

یک مدل دو پارامتری جهت شبیه سازی اثرات جهتی مادون قرمز حرارتی برای کاربرد های سنجش از راه دور

چکیده

اندازه گیری های دمای سطحی زمین (LST) که در دامنه مادون قرمز حرارتی (TIR) انجام می شود، در معرض نا همسانگردی جهتی شدید قرار داشته اند. به جای مدل های TIR فیزیکی تحلیلی دقیق که به اطلاعات ورودی و ظرفیت محاسباتی قابل توجه نیاز دارند، روش های پارامتریک ساده شده قادر به نشان دادن و اصلاح با دقت اثرات زاویه ای بر LST می باشند که برای کاربرد های اجرایی ماهواره نیز مناسب خواهند بود. ما در این تحقیق یک مدل دو پارامتری ساده تحت عنوان RL (روجین- لاگورده) را که نشان دهنده قابلیت هایی جهت نشان دادن علائم جهتی کاربرد های شهری و گیاهی با دقت بهتر از 1 درجه می باشد، ارائه می کنیم. این مقدار نشان دهنده RMSE (خطای جذر مربعات میانگین) به دست آمده به عنوان بهترین توجیه مدل RL نسبت به مجموعه داده های موجود می باشد. سپس روش RL با یک مجموعه داده ترکیبی ایجاد شده توسط مدل مشاهده پوشش خاک، فتوشیمی و شار انرژی (SCOPE) ایجاد شده است به طوری که تغییرات گسترده در روش های هواشناسی، سازه و ساختار سایبان و شرایط آب مد نظر قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده $RMSE \leq 0.6C$ می باشند که به عنوان یک نتیجه مناسب شناخته می شود. همچنین مدل RL از عملکرد بهتری حتی نسبت به مدل پارامتریک مشهور ونیکوو که دارای دو مجهول می باشد، برخوردار است. توانایی مدل RL جهت بازتولید بهتر پدیده نقطه داغ به بیان این خصوصیت می پردازد.

مدل RL به عنوان یک روش احتمالی برای زنجیره های پردازش عملیاتی داده های ماهواره ای TIR شناخته می شود، زیرا این مدل در برگیرنده الزامات هر دو فرمول بندی تحلیلی و تعداد محدود پارامتر های ورودی می باشد. با این حال بایستی تلاش ها جهت انجام روش های معکوس صورت پذیرد.

کلیدواژه: ناهمسانگردی جهتی^۱، دمای سطحی زمین^۲، سنجش از راه دور مادون قرمز حرارتی (TIR^۳)، مدل پارامتریک^۴، SCOPE

1. مقدمه

اندازه گیری های مادون قرمز حرارتی (TIR) به طور گسترده جهت بازیابی دمای سطحی زمین (LST) انجام می شوند که به عنوان یک عاملی مفید جهت به دست آوردن جریان های سطحی به ویژه تبخیر و میعان مورد استفاده قرار می گیرند. با این حال این اندازه گیری ها در معرض اثرات ناهمسانگردی جهتی شدید قرار دارند. می توان این موارد را به صورت تفاوت بین دمای خارج از سمت القدم و دمای سمت القدم تعریف کرد. این تفاوت ها می توانند به بیش از 15 درجه بر اساس نظریات محققین مختلف برسند (کیمز و کیرشنر 1983، لاگوراد و همکاران ، 2014).

تلاش هایی در گذشته جهت مدل سازی ناهمسانگردی تابشی TIR در شرایط هندسی متناسب، انتقال تابشی، روش های 3 بعدی و پارامتریک انجام شده است. می توان این بررسی را در تحقیقات ورهوف و همکاران (2007) مشاهده کرد. دافور و همکاران (2015) اخیرا توانایی مدل انتقال خاک- گیاه- اتمسفر (SVAT) SCOPE را (ون در تال و همکاران 2009) که شرح دقیقی از هر دو فرآیند فیزیکی و فیزیولوژیکی جهت شبیه سازی ناهمسانگردی جهتی TIR ارائه می کند، نشان داده اند. در واقع پردازش داده های TIR قادر به اصلاح داده های سنجش از راه دور TIR از اثرات

¹ Directional anisotropy

² Land surface temperature

³ Thermal infrared (TIR) remote sensing

⁴ Parametric model

جهتی با استفاده از یک روش سریع محاسباتی می باشد. بدین ترتیب، الگوریتم هایی را با (1) نیاز به برخی از داده های ورودی و (2) قابل تفسیر بودن جهت سادگی در اجرا در زنجیره های پردازش داده های عملیاتی ماهواره مورد نیاز می باشند، ارائه کرده اند. ثانیاً، مدل های ساده جهت ارزیابی سریع اثر نمونه برداری زاویه ای که در طراحی برنامه های آزمایشگاهی به منظور بهینه سازی پروتوکل تجهیزاتی به کار گرفته می شود، بسیار مفید می باشند.

مدل های پارامتریک ساده از کارایی بسیاری برخوردار می باشند. به دلیل تعداد پارامتر های ورودی محدود آنها، روش معکوس سازی از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. موضوع دیگر آن است که آنها می توانند در هر مقیاس مکانی به ویژه هنگامی که قابلیت خطی مدل امکان پذیر است، به کار گرفته شوند. علاوه بر این، مدل های پارامتریک می توانند جهت اندازه گیری صدا نسبت به مدل های تعینی که تحت تاثیر عدم اطمینان های تجمعی پایگاه داده های ورودی بزرگ قرار می گیرند، بهتر عمل کنند. مدل های پارامتریک می توانند به صورت تجربی بوده و یا مبتنی بر فرضیات فیزیکی باشند. هر چند که مدل های پارامتریک به صورت گسترده جهت اصلاح BRDF اپتیکال (تابع توزیع انعکاسی دو جهتی) به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرند، هنوز این روش جهت پردازش و تحلیل داده های TIR ارائه نشده است. با این حال یک محدودیت در این حوزه می تواند ناشی از اعمال مقادیر اولیه برای پارامتر های ورودی می باشد، مگر آن که مفهوم فیزیکی آنها به خوبی به وسیله آزمایشات محلی تعیین شود.

هنگام انجام اندازه گیری های ماهواره ای TIR به وسیله مدل سازی، یک فرض اصلی آن است که هر پیکسل حسگر به صورت جمع مقادیر فتومتریک اولیه می باشد. می توان این مورد را به صورت یک ترکیب خطی از توابع ریاضی ترسیمی به وسیله کرنل ها به صورت توابع مثلثی هندسه مشاهداتی مدل سازی کرد. در دامنه اپتیکال، روش کرنل به صورت موفقیت آمیز نشان دهنده BRDF می باشد (ونر و همکاران 1995؛ جاپ 2000؛ برون و همکاران 2002؛ ورموت و همکاران 2009). در حوزه TIR، این روش جهت شبیه سازی نا همسانگردی جهتی حساسیت سطحی به کار گرفته شده است (سیندر و ون 1998؛ سو و همکاران 2002). به منظور مدل سازی نا همسانگردی تابشی بر روی سیگنال TIR و همچنین دما از مشاهدات ماهواره های ثابت در زمین، وینیکو و همکاران (2012) یک مدل پارامتریک از نا همسانگردی TIR را بر اساس تنها دو کرنل ارائه کرده اند.

