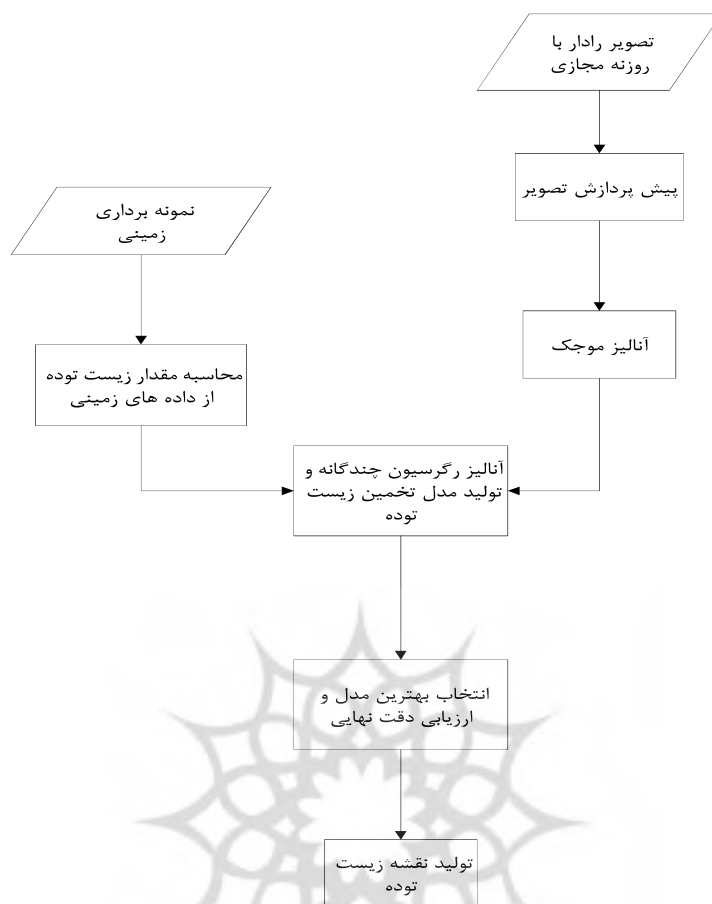
| شماره پلات | شماره درخت | نوع درخت | قطر برابر سینه (cm) | زیست توده هر درخت (kg/ha) | زیست توده پلات (t/ha) |
|------------|------------|----------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| | ۱ | راش | ۱۱۲ | ۷۹۹۷/۷ | |
| | ۲ | راش | ۴۲ | ۸۲۱/۷ | |
| | ۳ | راش | ۱۱ | ۳۶/۷ | |
| | ۴ | راش | ۲۴ | ۲۲۴/۳ | |
| | ۵ | راش | ۱۹ | ۱۳۰/۴ | |
| | ۶ | ممرز | ۱۹ | ۱۳۰/۴ | |
| | ۷ | راش | ۵۹ | ۱۸۰۷/۸ | |
| | ۸ | راش | ۵۶ | ۱۶۰۱/۶ | |
| | ۹ | راش | ۵۴ | ۱۴۷۲/۰ | |
| ۱ | ۱۰ | راش | ۲۹ | ۳۴۷/۹ | ۲۴۵/۳ |
| | ۱۱ | راش | ۱۴ | ۶۴/۲ | |
| | ۱۲ | راش | ۱۰ | ۲۹/۴ | |
| | ۱۳ | راش | ۱۸ | ۱۱۵/۰ | |
| | ۱۴ | راش | ۱۴ | ۶۴/۲ | |
| | ۱۵ | راش | ۲۹ | ۳۴۷/۹ | |
| | ۱۶ | راش | ۸۸ | ۴۵۷۰/۶ | |
| | ۱۷ | راش | ۷۷ | ۳۳۵۳/۰ | |
| | ۱۸ | راش | ۴۴ | ۹۱۵/۳ | |
| | ۱۹ | راش | ۳۳ | ۴۶۹/۶ | |
| | ۲۰ | راش | ۱۰ | ۲۹/۴ | |

۲-۲-۲- تصاویر ماهواره‌ای

تصویر استفاده شده در این مطالعه، تصویر رادار با روزه مجازی متعلق به سنجنده ALOS PALSAR است که در بانده L با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر تصویربرداری می‌کند. تصویر در تاریخ ۲۷ ژوئن سال ۲۰۰۸ در ساعت ۱۸:۵۸ از منطقه دریافت شده و متعلق به مسیر ۹۹۹۹۹ و مدار ۱۲۹۲۰ و عبور صعودی است. زاویه تابش ۳۸/۷ درجه، و پلاریزاسیون تصویر HH و HV است. تصویر موردنظر از آرشیو داده‌های سازمان فضایی اروپا دریافت شده است.

