

شماره مقاله: ۱۸۴-۱۸۶-۱۵
تاریخ پذیرش: ۵ اسفند ۱۳۹۴

بسمه تعالی
گواهی ارائه مقاله



کمیته همکاران نشریات علمی

بدین وسیله گواهی می‌شود مقاله با عنوان

ادغام زمانی - مکانی تصاویر ماهواره‌ای به منظور کاهش بازه‌ی پایداری

توسط: علی رخش ماهپور، روزبه شاد

در اولین کنفرانس ملی جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار، مورد پذیرش قرار گرفته است.

این گواهی به منزله شرکت پژوهشگران گرامی در کنفرانس می‌باشد.

توفیق روزافزون شما را در عرصه‌های علمی و اجرایی کشور عزیزمان، ایران آرزو مندیم.

حسن صادقی نژاد
رئیس همایش



کمیته همکاران نشریات علمی

یعقوب عزیزی
دبیر علمی همایش



ادغام زمانی - مکانی تصاویر ماهواره‌ای

به منظور کاهش بازه‌ی پایش پدیده‌ها

علی رخش ماهپور، روزبه شاد

Email: ali.rakhsh@yahoo.com

r.shad@um.ac.ir

۱- دانشجوی ارشد سنجش از دور، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

امروزه با ظهور سنجنده‌های ماهواره‌ای با دوره‌ی گردش روزانه، این امکان فراهم شده است تا بتوان رفتار پدیده‌های مختلف را به صورت روزانه با هزینه‌های بسیار ناچیز مورد بررسی قرار داد. با این وجود، از جمله محدودیت‌های اصلی چنین سنجنده‌هایی قدرت تفکیک مکانی پایین آن‌ها است. اما خوشبختانه در چندسال اخیر، الگوریتم‌های بسیار قدرتمندی به منظور ادغام تصاویر سنجنده‌های مذکور با تصاویری با قدرت تفکیک مکانی بالاتر فراهم شده است. ارائه‌ی الگوریتم‌های مذکور، باعث شده تا بتوان فرایند پایش پدیده‌های روزانه را با دقت مکانی مناسب نیز انجام داد. از این رو در این تحقیق امکان سنجی استفاده از ادغام زمانی - مکانی تصاویر سنجنده‌ی مدیس و لندست، و همچنین مهمترین الگوریتم‌های ادغام آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و چارچوب مناسبی برای ادغام زمانی- مکانی تصاویر ماهواره‌ای ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی

مدیس، لندست، ادغام، زمانی- مکانی، قدرت تفکیک مکانی، قدرت تفکیک زمانی.

۱. مقدمه

امروزه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به توجه به در دسترس بودن و هزینه‌های پایین بسیار رایج شده است و این تصاویر نقش زیادی در بررسی محیط اطراف انسان دارند [1]. یکی از کاربردهای اساسی و مرسوم تصاویر ماهواره‌ای پایش پدیده‌های مختلف است. این پدیده‌ها با توجه به دوره‌ی رخدادشان، بایستی توسط سنجنده‌های مختلفی مورد بررسی قرار گیرند [2]. از آنجایی که یک تصویر ماهواره‌ای (از نظر قدرت تفکیک مکانی، طیفی، زمانی و رادیومتریک) برای بسیاری از مطالعات زمینی ایده‌آل می‌باشد، سعی بر آن است که عوامل مذکور در طراحی سنجنده‌ها تا حد امکان بهینه گردند. ولی به دلیل گستردگی کاربردها و مشکلات فنی در طراحی و ساخت سنجنده‌ها، هر سنجنده در کاربرد خاصی مناسب بوده و دارای محدودیت‌هایی در زمینه سایر کاربردها می‌باشد. از این جهت در بیشتر مواقع، لازم است تا به منظور یک کاربرد خاص و یا پایش پدیده‌های گوناگون، اطلاعات و داده‌های سنجنده‌های مختلف را به منظور استفاده از مزیت‌های تمامی آن‌ها مورد استفاده قرار داد. به عبارتی دیگر، داده‌ها و تصاویر اخذ شده توسط سنجنده‌های مختلف با یکدیگر به نحوی تلفیق شوند و داده و یا تصاویر جدید، دارای خصوصیات و ویژگی‌های تمامی تصاویر و یا داده‌های اولیه باشد. به این نحو از تلفیق تصاویر (داده) به اصطلاح ادغام (Fusion) می‌گویند [3]. بنابراین ادغام تصاویر مورد توجه اکثر پژوهشگران سنجش از دور و متخصصین پردازش تصویر قرار گرفته است. به طور کلی، فرآیند ادغام داده‌ها بسیار ساده‌تر و اقتصادی‌تر از طراحی و ساخت یک سنسور پیشرفته‌ای است که در آن قدرت تفکیک مکانی و

اولین کنفرانس جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار

طیفی به صورت توام منظور شده باشند (هر چند که از لحاظ تئوری هم ساخت چنین سنجنده‌های با محدودیت‌های بسیار بزرگی رو به رو است). لذا بدون شک، به‌کارگیری توام اطلاعات مکانی و طیفی بدون استفاده از روش‌های تلفیق داده‌ها، امکان پذیر نمی‌باشند [4].

یکی از مهمترین مباحث ادغام تصاویر ماهواره‌ای، ادغام زمانی- مکانی (Temporal-Spatial) آن‌ها است. در این نوع از ادغام، تصاویر با قدرت تفکیک زمانی بالا، با تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا ادغام می‌گردند. زیرا در تصاویر ماهواره‌ای معمولاً به منظور افزایش قدرت تفکیک زمانی (مدت زمان بین دو عبور متوالی ماهواره از یک مکان مشخص در سطح زمین) لازم است تا قدرت تفکیک مکانی کاهش یابد. به عبارت ساده‌تر، این دو پارامتر معکوس هم بوده. ادغام تصاویر به شیوه‌ی طیفی- مکانی (پن شارپنینگ) از مدت‌ها قبل و بلافاصله بعد از ظهور ماهواره‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا بوجود آمد. با این وجود مباحث مربوط به ادغام زمانی- مکانی به نسبت جدیدتر می‌باشند و الگوریتم‌های مربوط به آن در سال‌های اخیر ابداع شده‌اند.