به طور کلی، می توان حل مسئله معکوس را با ایجاد جداول LUT اولیه به جای شبیه سازی های مدل TIR پیچیده جهت اولویت بندی یادگیری ماشین ارائه کرد. حتی بر اساس اطلاعات ما، هنوز این امکان در دامنه TIR مورد ارزیابی قرار نگرفته است. با این حال، در حوزه کاربرد های کنترل از راه دور، کارایی راه حل به عنوان یک نگرانی واقعی جهت مطابقت با امکان نويز دار بودن و مشاهده داده های پراکنده به شمار می آید.

این موضوع توجیه کننده روش دیگر شامل به دست آوردن روابط تحلیلی صرف نظر از فرضیات ساده شده فیزیکی می باشد. به طور مثال روجین (2000) و برون و همکاران (2002) دو مدل از نقطه داغ را با ساده سازی روش های انتقال تابشی در داخل سایبان ها برای کاربرد های سنجش از راه دور اپتیکال ارائه کرده اند. در TIR، لاگوراده و ایروین (2008) مدل روجین (2000) را جهت به دست آوردن یک رابطه پارامتریک از ناهمسانگردی جهتی با نیاز به دو پارامتر معلوم اصلاح کرده اند. اولین آزمایش قابل قبول نسبت به اندازه گیری های آزمایشگاهی در سایبان شهری به دست آمد. سادگی مدل موجب جذاب شدن آن جهت بیان ناهمسانگردی جهتی شده است.

با این حال بایستی به صورت گسترده به بررسی این روش پرداخت. این موضوع هدف این مقاله می باشد. در بخش اول، مدل بیان شده و توانایی آن جهت شبیه سازی DA نسبت به گیاهان نشان داده می شود. کمبود پایگاه های داده DA آزمایشگاهی موجب ایجاد اطلاعات زاویه ای اوج و آزیموت و موجب ارزیابی قابلیت اطمینان مدل در گام دوم با ارزیابی آن نسبت به یک پایگاه داده ترکیبی ایجاد شده SCOPE به وسیله یک مدل تعیینی می گردد. در این قسمت از SCOPE به عنوان یک تولید کننده داده برای شرایط واقعی که قابل برآورده شدن می باشند، استفاده می شود؛ ساختار سایبان، وضعیت آب، forcing هواشناسی. در نهایت بخش سوم مقایسه ای از روش وینیکو که جهت اصلاح داده های ماهواره برای اثرات DA انجام می دهد. بر اساس اطلاعات ما، مدل وینیکو هیچ جایگزینی تا کنون نداشته است، از این رو قابلیت های دو روش برای سنجش از راه دور مورد بحث قرار می گیرند.

2. مدل پارامتریک

2.1. فرمول بندی تحلیلی

مدل RL با توجه به مدل انعکاسی پیشنهادی توسط روجین (2000) با جایگزین کردن انعکاس (رابطه 25 در مقاله روجین) با دمای سطحی به دست آمده است. جهت مطابقت تعریف نا همسانگردی ما در این تعریف (تفاوت بین دمای سمت القدم و خارج از سمت القدم) دمای سمت القدم (T_N) را که منجر به رابطه زیر می شود، معرفی کرده ایم (معادله 1 لاگوراده و اروین 2008):

$$T(\theta_s, \theta_v, \varphi) - T_N = (T_{HS} - T_N) \frac{[\exp(-kf) - \exp(-kf_N)]}{[\exp(-kf_{HS}) - \exp(-kf_N)]} \quad (1)$$

تفاوت اندازه های $T(\theta_s, \theta_v, \varphi) - T_N$ نا همسانگردی برای یک زاویه مشاهداتی اوج مشخص (θ_v) و زاویه مشاهده ای آزیمومت (φ_v) ارائه شده است. تفاوت (T_N T_{HS}) (تحت عنوان ΔT_{HS}) به صورت نا همسانگردی در هندسه نقطه داغ می باشد (اندیس HS نشان دهنده نقطه داغ است). θ_s زاویه اوج خورشید بوده و φ زاویه آزیمومت نسبی بین خورشید (φ_s) و ناظر (φ_v) می باشد. بایستی توجه داشت که در این منظور از نقطه داغ بیشترین مقدار دمای روشنایی به دست آمده هنگام مشاهده انطباق جهت با جهت خورشید می باشد (خورشید در پشت فرض شده است): این موضوع ناشی از این حقیقت است که در جهت واقعی خورشید، هدف تنها المان های روشن شده از انعکاس نور خورشید می باشد که به عنوان گرم ترین نمونه ها نیز مطرح می باشند. هنگام مشاهده جهت صرف نظر از خورشید، می توان المان های بسیار زیادی را به وسیله حسگر مشاهده کرد که موجب کاهش دمای جهتی اندازه گیری شده می گردد. بنابراین هر دو نقطه داغ در ناحیه حرارتی و در ناحیه طیفی مادون قرمز (VNIR) قابل مشاهده مرتبط با یک پیکره بندی هندسی با مقداری تفاوت می باشند. در VNIR نا همسانگردی جهتی اساسا به وسیله فرآیند های انتقال تابشی در سایبان حکم فرما می شود. در حوزه TIR انتقال انرژی به شرایط فیزیکی DA افزوده می شود. در حوزه TIR انتقال انرژی ترکیبی به شرایط فیزیکی DA افزوده می شوند. در واقع، این موضوع موجب حاکم شدن پروفیل قائم دمای سطحی در سایبان بر اساس شاخص های مشاهده شده آن توسط حسگر می گردد. این موضوع نشان دهنده وابستگی TIR DA با تمامی عوامل حاکم بر تبادل انرژی می باشد: سازه و ساختار سایبان (جهت تابش و همچنین

نفوذ باد) شرایط هواشناسی، دسترسی آب جهت بخار آب و تعرق گیاه. علاوه براین، اثرات اینرسی حرارتی می توانند بر روی نا همسانگردی جهتی TIR تاثیر بگذارند. بر خلاف سایبان های شهری که در آنها یک انحراف کوچک در مورد موقعیت نقطه داغ نسبت به زوایای افتار مشاهده می شود (لاگوراده و همکاران 2010)، هیچ گونه اثر قابل توجهی بر سایبان های گیاهی مشاهده نمی شود. همچنین بایستی توجه داشت که ما در این تحقیق تنها از یک سایبان گیاهی تیره استفاده می کنیم. در واقع این حالت برای سایبان شهری که طی آن معادله (1) به دست آمده است، صادق می باشد. همچنین، ما به ارزیابی کارایی آن برای گیاهان می پردازیم. حالت سایبان های ناقص مجزا مانند دشت ها (پینهیرو و همکاران 2006)، پوشش گیاهی گسترده (کابش و همکاران 2008؛ گالیویک و همکاران 2013) یا حتی محصولات خام (مانند مراکز تولید شراب لانگوراد و همکاران 2014) که در آن نا همسانگردی جهتی TIR نشان دهنده الگو های متفاوت می باشند، در این تحقیق مورد بررسی قرار نخواهند گرفت.

