

شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای ابرطیفی بالای اتمسفر از طریق مدل‌های انتقال تابش علی جعفر موسیوند^{*}

۱. استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۹۶/۰۸/۰۷ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۹

چکیده

شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای اهمیت بسزایی در مطالعات سنجش از دوری دارد. این شبیه‌سازی می‌تواند پیش از پرتاب ماهواره جهت توسعه الگوریتم‌های مختلف، طراحی سنجنده برای کاربردهای خاص و یا در تخمین کمی پارامترهای مختلف گیاهی و خاک مورد استفاده قرار گیرد. رادیانس ثبت شده به وسیله سنجنده در بالای اتمسفر تابعی پیچیده از برهم‌کنش تابش خورشید با اتمسفر و عوارض موجود در سطح زمین است. این رادیانس به صورت ترکیبی از رادیانس‌های بازتابیده از پیکسل مورد مطالعه، اتمسفر و همچنین نواحی پیرامون پیکسل است مدل‌های فیزیکی- پایه مختلفی برای مدل‌سازی این فرآیند پیشنهاد شده‌اند که می‌توانند رادیانس بازتابیده از سطح زمین و اتمسفر را بازسازی کنند. در این مطالعه شبیه‌سازی بازتابندگی و رادیانس تصاویر سنجش از دوری ابرطیفی بالای اتمسفر با ترکیب مدل فیزیکی- پایه SLC و مدل اتمسفری MODTRAN4 و با استفاده از مدل بهبودیافته چهار جریانه ارائه شده است. تصاویر ماهواره‌ای ابرطیفی CHRIS-Proba و چندطیفی LANDSAT-5 جهت ارزیابی مدل با استفاده از داده‌های زمینی منطقه باراکس اسپانیا سال ۲۰۰۹ شبیه‌سازی شده‌اند. مقایسه تصاویر شبیه‌سازی شده با تصاویر واقعی بیانگر عملکرد مناسب مدل پیشنهادی با متوسط خطای RMSE بهتر از ۰/۰۲ برای بازتابندگی پوشش گیاهی است.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی رادیانس، CHRIS-Proba، مدل چهار-جریانه، مدل‌سازی اتمسفر، مدل SLC.



۱- مقدمه

شبیه‌سازی آن‌چه ماهواره‌های سنجش از دوری از سطح زمین ثبت می‌کنند از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات سنجش از دور کمی^۱ برخوردار است. از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: الف- شبیه‌سازی تصویر ماهواره پیش از پرتاب آن جهت آگاهی از وضعیت و کارایی کلی ماهواره و همچنین تهیه و توسعه الگوریتم‌های مورد نیاز برای تصحیح و پیش‌پردازش تصاویر آن (بورنر^۲ و همکاران، ۲۰۰۱؛ ال. گوانتر^۳، سگل^۴ و کوفمن^۵، ۲۰۰۹؛ کرکس^۶ و لندگرب^۷، ۱۹۸۹؛ لیو^۸، ژانگ^۹، ژانگ و تنگ^{۱۰}، ۲۰۰۹؛ پرنٹ^{۱۱}، کلارک^{۱۲}، برون^{۱۳} و بیشاپ^{۱۴}، ۲۰۱۰؛ ووت و رهوف و باخ، ۲۰۰۳؛ ژانگ، ژانگ، زو^{۱۵} و چن^{۱۶}، ۲۰۱۰)؛ ب- بازیابی خصوصیات بیوفیزیکی، بیوشیمیایی و ساختاری عوارض و سطوح زمینی و اتمسفر از تصاویر سنجش از دوری با استفاده از مدل‌سازی معکوس تصاویر ماهواره‌ای (ولری سی.ای. لورنت^{۱۷}، ورهوف، دم، شاپمن و کلورز، ۲۰۱۳؛ موسیوند، مننتی، گرت و ورهوف، ۲۰۱۵)؛ ج- طراحی سنجنده‌های مورد نیاز برای کاربردهای خاص در آینده (ال. گوانتر^{۱۸} و همکاران، ۲۰۰۹؛ ووت و رهوف^{۱۹} و باخ^{۲۰}، ۲۰۱۲)؛ د- آموزش و درک مفاهیم فیزیکی برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی با عوارض و سطوح مختلف زمینی و اتمسفر.

¹ Quantitative Remote Sensing

² Börner

³ L. Guanter

⁴ Segl

⁵ Kaufmann

⁶ Kerekes

⁷ Landgrebe

⁸ Liu

⁹ Zhang

¹⁰ Tong

¹¹ Parente

¹² Clark

¹³ Brown

¹⁴ Bishop

¹⁵ Zou

¹⁶ Chen

¹⁷ Valérie C. E. Laurent

¹⁸ L. Guanter

¹⁹ Wout Verhoef

²⁰ Bach

به طور کلی می‌توان از سه روش مختلف تصاویر ماهواره‌ای را شبیه‌سازی کرد. روش اول استفاده از نقشه‌های پوشش و کاربری اراضی^۱ و جداول کتابخانه طیفی^۲ مرتبط با هر کلاس جهت شبیه‌سازی تصویر ماهواره‌ای است. این روش ساده و ابتدایی است، ولی از آن جایی که برای هر کلاس کاربری فقط یک طیف از کتابخانه طیفی (یا ترکیبی از طیف‌ها) استفاده می‌شود نمی‌تواند تغییرات داخلی هر کلاس را به خوبی مدل کند و در نهایت تصویر شبیه‌سازی شده نمایانگر جزئیات مناسبی مشابه واقعیت زمینی نخواهد بود. روش دوم استفاده از تصاویر سنجنده‌ها و ماهواره‌های موجود و تغییر و تنظیم آن‌ها تا جایی است که شبیه تصاویر سنجنده هدف گردند. این روش نیز به نوبه خود دربرگیرنده ایراداتی از قبیل درونیابی و برون‌یابی طیفی، مکانی و زاویه‌ای است که از دقت نهایی تصویر شبیه‌سازی شده خواهد کاست و در برخی موارد در صورت عدم وجود سنجنده مشابه سنجنده هدف استفاده از این روش امکان‌پذیر نیست. روش سوم استفاده از مدل‌های فیزیک- پایه انتقال تابش^۳ است که امکان شبیه‌سازی پیکسل به پیکسل تصویر و همچنین اعمال تغییرات زاویه‌ای و طیفی را فراهم می‌سازد (ووت و رهوف و باخ، ۲۰۱۲). مدل‌های انتقال تابش نیازمند تعدادی پارامتر/ متغیر ورودی از هر پیکسل است. برای مثال برای یک پیکسل گیاه پارامترهایی از قبیل شاخص سطح برگ، میزان کلروفیل، میزان آب گیاه، رطوبت خاک، زاویه هندسی خورشید- زمین- سنجنده و پارامترهای دیگر نیاز است. در چنین روشی ابتدا باید اطلاعات مربوط به پیکسل‌های تصویر موجود باشند، سپس از طریق مدل انتقال تابش میزان رادیانس بازتابی هر پیکسل با توجه به خصوصیات هندسی خورشید- زمین- سنجنده محاسبه می‌گردد. به دست آوردن چنین اطلاعاتی برای هر پیکسل با توجه به تعداد زیاد پارامترهای ورودی مدل‌های انتقال تابش اصلی‌ترین چالش این روش است. مدل‌سازی معکوس تصاویر ماهواره‌ای یکی از روش‌های تهیه این اطلاعات در سطح پیکسل است.