فرآیند ادغام اطلاعات سنسوری، داده‌ها از منابع مختلف را با یکدیگر مربوط نموده و دقت‌های بالاتری را فراهم می‌آورد. مفهوم ترکیب اطلاعات سنسوری زمینه‌ای جدید می‌باشد که در بسیاری از مسائل علمی مورد توجه قرار گرفته است. همه‌ی انسان‌ها و حیوانات به منظور تحلیل اطلاعات به‌دست آمده از حواس چندگانه خود، در هر لحظه از ادغام اطلاعات سنسوری استفاده می‌نمایند. به عنوان مثال در صورتی که حواسی مانند بینایی، لامسه، بویایی و چشایی برای تشخیص یک ماده خوراکی به کار گرفته شوند، فرآیند تشخیص دقیق‌تر و درست‌تر انجام خواهد شد. این مساله نه تنها در حوزه‌ی سنجش از دور حائز اهمیت می‌باشد، بلکه کاربردهایی نظیر کنترل کیفیت صنعتی، صنایع نظامی، بینایی ربات‌ها و نظیر آن نیز از ادغام سنجنده‌ها و اطلاعات حاصل از آن‌ها استفاده می‌نمایند [6]. در سنجش از دور کاربردهای مهم ادغام اطلاعات سنجنده‌ها در مقولاتی مانند مسائل نظامی، مشکلات زیست محیطی، کشاورزی، هدایت وسیله نقلیه و نظیر آن اجرا می‌گردند. در سال‌های اخیر، مفهوم ترکیب اطلاعات سنسوری از مجموعه‌ای از تکنیک‌های بی‌قاعده به راهبردهای منظم علمی و مهندسی، تغییر یافته است. اصطلاحات مختلفی در ترکیب اطلاعات سنسوری مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک معنی خاص خود را دارد. در این تحقیق، مساله فیوژن با تعریفی به صورت: "ادغام اطلاعات به دست آمده از چندین منبع برای تولید یک داده‌ی واحد و یک پارچه"، مد نظر قرار گرفته است. فیوژن علاوه بر برتری‌های آماری نسبت به دیگر روش‌های ترکیب اطلاعات سنسوری، قادر است که با اجرای بهینه‌سازی و مشاهدات مکرر بر روی پدیده‌ی فیزیکی، فرآیند مشاهده و تخمین را تدقیق نماید.

از جمله مرسوم‌ترین تلفیق زمانی- مکانی، ادغام داده‌های سنجنده‌های ابر طیفی مانند Hyperion و MODIS (سنجنده‌های با بیش از ۳۰ باند) و چند طیفی مانند سنجنده‌های سری لندست MS + ETM (کمتر از ۳۰ باند) می‌باشند. سنجنده‌ی مدیس دارای قدرت تفکیک زمانی بسیار بالا است، به طوری که تصاویر آن به صورت روزانه برای هر ناحیه‌ای از زمین، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، قدرت تفکیک مکانی آن بسیار پایین می‌باشد (قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰، ۲۵۰ متر و ۱ کیلومتر). با این وجود سنجنده‌ی لندست، دارای قدرت تفکیک مکانی بالا (۳۰ متر برای باندهای چندطیفی و ۱۵ متر برای باند پنکروماتیک)، و قدرت تفکیک زمانی پایین (۱۶ روزه) می‌باشد. بنابراین با ادغام مکانی- زمانی سنجنده‌های لندست و مدیس، می‌توان تصاویری به دست آورد که به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر و یا ۳۰ متر، در دسترس هستند. این کار امکان پایش روزانه‌ی پدیده‌ها و یا عوارض را با قدرت تفکیک مکانی بالا فراهم می‌کند. قدرت تفکیک مکانی مذکور، در بسیاری از کاربردها به خصوص در حوزه‌ی کشاورزی مناسب بوده و از این جهت با به‌کارگیری ادغام مکانی- زمانی، می‌توان بسیاری از پدیده‌ها و نواحی کشاورزی را مورد پایش قرار داد [5].

اولین کنفرانس جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار

همزمان با پیشرفت وسایل تصویربرداری مورد استفاده، تحقیق در این عرصه نیز به طور مداوم در حال پیشرفت می‌باشد. در [7] کارهای موجود در زمینه‌ی فیوژن تصاویر چند سنجنده‌ای را مرور شده است. در تحقیق مذکور، دامنه‌ای جامع از تکنیک‌های ادغام و ویژگی‌های آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در پژوهش مذکور، فرآیند بررسی تکنیک‌های ریاضیاتی پایه نظیر جمع (نسبت‌گیری تصویر)، تکنیک‌های مبتنی بر تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA^1) و تکنیک‌های چند قدرت تفکیکی مبتنی بر موجک (Wavelet)، انجام شده است. الگوریتم فیوژن زمانی کارآمد می‌باشد که عوارض رادیومتریک و مکانی مهم تصاویر حفظ شوند و یا در طول فرآیند فیوژن عوارض مذکور بارزتر گردند. بنابر این، در مرحله‌ی اول باید ویژگی‌های مکانی را استخراج نمود. سپس، برای به‌دست آوردن ویژگی‌های واحد در ورودی و دستیابی به فیوژنی کارآمد الگوریتم اجرا می‌شود، به طور مثال [8,9]، با استفاده از پیرامید لاپلاسیان (Laplacian) تکنیک‌هایی را پیشنهاد نمودند که تصویر ورودی را به مجموعه‌ای از شکل‌های هندسی اولیه تجزیه می‌کند. شکل‌های هندسی مربوطه توسط الگوهای ادراکی تعریف می‌شوند. در سال ۲۰۰۶، محققان، به منظور دستیابی به تصاویر با وضوح بهتر و قدرت تفکیک زمانی - مکانی بالاتر، الگوریتمی را برای ترکیب تصاویر سنجنده‌های (ETM+) و مودیس (MODIS) ابداع کردند [10,11]. این الگوریتم که به اختصار STARFM² نام گرفت، الگوریتم مذکور یکی از الگوریتم‌های مبنایی و مرسوم در ادغام زمانی - مکانی می‌باشد. در ادامه در [12]، الگوریتم وقتی به منظور ادغام زمانی و مکانی ارائه شد. الگوریتم مذکور، عملکرد مشابه الگوریتم STARFM دارد، ولی به صورت محلی و وقتی اعمال می‌گردد. در تحقیق مذکور ادعا شده که در برخی نواحی (که صحنه پیچیدگی بالایی دارد) الگوریتم پیشنهادی می‌تواند نسبت به الگوریتم STARFM دقت بالاتری ارائه دهد. با توجه به اهمیت ادغام زمانی - مکانی، با توسعه‌ی مفاهیم و الگوریتم‌های زیر پیکسل (Subpixel)، در [13]، الگوریتمی بر مبنای اختلاط طیفی، ارائه شد (STDFM³). الگوریتم مذکور با استفاده از اختلاط طیفی، تصاویر لندست روزانه را پیش‌بینی می‌کند. الگوریتم مذکور نسبت به الگوریتم STARFM زمان محاسباتی کمتری نیاز داشته و همچنین در نواحی که یکنواختی کمتر باشد، به مراتب دقت بالاتری دارد. همچنین به منظور بهبود الگوریتم ارائه شده در [13]، در پژوهشی دیگر [14]، نسخه‌ی بهبود یافته‌ی آن ارائه گردید. تا کنون تحقیقات دیگری [15-17] نیز بر مبنای الگوریتم‌های STARFM و همچنین مبتنی بر اختلاط طیفی ارائه شده‌اند، که مبنای تمامی آن‌ها، الگوریتم‌های STARFM و همچنین الگوریتم پیشنهادی در [13] است.