۲-۳- روش اجرا

الگوریتم کلی پیاده‌سازی شده در پژوهش حاضر در شکل ۲ دیده می‌شود. به‌طور کلی این روش شامل جمع‌آوری داده‌های زمینی و محاسبه زیست توده با استفاده از داده‌های زمینی، پیش‌پردازش تصویر رادار با روزه مجازی، محاسبه ضرایب تبدیل موجک، آنالیز رگرسیون چندگانه و محاسبه مدل تخمین زیست توده و تهیه نقشه زیست توده از منطقه موردنظر است. هر یک از مراحل ذکر شده به ترتیب در بخش‌های جداگانه در ادامه شرح داده شده‌اند.



شکل ۲. نمودار الگوریتم پیاده‌سازی شده

۲-۳-۲- پیش پردازش تصاویر رادار با روزنه مجازی

میزان تغییراتی توپوگرافی منطقه به علت تغییر زاویه تابش روی بازپراکنش ثبت شده به وسیله سنجنده بسیار مؤثر است؛ در نتیجه حذف اثر توپوگرافی خصوصاً در مناطقی با ناهمواری‌های زیاد، پیش از استفاده از داده‌های رادار با روزنه مجازی ضروریست. برای حذف اثر توپوگرافی، داشتن مدل رقومی زمین از منطقه با قدرت تفکیک مناسب در حد قدرت تفکیک پیکسل‌های تصویر الزامی است. مدل رقومی موجود از منطقه با قدرت تفکیک ۱۰ متر تولید شده از نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ با دقت ارتفاعی بهتر از ۶ متر در این مرحله به کار رفت. تصحیح توپوگرافی و زمین مرجع کردن تصویر ALOS PALSAR با استفاده از الگوریتم

۲-۳-۱- محاسبه زیست توده از داده‌های زمینی

زیست توده موجود در هر درخت با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (FAO, 1997).

$$Y = 10^{(-0.578 + \log_1 BA)} \quad (1)$$

که در آن، Y نمایش دهنده زیست توده هر درخت بر حسب کیلوگرم و BA نمایش دهنده سطح پایه بر حسب سانتی متر مربع است. در هر پلات، با تقسیم مجموع Y مربوط به کل درختان واقع شده در هر پلات بر مساحت پلات، مقدار کل زیست توده موجود بر حسب تن برهکتار به دست می‌آید. از ۲۴۶ پلات، تعداد ۲۱۰ پلات برای تولید مدل‌های تخمین زیست توده و آنالیز همبستگی و تعداد ۳۶ پلات برای ارزیابی دقت نهایی مدل انتخابی مورد استفاده قرار گرفت.

بالاگذر دارای ضرایب افقی، قائم و قطری برای بازسازی تصویر به کار گرفته می‌شوند. در پژوهش حاضر تکرار فیلتر کردن تصاویر در مرحله دوم متوقف شده است زیرا از مرحله سوم به بعد مقادیر تعداد زیادی از پیکسل‌ها به صفر تبدیل شد.

۲-۳-۴- آنالیز رگرسیون چندگانه، مدل‌سازی و

ارزیابی دقت

پس از اعمال هر یک از تبدیلات ذکر شده روی تصویر PALSAR، هر یک از تصاویر تولید شده به‌عنوان متغیر مستقل وارد آنالیز رگرسیون شدند تا بهترین متغیرها از نظر بالاتر بودن میزان همبستگی با زیست توده انتخاب شوند و بر این اساس بهترین مدل تخمین زیست توده تولید شود. استراتژی به‌کار گرفته شده در انتخاب پارامترهای شرکت کننده در مدل تخمین زیست توده، روش مرحله‌به‌مرحله نام دارد، که در آن عملیات فقط با یک پارامتر ثابت آغاز می‌شود و در هر مرحله یک متغیر به مدل اضافه می‌گردد و میزان همبستگی کلی محاسبه می‌شود. در هر مرحله پس از محاسبه همبستگی، متغیرهایی که نقشی در تقویت مدل ندارند حذف می‌شوند. این روش تضمین می‌کند که مدل با کمترین تعداد متغیرهای مستقل به‌اتمام برسد. در نهایت مدلی باید به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شود که تعداد پارامترهای تشکیل دهنده آن از ۱۰ کمتر و همبستگی آن بالاتر از ۰/۶ باشد (Wei, 2008). در پژوهش حاضر به‌منظور ارتقای دقت تخمین زیست توده، حد آستانه بیشترین تعداد متغیرهای مستقل شرکت کننده در هر مدل ۸ و کمترین همبستگی مورد قبول ۰/۷ در نظر گرفته شد. براساس این حد آستانه‌های در نظر گرفته شده، بهترین مدل

پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار ASF Map Ready که دانشگاه آلاسکا آن را تولید کرده است انجام پذیرفت. این نرم‌افزار به‌منظور انجام عملیات زمین مرجع کردن دقت زمین مرجع کردن زیر ۱۰ متر و تصحیح توپوگرافی روی تصاویر رادار با روزه مجازی از سنجنده‌های مختلف و با فرمت‌های گوناگون ایجاد شده است (Beaudoin et al., 1995).

۲-۳-۳- آنالیز موجک

ضرایب موجک استخراج شده از تصویرهای با قدرت تفکیک بالا نشان دهنده تغییرات محلی با فرکانس زیاد و ضرایب استخراج شده از تصاویر با قدرت تفکیک متوسط نشان دهنده تغییرات با فرکانس متوسط یا کم هستند. از ویژگی‌های مهم تبدیلات موجک، محلی‌سازی^۱ در دامنه‌های زمان و فرکانس است و در صورت در اختیار داشتن تصویر چندطیفی یا ابرطیفی قابلیت استفاده از اطلاعات طیفی و بافت چندین باند مختلف تصویر به‌طور هم‌زمان در اختیار قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر برای ارزیابی توانایی تبدیل موجک در استخراج زیست توده از تصاویر ماهواره‌ای، تبدیلات مختلف موجک دوبعدی روی تصویر منطقه اعمال شده است. تبدیلاتی که به کار گرفته شدند، اینها هستند:

$Misiti,) Sym^5 N, Coif^4 N, Bior^3 NM, Db^2 N$ (1996).

تبدیلات Db 1 تا Db 10 به‌صورت یک مرحله‌ای و تبدیلات Db 2, Bior 35, Coif 5 و Sym 5 به‌صورت دومرحله‌ای روی تصویر اعمال شدند. حاصل اعمال این تبدیلات در هر مرحله، ۴ تصویر است که نشان دهنده تغییرات با فرکانس زیاد در جهت سطرها و ستون‌ها، تغییرات با فرکانس زیاد در سطرها و تغییرات با فرکانس کم در ستون‌ها، تغییرات با فرکانس کم در سطرها و تغییرات با فرکانس زیاد در ستون‌ها، و تغییرات با فرکانس کم در سطرها و ستون‌ها هستند. در هر مرحله از انجام تبدیل، تصویر پایین‌گذر دارای ضرایب تقریبی به مرحله بعد منتقل شده و تصاویر

1. Localization
2. Daubechies
3. Biorthogonal
4. Coiflet
5. Symlet

تأثیر متغیر دیگر قرار می‌گیرد و آیا متغیرها با هم تعامل دارند یا نه (Neter et al., 1990).

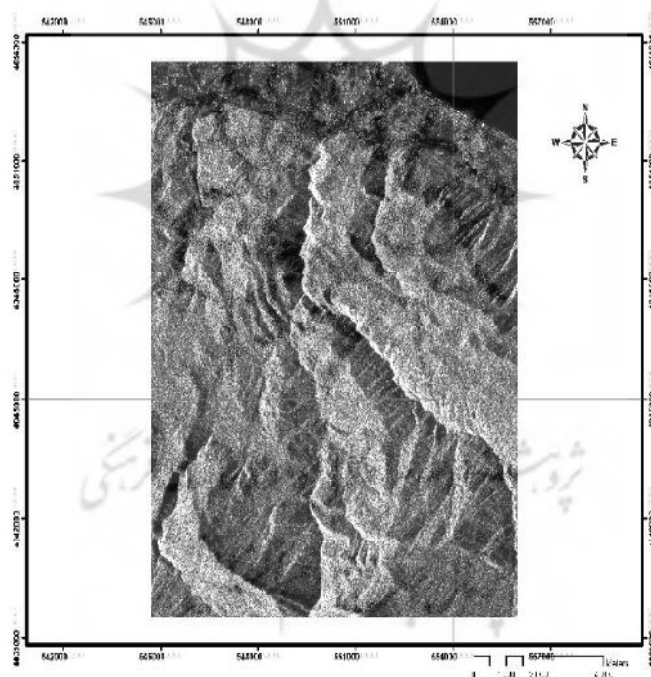
انتخاب شد و نقشه زیست‌توده منطقه با استفاده از مدل بهینه تولید گردید.