تابع f فاصله زاویه ای بین جهت های سوی خورشید و ناظر را اندازه گیری می کند. می توان این تابع را به صورت زیر تعریف کرد:

$$f = \sqrt{\tan^2\theta_s + \tan^2\theta_v - 2 \tan\theta_s \tan\theta_v \cos\varphi} \quad (2)$$

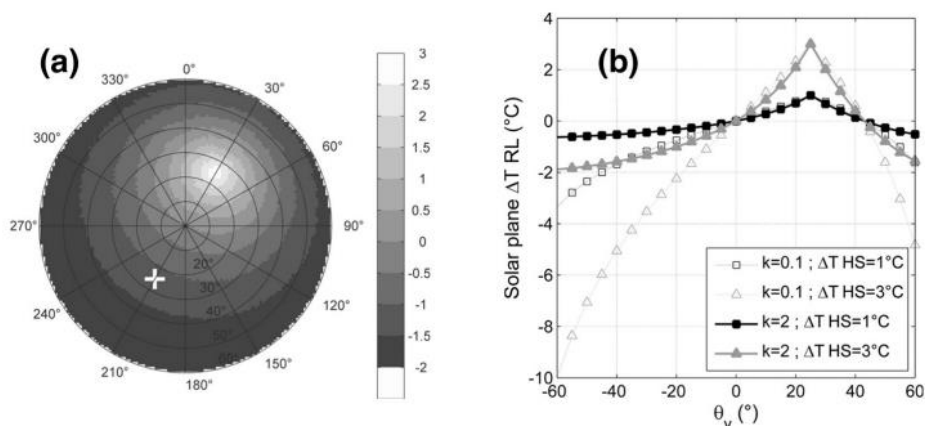
در سمت القدم ($\theta_v=0$) مقدار $f = \tan \theta_s f_N$ می باشد، در حالی که در هندسه نقطه داغ ($\theta_s = \theta_v$ و $\phi=0$) $f_{HS}=0$. بنابراین می توان معادله 1 را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta T(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \Delta T_{HS} \frac{[\exp(-kf) - \exp(-k \tan\theta_s)]}{[1 - \exp(-k \tan\theta_s)]} \quad (3)$$

در زیر ΔT_{HS} و K نشان دهنده دو پارامتر در نظر گرفته شده در مدل می باشند.

شکل 1 نشان دهنده توانایی رابطه تحلیلی (3) جهت بیان نا همسانگردی با مقادیر دلخواه $K=0.1$ و 2 و $\Delta T_{HS}=1$ و 3 درجه و با موقعیت خورشید ($\varphi_s=210^\circ$ ، $\theta_s=25^\circ$) متناظر با زمان ثبت در ابتدای بعد از می باشد. پارامتر های K و ΔT_{HS} در این قسمت تنها جهت ایجاد محدوده ای واقعی از مقادیر نا همسانگردی ارائه شده اند. شکل 1a نشان دهنده نا همسانگردی جهتی (رنگ خاکستری) شبیه سازی شده به وسیله RL (با $K=2$ و $\Delta T_{HS}=3$) می باشد. در این

قسمت نمایش نمودار در مختصات قطبی مورد استفاده قرار گرفته است (لاگوراد و همکاران 2010). این قسمت نشان دهنده جهت نمایش (نسبت به موقعیت ناظر) می باشد: شعاع بر اساس زاویه دید آزیموت φ_V جهت گیری شده اند و دوایر هم محور متناظر با زوایای دید اوج θ_V می باشند. روش ساده تصور این نمودار، فرض کردن وجود یک ناظر فرض کننده قرار گرفته در محور قائم عبوری از نمودار قطبی و توجه به سطح در جهات متناظر با جهات نمودار قطبی می باشد. به طور مثال در صورتی که ناظر به سمت جلو N-NE نگاه کند ($\varphi_V=30^\circ$)، با زاویه نمای اوج $\theta_V=25^\circ$ ، حداکثر ناهمسانگردی شکل می گیرد. این موضوع با حقیقت بیان می شود که المان های سایبان به صورت مستقیم نسبت به خورشید قرار گرفته اند. آنها نشان دهنده گرم ترین المان ها می باشند، زیرا آنها تنها متمرکز بر اثر تابش مستقیم برخورد به سطح می باشند. حداکثر اثر ناهمسانگردی هنگامی به دست می آید که نمای سطح در جهت دقیق مطابق با خورشید باشد و خورشید در پشت المان قرار گیرد که این حالت تحت عنوان نقطه داغ شناخته می شود. موقعیت خورشید نیز در شکل 1a با رنگ سفید در موقعیت مخالف با نقطه داغ در دیاگرام قطبی نشان داده شده است.



شکل 1 (a) نمودار قطبی ناهمسانگردی شبیه سازی شده RL (مقیاس خاکستری) با $K=2$ و $\Delta T_{HS}=3\text{C}$. شعاع ها و دوایر هم محور نشان دهنده زوایای مشاهده ای آزیموت φ_V (نشان دهنده شمال) و زوایای مشاهده ای اوج θ_V می باشند و نقاط سفید مطابق با موقعیت خورشید هستند (b) ناهمسانگردی در صفحه خورشیدی اصلی با $k=0.1$ (نماد های خالی) و 2 (نماد های پر) و $\Delta T_{HS}=1\text{C}$ (سیاه) و 3 (خاکستری)

ساختار جهتی ناهمسانگردی نشان داده شده به وسیله معادله (3) تقریباً مطابق با نتایج آزمایشگاهی قبل (نمودار قطبی شکل 2 در این مقاله با توجه به تحقیق لاگوراده و همکاران 2010، 2000). می باشد.

شکل 1b نشان دهنده نا همسانگردی $\Delta T(\theta_v, \theta_s, 0)$ محاسبه شده با توجه به معادله 3 شبیه سازی شده با RL در صفحه اصلی خورشید برای چهار حالت می باشد ($K=0.1$ و $\Delta T_{HS}=1C$ ؛ $K=0.1$ و $\Delta T_{HS}=3C$ ، $k=2$ و $\Delta T_{HS}=1$ ، $k=2$ و $\Delta T_{HS}=3C$). مطابق انتظار، ΔT_{HS} موجب حکم فرما شدن نا همسانگردی در نقطه داغ می گردد در حالی که K شکل تغییرات نا همسانگردی را با زوایای دید اوج تنظیم می کند. افزایش مقدار K نشان دهنده کاهش دامنه نا همسانگردی در محدوده تغییرات θ_v با شکل تیز تر نا همسانگردی در اطراف نقطه داغ می باشد. این رفتار مطابق انتظار می باشد، به طوری که مرتبط با ارائه تابع f بوده و همچنین در شکل 3 مقاله روجین (2000) نشان داده شده است.

مقادیر k و ΔT_{HS} تحت عنوان پارامتر های مدل RL دارای یک مقدار یکسان نمی باشند. بر اساس تحقیق روجین (2000)، k در محدوده اپتیکال دارای ارتباط نزدیکی به سازه سایبان در یک شاخص ناحیه صفحه ای مشخص LAI بوده و به وسیله $LAI/4$ برای یک شاخ و برگ تصادفی (مانند سایبان کروی) قابل جهت گیری می باشد. احتمال استفاده از این تقریب برای TIR به صورت دقیق تر در بخش 3.3 مورد ارزیابی قرار می گیرد. متغیر ΔT_{HS} که به تعیین پدیده نقطه داغ می پردازد، بستگی به فرآیند اعمال هواشناسی در سطح و بر روی وضعیت آب سطحی دارد. بنابراین ΔT_{HS} به عنوان اولویت و به عنوان یک متغیر که بیان آن دشوار می باشد، اشاره می شود.

در این مقاله، ما تنها توانایی مدل RL را جهت نشان دادن نا همسانگردی جهتی مورد بررسی قرار می دهیم. این موضوع به عنوان یک عامل ضروری پیش از انجام صحت سنجی به شمار می آید که بایستی در قسمت دوم انجام شود. در واقع، این فرآیند در ابتدا به کالیبراسیون مدل نیاز دارد به نحوی که بایستی بتوان پارامتر های K و ΔT_{HS} را نسبت به شرایط موجود برآورد کرد. این موضوع در انتهای مقاله مورد اشاره قرار می گیرد. بنابراین پروتوکل مورد نظر ما جهت دستیابی به بهترین توجیه از پارامتر های مدل RL در یک وضعیت آماری بر روی مجموعه داده ها تشکیل شده است که به صورت اندازه گیری یا شبیه سازی می باشد. این موضوع موجب ارائه برآوردی از مقادیر ΔT_{HS} و k حاصل از روش معکوس سازی جهت ارزیابی نهایی خطا و ارزیابی دقت می گردد.