در این تحقیق، به منظور امکان‌سنجی به کارگیری الگوریتم‌های ادغام زمانی - مکانی، در ابتدا مفاهیم کلی ادغام در داده‌ها، سپس در ادامه ملاحظات لازم به منظور ادغام مکانی - زمانی، ارائه می‌گردد. سپس مبنای ادغام مذکور و در ادامه دو الگوریتم مرسوم و جدید در زمینه‌ی ادغام مکانی - زمانی بیان می‌گردد. در نهایت نیز با جمع‌بندی تمامی ملاحظات لازم و مراحل مورد نیاز، چارچوبی معین به منظور ادغام زمانی - مکانی، تصاویری مانند مودیس و لندست ارائه خواهد شد.

۲. مبنای ادغام زمانی - مکانی

ادغام زمانی - مکانی از جمله پرکاربردترین تصاویر در سنجش از دور به شمار می‌رود که در دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از این رو در پژوهش‌های جدیدتر سعی بر آن است تا دقت الگوریتم‌های موجود افزایش داده شود.

¹ Principal Component analysis

² Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model

³ Spatial and Temporal Data Fusion Model

۱.۲. ملاحظات لازم

معمولا در استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در هر حوزه لازم است تا ملاحظاتی را در نظر داشت. عدم در نظر نگرفتن آن‌ها در بسیاری از مواقع باعث بروز خطاهای قابل توجهی شده‌اند. از این نظر بایستی همواره در استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در کاربردهای مختلف، ملاحظاتی را در نظر داشت. از آن جهت که در ادغام زمانی- مکانی تصاویر ماهواره‌ای، از دو تصویر با قدرت تفکیک زمانی بالا و قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده می‌گردد، از این رو، در وهله‌ی اول، انتخاب مناسب باندها از اهمیت به سزایی برخوردار است. از آن جهت که هدف اصلی در ادغام زمانی- مکانی تصاویر ماهواره‌ای، بهبود قدرت تفکیک مکانی یک تصویر با قدرت تفکیک زمانی بالا است، از این رو در طی فرایند مذکور، نبایستی طیف مواد موجود در صحنه دچار تغییر قابل ملاحظه‌ای شود (به طوری که ماهیت آن را تغییر دهد). زیرا هدف اصلی، افزایش قدرت تفکیک مکانی تصویر مذکور است. از این جهت، یکسان بودن محدوده‌ی طیفی تصاویر انتخاب شده به منظور ادغام زمانی- مکانی، پارامتری بسیار مهم است. و در ادغام مورد نظر، بایستی باندهایی از دو تصویر انتخاب گردند که تا حد امکان محدوده‌ی طیفی یکسانی داشته باشند. از دیگر نکات قابل توجه، وجود حداقل دو تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا است. زیرا عدم محاسبه‌ی دقت و خطای الگوریتم در هیچ روشی معقول نمی‌باشد. همچنین با توجه به اینکه در تصاویر فراتیفی، تعداد باندها بسیار زیاد می‌باشد، از این رو انتخاب باندهای مناسب و نظیر در دو تصویر با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، از اهمیت بیشتری برخوردار است. علاوه بر آن، در چنین مواقعی، الگوریتم‌های بایستی انتخاب شوند که زمان محاسباتی و پیچیدگی کمتری دارند.

۲.۲. پیش‌پردازش‌ها

از آن جهت که تصاویر ماهواره‌ای از سکوهایی واقع در فضا اخذ می‌گردند و همواره اتمسفر و دیگر عوامل داخلی، به عنوان اصلی‌ترین منابع وجود عدم قطعیت در این تصاویر هستند، انجام مراحل پیش‌پردازش به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها و همچنین خطاهای محیطی و دستگاهی در تصاویر سنجش از دور فرایندی ناگزیر می‌باشد. مهمترین مراحل پیش‌پردازش در تصاویر مختلف ماهواره‌ای، تصحیحات هندسی و تصحیحات رادیومتریکی می‌باشند که معمولا با توجه به کاربرد و حوزه‌ی به کارگیری تصاویر، اندکی متفاوت خواهند بود. در تصحیح هندسی، با به کارگیری نقاط زمین با مختصات معلوم، سیستم مختصات تصاویر به یک سیستم مرجع زمینی انتقال می‌یابد. و در تصحیح رادیومتریکی، بسته به هدف، تصحیحات نسبی و یا مطلق رادیومتریکی به منظور تبدیل مقادیر خام تصاویر به بازتابندگی سطح زمین، انجام می‌گیرد.