۳- نتایج و بحث

تصویر زمین مرجع شده در شکل ۳ دیده می‌شود. در مطالعه حاضر با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه، میزان همبستگی تبدیلات موجک مرتبه اول Db1 تا Db10 با زیست‌توده آزمایش شد. جدول ۲ خلاصه ضرایب به دست آمده از آنالیز رگرسیون تبدیلات مرتبه اول Db1 تا Db10 اعمال شده روی تصویر PALSAR را نشان می‌دهد.

۲-۳-۵- ارزیابی صحت مدل‌ها با تست ANOVA

برای ارزیابی صحت مدل‌های تولیدشده، از تست ANOVA استفاده شد. تست ANOVA در رگرسیون به منظور بررسی وجود همبستگی معنادار بین پارامترهای مستقل و وابسته انجام می‌شود. تست ANOVA یا آنالیز واریانس‌ها شبیه آزمون t-student است اما انعطاف‌پذیری آن بیش از آزمون t است و قابلیت در نظر گرفتن بیش از یک متغیر را نیز دارد. همچنین می‌تواند مشخص کند که آیا یک متغیر تحت



شکل ۳. تصویر ALOS PALSAR زمین مرجع شده مربوط به منطقه مورد مطالعه

جدول ۲. خلاصه نتایج رگرسیون با استفاده از تبدیلات مرحله اول Db1 تا Db10 اعمال شده روی تصویر ALOS PALSAR

| | Db 1 | Db 2 | Db 3 | Db 4 | Db 5 | Db 6 | Db 7 | Db 8 | Db 9 | Db 10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R | ۰/۵۹۶ | ۰/۶۴۹ | ۰/۶۵۵ | ۰/۶۹۰ | ۰/۶۵۹ | ۰/۶۶۹ | ۰/۶۹۲ | ۰/۶۶۸ | ۰/۶۴۱ | ۰/۷۳۳ |
| R ² | ۰/۳۵۵ | ۰/۴۲۱ | ۰/۴۲۹ | ۰/۴۷۶ | ۰/۴۳۴ | ۰/۴۴۷ | ۰/۴۷۸ | ۰/۴۴۶ | ۰/۴۱۰ | ۰/۵۳۷ |

تخمین میزان زیست توده جنگل‌ها با استفاده از تصاویر رادار با روزه مجازی (مطالعه موردی: جنگل خیرودکنار نوشهر)

دومرحله‌ای Db2 در جدول ۴ آورده شده است. ضرایب استاندارد شده یا بتا^۱ برای مقایسه بین ضرایب رگرسیون هنگامی که متغیرهای مستقل با واحدهای مختلف اندازه گیری می‌شوند به کار می‌روند، و ضرایب غیراستاندارد^۲ همان ضرایب مدل هستند. با مقدار بتای ۰/۳۸، متغیر HV-D2 بیشترین تأثیر را در مدل دارد. مقادیر آماره^۳ t نسبت اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل را در مدل بیان می‌کند. مقادیر t بیشتر از ۲+ یا کمتر از ۲- بیشترین اهمیت را در مدل دارند. متغیرهایی با مقادیر بزرگ t و مقادیر کوچک Sig^۳ بیشترین تأثیر را روی متغیر وابسته دارند.

آنالیزهای شرح داده شده برای تبدیلات یک مرحله‌ای به طور مشابه روی تبدیلات دومرحله‌ای نیز انجام گرفتند. خلاصه نتایج رگرسیون با استفاده از تبدیلات موجک دومرحله‌ای در جدول ۳ دیده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه میزان همبستگی متغیرهای حاصل از تصویر PALSARALOS، بالاترین مقدار همبستگی میان متغیرهای مستقل وارد شده در آنالیز رگرسیون متعلق به تبدیل دومرحله‌ای Db2 اعمال شده روی تصویر PALSAR است. در نتیجه این تبدیل به عنوان بهترین تبدیل برای تخمین زیست توده انتخاب شد. ضرایب مدل تشکیل شده با متغیرهای مربوط به تبدیل

جدول ۳. خلاصه نتایج رگرسیون با استفاده از تبدیلات دومرحله‌ای اعمال شده روی تصویر ALOS PALSAR

| | Bior 35 | Sym 5 | Db 2 | Coif 5 |
|----------------|---------|-------|-------|--------|
| R | ۰/۷۳۹ | ۰/۷۵۹ | ۰/۷۸۴ | ۰/۷۴۴ |
| R ² | ۰/۵۴۶ | ۰/۵۷۶ | ۰/۶۱۴ | ۰/۵۵۳ |