مدل‌های انتقال تابش چگونگی انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک محیط (مثلاً اتمسفر یا پوشش گیاهی) را با فرآیندهای مختلف جذب، پخش و عبور از طریق قوانین فیزیکی توضیح می‌دهند. این مدل‌ها به صورت وسیعی در شبیه‌سازی بازتابندگی طیفی و رادیانس خاک، پوشش گیاهی و اتمسفر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (جیکومود^۴ و همکاران، ۲۰۰۹؛ و. و رهوف و باخ، ۲۰۰۷). شبیه‌سازی رادیانس بالای اتمسفر نیازمند تلفیق مدل‌های انتقال تابش سطح زمین و

^۱ Land use/land cover

^۲ Spectral library

^۳ Physically-based radiative transfer model

^۴ Jacquemoud



اتمسفر است. مدل‌های شبیه‌ساز مختلفی با تلفیق مدل‌های انتقال تابش سطح و اتمسفر برای شبیه‌سازی رادیانس بالای اتمسفر ارائه شده‌اند (بورنر^۱ و همکاران، ۲۰۰۱؛ ال. گوانتر و همکاران، ۲۰۰۹؛ ایزاکس^۲ و وگلمن^۳، ۱۹۸۸؛ کرکس^۴ و لندگرب، ۱۹۸۹؛ دنیل شالپفر^۵ و نیکی^۶، ۲۰۰۵). با این حال بیشتر این مدل‌ها از طرق مختلف مانند فرض زمین مسطح، لامبرتی بودن سطح و همچنین لامبرتی بودن اتمسفر ساده‌سازی شده‌اند. مدل‌های دیگری که دقت بالایی دارند غالباً زمان اجرای طولانی داشته و نیازمند ورودی‌های بسیاری می‌باشند که در اغلب موارد کارایی آن‌ها برای کاربردهای مختلف محدود و گاهی نامناسب است (موسیوند^۷، ورهوف، مننتی^۸ و گرت^۹، ۲۰۱۵).

در این تحقیق سیستم مدل‌سازی بهبودیافته چهارجریانه^{۱۰} برای شبیه‌سازی تصاویر ابرطیفی ارائه شده است. در این سیستم رادیانس بازتابیده شده بالای اتمسفر در سه سطح مختلف سطح زمین، اتمسفر و سنجنده مدل می‌شود. در ابتدا در بخش زمینی با استفاده از مدل انتقال تابش اسال‌سی^{۱۱} چهار بازتابندگی طیفی سطحی (در این تحقیق پوشش گیاهی و خاک) محاسبه می‌گردند. سپس این بازتابندگی‌ها با کمیت‌های اتمسفری مستخرج از مدل انتقال تابش اتمسفری MODTRAN4 ترکیب شده و رادیانس بالای اتمسفر را به‌دست می‌دهند. در نهایت رادیانس به‌دست آمده با استفاده از توابع پاسخ طیفی^{۱۲} سنجنده به رادیانس اخذ شده توسط سنجنده تبدیل می‌شود. برای استخراج کمیت‌های اتمسفری مورد نیاز در مدل چهارجریانه باید مدل MODTRAN4 با سه نوع بازتابندگی سطحی مختلف صفر، پنجاه و صد در صد اجرا شود. در حالی که در مدل بهبودیافته برای شبیه‌سازی اتمسفر فقط نیازمند دو بار اجرای مدل MODTRAN4 بوده که علاوه بر بهبود قابل توجه زمان اجرای شبیه‌سازی از بروز خطای مربوط به بازتابندگی صفر (زمین بدون بازتابندگی) جلوگیری می‌کند که در مدل اصلی چهارجریانه

¹ Börner² Isaacs³ Vogelmann⁴ Kerekes⁵ Daniel. Schlöpfer⁶ Nieke⁷ Mousivand⁸ Menenti⁹ Gorte¹⁰ Extended four-stream modelling¹¹ Soil-Leaf-Canopy (SLC)¹² Spectral Response Functions (SRF)

استفاده شده است. این امر نیازمند تغییر و بازنویسی روابط استخراج این کمیت‌هاست که در این تحقیق انجام گرفته است.

۲- رادیانس بالای اتمسفر

آنچه یک سنجنده سنجش از دوری به عنوان رادیانس بازتابیده شده از عوارض سطح زمین در بالای اتمسفر ثبت می‌کند، در واقع تابع پیچیده‌ای از برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی خورشید با عوارض و سطوح مختلف واقع شده بین سنجنده و زمین است (موسیوند، ورهوف و همکاران، ۲۰۱۵). رادیانس ثبت شده تابعی از بازتابندگی سطحی^۱ پیکسل هدف، اثرات اتمسفر^۲ و اثرات پیکسل‌های مجاور^۳ است که با توجه به خصوصیات طیفی، فضایی، رادیومتریک و زاویه‌ای سنجنده تغییر پیدا کرده‌اند. در این حالت می‌توان فرض کرد که آنچه سنجنده به عنوان رادیانس بالای اتمسفر (TOA_{rad}) دریافت می‌کند، مطابق رابطه (۱) ترکیبی از رادیانس مسیر ($Path_{rad}$)^۴ و رادیانس بازتابیده از پیکسل هدف ($Target_{rad}$)^۵ است. رادیانس مسیر به نوبه خود مجموع رادیانس بازتابیده اتمسفر (Atm_{rad})^۶ و رادیانس بازتابیده از پیکسل‌های اطراف (Adj_{rad})^۷ به میدان دید سنجنده خواهد بود (رابطه (۲)). به همین ترتیب رادیانس بازتابیده از پیکسل هدف نیز شامل رادیانس بازتابیده شده از تابش مستقیم خورشید (Sun_{rad})^۸ روی پیکسل و رادیانس بازتابیده غیرمستقیم از ایرادیانس ورودی از آسمان (Sky_{rad})^۹ است (رابطه (۳)). جزئیات کامل روابط زیر در (موسیوند، ورهوف و همکاران، ۲۰۱۵؛ ووت ورهوف و باخ، ۲۰۰۳؛ ووت ورهوف و باخ، ۲۰۱۲) آورده شده‌اند.

$$TOA_{rad} = Path_{rad} + Target_{rad} \quad (1)$$

$$Path_{rad} = Atm_{rad} + Adj_{rad} = \frac{E_s(t) \cos \theta_s}{\pi} \rho_{so} + \quad (2)$$

$$\frac{E_s(t) \cos \theta_s}{\pi} \left[\frac{\tau_{sd} + \tau_{ss} \overline{r_{sd}} \rho_{dd}}{1 - \overline{r_{dd}} \rho_{dd}} r_{do} \tau_{oo} \right]$$

¹ Surface Reflectance

² Atmospheric Effects

³ Target's Surroundings

⁴ Path Radiance

⁵ Target Radiance

⁶ Atmospheric BRDF

⁷ Adjacency Radiance

⁸ Sun Reflected Radiance

⁹ Sky Reflected Radiance



$$Target_{rad} = Sun_{rad} + Sky_{rad} = \frac{E_s(t) \cos \theta_s}{\pi} [\tau_{ss} r_{so} \tau_{oo}] + \quad (3)$$

$$\frac{E_s(t) \cos \theta_s}{\pi} \left[\frac{\tau_{sd} + \tau_{ss} \bar{r}_{sd} \rho_{dd}}{1 - \bar{r}_{dd} \rho_{dd}} r_{do} \tau_{oo} \right]$$

حال اگر روابط (۲،۳) را در رابطه (۱) جای گذاری کنیم، رادیانس بالای اتمسفر به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$TOA_{rad} = \frac{E_s(t) \cos \theta_s}{\pi} \left[\rho_{so} + \frac{\tau_{ss} \bar{r}_{sd} + \tau_{sd} \bar{r}_{ad}}{1 - \bar{r}_{dd} \rho_{dd}} \tau_{do} + \tau_{ss} r_{so} \tau_{oo} + \frac{\tau_{sd} + \tau_{ss} \bar{r}_{sd} \rho_{dd}}{1 - \bar{r}_{dd} \rho_{dd}} r_{do} \tau_{oo} \right] \quad (4)$$

تعاریف و نمادهای به کار گرفته در روابط مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند. همان گونه که از جدول ۱ پیداست چهار بازتابندگی سطحی با استفاده از مدل انتقال تابش SLC محاسبه می‌شوند و شش کمیت مربوط به اتمسفر نیز از مدل انتقال تابش MODTRAN4 استخراج شده و در رابطه (۴) قرار داده می‌شوند تا رادیانس بالای اتمسفر به دست آید. مدل سازی بازتابندگی سطحی و اتمسفر، و مدل های انتقال تابش مربوطه در ادامه به اختصار توضیح داده می‌شوند.