در ادغام زمانی- مکانی تصاویر، در وهله‌ی اول بایستی سیستم مختصات دو تصویر یکسان باشند. اما به دلیل اینکه سیستم‌های مختصاتی تصاویر لندست و مدیس یکسان نمی‌باشند، در وهله‌ی اول، بایستی سیستم تصویر (مختصاتی) تصاویر مدیس نسبت به سیستم مختصاتی تصویر لندست تغییر یابند. که برای این کار با مرجع قرار دادن تصویر لندست زمان مبنا (پس از زمین مرجع‌سازی آن)، سیستم مختصاتی مدیس با انتخاب نقاط متناظر در دو تصویر به راحتی با سیستم تصویر لندست یکسان خواهد شد. در مرحله‌ی تصحیح رادیومتریکی، چون هدف در ادغام زمانی- مکانی، فقط پیش‌بینی تصاویر لندست است، و از آن جهت که نحوه‌ی تشکیل تصویر از یک صحنه در دو سنجنده‌ی مذکور یکسان نیست، بنابراین بایستی مقادیر خام تصاویر دو سنجنده‌ی مذکور تبدیل به بازتابندگی سطح زمین شوند. بدین منظور برای تصاویر مدیس، محصولات تصحیح شده وجود دارد (MOD09GA) و به منظور تصحیح تصاویر لندست نیز می‌بایست از بسته‌های نرم افزاری موجود استفاده کرد. پس از تصحیح رادیومتریکی و محاسبه‌ی بازتابندگی در دو تصویر مذکور، می‌توان فرایند ادغام زمانی- مکانی را انجام داد.

اولین کنفرانس جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار

۳. تئوری روش‌ها

الگوریتم‌های ادغام به دور کلی بر دو مبنای محاسبه‌ی ضرایب (STARFM) و همچنین اختلاط طیفی خطی هستند. از این جهت در اینجا نیز دو الگوریتم STARFM و STDFM (بر مبنای اختلاط طیفی خطی) مورد بررسی قرار می‌گیرند. الگوریتم‌های مذکور، مبنای بیشتر الگوریتم‌های جدیدتر می‌باشند.

۱.۳ الگوریتم STDFM

این روش بر مبنای تئوری اختلاط طیفی (خطی) اجرا می‌گردد. مطابق با تئوری مذکور، بازتابندگی هر پیکسل، به صورت ترکیب خطی از میانگین بازتابندگی پیکسل‌های خالص درون آن در نظر گرفته می‌شوند (رابطه‌ی (۱)).

$$C(t, b) = \sum_{c=1}^{ne} \overline{F(c, t, b)} \times A(c, t) + \epsilon \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، t و b به ترتیب بیانگر باند و زمان، F نشان دهنده‌ی بازتابندگی ماده‌ی خالص و A نیز درصد حضور ماده‌ی خالص را نشان می‌دهد. همچنین ne و ϵ نیز به ترتیب تعداد ماده‌ی خالص درون پیکسل و خطای اتفاقی را بیان می‌نمایند. با نوشتن رابطه‌ی (۱) برای هر پیکسل تصویر مودیس، و مفروض بودن تصویر لندست برای زمان مرجع (با استفاده از آن درصد حضور ماده‌ی خالص برای هر پیکسل تعیین می‌گردد)، می‌توان میانگین بازتابندگی مواد خالص درون پیکسل‌های مودیس را با استفاده از روش کمترین مربعات به دست آورد. همچنین مقدار تغییرات بازتابندگی میانگین از رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\overline{\Delta F(c, \Delta tk, b)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (F(c, t0, b, f) - F(c, tk, b, f)) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، m تعداد پیکسل‌های مربوط به ماده‌ی خالص c در تصویر لندست و $F(c, t, b, f)$ بازتابندگی پیکسل j ام تصویر لندست (متعلق به ماده‌ی خالص c در زمان t) می‌باشند. با توجه به فرض یکسان بودن تغییرات زمانی ماده‌ی خالص در یک همسایگی، رابطه‌ی (۳) را به صورت زیر می‌توان نوشت.

$$F(c, t0, b, f) - F(c, tk, b, f) = F(c, t0, b, l) - F(c, tk, b, l) \quad j, l \in [1, m] \quad (3)$$

با در نظر گرفتن روابط (۲) و (۳)، رابطه‌ی (۴) و رابطه‌ی (۵) استخراج می‌گردند.

$$\overline{\Delta F(c, \Delta tk, b)} = F(c, t0, b, f) - F(c, tk, b, f) \quad (4)$$

$$F(c, t0, b, f) = F(c, tk, b, f) + \overline{\Delta F(c, \Delta tk, b)} \quad (5)$$

رابطه‌ی (۵) مبین آن است که بازتابندگی یک پیکسل در تصویر لندست در زمان پیش‌بینی، با حاصل جمع بازتابندگی همان پیکسل در زمان مرجع و تغییرات زمانی ماده‌ی خالص (در آن پیکسل) برابر می‌باشد. با حل رابطه‌ی (۳-۹) برای دو تصویر مودیس (زمان مرجع و زمان پیش‌بینی)، تغییرات زمانی ماده‌ی خالص (در طول زمان) به دست می‌آید. به عبارتی، از رابطه‌ی (۶) می‌توان استفاده نمود.

$$F(c, t0, b, f) - F(c, tk, b, f) + \Delta U(\Delta tk, b), \Delta U(\Delta tk, b) = U(t0, b) - U(tk, b) \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶)، $U(t, b)$ بیانگر تصویر مودیس (فرایند Unmixing) بر روی آن با استفاده از رابطه‌ی (۶) اجرا شده است، در زمان t می‌باشد. بنابراین با استفاده از رابطه‌ی (۶)، می‌توان بازتابندگی تصویر لندست را در بازه‌های زمانی که تصویر مودیس در دسترس می‌باشد، پیش‌بینی نمود. بدین ترتیب تصاویر لندستی به دست خواهند آمد که هم دارای قدرت تفکیک مکانی بالا و هم دارای قدرت تفکیک زمانی بالا باشند.