جدول ۴. ضرایب مدل تشکیل شده با استفاده از تبدیل دومرحله‌ای Db2

| Model | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | T | Sig. |
|----------|-----------------------------|------------|---------------------------|--------|-------|
| | B | Std. Error | Beta | | |
| Constant | ۱۸۳/۹۰۵ | ۴۴/۵۱۳ | | ۳/۱۰۳ | ۰/۰۰۰ |
| HH-H2 | ۱۴/۴۰۲ | ۹/۰۴۶ | ۰/۲۴۰ | ۲/۴۶۲ | ۰/۰۰۰ |
| HV-A1 | ۱۰۶/۲۹۲ | ۴۶/۹۱۶ | ۰/۱۹۵ | ۳/۱۸۲۸ | ۰/۰۰۲ |
| HH-H1 | ۲۴/۵۱۷ | ۱۴/۰۳۶ | ۰/۳۵۳ | ۱/۰۶۶ | ۰/۰۰۵ |
| HV-V2 | -۳۱/۰۰۰ | ۳/۷۸۵ | -۰/۲۵۶ | ۳/۹۸۹ | ۰/۰۰۵ |
| HH-D2 | ۲۶/۶۱۱ | ۴/۸۰۴ | ۰/۳۵۵ | -۲/۹۶۲ | ۰/۰۰۰ |
| HV-D2 | ۲۴۲/۳۳۴ | ۲۴/۷۲۷ | ۰/۳۸۹ | ۳/۷۹۰ | ۰/۰۰۲ |
| HH-A1 | ۵/۹۶۱ | ۱/۹۶۶ | ۰/۳۱۶ | ۳/۵۶۷ | ۰/۰۰۱ |

1. Beta
2. Unstandardized
3. Significance

جدول ۵. نتایج آزمون ANOVA برای مدل به دست آمده از تبدیل دومرحله‌ای Db2

| Model | Sum of Squares | Number of variables | Mean Square | F | Sig. |
|------------|-------------------|---------------------|-------------|---------|-------|
| Regression | ۹×۱۰ ^۸ | ۷ | ۴/۱۸۶۱۶۴۷۰۴ | | |
| Residual | ۲×۱۰ ^۹ | ۲۰۳ | ۶۱/۲۲۰۳۸۲۵۰ | ۷۹۷۸/۲۰ | ۰۰۰/۰ |
| Total | ۳×۱۰ ^۹ | ۲۱۰ | | | |

است. مقادیر مربوط به مجموع، جمع کلیه مقادیر تغییرات مربوط به رگرسیون و باقی مانده‌هاست. زمانی که نسبت تغییرات مربوط به رگرسیون به تغییرات مربوط به باقی مانده‌ها زیاد باشد، یعنی مدل توانسته است بیشتر تغییرات مربوط به متغیر وابسته را در نظر بگیرد. در مقابل، اگر تغییرات مربوط به باقی مانده‌ها از تغییرات مربوط به رگرسیون بیشتر باشد، نشان می‌دهد که مدل نتوانسته است متغیر وابسته را به خوبی محاسبه کند و ممکن است اضافه کردن پارامترهای دیگری به مدل بتواند مدل را بهبود بخشد. تعداد متغیرها در سطر مربوط به رگرسیون تعداد متغیرهای استفاده شده در مدل انتخاب شده و عدد ذکر شده در سطر مربوط به باقی مانده‌ها متغیرهایی را نشان می‌دهد که به دلیل وجود نداشتن وابستگی معنادار از مدل حذف شده‌اند. همبستگی این مدل با زیست توده بیش از ۰/۷ و تعداد متغیرهای شرکت کننده در آن کمتر از ۸ است. در نتیجه این مدل به عنوان مدل بهینه انتخاب شد و برای تولید نقشه زیست توده منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد.

به منظور ارزیابی دقت مدل انتخاب شده، از میان داده‌های زمینی که در انجام رگرسیون شرکت نکرده‌اند از ۳۶ مورد از پلات‌ها که به عنوان داده‌های تست انتخاب شدند، استفاده شده است. با استفاده از مدل انتخاب شده، مقدار زیست توده در این پلات‌ها تخمین

بنابراین متغیرهای HH-A1 و HV-D2 بیشترین تأثیر و متغیر HH-H1 کمترین تأثیر را بر متغیر وابسته دارند. با استفاده از اعداد استخراج شده از ستون B و ضرب آنها در متغیر مرتبط، مدل تشکیل شده با استفاده از تبدیل دومرحله‌ای Db2 به صورت رابطه (۲) در می‌آید.