۲-۱- مدل سازی بازتابندگی سطحی

مدل سازی بازتابندگی سطحی با استفاده از چهار بازتابندگی سطحی- جهتی محاسبه شده به وسیله مدل SLC صورت می‌پذیرد. مدل انتقال تابش SLC در واقع جدیدترین نسخه از خانواده مدل SAIL است. مدل SAIL نخستین بار برای محاسبه بازتابندگی سطوح پوشش گیاهی در سال ۱۹۸۴ توسط ورهوف (و.ورهوف، ۱۹۸۴) ارائه گردید و از آن زمان تاکنون نسخه‌های بهبود یافته متفاوتی از آن منتشر شده است. این مدل ابتدا برای محاسبه بازتابندگی پوشش‌های گیاهی با فرض یکنواخت بودن سطح و عدم تغییرات افقی ارائه شد، سپس بخش‌های مختلفی برای محاسبه بازتابندگی سایر پوشش‌های گیاهی بر آن افزوده شده است. ترکیب این مدل با مدل انتقال تابش (جیکومود و برت^۱، ۱۹۹۰) PROSPECT (در سطح برگ) که تحت عنوان PROSAIL شناخته می‌شود، به دلیل سادگی و دقت مناسب آن یکی از پرکاربردترین ابزارهای موجود برای محاسبه بازتابندگی سطحی گیاهان در دهه‌های اخیر بوده است (جیکومود

^۱ Baret

و همکاران، ۲۰۰۹). از جمله مدل‌های ارتقا یافته می‌توان به SAILH، GeoSAIL، SAIL++، 4SAIL و 4SAIL2 اشاره کرد.

جدول ۱ کمیت‌های استفاده شده در تحقیق همراه با توضیح فارسی و انگلیسی هر کمیت.

عامل	توضیح	معادل انگلیسی	مدل مرتبط
TOA_{rad}	رادیانس بالای اتمسفر	TOA radiance	—
$E_s(t)$	ایرادیانس خورشید بالای اتمسفر بر سطحی عمود بر جهت تابش	Extraterrestrial solar irradiance on a plane perpendicular to the sunrays	—
r_{so}	بازتابندگی دوجتهی سطحی	Surface bidirectional reflectance	SLC
r_{do}	بازتابندگی نیم‌کره‌ای - جتهی سطحی	Surface hemispherical-directional reflectance	SLC
$\overline{r_{sd}}$	بازتابندگی جتهی - نیم‌کره‌ای سطحی*	Surface directional-hemispherical reflectance	SLC
$\overline{r_{ad}}$	بازتابندگی دو نیم‌کره‌ای سطحی*	Surface bi-hemispherical reflectance	SLC
ρ_{ad}	آلبدوی اتمسفر (پایین اتمسفر)	Bottom Of Atmosphere (BOA) spherical albedo of the atmosphere	MODTRAN4
ρ_{so}	بازتابندگی دو جتهی اتمسفر (بالای اتمسفر)	TOA atmospheric bidirectional reflectance	MODTRAN4
τ_{oo}	عبور اتمسفری مستقیم از زمین به سنجنده	Direct atmospheric transmittance from the ground to the sensor	MODTRAN4
τ_{ss}	عبور اتمسفری مستقیم از خورشید به زمین	Direct atmospheric transmittance from the sun to the ground	MODTRAN4



عامل	توضیح	معادل انگلیسی	مدل مرتبط
τ_{do}	عبور اتمسفری غیرمستقیم از زمین به سنجنده	Diffuse atmospheric transmittance from the ground to the sensor	MODTRAN4
τ_{sd}	عبور اتمسفری غیرمستقیم از خورشید به زمین	Diffuse atmospheric transmittance from the sun to the ground	MODTRAN4
θ_s	زاویه اوج خورشیدی	Solar zenith angle	---

* علامت خط ممتد بالای کمیت‌ها بیانگر میانگین‌گیری مکانی کمیت فوق بر پیکسل‌های همسایه تا شعاع یک کیلومتری است.

مدل SLC شامل نسخه تعدیل شده مدل (هپک^۱، ۱۹۸۱) Hapke soil BRDF، مدل خصوصیات طیفی برگ PROSPECT و مدل انتقال تابش پوشش گیاهی 4SAIL2 است. بازتابندگی شبیه‌سازی شده در مدل SLC تابعی از خصوصیات ساختاری و نوری خاک، برگ و تاج پوشش گیاه و همچنین پارامترهای مربوط به چگونگی قرارگیری سنجنده و خورشید است. مدل اسال‌سی توانایی شبیه‌سازی بازتابندگی در محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر را برای شرایط مختلف داراست. این مدل به عنوان خروجی چهار بازتابندگی جهتی سطحی (r_{do} , r_{so} ، r_{dd} و r_{sd} در جدول ۱) و همچنین دو کمیت جذبی پوشش گیاهی برای تابش مستقیم و غیرمستقیم به‌دست می‌دهد. در مدل اسال‌سی ابتدا بازتابندگی خاک پس‌زمینه پوشش گیاهی با استفاده از نسخه تعدیل شده مدل Hapke soil BRDF محاسبه می‌شود که توانایی در نظر گرفتن تغییرات رطوبتی و همچنین هات اسپات^۲ را داراست. در این مدل خاک به صورت غیرلامبرتی در نظر گرفته می‌شود که با واقعیت بازتابندگی خاک سازگاری بیشتری دارد. پس از محاسبه بازتابندگی خاک با استفاده از مدل PROSPECT میزان بازتابندگی و عبور طیفی برگ‌ها به‌دست می‌آید.

^۱ Hapke

^۲ Hotspot

Sun-Target-Sensor geometry Solar zenith angle (tts) Sensor zenith angle (tto) Relative azimuth angle (psi)	
Canopy LIDF parameter a, which controls the average leaf slope (LIDFa) LIDF parameter b, which controls the distribution's bimodality (LIDFb) Layer dissociation factor (Diss) Tree shape factor (Zeta) Hot spot size parameter (Hot) Fraction brown leaf area (FB) Vertical crown cover percentage (Cv) Total (green + brown) leaf area index (LAI)	
Green Leaves Mesophyll Structural parameter(N_g) Chlorophyll content (Cab_g) Water content (Cw_g) Dry matter content (Cdm_g) Senescence factor (Cs_g)	Brown Leaves Mesophyll Structural parameter(N_b) Chlorophyll content (Cab_b) Water content (Cw_b) Dry matter content (Cdm_b) Senescence factor (Cs_b)
Soil Hapke phase function parameter b (Hapke_b) Hapke phase function parameter c (Hapke_c) Hapke hot spot width parameter (Hapke_h) Hapke hot spot magnitude parameter (Hapke_B0) Soil moisture percentage (SM)	

شکل ۱ پارامترهای ورودی مختلف در مدل اسال سی برای خاک، برگ سبز، برگ قهوه‌ای و پوشش گیاهی

در مجموع مدل SLC نیازمند ۲۶ پارامتر ورودی است (شکل ۱). از این تعداد ۵ پارامتر برای خاک، ۵ پارامتر برای برگ سبز، ۵ پارامتر برای برگ قهوه‌ای، ۸ پارامتر برای ساختار پوشش گیاهی و همچنین ۳ پارامتر برای هندسه خورشید- زمین- سنجنده شامل زاویه کجی سنجنده، زاویه کجی خورشید و زاویه آزیموت نسبی بین سنجنده و خورشید در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۲- مدل سازی اتمسفر

مدل سازی اتمسفر با استفاده از شش کمیت طیفی استخراج شده از مدل MODTRAN4 انجام می‌گیرد. مدل انتقال تابش MODTRAN4^۱ (برک^۲ و همکاران، ۱۹۹۹) برای مدل سازی پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی در اتمسفر از روی مدل اولیه LOWTRAN 7^۳ توسعه داده شده

^۱ MODerate Resolution Atmospheric TRANsmittance and Radiance Code (MODTRAN4)

^۲ Berk

^۳ LOW Resolution TRANsmittance 7 (LOWTRAN 7)