۲.۳ الگوریتم STARFM

در یک پیکسل غیر هموژن مودیس رابطه‌ی (۷) را به صورت زیر می‌توان نوشت.

$$Ct = \sum (Fit \times Ait) \quad (7)$$

اولین کنفرانس جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار

که در آن (Ct) بازتابندگی در مودیس، Fit بازتابندگی در لندست و Ait درصد تشکیل دهندهی Fit در پیکسل Ct می‌باشند. به عبارتی Fit را می‌توان بازتابندگی پیکسل‌های هموزن لندست در نظر گرفت. اگر به نحوی Fit را بتوان از طریق پیکسل‌های همسایه در تصویر مودیس به دست آورد (زیرا ممکن است در یک زمان خاص تصویر لندست موجود نباشد)، آن‌گاه نتایج بهبود خواهند یافت. از این رو گام اصلی پیدا کردن پیکسل‌های همسایه هموزن و یکسان طیفی می‌باشد. برای یک پیکسل هموزن مودیس، بازتابندگی مشاهده شده توسط لندست از رابطه (۸) به دست می‌آید. با توجه به آن که پیکسل مودیس هموزن می‌باشد (یعنی تعداد پیکسل‌های لندستی که در آن قرار می‌گیرند، همگی دارای بازتابندگی یکسانی هستند)، در نتیجه میانگین پیکسل‌های لندستی که به عنوان بازتابندگی در پیکسل مودیس قرار می‌گیرند، یکسان در نظر گرفته خواهد شد. بنابراین رابطه‌ی مذکور منطقی خواهد بود.

$$L(x_i, y_j, t_k) = M(x_i, y_j, t_k) + \varepsilon_k \quad (۸)$$

در رابطه‌ی (۸)، (x_i, y_j) موقعیت پیکسل داده شده برای تصاویر لندست و مودیس و t_k تاریخ اکتساب دو تصویر مودیس و لندست در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، ε_k نشان دهنده تفاوت بین بازتاب سطحی مشاهده شده مودیس و لندست (ناشی از پهنای باند مختلف و هندسه خورشیدی متفاوت) می‌باشد. لذا با فرض ثابت بودن ε_k در طول دوره‌ی پیش‌بینی و همچنین این موضوع که در تاریخ پیش‌بینی t_0 و t_k تغییراتی در خطاهای سیستمی در پیکسل (x_i, y_j) اتفاق نیافتد، معادله $\varepsilon_0 = \varepsilon_k$ برقرار خواهد بود. در نتیجه، رابطه (۹) بازتابندگی لندست را به صورت زیر پیش‌بینی خواهد نمود.

$$L(x_i, y_j, t_0) = M(x_i, y_j, t_0) + (L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)) \quad (۹)$$

رابطه‌ی مذکور برای پیکسل‌های هموزن در تصویر مودیس کاملاً منطقی خواهد بود (بدین مفهوم که در پیکسل‌های هموزن دارای اعتبار می‌باشد). باید توجه داشت که اگر رابطه‌ی (۹) در تمامی سطح تصویر مورد استفاده قرار گیرد باعث بروز چندین مشکل اساسی خواهد شد.

الف- تمام پیکسل‌های مودیس همواره هموزن و یکنواخت نیستند.

ب- در طول دوره‌ی پیش‌بینی نوع پوشش زمین تغییر نموده و ممکن است که پیکسلی که در زمان t_0 در مودیس هموزن باشد، در زمان (t_0) دیگر هموزن نباشد.

ج- در طول دوره پیش‌بینی، تغییرات BRDF

^۱ و آب و هوایی در نظر گرفته نمی‌شوند.

بدین منظور، با استفاده از اطلاعات اضافی حاصل از همسایگی پیکسل‌های مودیس و تابع وزن، بازتابندگی مشاهده شده توسط لندست را به صورت زیر می‌توان تعریف نمود.

$$L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_0) = \sum \sum \sum W_{ijk} \times (M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)) \quad (۱۰)$$

برای اطمینان از اینکه در رابطه (۱۰) اطلاعات صحیحی قرار گرفته و پیکسل‌های همسایه هموزن هستند، تنها از پیکسل‌های طیفی مشابه (که به یک کلاس طیفی تعلق دارند) استفاده می‌شود. بنابراین یک تصویر لندست اولیه مورد نیاز خواهد بود. دلیل این موضوع آن است که پیکسل‌های مشابه از نظر طیفی، از طریق تصویر لندست اولیه قابل استخراج هستند.

برای به دست آوردن بازتابندگی لندست در مناطقی که هموزن نیستند، از همسایه‌های هموزن آن منطقه می‌توان استفاده نمود (رابطه (۷))، زیرا در همسایه‌های هموزن، مقدار بازتابندگی مودیس و لندست یکسان می‌باشند. بنابراین با توجه به معلوم بودن بازتابندگی مودیس، بازتابندگی همسایه‌های هموزن پیکسل مرکزی پنجره را نیز همان بازتابندگی مودیس می‌توان در نظر گرفت. همچنین، با دادن وزن به همسایه‌های هموزن، میزان بازتابندگی برای یک

¹ Bidirectional Reflectance distribution Function

اولین کنفرانس جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار

پیکسل مشخص از تصویر لندست قابل پیش‌بینی می‌باشد. در نتیجه، اساس فرآیند مذکور، پیدا کردن پیکسل‌های هموزن موجود در اطراف پیکسل مرکزی در تصویر لندست اولیه خواهد بود. وزن W_{ijk} ، میزان مشارکت پیکسل‌های همسایه مرکزی را در تخمین بازتابندگی بیان می‌کند. برای محاسبه وزن W_{ijk} در نظر گرفتن سه پارامتر زیر ضروری است.

الف- اختلاف بین بازتابندگی MODIS و ETM+ در مکانی معین، به صورت زیر می‌باشد.

$$S_{ijk} = |L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)| \quad (11)$$

این تخمین در واقع اختلاف بازتابندگی لندست و متوسط بازتابندگی همسایه‌های آن (مودیس) را نشان می‌دهد. بنابراین هرچه اختلاف کمتر باشد، به مفهوم یکسان بودن (و یا هموزن بودن) پیکسل مودیس در آن نقطه خواهد بود. همچنین بازتابندگی مودیس در آن نقطه وزن بزرگتری را خواهد داشت. در بعضی مواقع ممکن است که بازتابندگی لندست با بازتابندگی متوسط آن در همسایه‌ها (بازتابندگی مودیس) یکسان باشد. اما به دلیل وجود تغییرات زمانی، شرایط برابری مذکور از بین خواهد رفت. لذا در این مواقع، لازم است که اندازه‌گیری‌های دیگری مانند تغییرات زمانی بازتابندگی مودیس نیز انجام گیرد. لذا در نواحی غیر هموزن، میزان دقت کار افزایش می‌یابد. به عبارتی تغییرات اندک بازتابندگی مودیس، باعث اطمینان بیشتر در مناطق غیر هموزن خواهد شد.