رابطه (۲)

$$\text{Biomass (t/ha)} = 183.905 + 14.402 (\text{HH-H2-Db2}) + 106.292 (\text{HV-A1 -Db2}) + 24.517 (\text{HH-H1 -Db2}) - 31 (\text{HV-V2 -Db2}) + 26.116 (\text{HH-D2 -Db2}) + 242.334 (\text{HV-D2 -Db2}) + 5.961 (\text{HH-A1 -Db2})$$

در جدول ۵ نتایج آزمون ANOVA و مقادیر مجموع مربعات، F و میانگین مربعات برای دو دسته تغییرات رگرسیون و باقی مانده‌ها محاسبه شده است.

مجموع مقادیر مربعات خطا در آزمون ANOVA مقدار واریانس محاسبه شده را که به دلیل تأثیرات مستقل و تخمین خطا حذف شده‌اند، نشان می‌دهد. نسبت مجموع مجذورات خطای میان گروهی و نسبت مجذورات خطای بین گروهی مقدار آماره F را به دست می‌دهد. مقادیر پایین F نشان دهنده تفاوت بین متغیرهای تصادفی و مقادیر بالای F نشان دهنده معنا دار بودن تفاوت بین گروه‌هاست. پارامتر مجموع مربعات^۱ در واقع مجموع مربعات مقادیر خطاها را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به سطر رگرسیون، مقادیر تغییراتی را نشان می‌دهد که مدل نتوانسته است آنها را محاسبه کند و مقادیر مربوط به سطر باقی مانده‌ها مقادیری هستند که مدل موفق به محاسبه آنها نشده

1. Sum of Squares

دو یافته مهم را نشان می‌دهند: (۱) به‌طور کلی، ضرایب تبدیلات موجک به‌دست‌آمده از تصاویر مایکروویو درمقایسه با داده‌های اصلی همبستگی بیشتری با زیست توده دارند؛ (۲) تصویر مربوط به متغیر HV-V2 بالاترین مقدار همبستگی را با زیست توده و متغیر HH-H1 تصویر پایین‌گذر در جهت رنج، و تصویر بالاگذر در جهت آزیموت در پلاریزاسیون HH، کمترین مقدار همبستگی را با زیست توده دارند. آنالیز سیستم تصویربرداری مایکروویو فعال با روزه مجازی به درک این پدیده کمک می‌کند. سیستم سنجنده‌های مایکروویو نیز به‌صورت دید جانبی هستند. همزمان با حرکت سنجنده رو به جلو، عوارض به‌صورت مایل اسکن می‌شوند. درختان، به‌ویژه تنه و ساقه، در جهت برخورد سیگنال بازپراکنش بیشتری دارند. بنابراین منطقاً به‌دلیل قرارگرفتن درختان در جهت دید سنجنده، اطلاعات با فرکانس بالا در جهت رنج قوی‌تر هستند و درمقایسه با اطلاعات موجود در جهت آزیموت همبستگی بالاتری با زیست توده دارند. به‌عنوان مهم‌ترین نکته می‌توان اشاره کرد که در این مقاله مدل‌های مختلف موجود تخمین زیست توده در یک منطقه جنگلی به‌صورت بومی با استفاده از داده‌های ALOS PALSAR برای نخستین بار آزمون و مقایسه شد و با تخمین زمینی نیز صحت‌سنجی گردید.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر روشی براساس تبدیل موجک برای تخمین زیست توده ارائه و در منطقه جنگلی شمال ایران پیاده‌سازی شد. این مطالعه به هدف اصلی در خصوص ارائه مدلی با دقت مناسب برای تخمین زیست توده دست یافته است. نتایج به‌دست‌آمده با آزمون ANOVA صحت‌سنجی شد و مقدار خطای واقعی مدل با مقادیر تخمینی زمینی مقایسه گردید. تبدیلات دوبعدی گسسته موجک روی تصویر دریافت‌شده در باند L اعمال شد و نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور یافتن رابطه بین متغیرهای محاسبه‌شده و

زده شد و این مقدار با عملیات زمینی مقایسه شد. اختلاف مقادیر محاسبه‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای محاسبه پارامتر خطای کمترین مربعات به‌کار گرفته شد و میزان همبستگی نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های زمینی با پارامتر R^2 به‌عنوان ضریب تعیین، ارزیابی گردید. مقادیر به‌دست‌آمده $RMSE=25/7$ ($t.ha^{-1}$) و $R^2=0/88$ دقت مدل انتخاب‌شده را تأیید می‌کند. مدل انتخاب‌شده برای تولید نقشه زیست توده از منطقه مورد نظر به‌کار گرفته شد. نقشه تولیدشده در شکل ۴ نشان داده شده است.