است. در این مدل پخش چندگانه اتمسفر با استفاده از مدل^۱ DISORT و جذب اتمسفری از طریق الگوریتم Correlated k مدل می‌شوند. مدل MODTRAN4 یکی از پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی و تصحیح اتمسفری در سنجش از دور در محدوده طیفی مرئی تا حرارتی بوده است (ادلر^۲ و همکاران، ۱۹۹۹؛ ولری سی.ای. لورنت^۳، ورهوف، کلورز و شاپمن، ۲۰۱۱؛ موسیوند، مننتی، گرت^۴ و ورهوف، ۲۰۱۴؛ موسیوند، ورهوف و همکاران، ۲۰۱۵؛ دنیل شالپفر، بورل^۵، کلر و ایتن^۶، ۱۹۹۸؛ دنیل شالپفر و نیکی، ۲۰۰۵). این مدل نیازمند پارامترهای ورودی بسیاری (بیش از ۱۰۰ پارامتر ورودی) برای مدل‌سازی اتمسفر است که البته می‌توان برای بسیاری از این پارامترها از مقادیر از پیش تعیین شده در مدل استفاده کرد. علاوه بر این زمان اجرای مدل بسته به روش محاسباتی می‌تواند از چند دقیقه تا چند ساعت طول بکشد. مدل MODTRAN4 به صورت مستقیم شش کمیت بیان شده در جدول ۱ را فراهم نمی‌سازد، بلکه این کمیت‌ها با استفاده از خروجی‌های مدل به صورت غیرمستقیم استخراج می‌شوند. با توجه به روش پیشنهادی^۷ ورهوف و همکاران (و. ورهوف و باخ، ۲۰۰۷؛ ووت ورهوف و باخ، ۲۰۱۲) برای استخراج این کمیت‌ها نیاز است تا مدل MODTRAN4 در سه حالت بازتابندگی سطحی صفر، پنجاه و صد در صد اجرا شده و با استفاده از روابط فراهم شده این کمیت‌ها به دست آیند. گانتر^۸ و همکاران (۲۰۰۹) نشان داده‌اند که استفاده از بازتابندگی صفر برای سطح زمین باعث بروز مشکلاتی در مدل DISORT شده و منجر به اشتباه در محاسبه آلبیدوی اتمسفر خواهد شد (لویس گوانتر، ریشتر^۹ و کوافمن^{۱۰}، ۲۰۰۹). از این رو در روش پیشنهادی معادلات جبری به گونه‌ای تغییر پیدا کرده‌اند که تنها با دو بار اجرای مدل MODTRAN4 با استفاده از بازتابندگی‌های سطحی پنجاه و صد در صد می‌توان کمیت‌های مربوط به اتمسفر را به دست آورد.

^۱ DIScrete Ordinate Radiative Transfer (DISORT)

^۲ Adler

^۳ Valérie C. E. Laurent

^۴ Gorte

^۵ Borel

^۶ Itten

^۷ MODTRAN4 Interrogation Technique (MIT)

^۸ Guanter

^۹ Richter

^{۱۰} Kaufmann

MM	2	2	2	-1	2	2	2	2	2	2	1	0	1	293.0000	5								
	1	1	1	3	0	0	30.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.70000											
	-99.0000	-99.0000	-99.0000	-99																			
	-99.00000	-99.00000	-99.00000		2.000000	0.000706	1	H2O & O3	COLUMNS	[GM/CM2]													
	36	WIDELATITUDE	SUMMER																				
	100.00000	0.70000	180.00000	99.30000	0.00000	0.00000	0																
	0	2	181	0																			
	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	90.00000	0.00000	0.00000	0.00000													
	3	3955	26670	1	1RN	NGAA																	
	FREQ	NM	TRAN	PTH	THREML	THREML	SCT	SURF	EMIS	SOL	SCAT	SING	SCAT	GRND	RFLT	DRCT	RFLT	TOTAL	RAD	REF	SOL	SOL@OBS	DEPTH
	.400000E+03	0.5278	0.0000E+00					0.0000E+00	1.3611E+01	4.4406E+00	1.2089E+01	6.8210E+00	2.5700E+01	4.29E+01	1.53E+02	0.639							
	.405000E+03	0.5390	0.0000E+00					0.0000E+00	1.4071E+01	4.5747E+00	1.3125E+01	7.5235E+00	2.7196E+01	4.73E+01	1.63E+02	0.618							
	.410000E+03	0.5495	0.0000E+00					0.0000E+00	1.4191E+01	4.5953E+00	1.3934E+01	8.1171E+00	2.8155E+01	5.10E+01	1.69E+02	0.599							
	.415000E+03	0.5598	0.0000E+00					0.0000E+00	1.4140E+01	4.5586E+00	1.4565E+01	8.6117E+00	2.8705E+01	5.41E+01	1.73E+02	0.580							
	.420000E+03	0.5695	0.0000E+00					0.0000E+00	1.3103E+01	4.2043E+00	1.4142E+01	9.4810E+00	2.7245E+01	5.33E+01	1.64E+02	0.563							
	.425000E+03	0.5788	0.0000E+00					0.0000E+00	1.2151E+01	3.8790E+00	1.3717E+01	8.3377E+00	2.5868E+01	5.24E+01	1.56E+02	0.547							
	.430000E+03	0.5879	0.0000E+00					0.0000E+00	1.0294E+01	3.2677E+00	1.2148E+01	7.4805E+00	2.2442E+01	4.70E+01	1.36E+02	0.531							
	.435000E+03	0.5964	0.0000E+00					0.0000E+00	1.1950E+01	3.7710E+00	1.4725E+01	9.1813E+00	2.6675E+01	5.77E+01	1.62E+02	0.517							
	.440000E+03	0.6046	0.0000E+00					0.0000E+00	1.2238E+01	3.8403E+00	1.5704E+01	9.9061E+00	2.7942E+01	6.22E+01	1.70E+02	0.503							
	.445000E+03	0.6122	0.0000E+00					0.0000E+00	1.2830E+01	4.0043E+00	1.7123E+01	1.0923E+01	2.9953E+01	6.86E+01	1.83E+02	0.491							

شکل ۲ نمونه فایل خروجی MODTRAN4 فرمت «*.7sc» که برای استخراج کمیت‌های اتمسفری مورد استفاده قرار می‌گیرد. کمیت τ_{00} در ستون دوم و ایرادیانس بالای اتمسفر $E_s(t)$ در ستون دوازدهم از سمت چپ ذخیره شده‌اند و بقیه کمیت‌ها از روابط (۵-۹) به دست می‌آیند.

مدل MODTRAN4 فایل‌های مختلفی را به عنوان خروجی نتیجه می‌دهد که از بین آن‌ها فایل خروجی با پسوند «*.7sc» برای استخراج کمیت‌های اتمسفری مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه خروجی استاندارد فایل «*.7sc» در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که از شکل پیداست فایل «*.7sc» شامل ۱۳ ستون مختلف است که ستون TRAN میزان عبور مستقیم از زمین به سنجنده (τ_{00}) و ستون SOL@OBS میزان ایرادیانس خورشید بالای اتمسفر بر سطحی عمود بر جهت تابش ($E_s(t)$) است. جهت استخراج شش کمیت اتمسفری مورد نظر مدل بهبود یافته چهار- جریانه نیازمند رادیانس مسیر پخش شده خورشیدی^۱ (ستون SOL SCAT در شکل ۲) و رادیانس بازتابیده زمینی^۲ (ستون GRND RFLT) برای بازتابندگی‌های سطحی پنجاه و صد در صد و همچنین رادیانس بازتابیده زمین ناشی از تابش خورشید^۳ (ستون DRCT RFLT) برای بازتابندگی سطحی صد در صد است. با فرض سطح لامبرتی می‌توان کمیت‌های اتمسفری را از دو اجرای MODTRAN4 با توجه به روابط (۵-۹) به ترتیب به دست آورد.

$$\tau_{ss} = \frac{DRCT \ RFLT_{100\%} \times \pi}{E_s(t) \cos \theta_s \times \tau_{00}} \quad (5)$$

$$\rho_{dd} = \frac{GRND \ RFLT_{100\%} - 2 \times GRND \ RFLT_{50\%}}{GRND \ RFLT_{100\%} - GRND \ RFLT_{50\%}} \quad (6)$$

¹ Solar-scattered Path Radiance

² Ground-reflected Radiance Contribution

³ Radiance Contribution due to Ground-reflected Sunlight

$$\tau_{sd} = \left[\frac{GRND\ RFLT_{100\%} (1 - \rho_{dd})}{DRCT\ RFLT_{100\%}} - 1 \right] \tau_{ss} \quad (7)$$

$$\tau_{do} = \left[\frac{SOL\ SCAT_{100\%} - SOL\ SCAT_{50\%}}{GRND\ RFLT_{100\%} - GRND\ RFLT_{50\%}} \right] \tau_{oo} \quad (8)$$

$$\rho_{so} = \left[SOL\ SCAT_{100\%} - \left(\frac{GRND\ RFLT_{100\%} \times \tau_{do}}{\tau_{oo}} \right) \right] \frac{\pi}{E_s(t) \cos \theta_s} \quad (9)$$

نحوه محاسبه روابط بالا و جزئیات بیشتر در خصوص هر رابطه در مقاله موسیوند و همکاران (موسیوند، ورهوف و همکاران، ۲۰۱۵) آورده شده است. برای پرهیز از دوباره‌نویسی و به دلیل محدودیت فضا خوانندگان علاقمند برای جزئیات بیشتر به مقاله یادشده رجوع کنند.