ب- رابطه‌ی (۱۲) تغییرات زمانی بازتابندگی پیکسل مورد نظر در مودیس را نشان می‌دهد که به صورت زیر می‌باشد.

$$T_{ijk} = |M(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_0)| \quad (12)$$

این تغییرات هر اندازه کوچکتر باشند، وزن W_{ijk} افزایش خواهد یافت. دلیل این موضوع آن است که تغییر صحنه در طول فرآیند پیش‌بینی تغییر نمی‌کند. اما اگر تغییرات به وجود آمده آن قدر ناچیز بوده که توسط اختلاف پیکسل‌های مودیس قابل تشخیص نباشند، در این صورت الگوریتم مذکور قادر نخواهد بود که آن را مشخص کند. همچنین اگر دو تغییر متضاد ایجاد شده که باعث خنثی شدن تغییرات کلی شود، بازهم الگوریتم مذکور قادر به تشخیص آن نخواهد بود.

ج- اختلاف مسطحاتی (فاصله مکانی) بین پیکسل مرکزی $(X_{w/2}, Y_{w/2})$ و پیکسل کاندید (X_i, Y_j) ، که بیانگر مناطق هموزن هستند، در تاریخ t_k به شرح زیر خواهد بود.

$$d_{t_k} = \sqrt{\left(X_{\frac{w}{2}} - X_t\right)^2 + \left(Y_{\frac{w}{2}} - Y_t\right)^2} \quad (13)$$

در این فرمول، فاصله مکانی بین پیکسل مرکزی پیش‌بینی شده و پیکسل مشابه طیفی پیرامونی (همسایه) کاندید اندازه‌گیری می‌شود. لذا هرچه فاصله d کمتر باشد، مقدار وزن بزرگتر خواهد شد. با محاسبه‌ی وزن هر پیکسل با به کارگیری روابط (۱۱ تا ۱۳)، می‌توان مقدار پیکسل لندست را در رابطه‌ی (۱۰) محاسبه کرد.

۴. اعتبار سنجی

در مباحث زیادی بحث اعتبار سنجی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بدون انجام آن، در واقع الگوریتم‌ها و روش‌های مختلف از اعتبار کافی برخوردار نیستند. به عبارتی، مرحله‌ی اعتبار سنجی به منزله‌ی بیان صحت و دقت یک الگوریتم به کار می‌رود. مرحله اعتبار سنجی در مباحث و موضوعات مختلف یکسان نمی‌باشد. در مبحث ادغام تصاویر نیز، مرحله‌ی اعتبار سنجی با توجه به نوع ادغام متفاوت خواهد بود. به طور مثال در بحث ادغام درون‌سنسوری و یا پنشارپنینگ، به طور مرسوم از شاخص‌های طیفی و کمی به منظور اعتبار سنجی نتایج الگوریتم‌ها و بیان دقت و صحت آن‌ها به کار می‌رود. البته بایستی ذکر گردد که نتایج بصری در مواقعی که تصاویر به عنوان داده‌های ورودی

اولین کنفرانس جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار

الگوریتم‌ها به کار گرفته می‌شوند، همواره از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو در اعتبار سنجی نتایج ادغام زمانی- مکانی تصاویر نیز همواره از مقایسه‌ی بصری تصاویر استفاده می‌گردد. همان طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، به منظور اعمال الگوریتم‌های ادغام زمانی- مکانی، همواره حداقل به یک جفت تصویر با قدرت تفکیک زمانی بالا (مدیس) و یک جفت تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا (لندست) برای بازه‌ی پیش‌بینی (یک تصویر مربوط به اول بازه و دیگری مربوط به انتهای بازه، به طور مثال برای سنجنده‌ی لندست، تصاویر مربوط به یک بازه‌ی ۱۶ روزه نیاز است) به کار گرفته می‌شود. از جفت تصاویر مدیس و تصویر لندست مربوط به زمان مرجع، برای پیش‌بینی تصویر لندست مربوط به انتهای بازه‌ی پیش‌بینی استفاده شده و الگوریتم‌های ادغام زمانی- مکانی، قابل انجام هستند. سپس از تصویر لندست واقعی مربوط به انتهای بازه‌ی پیش‌بینی برای اعتبار سنجی الگوریتم به کار گرفته شده، استفاده خواهد شد. از این رو در مقایسه‌های بصری، تصویر لندست پیش‌بینی شده در کنار تصویر لندست واقعی مربوط به انتهای بازه‌ی پیش‌بینی استفاده می‌گردد.

به منظور استفاده از یک معیار کمی نیز، طیف‌نگار دوبعدی تصویر لندست پیش‌بینی شده و لندست واقعی مربوط به انتهای زمان پیش‌بینی به صورت باند به باند نمایش داده خواهند شد. بدیهی است که هر چه پراکندگی مقادیر پیکسل‌ها در طیف‌نگارهای دو بعدی نشان داده شده به قطر اصلی (خط ۴۵ درجه) نزدیکتر بوده و پراکندگی آن‌ها به صورت خطی باشد، دقت و صحت الگوریتم ادغام به کار گرفته شده بالاتر است. همچنین از معیار RMSE نیز به طور معمول استفاده می‌گردد. بدین صورت که با در نظر گرفتن تصویر لندست پیش‌بینی شده برای انتهای بازه‌ی پیش‌بینی و تصویر لندست موجود مربوط به آن زمان، معیار مذکور به راحتی قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که هر چه معیار مذکور به صفر نزدیکتر باشد، دقت و صحت الگوریتم به کار گرفته شده بالاتر است.