2.1. ارزیابی آزمایشگاهی RL

2.1.1. داده های آزمایشگاهی

این بخش در تلاش است تا سازگاری مدل RL را به وسیله یک مقایسه نسبت به پایگاه های داده آزمایشگاهی موجود نشان دهد. اندازه گیری ها در طی 2 آزمایش میدانی انجام شده در شهر (لاگوراده و اروین 2008) و یک سایبان جنگلی (لاگوراده و همکاران 2000) به دست آمده اند. پروتوکل اندازه گیری مبتنی بر استفاده از دوربین های هوایی TIR مستقر بر روی یک هواپیمای کوچک می باشد. دوربین ها مجهز به لنز های زاویه گسترده بوده و در بالای هواپیما با یک زاویه انحراف جهت افزایش محدوده زوایای اوج مشاهده ای مورد بررسی مستقر شده اند. چندین خطر پرواز کوتاه که در جهت مخالف در حال پرواز بوده اند، همگی در مرکز ناحیه مورد نظر به یکدیگر رسیده اند (ناحیه شهری یا جنگل). خط اول در صفحه خورشیدی اصلی به پرواز در آمده و خط دوم در صفحه عمود پرواز کرده است. سپس خطوط اضافی در جهت هایی با زاویه ± 45 درجه از صفحه اصلی نشان داده شده اند. ترکیب هشت قطعه پروازی موجب به دست آوردن اندازه گیری های جهتی TIR برای زوایای اوج θ_v تا مقدار 60 درجه با پوشش کلی همه جهت های مشاهده ای آزمون می گردد. اساس این روش مبتنی بر این حقیقت است که این روش به میانگین گیری نا همگنی های مکانی ناحیه مورد مطالعه (خیابان ها، حیات ها، میدان ها، نواحی کوچک و غیره) و تغییرات زمانی (ناشی از فشار جریان اتمسفری، لاگوراده و همکاران 2015) می پردازد. می توان جزئیات دقیق پروتوکل را در دو مقاله مرجع فوق از لاگوراده و همکاران (2000) و لاگوراده و اروین (2008) مشاهده کرد.

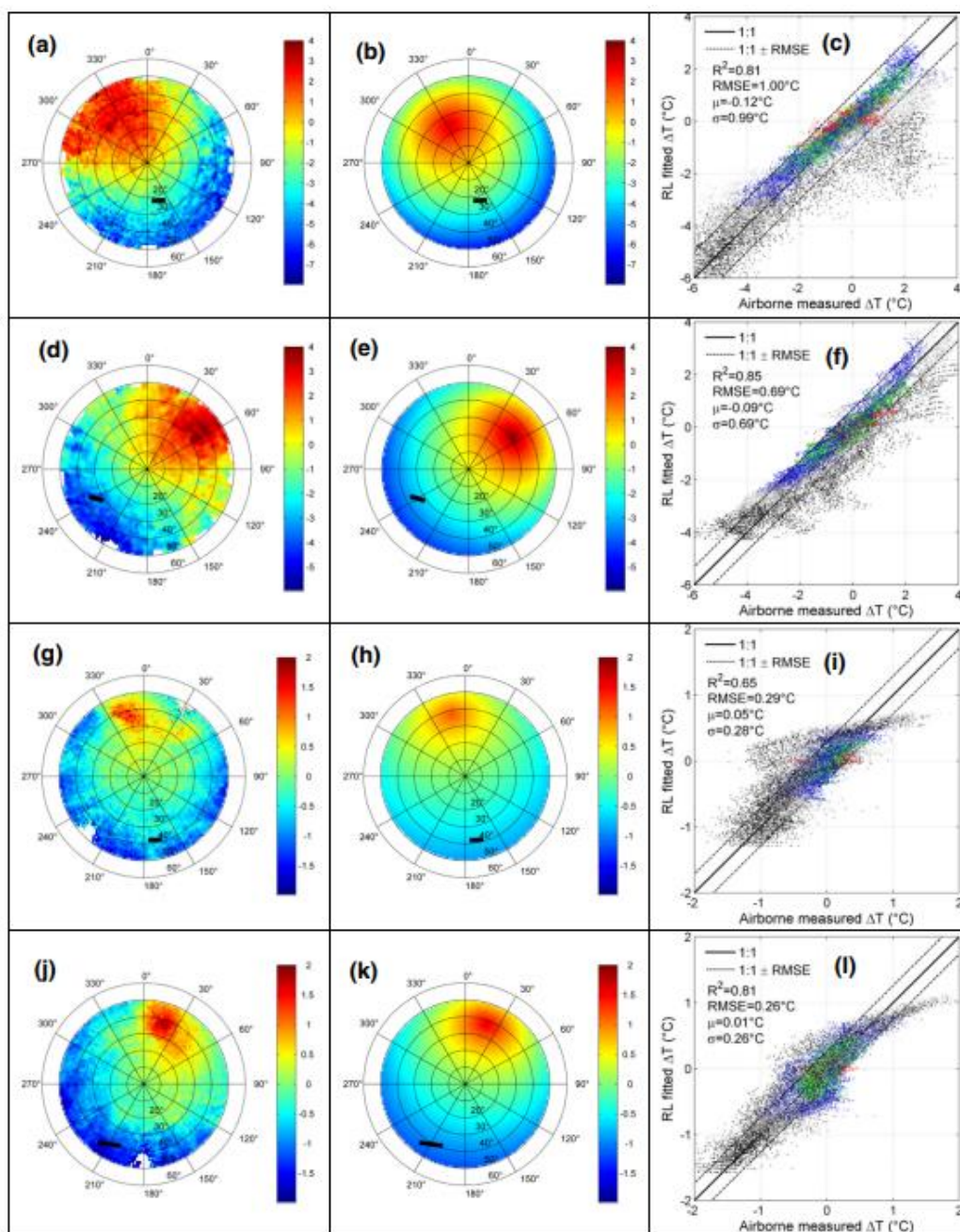
ناحیه شهری مرکز شهر تولوز بوده و در چارچوب آزمایش CAPITOU (میسون و همکاران 2008) مورد مطالعه قرار گرفته است. مرکز شهر تولوز ناحیه ای حدود $2 \times 3 \text{ km}$ می باشد. این قسمت به صورت متراکم با حیات های کوچک یا باغ ها درون واحد های ساختمانی ساخته شده است و دارای پوشش گیاهی بسیار کم (حدود 8٪) در چند خیابان یا در پارک ها می باشد. بیشتر ساختمان ها قدیمی بوده و مصالح استفاده شده شامل آجر برای دیوار و کاشی برای بام می باشد. میانگین ارتفاع دیوار ها حدود 15 متر است. خیابان ها در تمامی جهات جهت گیری شده و دارای عرض های مختلفی می باشند. یک مطالعه یکنواخت به صورت دلخواه با تفسیر تصاویر هوایی انجام شده است؛ این ناحیه به

اندازه کافی جهت در نظر گرفتن المان های مشخصه مرکز شهر و جهت استخراج نا همسانگردی TIR نمایشی بزرگ می باشد.