۲-۳- پیاده سازی مدل

رادیناس بالای اتمسفر را می‌توان با استفاده از رابطه (۴) محاسبه کرد. همان‌گونه که از این رابطه و جدول ۱ پیداست مجهول‌های این معادله شامل چهار پارامتر بازتابندگی ($\tau_{ss}, \tau_{oo}, \tau_{sd}, \tau_{do}, \rho_{dd}, \rho_{so}$) و همچنین شش کمیت اتمسفری ($r_{so}, r_{do}, \overline{r_{dd}}, \overline{r_{sd}}$) است که به ترتیب از مدل‌های SLC و MODTRAN4 (روابط (۵-۹)) به‌دست خواهند آمد. برای کمیت‌های $\overline{r_{dd}}$ و $\overline{r_{sd}}$ از آن‌جایی که مدل SLC تنها مقادیر r_{dd} و r_{sd} را محاسبه می‌کند، نیاز است تا با میانگین‌گیری مکانی بر محدوده‌ای در حدود یک کیلومتر از پیکسل‌های اطراف پیکسل هدف $\overline{r_{dd}}$ و $\overline{r_{sd}}$ محاسبه شوند. این دو پارامتر در صورت شبیه‌سازی برای سنجنده‌هایی با اندازه پیکسل بیش از یک کیلومتر نیاز به محاسبه نخواهند داشت و همان خروجی‌های مدل اسال‌سی در این مورد به کار گرفته خواهند شد.

مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای به اطلاعات مکانی از منطقه مورد مطالعه از قبیل کاربری/پوشش اراضی، خصوصیات خاک و پوشش گیاهی و همچنین به هندسه سنجنده و خورشید نیاز دارد. در بخش اتمسفر نیز اطلاعات مربوط به میدان دید اتمسفری^۱ و میزان بخار آب^۲ برای مدل‌سازی پخش و جذب اتمسفر استفاده می‌شوند. با استفاده از این اطلاعات برای هر پیکسل ابتدا مدل اسال‌سی اجرا شده تا چهار کمیت بازتابندگی به‌دست آید و سپس مدل MODTRAN4 برای دو مقدار بازتابندگی سطحی پنجاه و صد در صد اجرا خواهد شد تا

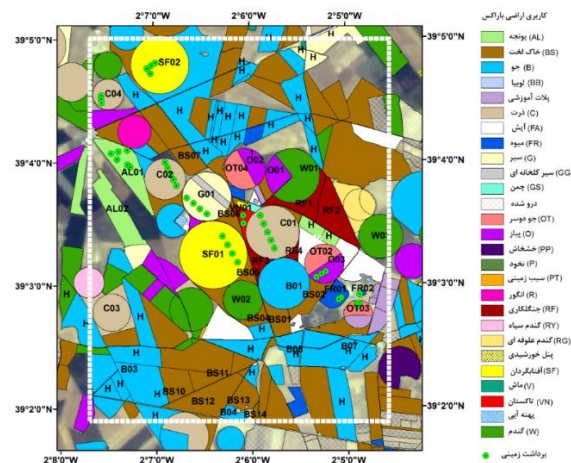
¹ Atmospheric Visibility

² Water Vapor Content

کمیت‌های اتمسفر از خروجی‌های آن استخراج گردند و با استفاده از رابطه (۴) رادیانس بالای اتمسفر شبیه‌سازی می‌گردد. سپس نیاز است تا با استفاده از توابع پاسخ طیفی سنجنده و همچنین ملاحظات مکانی، طیفی و رادیومتریک رادیانس بالای اتمسفر به رادیانس سنجنده تبدیل شود.

۳- منطقه مورد مطالعه

منطقه باراکس^۱ ($N39^{\circ}3'$, $W2^{\circ}60'$) واقع در کشور اسپانیا به عنوان منطقه مورد مطالعه برای این تحقیق در نظر گرفته شده است (شکل ۳). دلیل این انتخاب هموار بودن این ناحیه (با شیب متوسط کمتر از ۲ درصد)، وجود کشت‌های آبی و دیم کشاورزی (گاه با قطر نزدیک به یک کیلومتر)، تنوع محصولات کشاورزی و همچنین در دسترس بودن داده‌های زمینی، هوایی و ماهواره‌ای مختلف از این منطقه است. در دو دهه اخیر سازمان فضایی اروپا^۲ چندین کمپین گردآوری داده‌های زمینی برای کالیبراسیون- ارزیابی ماهواره‌های جدید در منطقه باراکس اجرا کرده است.



شکل ۳ نقشه کاربری ارضی منطقه باراکس اسپانیا. محدوده مطالعاتی با خط چین سفید مشخص شده است. نقاط سبز مناطق برداشت‌های زمینی را نشان می‌دهد. کد هر مزرعه در راهنمای سمت راست آورده شده است. مزارع جو با نوشته H پیش از کمپین گردآوری داده زمینی برداشت شده‌اند.

¹ Barrax

² European Space Agency



در این تحقیق برای سنجش کارایی مدل پیشنهادی در شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای از داده‌های زمینی گردآوری شده در کمپین SEN3EXP سازمان فضایی اروپا در تاریخ ۲۰ تا ۲۴ ژوئن ۲۰۰۹ استفاده شده است. این کمپین برای کالیبراسیون-ارزیابی ماهواره سنتینال-۳ انجام گرفته است. در این کمپین داده‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی پوشش‌های مختلف گیاهی و خاک برای نمونه‌های زمینی هم‌زمان با گذر ماهواره اندازه‌گیری شده است. این داده‌ها شامل شاخص سطح برگ^۱، میزان کلروفیل^۲، میزان آب برگ^۳، میزان توده خشک برگ^۴، رطوبت خاک^۵، سطح پوشیده شده با پوشش گیاهی^۶ و همچنین طیف‌سنجی میدانی از نمونه‌های مختلف است. تصاویر ماهواره‌ای مختلفی از جمله کریس-پروبا^۷ و لندست^۸ در روزهای کمپین اخذ شده است.

۴- نتایج و بحث

گام اول برای شبیه‌سازی تصویر ماهواره‌ای این است که داده‌های مورد نیاز مدل شبیه‌ساز برای هر پیکسل به صورت مجزا وجود داشته باشند. این داده‌ها شامل پارامترهای ساختاری، بیوفیزیکی و بیوشیمیایی سطح مورد مطالعه (برای مثال گیاه و خاک) و همچنین پارامترهای اتمسفری است. در حالت ایده‌آل باید هم‌زمان با عبور سکوی برداشت تصویر (ماهواره یا هواپیما) پارامترهای مورد نیاز با برداشت دقیق زمینی گردآوری شوند. سپس با استفاده از این داده‌ها اقدام به شبیه‌سازی تصویر کرده و نتیجه حاصله را با تصویر اصلی مقایسه نمود. با این حال روشن است که چنین امری با توجه به تعداد زیاد پارامترهای قابل برداشت (مثلاً ۲۶ پارامتر برای مدل اس‌ال‌سی) و همچنین زمان محدود گذر سکوی برداشت تصویر، بسیار مشکل و حتی غیرممکن خواهد بود. از این‌رو معمول است که پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی تصاویر در سطح پیکسل یا به صورت گسسته و محدود برای تعداد اندکی از پیکسل‌ها با برداشت زمینی گردآوری می‌شوند و یا با استفاده از مدل‌سازی معکوس از تصاویر ماهواره‌ای برای تمام تصویر استخراج می‌گردند. در حالت اول فقط تعداد مشخصی پیکسل مورد آزمایش قرار گرفته و رادیانس (و یا بازتابندگی) بالای اتمسفر برای این پیکسل‌ها شبیه‌سازی شده و با پیکسل‌های معادل در تصویر اصلی مقایسه می‌گردند. در حالت دوم پارامترهای مورد نیاز برای همه پیکسل‌ها استخراج شده

¹ Leaf Area Index

² Chlorophyll Content

³ Leaf Water Content

⁴ Dry Matter Content

⁵ Soil Moisture

⁶ Fraction of Vegetation Cover

⁷ Chris-Proba

⁸ Landsat

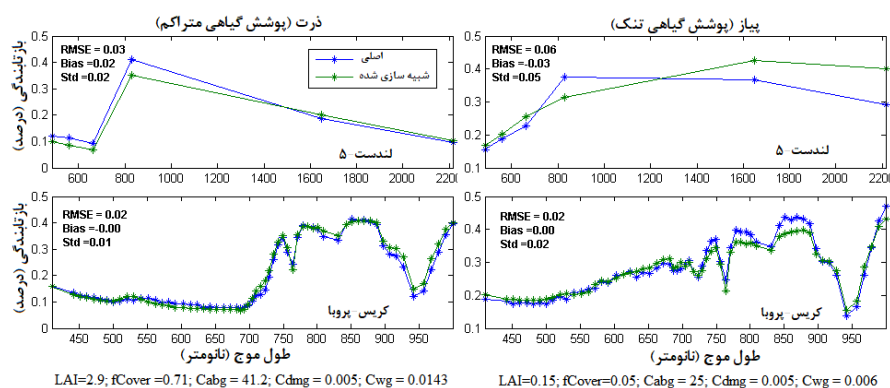
و پس از شبیه سازی تصویر ماهواره ای (خود تصویر مورد استفاده برای مدل سازی معکوس و یا تصویر دیگری) نتایج با تصویر اصلی مقایسه می گردد. در این تحقیق از هر دو روش برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته اند.