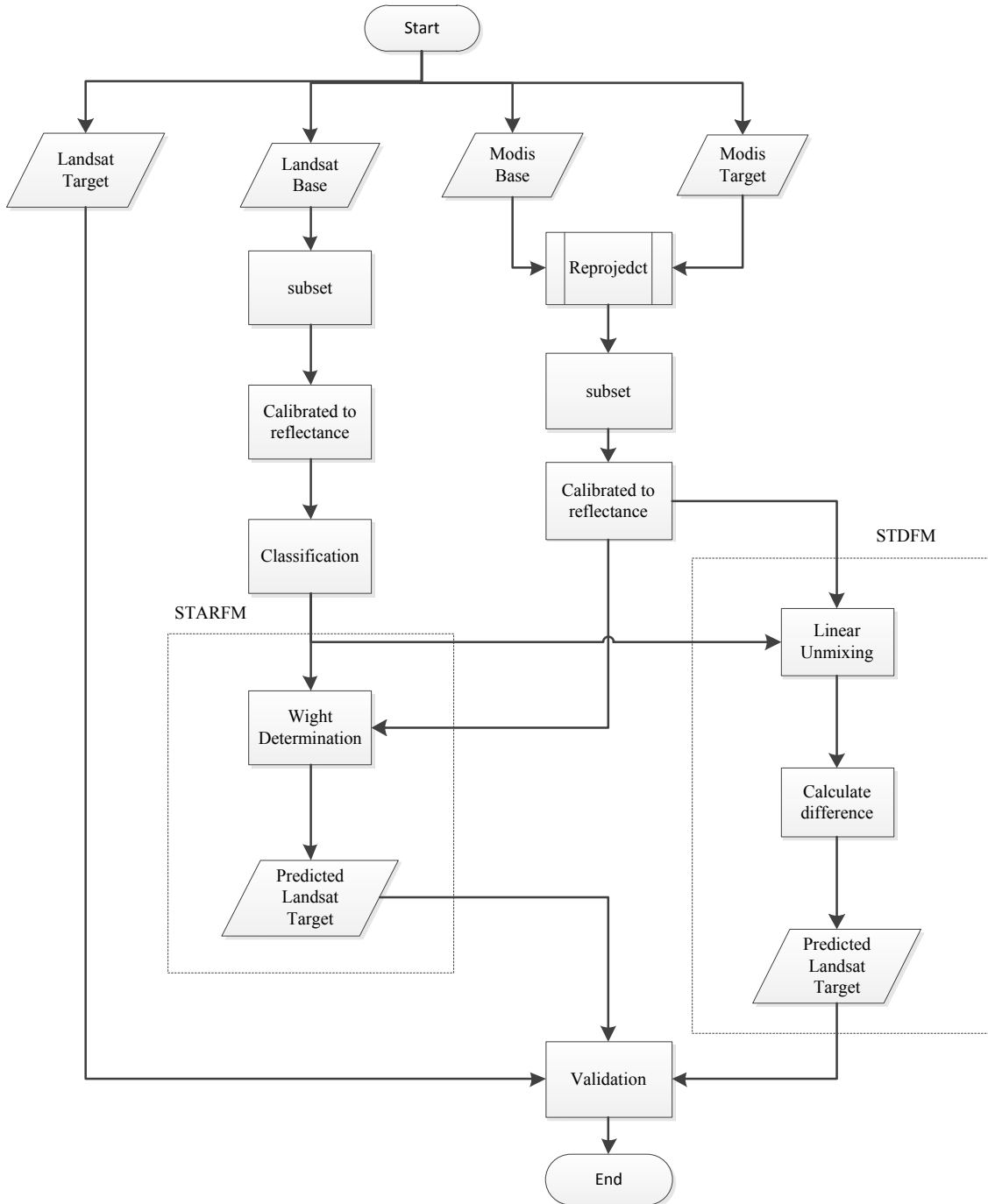
۵. بحث و بررسی

همان طور که بیان شد، با توجه به افزایش روزافزون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور آنالیز و بررسی رفتار پدیده‌های مختلف زمینی، و همچنین محدودیت در امر ساخت سنجنده‌های مختلف، بحث ادغام داده‌ها و تصاویر در سنجش از دور به منظور استفاده از مزیت‌های سنجنده‌های بیشتر، از جمله مباحثی است که امروزه موضوع تحقیقات بیشتری می‌باشد. از جمله مهمترین الگوریتم‌های ادغام تصاویر ماهواره‌ای، ادغام زمانی- مکانی تصاویر است. ادغام مذکور؛ این امکان را فراهم کرده است تا بتوان پدیده‌هایی با دوره‌ی رخداد روزانه را با دقت مکانی بالا مورد پایش قرار داد. این امکان زمانی با اهمیت‌تر خواهد بود، که با توجه به اینکه قدرت تفکیک مکانی تصاویر به کار گرفته شده (به طور معمول لندست) حتی امکان ارزیابی و برآورد خسارت و پایش تغییرات مربوط به پدیده‌هایی که باعث ایجاد تغییرات روزانه (مانند سیل، زلزله و ...) می‌شوند نیز امکان پذیر است. از این رو، ادغام زمانی- مکانی، می‌تواند در حوزه‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. همین با توجه به آنکه الگوریتم‌های ادغام مذکور بسیار جدید می‌باشند، توسعه‌ی آن‌ها هم اکنون نیز موضوع بسیاری از تحقیقات به شمار می‌رود. و از این رو می‌توان گفت که ادغام مورد نظر، از جمله مسائل روز به شمار می‌آید. از این منظر شایسته است که پژوهش‌های مرتبط با آن در داخل کشور نیز مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به اهمیت موضوع ادغام زمانی- مکانی تصاویر ماهواره‌ای، لازم است تا یک جمع‌بندی مناسبی در این بخش انجام گرفته و یک چارچوب مناسب و عملی به منظور اعمال آن بیان گردد. مطابق با آنچه در بخش مقدمه اشاره شد، بررسی تحقیقات مربوط به ادغام زمانی- مکانی این موضوع را نشان می‌دهد که علاوه بر جدید بودن موضوع (اولین الگوریتم در سال ۲۰۰۶ ارائه گردید)، سیر توسعه‌ی آن بسیار سریع بوده است. با این وجود، در تمامی الگوریتم‌های جدیدتر ارائه شده، مبنای الگوریتم‌های اولیه، تا حد بسیار زیادی ثابت بوده است. به طور مثال، در برخی الگوریتم‌های جدیدتر، به جای استفاده از دو تصویر لندست، از ۳ یا ۴ تصویر لندست استفاده شده و بدین صورت، عملکرد ادغام را افزایش داده‌اند. همچنین از دیگر موارد، می‌توان گفت که با افزایش دقت و صحت روش طبقه‌بندی سعی در افزایش