آزمایش دوم در یک باغ درختان کاج در لی بری (44.44 شمالی و 0.46 غربی)، به عنوان محل آزمایشگاهی INRA واقع در نزدیکی بوردو انجام شده است. این ناحیه دارای یک باغ 350x500m با قدمت 26 ساله با میانگین ارتفاع 17.6 متر برای درختان (در سال 1996) می باشد. تراکم این ناحیه به میزان 518 اصله درخت در هر هکتار می باشد. میانگین فاصله بین درختان 4.7 متر است. LAI حدود 3.1 است. زمین به صورت کامل توسط سایبان پوشانده نشده است و سطح پوشش آن به میزان حدود 70٪ برآورد می شود. علاوه براین، باغ به صورت ردیفی (با زاویه حدود 35 درجه آزیموت از شمال) کاشته شده است، اما فاصله بین ردیف ها و درختان (4 و 4.7 متر) تقریبا مشابه بوده و باغ به صورت یکدست و یکنواخت می باشد.

برای قسمت های 2 سطحی، اندازه گیری ها در میانه روز انتخاب شده اند. جدول 1 نشان دهنده موقعیت خورشید در شروع و انتهای هر مرحله می باشد.

برای هر توالی اندازه گیری (برای هر نمودار قطبی آزمایشگاهی)، برازش مدل RL و بازیابی ΔT_{HS} و K در بازه [0,50] زوایای اوج با گام 1 درجه و در بازه [0,360] با گام 1 درجه برای جهت های آزیموت انجام شده است. بدین منظور، ما از روش بهینه سازی خودکار fminsearch پیشنهادی در جعبه ابزار بهینه سازی متلب استفاده کرده ایم.



شکل 2. نا همسانگردی اندازه گیری شده در شهر تولوز (15 ژولای 2004) بین ساعت 11:15-11:49 (a) و (g) 11:20-11:52 (g) و در بالای جنگل کاج در لی بری (4 سپتامبر 1996) بین ساعت 14:23-13:48 (d) و در بالای جنگل کاج در لی بری (4 سپتامبر 1996) بین ساعت 11:20-11:52 (g) با نمودار های قطبی متناظر به دست آمده با برازش مدل RL (b-e-h-k). همچنین نمودار های توزیع RL شبیه سازی شده نسبت به نا همسانگردی هوایی اندازه گیری شده (c-f-i-l) با نقاط قرمز، سبز، خاکستری و مشکی جهت متمایز ساختن محدوده های اوج نشان داده شده اند.

جدول 1. مشخصات پرواز های انجام شده در تولوز و نواحی جنگلی لی بری. مدت زمان هر پرواز نشان داده شده است. تغییرات φ_s (که به صورت مثبت از شمال به صورت ساعت گرد اندازه گیری شده اند) و زوایای خورشیدی θ_s آزمونتی در طی مشاهدات ارائه شده اند.

Site	Date	Time (UTC)	φ_s/θ_s (begin)	φ_s/θ_s (end)
Toulouse city	2004/07/15	11:15–11:49	153.6/24.0	173.3/22.2
Toulouse city	2004/07/15	13:48–14:23	234.1/31.5	244.9/36.9
Pine forest	1996/09/04	11:20–11:52	163.1/38.7	175.8/37.6
Pine forest	1996/09/04	12:52–13:36	199.8/39.1	215.6/42.7

این فرآیند به عنوان یک روش حداقل سازی غیر خطی غیر مقید بر اساس الگوریتم Simplex (نلدنر و مئاد 1965) می باشد.

2.2.2. ارزیابی RL نسبت به یک سایبان شهری

آزمایش اول مدل RL نسبت به داده های آزمایشگاهی برای مرکز تولوز در دو تاریخ سال های 2004 و 2005 پیشنهاد شده است (4 اکتبر حدود ساعت 11 و 25 فوریه ساعت 14:10). بایستی توجه داشت که با توجه به موقعیت محل نزدیک به طول جغرافیایی 0، می توان زمان ها را به صورت مشابه بر حسب UTC یا LTC در این مقاله بیان کرد. از UTC در این مقاله استفاده می شود. تاریخ های پاییز و زمستان موجب شده است تا نقطه داغ متناظر با زوایای خورشیدی اوج بزرگ حدود 50 و 60 درجه باشد و مدل نسبت به نا همسانگردی اندازه گیری شده نسبت به صفحه اصلی برازش شده است (با جمع تمامی اندازه گیری ها در صفحات تشکیل شده بین صفحه خورشیدی اصلی). تناظر بین اندازه گیری ها و شبیه سازی های RL به عنوان نتیجه ای از بهترین برازش به صورت نسبتا مناسب با ضریب همبستگی 0.96 و 0.93 و خطای جذر میانگین ریشه (RMSE) 0.5 درجه و 1 درجه برای 4 اکتبر و 25 اکتبر می باشند (شکل 11 مقاله لاگوراده و اروین 2008).

نتایج ارائه شده نسبت به شهری مشابه در طی آزمایش CAPITOUL مشابه در شرایط تابستانی (15 ژولای 2004) با برازش مدل RL بر کل پایگاه داده آزمایشگاهی برای تمامی جهات آزمون و برای زوایای دید $0 \leq \theta_v \leq 50$

به دست آمده اند. نتایج در شکل 2a و b برای ساعت 11:30 UTC و در شکل 2d و e برای ساعت 14:00 UTC نشان داده شده اند.

متناظر کلی برای هر دو حالت برقرار می باشد. تغییرات موقعیت نقطه داغ با زمان روز نیز نشان داده شده است. با این حال توزیع مقادیر نا همسانگردی در اطراف نقطه داغ در داده های آزمایشگاهی برای جهت های دید آزمون نسبت به شمال، غرب و شرق قابل مشاهده می باشند. این موضوع برای زمان موجود، غیر قابل توصیف می باشد، اما می توان آن را مرتبط با جهت های خیابان در شهر (دو بلوار عمود NW-SE جهت گیری شده و NE-SW در تصاویر هوایی شهر (شکل 1 تحقیق لاگوراده و همکاران 2010)) دانست. نمودار های توزیع در شکل های 2c و f نشان دهنده درجه اطمینان مدل RL می باشند. می توان تمایل RL به برآورد دست پایین اندازه گیری ها برای زوایای اوج بزرگتر از 40 درجه را مشاهده کرد. انحراف گروهی از نقاط از خط 1:1 در شکل 2c مرتبط با توزیع اندازه گیری های آزمایشگاهی در اطراف نقطه داغ مطابق توضیحات فوق می باشد. علی رغم این موضوع، علائم جهتی به خوبی با ضریب همبستگی بزرگتر 0.8 و RMSE کمتر از 1 درجه به تصویر کشیده شده اند.