روند افزایش مقدار همبستگی مدل‌ها از تبدیلات مرحله اول به مرحله دوم نشان می‌دهد که تبدیلات مراحل بالاتر می‌توانند دقت مدل‌های به‌دست‌آمده را افزایش دهند؛ اگرچه تبدیلات مراحل دوم و سوم متغیرهای زیادی را وارد آنالیز رگرسیون می‌کنند و از این نظر زمان پردازش را طولانی می‌کنند. همبستگی بیش از ۰/۷ در مدل‌های به‌دست‌آمده از تبدیلات دوم‌مرحله‌ای و تعداد متغیرهای مناسب بین ۶ تا ۸ متغیر در هر مدل، نشان می‌دهد که تبدیلات مرحله دوم و بالاتر می‌توانند میزان خطای بودن مدل را افزایش دهند. در این مطالعه، تبدیلات دوم‌مرحله‌ای برای انجام رگرسیون و به‌دست‌آوردن مدل کافی بود زیرا از مرحله سوم به بعد مقادیر تعداد زیادی از پیکسل‌ها به صفر تبدیل شد. برای تبدیلات خانواده Db از تبدیلات Db1 تا Db10 مقیاس افزایش می‌یابد. تبدیلات Db در آنالیز یک‌مرحله‌ای به‌کار گرفته شدند. در مرحله نخست، بهترین نتیجه از تبدیل Db4 در تصویر PALSAR و در مرحله دوم بهترین نتیجه از تبدیل Db2 به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهند که مقیاس‌های پایین‌تر درمقایسه با مقیاس‌های بالاتر شامل Db8 تا Db10 همبستگی بهتری با مقدار زیست توده دارند (Jiang, 2006).

یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهند که حساسیت تصاویر مایکروویو به زیست توده با استفاده از تبدیل موجک افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل‌های آماری،

Falahati Bagherabadi, M., 2008, **Fusion of Radar and Optical Satellite Images for Estimation of Forest Volumetric Coverage of Trees (Case study: North of Iran)**, M.Sc. thesis, Tehran University.

Foody, G.M., 2003, **Remote Sensing of Tropical Forest Environments: Towards the Monitoring of Environmental Resources for Sustainable Development**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, PP. 4035–4046.

Foody, G.M., Cutler, M.E., Mcmorrow, J., Pelz, D., Tangki, H., Boyd, D.S. & Douglas, I., 2001, **Mapping the Biomass of Bornean Tropical Rain Forest from Remotely Sensed Data**, Global Ecology & Biogeography, Vol. 10, PP. 379-387.

Houghton, R.A., 1991, **Tropical Deforestation and Atmospheric Carbon Dioxide**, Climate Change, Vol. 19, PP. 99–118.

Houghton, R.A., Lawrence, K.T., Hackler, J.L. and Brown, S., 2001, **The Spatial Distribution of Forest Biomass in the Brazilian Amazon: A Comparison of Estimates**. Global Change Biology, Vol. 7, PP. 731–746.

Jiang, P., 2006, **Biomass Estimation and Classification of Secondary Succession Using Radar And Optical Remote Sensing Data Based on Textural And Spectral Analysis In Amazonia**, The School of Graduate Studies Department of Geography, Geology, and Anthropology, Indiana State University, Terre Haute, Indiana, Ph.D. thesis.

زیست توده به دست آمده از داده های زمینی تحلیل شدند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دادند که تبدیلات موجک به ویژه تبدیلات گسسته دویبعدی می توانند در تخمین زیست توده با استفاده از تصاویر رادار با روزه مجازی به کار گرفته شوند. میزان خطی بودن رابطه موجود بین متغیرهای محاسبه شده از تصویر با به کارگیری تبدیلات دومرحله ای و بالاتر افزایش می یابد. توابع Db2، Db4 و Coif5 در مقایسه با سایر تبدیلات آزمایش شده همبستگی بیشتری با مقدار زیست توده دارند. آنالیز موجک، ابزاری مناسب برای استخراج اطلاعات بافت با مقیاس های متوسط تا بالاست که به علت قابلیت محلی سازی می تواند توپولوژی مکانی موجود در تصویر اصلی را حفظ کند و پژوهشگران را قادر به استفاده هم زمان از اطلاعات طیفی و بافت تصاویر می سازد.