اولین کنفرانس جغرافیا، عمران، شهرسازی، معماری، مدیریت شهری و توسعه پایدار

الگوریتم‌های اولیه شده است. از این منظور، به طور خلاصه می‌توان گفت که الگوریتم‌های مبنای این ادغام (که در اینجا به تفصیل در بخش‌های ۲.۲ و ۳.۲ مورد بحث قرار گرفتند)، مبنای بسیاری از تحقیقات حال حاضر به شمار می‌رود، و این نشان از دقت و مناسب بودن آن‌ها است. به منظور اعمال عملی الگوریتم‌های مذکور، شایسته است تا مراحل آن به صورت یک چارچوب ساده بیان گردد. چارچوب مورد استفاده در شکل ۱، آورده شده است. مطابق با شکل مذکور، در مرحله اول، پس از اخذ تصاویر لازم است تا تصاویر لندست و مدیس هم مرجع گردند. و سپس تصویر لندست مبنای طبقه‌بندی شده و وارد الگوریتم‌های ادغام می‌گردد. در مرحله اعتبارسنجی نیز، از طیف‌نگار دو بعدی و معیار RMSE استفاده خواهد شد.



شکل ۱: چارچوب ادغام زمانی - مکانی سنجنده‌های لندست و مدیس.

۶. منابع و مراجع

- [1] Samarasinghea, S. M. J. S., Nandalalb, H. K., Weliwitiyac, D. P., Fowzed, J. S. M., Hazarikad, M. K., Samarakoond, L., Application of remote sensing and GIS for flood risk analysis: A case study at Kalu-Ganga River, Sri Lanka. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 38(Pt 8), 110-115. 2010.
- [2] Römer, H., Willroth, P., Kaiser, G., Vafeidis, A. T., Ludwig, R., Sterr, H., Revilla Diez, J., Potential of remote sensing techniques for tsunami hazard and vulnerability analysis—a case study from Phang-Nga province, Thailand. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(6), 2103-2126. 2012.
- [3] Ramachandra, T. V., Kumar, U., Geographic resources decision support system for land use, land cover dynamics analysis. In *Proceedings of the FOSS/GRASS Users conference* (pp. 12-14). 2004.
- [4] Zeng, Y., Zhang, J., & Van Genderen, J. L., Comparison and analysis of remote sensing data fusion techniques at feature and decision levels. In *ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes"*, 2006.
- [5] Zhang, W., Li, A., Jin, H., Bian, J., Zhang, Z., Lei, G., ... & Huang, C., Article An Enhanced Spatial and Temporal Data Fusion Model for Fusing Landsat and MODIS Surface Reflectance to Generate High Temporal Landsat-Like Data, 2013.
- [6] Notarnicola, C.; Duguay, M.; Moelg, N.; Schellenberger, T.; Tetzlaff, A.; Monsorno, R.; Costa, A.; Steurer, C.; Zebisch, M. Snow cover maps from MODIS images at 250 m resolution, Part 1: Algorithm description. *Remote Sens.* 5, 110–126, 2013.
- [7] Haq, M., Akhtar, M., Muhammad, S., Paras, S., Rahmatullah, J., Techniques of remote sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment: a case study of Sindh province, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(2), 135-141, 2012.
- [8] Ocheo, H., Application of remote sensing in deforestation monitoring: a case study of the Aberdares (Kenya). In *2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, December, 2003*.
- [9] Kostiuk, M., Using Remote Sensing Data to Detect Sea Level Change. *International Archives of Photogrammetry Remote sensing And Spatial Information Sciences*, 34(1), 105-113, 2002.
- [10] C. B. Schaaf, F. Gao, A. H. Strahler, W. Lucht, X. Li, T. Tsang, N. C. Strugnell, X. Zhang, Y. Jin, J.-P. Muller, P. Lewis, M. Barnsley, P. Hobson, M. Disney, G. Roberts, M. Dunderdale, C. Doll, R. d'Entremont, B. Hu, S. Liang, and J. L. Privette, "First operational BRDF, Albedo and Nadir reflectance products from MODIS," *Remote Sens. Environ.*, vol. 83, no. 1/2, pp. 135–148, Nov. 2002.
- [11] Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., & Hall, F., On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 2207–2218, . 2006.
- [12] Hilker, T., Wulder, M. A., Coops, N. C., Seitz, N., White, J. C., Gao, F., et al., Generation of dense time series synthetic Landsat data through data blending with MODIS using a spatial and temporal adaptive reflectance fusion model. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1988–1999, 2009.
- [13] J.J. Walker , K.M. de Beurs , R.H. Wynne , F. Gao Evaluation of Landsat and MODIS data fusion products for analysis of dryland forest phenology. *Remote Sensing of Environment* 117 , 381–393, 2012.
- [14] Dongjie Fu, Baozhang Chen , Juan Wang , Xiaolin Zhu and Thomas Hilker ,2013. *An Improved Image Fusion Approach Based on Enhanced Spatial and Temporal the Adaptive Reflectance Fusion Model* ISSN 2072-4292 10.3390/rs5126346.
- [15] Caroline M. Gevaert , F. Javier García-Haro., A comparison of STARFM and an unmixing based algorithm for Landsat and MODIS data fusion *Remote Sensing of Environment* 156 , 34–44, (2014)
- [16] Feng, M., Sexton, J. O., Huang, C., Masek, J. G., Vermote, E. F., Gao, F., et al., Global surface reflectance products from Landsat: Assessment using coincident MODIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 134, 276–293, .2013.
- [17] Amorós-López, J., Gómez-Chova, L., Alonso, L., Guanter, L., Zurita-Milla, R., Moreno, J., et al., Multitemporal fusion of Landsat/TM and ENVISAT/MERIS for crop monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 132–141, .2013.