2.2.3. ارزیابی RL نسبت به یک سایبان جنگلی

شکل 2g و z نشان دهنده نمودار های قطبی نا همسانگردی اندازه گیری شده در 2 پرواز بین ساعت های 11:20 و 11:52 و بین ساعت های 12:52 و 13:36 UTC در 4 سپتامبر 1996 می باشد (لاگوراده و همکاران 2000) در حالی که شکل 2h و k نشان دهنده شبیه سازی های RL متناظر می باشند. همانند سایبان های شهری، تغییرات جهتی به صورت صحیح به وسیله RL بیان می شوند. نا همسانگردی شبیه سازی شده در مجاورت نقطه داغ اندکی کمتر از حالت اندازه گیری شده به وسیله 0.75C مطابق نمودار های شکل 2i و a می باشد. آمار های نشان دهنده ضریب همبستگی 0.65 و 0.81 و $RMSE=0.29$ و 0.26 درجه برای پرواز اول و دوم می باشند. انحراف بین نا همسانگردی اندازه گیری شده و برازش شده بالاتر از خط 1:1 در شکل 2i متناظر با جهت دید آزمون حدود زاویه 320 درجه می باشد که طی آن یک ناپیوستگی در داده های آزمایشگاهی مشاهده می شود (شکل 2g). ساختار خطی

این ناپیوستگی نشان دهنده نقص اندازه گیری شاهر شده هنگام ترکیب محور های مختلف و تحت تاثیر شرایط هواشناسی محیطی مختلف- سرعت باد شامل تغییرات دمای سطحی می باشد. می توان اثر احتمالی جهت ردیف (35) درجه نسبت به شمال) را مشاهده کرد. با این حال RL دارای برآزش مناسب با داده های آزمایشگاهی می باشد. تست های مقدماتی سازگاری در یک شهر و در یک سایبان جنگلی نشان دهنده توانایی RL جهت بیان DA می باشد، اما کمبود داده های نا همسانگردی مشابه نسبت به سطوح دیگر و دیگر شرایط موجب ارزیابی دشوار مدل RL می گردد. در واقع مطالعه درجه حساسیت اخیر (دافور و همکاران 2015) نشان می دهد که نا همسانگردی جهت TIR تحت تاثیر چندین عامل می باشند: موقعیت خورشید (فصل، تاریخ و زمان روز)، ساختار سایبان (شاخص ناحیه برگ، تابع توزیع زاویه شاخ و برگ و پارامتر نقطه داغ) اعمال شرایط اقلیمی و هواشناسی و وضعیت آب می باشد. می توان ارزیابی گسترده از مدل RL برای انواع حالت ها را انجام داد. این موضوع تنها به وسیله پایگاه های داده ای شبیه سازی شده بزرگ قابل انجام می باشند. بخش بعد به بیان این موضوع با استفاده از مدل SCOPE به عنوان یک عامل ایجاد کننده داده ها می پردازد.

3. تعمیم SCOPE

3.1. مدل SCOPE

مدل SCOPE (ون در تول و همکاران 2009) یک مدل SVAT چند لایه می باشد که جهت شبیه سازی توامان تابش خورشیدی بازتابی جهتی، تابش حرارتی بازتابی و سیگنال های فلئورسنس خورشید در TOC (بالای سایبان) سایبان های یکنواخت همراه با جریان های انرژی، آب و CO₂ ارائه ده اند. این مدل مبتنی بر ترکیبی از چندین مدل که بیان کننده انتقال تابشی، متلاطم و رمی در داخل سایبان می باشند، با در نظر گرفتن زیست شیمی برگ ها و فرآیند های ایروودینامیک می باشد. همراه با روش چند لایه ای، این روش دارای کارکردی مناسب جهت مطالعه سایبان های دارای شاخ و برگ می باشد. این موضوع بیان کننده انتخاب نهایی ما برای SCOPE در میان مدل های دیگر مانند CUPID/TGRM (هانگ و همکاران 2008) یا حتی DART (گاستلو- اتشگروی و همکاران 2004) می باشد. شاخص

های اصلی مدل به طور اجمالی مورد اشاره قرار گرفته اند. برای جزئیات بیشتر، خواننده می تواند به مقاله معرفی کننده مدل SCOPE مراجعه کند.

در مدل SCOPE، سایبان به وسیله بیان 60 لایه افقی برای گیاهان و یک لایه برای خاک مورد اشاره قرار می گیرد. پارامتر های کلاسیک به منظور احتساب سازه سایبان در لایه های گیاهی مانند LAI، توزیع زوایای برگ یا احتمال نسبت های شکاف بین آنها مورد استفاده قرار می گیرند. برگ ها در 13 زاویه اوج نسبت به 36 جهت آزیموتی توزیع می شوند. مدل 4SAIL متحد (ورهوف و همکاران 2007) به منظور شبیه سازی انتقال تابشی مورد استفاده قرار می گیرد. این روش تابش خالص و درخشندگی در بازه طیفی [0.4-50] میکرومتر را محاسبه می کند. در بازه اپتیکال، مدل PROSPECT (یاکومود و برت 1990) جهت به دست آوردن طیف های انتقالی و انعکاسی برای گیاهان مورد استفاده قرار می گیرد. برای طول موج های بیشتر از 2.5 میکرومتر، حساسیت برگ ها به میزان 0.97 بیان شده و درجه انتقال به میزان 0 فرض می شود. در مورد خاک، بایستی یک طیف انعکاسی ارائه کرد.

محاسبه جریان های انرژی (حرارت قابل احساس، حرارت جانبی، حرارت خاک) و شار CO_2 مبتنی بر فرآیند های زیست شیمیایی و ایرودینامیک می باشد. فرآیند های زیست شیمیایی شامل مدل کوان (کوان 1977) جهت محاسبه رسانایی روزنه می باشد. مدل فرکوهر و همکاران (1989) فتوسنتز از ظرفیت کربوکسیلاسیون به عنوان ورودی استفاده می کند که این پارامتر کنترل کننده ظرفیت فتوسنتز می باشد. مقاومت های ایرودینامیکی از روش ولاس و ورهو (2000) محاسبه شده و مقاومت سطحی خاک (r_{gs}) نسبت به رطوبت خاک قابل بیان می باشد.

علاوه بر جریان ها، SCOPE امکان محاسبه انعکاس های جهتی در دامنه خورشیدی و دما های روشنایی جهتی در حوزه حرارتی را ممکن می سازد. نتایج اثر جهتی از ترکیب احتمال مشاهده یا یک المان برگ و خاک و از احتمال تابش نور خورشید/ اثر سایه برای خاک یا برگ آنها ارائه می شود. این احتمالات برای هر لایه گیاه محاسبه می شود که این موضوع موجب برآورد تابش منتشر شده از سوی ناحیه سایه و تحت تابش خورشید می گردد و خاک به وسیله ناظر در یک جهت مشخص بالای سایبان مشاهده می شود. با جمع این تابش ها (جهت جزئیات بیشتر، معادله 35-

28 ون در تول و همکاران (2009)، می توان تابش جهتی را در بالای سایبان (TOC)، $L(\theta, \phi)$ به دست آورد که به دمای روشنایی جهتی $(\theta, \phi)T_b$ بر اساس معادله استفان-بولتزمن منتقل می شود:

$$\pi L(\theta, \phi) = \sigma T_b^4(\theta, \phi) \quad (4)$$

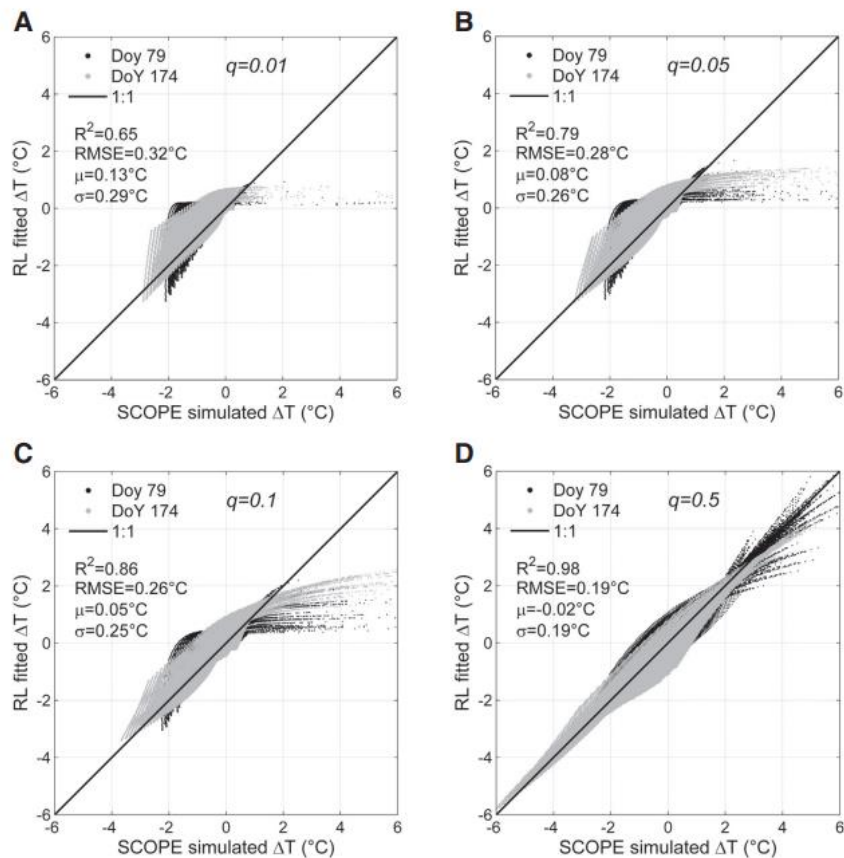
که σ نشان دهنده بولتزمن استفان می باشد.

توانایی SCOPE جهت شبیه سازی شار انرژی و همچنین دمای روشنایی جهتی TIR و نا همسانگردی جهتی در TOC به وسیله دافور و همکاران (2015) مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مولفین در ابتدا به مقایسه نتایج شبیه سازی های دو پایگاه داده آزمایشگاهی اندازه گیری شده زمین در زمستان و جنگل درختان کاج پرداخته اند که شار حرارتی قابل احساس و پنهانی با انتشار CO_2 در دسترس بوده اند. این دما های روشنایی جهتی نسبت به شمال و جنوب در محل گیاهان زمستانی اندازه گیری شده اند. در منطقه جنگل درختان کاج، مجموعه ای از اندازه گیری های دمای روشنایی جهتی نسبت به جهت غرب و یک مجموعه ثانویه با اندازه گیری های انجام شده در نقطه داغ انجام شده اند، به نحوی که رادیوترنومتر بر روی یک پلتفرم موتوری نسبت به موقعیت خورشید در طول روز تعبیه شده بود. میانگین RMSE حدود 30 و 50 برای شار های حرارتی قابل حساس و پنهانی یافت شده اند، در حالی که برای دمای روشنایی جهتی، RMSE بین 1 و 1.5 درجه می باشد. قسمت دوم تحقیق نشان می دهد که مدل SCOPE قادر به شبیه سازی کیفی علائم جهتی نا همسانگردی به صورت موفقیت آمیز می باشد (تفاوت بین دمای سمت القدم و خارج از سمت القدم). این مقاله که به عنوان صحت سنجی SCOPE مطرح می باشد، نسبت به پایگاه داده سایبان جنگلی در بخش 2.2.3 انجام شده است. همچنین پایگاه داده SCOPE شبیه سازی شده و پایگاه داده آزمایشگاهی نسبت به سایبان جنگلی موجب ایجاد منبعی مستقل از اطلاعات برای برازش مدل های پارامتری مطالعه شده در مقاله می گردد.

3.2. ایجاد یک پایگاه داده ترکیبی

با استفاده از SCOPE به عنوان ایجاد کننده داده، ما یک پایگاه داده ترکیبی از نا همسانگردی جهتی TIR را ایجاد کرده ایم. این مجموعه، یک پایگاه داده می باشد که به وسیله دافور و همکاران (2015) جهت مطالعه درجه حساسیت

نا همسانگردی جهتی نسبت به عوامل کلی آن مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر ورودی ارائه شده نسبت به این عوامل به صورت مجدد در این قسمت مورد اشاره قرار گرفته اند. می توان این طور در نظر گرفت که آنها موجب ایجاد محدوده ای نمایشی از برآورده شدن اثرات نا همسانگردی در عمل می شوند. شبیه سازی های SCOPE در ساعت 13:00 برای دو روز تحت شرایط ابری نزدیک به اعتدال بهاری (Doy 79) و نسبت به انقلاب تابستانی (Doy 174) ارائه شده اند. این تاریخ جهت اعمال تابش کلی و موقعیت خورشید و تغییر گسترده آن اعمال شده اند. ما همچنین شبیه سازی هایی را بر Doy 354 (نزدیک به انقلاب زمستانی) انجام داده ایم، اما نا همسانگردی در این فصل بسیار کم بوده است ($no > 0.5C$) در بازه زوایای اوج در نظر گرفته شده در این تحقیق به دلیل تابش کلی کم و موقعیت نقطه داغ در یک زاویه اوج بزرگ در نظر گرفته شده است؛ نتایج به دست آمده در این روز به عنوان یک عامل بی اهمیت در نظر گرفته شده و بنابراین از آنها صرف نظر شده است. ما متمرکز بر ساعت 13:00 می باشیم، زیرا این حالت متناظر با زمان عبور یک ماموریت مکانی TIR آینده می باشد (لاگورده و همکاران 2013). با این حال محدود کردن پایگاه داده به یک زمان مشخص موجب به خطر انداختن درجه نمایش آن نمی گردد، زیرا تغییرات شرایط اعمالی در طی روز به صورت کامل به وسیله تغییرات بین تاریخ ها بازتولید می شود.



شکل 3. مقایسه ای از ناهمسانگردی SCOPE برازش شده RL برای DoY 79 و برای $q=0.01$ (a) $q=0.05$ (b) $q=0.1$ (c) و $q=0.5$ (d)

داده های هواشناسی ورودی اصلی (تابش کلی، طول موج، تابش و دمای هوا و رطوبت) از ایستگاه اوراده واقع در نزدیکی تولوز (فرانسه) گرفته شده اند که موجب محدود شدن مطالعه ما به عرض جغرافیایی 45 درجه می گردد. سرعت باد در یک مقدار ثابت 2m.s^{-1} در نظر گرفته شده است، زیرا دافور و همکاران (2015) نشان داده اند که اثر آن بر ناهمسانگردی بر خلاف شرایط دیگر مانند وضعیت آب سطحی یا تابش جهانی کم می باشد. ما به شبیه سازی یک سایبان به ارتفاع 1 متر با یک تابع توزیع زاویه کروی پرداخته ایم. سازه های سایبانی مختلف با ارائه شاخص ناحیه سطحی 6 ایجاد شده و 4 مقدار از پارمتر نقطه داغ q به صورت نسبت بین اندازه و ارتفاع سایبان تعریف شده اند. (0.01، 0.05، 0.1 و 0.5). 4 حالت آب با بررسی اثر خیس/خشکی خاک/گیاه (مرطوب، خشک، خاک مرطوب/گیاه خشک، خاک خشک/گیاه مرطوب) مطابق زیر در نظر گرفته شده اند. در مورد گیاه، حداکثر کربوکسیلاسیون

V_{cmo} (پارامتر مربوط به فعالیت فتوسنتز و بنابراین رسانایی روزنه) در مقدار 125 و $25 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ جهت شبیه سازی رسانایی روزنه کم جهت شبیه سازی رسانایی روزنه کم و زیاد به منظور شبیه سازی شرایط خشک و خیس در نظر گرفته شده اند. در مورد خاک، مقاومت سطحی (r_{ss}) به میزان 200 و 2000 s.m^{-1} لحاظ شده است که متناظر با شرایط خشک و خیس می باشد. هزینه محدود ادغام به عنوان پارامتر حاکم بر رسانایی روزنه به میزان $2000 \text{ mol.mol}^{-1}$ لحاظ شده است. پایگاه داده شبیه سازی شده حاصله متشکل از 200 حالت می باشد. برای هر حالت، نا همسانگردی برای تمامی جهات از 1 تا 360 و از سمت القدم 50 با گام های 1 درجه انتخاب شده اند. محدودیت زاویه اوج مد نظر قرار گرفته است، زیرا متناظر با محدوده مفیدی از زوایای دید اوج برای ابزار های بزرگ موجود مانند MODIS یا VIRUS می باشد. در واقع علی رغم آن که حداکثر زاویه 55 درجه منجر به زاویه دید اوج 65 درجه در لبه برای این حسگر ها می گردد، ما زاویه بیشتر از 50 درجه را در نظر گرفته ایم که این اندازه گیری ها اغلب به وسیله اثرات اتمسفری محدود می شود.