۴-۱- شبیه سازی بازتابندگی برای پیکسل های برداشت شده زمینی

نتایج شبیه سازی بازتابندگی بالای اتمسفر برای پیکسل های مرجع زمینی در شکل ۴ آورده شده است. در این شکل دو پوشش گیاهی متفاوت برای ارزیابی عملکرد مدل شامل یک پیکسل پیاز (از مزرعه O03 در شکل ۳) با پوشش گیاهی بسیار اندک با شاخص سطح برگ 0.15 و یک پیکسل ذرت (از مزرعه C02 در شکل ۳) با پوشش گیاهی متوسط با شاخص سطح برگ 2.9 آورده شده است. تصاویر بالا و پایین به ترتیب مقایسه بازتابندگی اصلی و شبیه سازی شده برای لندست-۵ و کریس- پروباست. مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای شبیه سازی در زیر هر شکل آورده شده است. این مقادیر در طی کمپین زمینی گردآوری شده اند. روشن است که در پیکسل ذرت (سنجنده کریس- پروبا) مدل به دلیل وجود پوشش گیاهی عملکرد مناسبی در بازسازی بازتابندگی پیکسل مورد نظر داشته است و RMSE در حدود 0.02 همراه با انحراف معیار 0.01 به دست آمده است. مدل پیشنهادی با وجود پوشش گیاهی بسیار کم پیکسل پیاز توانایی خوبی در بازسازی بازتابندگی بالای اتمسفر برای سنجنده کریس- پروبا داشته است، جایی که RMSE 0.02 و انحراف معیار 0.02 به دست آمده است. نتایج کم و بیش مشابهی برای سایر پیکسل های مرجع زمینی به دست آمد که به دلیل محدودیت صفحات در این مقاله آورده نشده اند. موارد نمونه آورده شده بیانگر توانایی مدل پیشنهادی در بازسازی بازتابندگی پوشش های گیاهی است. علاوه بر این نتایج شبیه سازی پیکسل های یادشده برای ماهواره لندست-۵ سنجنده تی ام آورده شده اند. در این حالت برای پیکسل ذرت نتایج قابل قبولی با RMSE در حدود 0.03 و انحراف معیار 0.02 به دست آمده است. با این حال نتایج برای پیکسل پیاز از صحت کمتری در مقایسه با بازتابندگی تصویر اصلی برخوردار بوده است، جایی که RMSE 0.06 و انحراف معیار 0.05 به دست آمده است. از شکل ۴ پیداست که نتایج شبیه سازی برای طول موج های مرئی و مادون قرمز نزدیک کماکان مناسب بوده و بیشترین اختلاف در محدوده مادون قرمز میانی و دور (باند های ۵ و ۷ لندست-۵) دیده می شوند. این نتایج می تواند تا اندازه ای مرتبط به فرضیه هایی باشد که مدل پیشنهادی بر آن استوار است. مدل SAIL به عنوان مدل اولیه و پایه مدل SLC در واقع بر فرضیه Turbid Medium بودن پوشش گیاهی استوار است. در این فرضیه پوشش گیاهی به صورت مجموعه ای از ذرات بسیار کوچک توصیف می شود که به صورت تصادفی پخش



شده و سایه ندارند، همچنین تغییرات فقط و فقط در جهت عمودی رخ می‌دهد و محیط در بعد افقی همگن فرض می‌شود. این فرضیه فقط می‌تواند برای سطوح با پوشش گیاهی متراکم و یکنواخت (از قبیل چمن) توجیه‌پذیر باشد. با وجود افزودن پارامترهای جدید در مدل اسال‌سی جهت شبیه‌سازی سطوح با پوشش گیاهی غیرمتراکم و پراکنده در حالت ناچیز بودن پوشش گیاهی انتظار دقت و صحت بالایی از مدل پیشنهادی نخواهد بود. این مورد در کارهای دیگران نیز مورد اشاره قرار گرفته است (وی.سی.ای. لورنت^۱، ورهوف، شاپمن^۲، دم^۳ و کلورز^۴، ۲۰۱۲؛ موسیوند، مننتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ و. ورهوف و باخ، ۲۰۰۷).



شکل ۴ مقایسه بازتابندگی بالای اتمسفر اصلی و شبیه‌سازی شده سنجنده‌های کریس-پروبا و لندست-۵ برای پیکسل‌های مرجع زمینی

۲-۴- شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای

در ابتدا ۶ پارامتر مهم شامل LAI, SM, Cv, LIDFa, FB, Cabg (توضیح در شکل ۱) با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس بی‌زین^۵ از تصویر کریس-پروبا به تاریخ ۱۹ ژوئن ۲۰۰۹ بازیابی شدند. روش مدل‌سازی معکوس بی‌زین همراه با توضیحات لازم در خصوص بازیابی این پارامترها در موسیوند و همکاران (۲۰۱۵) آورده شده است و خوانندگان علاقمند می‌توانند برای جزئیات بیشتر به این مقاله رجوع کنند. از آنجایی که مدل اسال‌سی نیازمند ۲۳ پارامتر ورودی

¹ V. C. E. Laurent

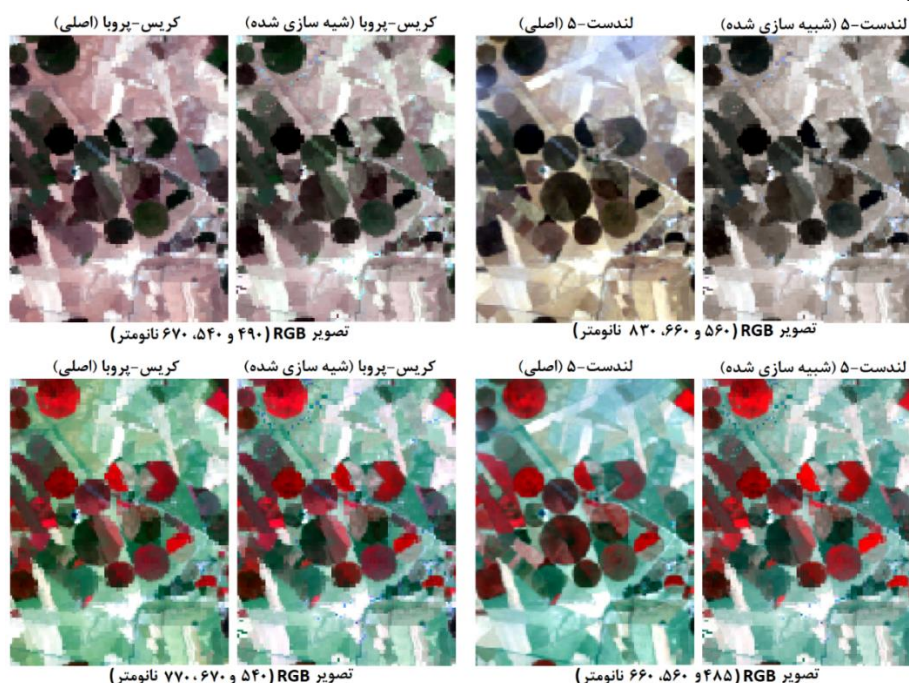
² Schaepman

³ Damm

⁴ Clevers

⁵ Bayesian Model Inversion

(جدا از ۳ پارامتر هندسه خورشید- زمین- سنجنده که ثابت هستند) است، سایر پارامترها با استفاده از داده‌های زمینی برداشت شده طی کمپین و یا با استفاده از موارد مشابه در ادبیات تحقیق به صورت ثابت در مدل‌سازی استفاده شدند. برخی پارامترها اثر ناچیزی بر رادیانس خروجی مدل دارند، از این‌رو حتی مقادیر نامربوط هم اثر چندانی بر خروجی مدل نخواهد داشت. توضیحات کامل و جامع در مورد میزان حساسیت این پارامترها در موسیوند و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شده است. پارامترهای اتمسفری (میزان بخار آب و میدان دید اتمسفری) منطقه مورد مطالعه طی دوره کمپین هم‌زمان با گذر ماهواره گردآوری شده‌اند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۵ تصاویر اصلی و شبیه‌سازی شده سنجنده‌های کریس- پروبا و لندست-۵