۵- سپاس گزاری

نویسندگان لازم می دانند از زحمات آقای دکتر محمود زبیری در جمع آوری داده های زمینی و راهنمایی های آقای مهندس بیانی که نقش مهمی در به نتیجه رسیدن این پژوهش داشتند، قدردانی کنند. همچنین از سازمان فضایی اروپا (ESA) برای در اختیار گذاشتن تصاویر ماهواره ای مورد نیاز سپاس گزاری می شود.

۶- منابع

Beaudoin, A., Troufleau, D., Desbois, N., Piet, L. and Deshayes, M., 1995, **On the Use of ERS-1 SAR Data Over Hilly Terrain: Necessity of Radiometric Corrections For thematic Applications in IEEE Int. Geos. RS Symposium**, Florence, PP. 150-155.

FAO Forestry Department., 1997, **FAO Corporate Document Repository**, [Online]. http://www.fao.org/documents/pub_dett.asp?pub_id=20126&lang=en.

تخمین میزان زیست توده جنگل‌ها با استفاده از تصاویر رادار با روزه مجازی (مطالعه موردی: جنگل خیرودکنار نوشهر)

- Kasischke, E.S., Tanase, M.A., Bourgeau-Chavez, L. and Borr, M., 2011, **Soil Moisture Limitations on Monitoring Boreal Forest Regrowth Using Spaceborne L-band SAR Data**, Remote Sensing of Environment, Vol. 7, PP. 227-232,
- Lu, D., 2005, **Aboveground Biomass Estimation Using Landsat TM Data in the Brazilian Amazon Basin**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, PP. 2509-2525.
- Lucas, R.M., Curran, P.J., Honzak, M., Foody, G.M., Do Amaral, I. & Amaral, S., 1998, **The Contribution of Remotely Sensed Data in the Assessment of the Floristic Composition**, total biomass & structure of Amazonian tropical secondary forests, Regeneracaii Florestal: Pesquisas na Amazonia, Vol. 10, PP. 61-82.
- Misiti, M.M., 1996, **Wavelet Toolbox for Use with MATLAB**, The Mathworks Inc.
- Nelson, R.F., Kimes, D.S., Salas, W.A. and Routhier, M., 2000, **Secondary Forest Age and Tropical Forest Biomass Estimation Using Thematic Mapper Imagery**, Bioscience, Vol. 50, PP. 419-431.
- Neter, J., Wasserman, W. and Kutner, M.H., 1990, **In: Applied Linear Statistical Models, Third Edition**, Homewood, IL: Irwin.
- Ranson, K.J., Sun, G., Weishamped, J.F. & Knox, G., 1997, **Forest Biomass from Combined Ecosystem & Radar Backscatter Modeling**, Remote Sensing of Environment, Vol. 59, PP. 118-133.
- Rignot, E.J., Zimmerman, R. & Van Zyl, J.J., 1995, **Spaceborne Applications of P Band Imaging Radars for Measuring Forest Biomass**, IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, Vol. 59, PP. 167-179.
- Sadeghi, Y., 2009, **Forest Biomass Estimation Using Optical and SAR Data**, M.Sc. thesis, Tehran University.
- Santos, J.R., Freitas, C., Araujo, L.S., Dutra, L.V., Mura, J.C., Gama, F.F., Soler, L.S. & Sant' Anna, J.S., 2003, **Airborne P-band SAR Applied to the Aboveground Biomass Studies in the Brazilian Tropical Rainforest**, Remote Sensing of Environment, Vol. 87, PP. 482-493.
- Steininger, M.K., 2000, **Satellite Estimation of Tropical Secondary Forest Aboveground Biomass Data from Brazil and Bolivia**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 21, PP. 1139-1157.
- Trotter, C.M., Dymond, J.R., Goulding, C.J., 1997, **Estimation of Timber Volume in a Coniferous Plantation Forest Using Landsat TM**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, PP. 2209-2223.
- Wei, X. F., 2008, **Wavelet Analysis for above Ground Biomass Estimate In Temperate Deciduous Forests**, The School of Graduate Studies Department of Geography, Geology and Anthropology Indiana State University, Terre Haute, Indiana, Ph.D. thesis.

Wu, Y. and Strahler, A.H., 1994, **Remote Estimation of Crown Size, Stand Density, & Biomass on the Oregon Transect**, Ecological Applications, Vol. 42, PP. 299-312.

Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le Moine, J. and Ryu, S., 2004, **Estimating Aboveground Biomass Using Landsat 7 ETM + data Across a Managed Landscape in Northern Wisconsin, USA**, Remote Sensing of Environment, Vol. 93, PP. 402-411.