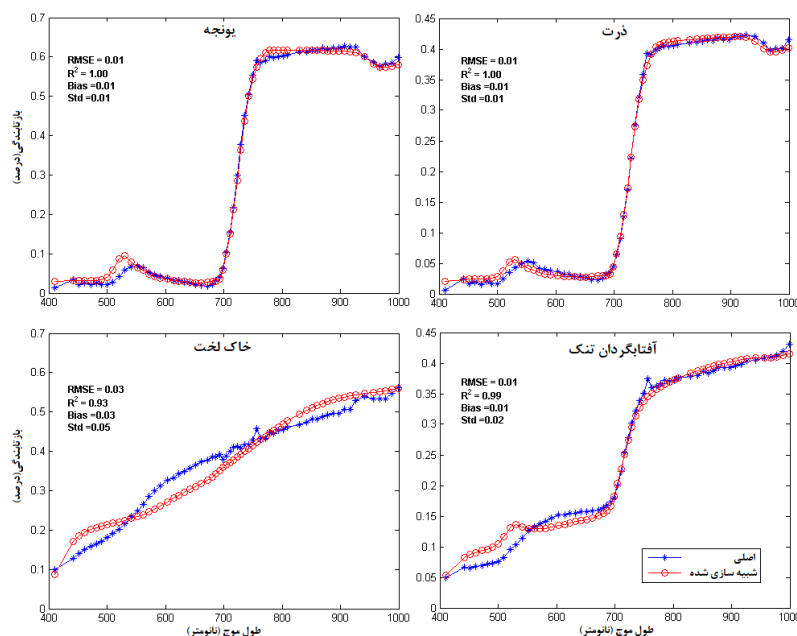
با استفاده از پارامترهای بازیابی شده، تصویر کریس- پروبا به تاریخ ۱۹ ژوئن ۲۰۰۹ و همچنین تصویر لندست-۵ تی‌ام به تاریخ ۲۲ ژوئن ۲۰۰۹ شبیه‌سازی شدند. دلیل انتخاب تصویر لندست برای شبیه‌سازی، نزدیکی زمان برداشت به تصویر کریس- پروبا و همچنین قرار گرفتن در محدوده زمانی برداشت پارامترهای زمینی در طول دوره کمپین است.



شکل ۵ مربوط به مقایسه بصری تصاویر شبیه‌سازی شده با تصاویر اصلی برای ماهواره‌های کریس- پروبا و لندست-۵ است. در این شکل مشخص است که مدل به صورت کلی دقت بالایی در شبیه‌سازی تصویر کریس- پروبا داشته است. این امر به خصوص برای سطوح با پوشش گیاهی متوسط به بالا مشهود است. زمین‌های کشاورزی با پوشش گیاهی متراکم شباهت بسیار بالایی در دو تصویر شبیه‌سازی شده و اصلی دارند. با این حال مناطق عاری از پوشش گیاهی و یا با پوشش گیاهی تنک تفاوت‌هایی را در دو تصویر نشان می‌دهند. دلیل این امر در بخش پیشین مرتبط با شکل ۴ آورده شده است. علاوه بر این روشن است که در تصویر اصلی لندست-۵ در قسمت بالای تصویر یک محدوده با مه نسبتاً رقیقی پوشیده شده است. این مه در تصویر شبیه‌سازی شده وجود ندارد، دلیل آن شبیه‌سازی تصویر لندست-۵ با استفاده از پارامترهای استخراج شده از تصویر کریس- پروباست. در تصاویر شبیه‌سازی شده پیکسل‌هایی با رنگ متفاوت دیده می‌شوند که در تصویر اصلی وجود ندارند. این پیکسل‌ها به خصوص در قسمت چپ- بالا در نواحی با پوشش خاک تمرکز پیدا کرده‌اند. خطای ناشی از بازیابی پارامترها و مدل‌سازی معکوس دلیل وجود این پیکسل‌هاست که قادر به تخمین مقدار درست پیکسل نبوده و مقادیر غیرواقعی برای پیکسل‌ها استخراج شده است. برای ارائه نتایج اصلی مدل‌سازی معکوس و شبیه‌سازی تصویر تصمیم گرفته شد که این پیکسل‌ها به صورت اصلی و بدون اعمال هرگونه تصحیح آورده شوند.

عملکرد به نسبت ضعیف مدل در بازسازی و شبیه‌سازی مناطق عاری از پوشش گیاهی (خاک لخت و پهنه‌های آبی) با توجه به این که مدل اسال‌سی برای محاسبه بازتابندگی پوشش‌های گیاهی ارائه شده قابل توجه است. این امر در شکل ۶ به وضوح نشان داده شده است. در این شکل بازتابندگی بالای اتمسفر برای چند پوشش گیاهی مختلف و خاک بین دو تصویر اصلی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. مدل پیشنهادی با RMSE در پوشش‌های یونجه و ذرت به دلیل متراکم بودن پوشش گیاهی در حدود 0.01 ، R^2 ۱۰۰٪ و همچنین انحراف معیار 0.01 قادر به بازتولید و شبیه‌سازی بازتابندگی تصویر اصلی بوده است. با این حال در پوشش گیاهی آفتابگردان تنک (با مقدار شاخص سطح برگ کمتر از ۲) بازتابندگی شبیه‌سازی شده مطابقت کمتری از موارد پیشین با بازتابندگی اصلی داشته و در حالت خاک لخت RMSE تا 0.03 بالا رفته و انحراف معیار متوسط نیز در حدود 0.05 است. میزان متوسط RMSE برای تمام تصویر به ترتیب 0.023 و 0.052 برای تصاویر کریس- پروبا و لندست-۵ به دست آمد. میزان نسبتاً بالای RMSE در تصویر لندست-۵ با توجه به اختلاف زمانی دو تصویر و تغییر یک سری از

پارامترها از قبیل رطوبت خاک (رطوبت استخراجی از تصویر کریس- پروبا در شبیه‌سازی استفاده شده است) در فاصله زمانی بین دو تصویر و همچنین وجود مه در تصویر اصلی قابل توجیه است. اگر شکل ۶ با شکل ۴ مقایسه شود، مشاهده خواهد شد که در شکل ۴ میزان RMSE به طور معمول بالاتر از شکل ۶ است. این امر به تفاوت این دو بازتابندگی برمی‌گردد که اولی برای بالای اتمسفر و دومی برای پایین اتمسفر است. وجود اتمسفر و شبیه‌سازی آن نیز خطای دیگری به شبیه‌سازی‌های اضافه خواهد نمود که عامل اصلی در تفاوت‌های موجود بین دو شکل ۴ و ۶ نیز همین است.



شکل ۶ مقایسه بازتابندگی پوشش گیاهی (پایین اتمسفر) بین تصویر شبیه‌سازی شده و تصویر اصلی کریس- پروبا برای چهار سطح مختلف

۵- جمع‌بندی

شبیه‌سازی بازتابندگی و رادیانس بازتابی از عوارض و اشیاء و در یک دید جامع‌تر شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای کاربردهای فراوانی در مطالعات سنجش از دوری دارد. از آن جمله می‌توان به طراحی و گسترش الگوریتم‌ها برای سنجنده‌های جدید پیشین و در حین عملیاتی شدن، طراحی سنجنده‌های جدید، بررسی شرایط مختلف محیطی با سنجنده‌های موجود و بازیابی پارامترهای



بیوفیزیکی و بیوشیمیایی از تصاویر ماهواره‌ای اشاره کرد. در این مقاله مدل چهار-جریانہ ارائه شده توسط ورهوف و همکاران (۲۰۰۷، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵) برای شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای بهبود یافته است. در مدل پیشنهادی تعداد اجراهای مدل اتمسفری از سه بار اجرا با بازتابندگی‌های سطحی صفر، پنجاه و صد در صد به دو اجرا کاهش داده شده و همچنین روابط مورد نیاز برای استخراج کمیت‌های اتمسفری تغییر داده شده‌اند. نتایج به‌دست آمده با استفاده از مدل پیشنهادی مطابقت بالایی با نتایج به‌دست آمده در کارهای دیگران از قبیل ورهوف و همکاران (۲۰۰۳، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲)، لورنت و همکاران (۲۰۱۱ و ۲۰۱۳) و موسیوند و همکاران (۲۰۱۴) و ۲۰۱۵ نشان می‌دهند. به طور متوسط نشان داده شده است که مدل اس‌ال‌سی (و همین طور آن مدل بهبود یافته چهار-جریانہ) توانایی بالایی در شبیه‌سازی بازتابندگی سطوح با پوشش گیاهی متوسط و متراکم (RMSE بازتابندگی بهتر از ۰/۰۲) دارد. با این حال در صورت وجود پوشش گیاهی بسیار کم (شاخص سطح برگ کمتر از ۰/۵) نتایج مدل از صحت و دقت کمتری برخوردار هستند. از این رو می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی بازتابندگی و رادیانس سطوح پوشش گیاهی و همچنین شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد.

از آنجایی که مدل پیشنهادی نتایج قابل‌پذیرشی برای پوشش‌های گیاهی کشاورزی دست داده است، پیشنهاد می‌گردد که ارزیابی مشابه‌ای برای نواحی با پوشش جنگلی (سوزنی برگ و پهن برگ) انجام پذیرد. علاوه بر این نظر به توانایی مدل در بازسازی بازتابندگی سطوح پوشش گیاهی پیشنهاد می‌گردد از مدل ارائه شده برای بازیابی خصوصیات پوشش گیاهی با استفاده از مدل‌سازی معکوس تصاویر ماهواره‌ای از مدل‌های انتقال تابش استفاده شده و نتایج با سایر مدل‌های پرکاربرد مقایسه گردد.

منابع

- Adler, S. M., Matthew, M. W., Bernstein, L. S., Levine, R. Y., Berk, A., Richtsmeier, S. C., Burke, H. H. (1999). Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery Based on MODTRAN4. Paper Presented at the Proceedings of SPIE Conference on Imaging Spectrometry. doi: 10.1117/12.366315.
- Berk, A., Anderson, G. P., Bernstein, L. S., Acharya, P. K., Dothe, H., Matthew, M. W., Hoke, M. L. (1999). MODTRAN4 Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction. Paper Presented at the SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III. doi: 10.1117/12.366388.
- Börner, A., Wiest, L., Keller, P., Reulke, R., Richter, R., Schaepman, M., & Schlöpfer, D. (2001). SENSOR: a Tool for the Simulation of Hyperspectral Remote Sensing

- Systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(5–6), 299–312. doi:10.1016/s0924-2716(01)00022-3.
- Guanter, L., Richter, R., & Kaufmann, H. (2009). On the Application of the MODTRAN4 Atmospheric Radiative Transfer Code to Optical Remote Sensing. *Remote Sensing*, 30(6), 1407–1424. doi: 10.1080/01431160802438555.
- Guanter, L., Segl, K., & Kaufmann, H. (2009). Simulation of Optical Remote-sensing Scenes with Application to the EnMAP Hyperspectral Mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), 2340–2351. doi: 10.1109/TGRS.2008.2011616.
- Hapke, B. (1981). Bidirectional Reflectance Spectroscopy 1. Theory. *Geophysical Research*, 86(B4), 3039–3054. doi: 10.1029/JB086iB04p03039.
- Isaacs, R. G., & Vogelmann, A. M. (1988). Multispectral Sensor Data Simulation Modeling Based on the Multiple Scattering LOWTRAN code. *Remote Sensing of Environment*, 26(1), 75–99. doi: 10.1016/0034-4257(88)90120-4.
- Jacquemoud, S., & Baret, F. (1990). PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2), 75–91. doi: 10.1016/0034-4257(90)90100-z.
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P. J., Asner, G. P., Ustin, S. L. (2009). PROSPECT+SAIL Models: A Review of Use for Vegetation Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, S56–S66. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.026>.
- Kerekes, J. P., & Landgrebe, D. A. (1989). Simulation of Optical Remote Sensing Systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27, 762–771. doi: 10.1109/36.35965.
- Laurent, V. C. E., Verhoef, W., Clevers, J. G. P. W., & Schaepman, M. E. (2011). Estimating Forest Variables From Top-of-atmosphere Radiance Satellite Measurements Using Coupled Radiative Transfer Models. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1043–1052. doi: 10.1016/j.rse.2010.12.009.
- Laurent, V. C. E., Verhoef, W., Damm, A., Schaepman, M. E., & Clevers, J. G. P. W. (2013). A Bayesian Object-based Approach for Estimating Vegetation Biophysical and Biochemical Variables from APEX at-sensor Radiance Data. *Remote Sensing of Environment*, 139(0), 6–17. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.032.
- Laurent, V. C. E., Verhoef, W., Schaepman, M. E., Damm, A., & Clevers, J. G. P. W. (2012, 22-27 July 2012). Mapping LAI and Chlorophyll Content from at-sensor APEX Data Using a Bayesian Optimisation of a Coupled Canopy-atmosphere Model. Paper Presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6352321.
- Liu, B., Zhang, L., Zhang, X., Zhang, B., & Tong, Q. (2009) Simulation of EO-1 Hyperion Data from ALI Multispectral Data Based on the Spectral Reconstruction Approach. *Sensors*, 9, 3090–310. doi: 10.3390/s90403090.
- Mousivand, A., Menenti, M., Gorte, B., & Verhoef, W. (2014). Global sensitivity analysis of the spectral radiance of a soil–vegetation system. *Remote Sensing of Environment*, 145(0), 131–144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.023>.



- Mousivand, A., Menenti, M., Gorte, B., & Verhoef, W. (2015). Multi-temporal, Multi-sensor Retrieval of Terrestrial Vegetation Properties from Spectral-directional Radiometric Data. *Remote Sensing of Environment*, 158(0), 311-330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.030>.
- Mousivand, A., Verhoef, W., Menenti, M., & Gorte, B. (2015). Modeling Top of Atmosphere Radiance over Heterogeneous Non-Lambertian Rugged Terrain. *Remote Sensing*, 7(6), 8019. doi:10.3390/rs70608019.
- Parente, M., Clark, J. T., Brown, A. J., & Bishop, J. L. (2010). End-to-End Simulation and Analytical Model of Remote-Sensing Systems: Application to CRISM. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(11), 3877-3888. doi: 10.1109/TGRS.2010.2050000.
- Schläpfer, D., Borel, C. C., Keller, J., & Itten, K. I. (1998). Atmospheric Precorrected Differential Absorption Technique to Retrieve Columnar Water Vapor. *Remote Sensing of Environment*, 65(3), 353-366. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00044-3).
- Schläpfer, D., & Nieke, J. (2005). Operational Simulation of at Sensor Radiance Sensitivity Using the MODO / MODTRAN4 Environment Paper Presented at the 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy. New Quality in Environmental Studies, Warsaw.
- Verhoef, W. (1984). Light scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90057-9).
- Verhoef, W., & Bach, H. (2003). Simulation of Hyperspectral and Directional Radiance Images Using Coupled Biophysical and Atmospheric Radiative Transfer Models. *Remote Sensing of Environment*, 87, 23-41. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00143-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00143-3).
- Verhoef, W., & Bach, H. (2007). Coupled Soil-leaf-canopy and Atmosphere Radiative Transfer Modeling to sSimulate Hyperspectral Multi-angular Surface Reflectance and TOA Radiance Data. *Remote Sensing of Environment*, 109(2), 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.013>.
- Verhoef, W., & Bach, H. (2012). Simulation of Sentinel-3 images by Four-stream Surface-atmosphere Radiative Transfer Modeling in the Optical and Thermal Domains. *Remote Sensing of Environment*, 120(0), 197-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.034>.
- Zhang, J., Zhang, X., Zou, B., & Chen, D. (2010). On Hyperspectral Image Simulation of a Complex Woodland Area. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(11), 3889-3902. doi: 10.1109/TGRS.2010.2063435.