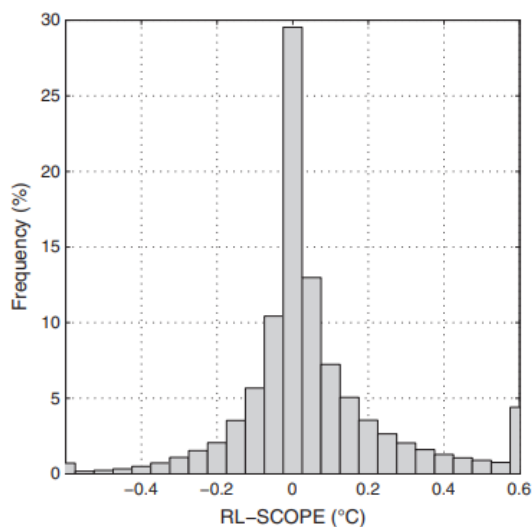
3.3. مقایسه RL و نا همسانگردی جهتی SCOPE

شکل 3a-d نشان دهنده نا همسانگردی به دست آمده با مدل RL بر روی داده های شبیه سازی شده SCOPE برای مجموعه داده های کامل می باشد. نتایج نشان دهنده تمایز مقادیر پارامتر نقطه داغ از $q=0.01$ تا $q=0.5$ می باشد (شکل 3d) می باشد.

اثر قابل توجه پارامتر q آشکار می باشد. می توان دریافت که توافق و تناظر کلی بین مقادیر شبیه سازی شده RL و SCOPE وجود دارد، و بازه مقادیر نا همسانگردی با q افزایش می یابد. با این حال برای مقادیر q بیشتر از 0.1 (شکل 3a-c)، و به ویژه برای $q=0.5$ و $q=-0.1$ ، می توان انحراف از خط 1:1 را مشاهده کرد که متناظر با مقادیر نا همسانگردی SCOPE بزرگتر از 2 درجه می باشد. همچنین این مقادیر متناظر با نقاط قرار گرفته در مجاورت نقطه داغ می باشند. می توان این موضوع را به وسیله یک شکل تیز از نقطه داغ که به وسیله معادله 1 قابل بیان نیست، ارائه کرد. علی رغم این که ممکن است نمایش گمراه کننده باشد، تراکم نقاط در نواحی مشکی و خاسکتری از خط

1:1 در شکل 3b و c منحرف می شود که چندان حائز اهمیت نمی باشد. برای $q=0.5$ ، تناظر بین RL و SCOPE به خوبی وجود دارد. محاسبه RMSE و R^2 موید کیفیت کلی برازش RL نسبت به SCOPE می باشد: R^2 با q از 0.65 برای $q=0.01$ تا 0.98 برای $q=0.5$ افزایش می یابد در حالی که RMSE از 0.32 درجه برای $q=0.01$ تا 0.19 برای $q=0.5$ کاهش می یابد. RMSE مساوی با 0.28 و 0.26 برای $q=0.05$ (شکل 3b) و $q=0.1$ (شکل 3c) می باشد. با این حال، هر چند که می توان دامنه بزرگی از مقادیر را برای پارامتر q در محدوده شبیه سازی انعکاس جهتی در دامنه خورشیدی مشاهده کرد، هیچ گونه شاخصی در مورد احتمال بیان آنها به صورت مستقیم در دامنه TR وجود ندارد.

توانایی دیگر مدل RL، بیان ناهمسانگردی به صورت مناسب و همچنین تایید وزن تفاوت ها در ناحیه نقطه داغ در شکل 4 می باشد که نشان دهنده هیستوگرام بر روی انحرافات بین داده های RL و SCOPE می باشد.



شکل 4. هیستوگرام تفاوت بین RL برازش شده و ناهمسانگردی SCOPE شبیه سازی شده

این ناحیه در زاویه 0 درجه قرار گرفته و نشان دهنده تقارن نسبی می باشد. یک مقدار ماکزیمم نسبی در سمت چپ ظاهر شده است که متناظر با داده های نقطه داغ بوده و نشان می دهد که کمتر از 1٪ تفاوت های بین RL و SCOPE کمتر از $-0.6C$ می باشد. بیشینه دیگر در سمت راست هیستوگرام متناظر با داده هایی است که طی آن RL ناهمسانگردی SCOPE را بیش از 0.6 درجه برآورد می کند. تحلیل دقیق نتیجه برازش RL نسبت به SCOPE نشان

می دهد که این تفاوت های بزرگ در حالت خاک های خشک با LAI بین 1 و 2 رخ می دهند. هیستوگرام تجمعی توزیع تفاوت مطلق بین داده های RL و SCOPE (که در اینجا نشان داده نشده اند) نشان می دهد که تفاوت های بین دو مدل در محدوده 60٪ و 90٪ برای مقادیر کمتر از 0.1 درجه و 0.4 درجه می باشد. در نهایت، تنها 5٪ داده ها دارای تفاوت بیشتر از 0.6 درجه می باشند.

با توجه به بازیابی بهینه دو پارامتر مدل RL، نا همسانگردی جهتی TIR به صورت مناسب نسبت به داده های SCOPE مقایسه می شود. تحلیل کامل پارامتر های بازیابی شده ΔT_{HS} و K نشان می دهد که این اطلاعات به عنوان مقادیر اولیه قابل تعمیم نمی باشند، زیرا آنها از روند های مشخصی به صورت تابعی از عوامل اصلی یک نا همسانگردی مانند تابش کلی، سازه سایبان و حالت آب تبعیت نمی کنند. همان طور که پیشتر بیان شد، روجین (2000) در رابطه خود که هت شبیه سازی BRDF نقطه داغ اپتیکال انجام می شود نشان داده است که می توان پارامتر K را به مقدار LAI/4 برای سایبان های کروی لحاظ کرد. در این تحقیق، مقادیر K بازیابی شده با LAI و q بدون یافتن یک پارامتر ساده k تغییر می کنند. علاوه بر این k دارای مقادیر منفی برای برخی از حالت ها با q=0.01 برای DoY174 و با q بیشتر از 0.1 برای DoY79 می باشد. بنابراین ما در این تحقیق، نمی توانیم مقدار k را به میزان LAI/4 لحاظ کنیم که این موضوع موجب نیاز به برازش K و ΔT_{HS} در معکوس سازی مدل RL می گردد. با این حال ما انجام تحقیقات بیشتری را در این قسمت پیشنهاد کرده ایم. در واقع تلاش هایی ارائه شده توسط ما با مقدار LAI/4 به اندازه کافی دقیق نبوده اند، اما می توان در این مورد به چند موضوع اشاره کرد: آیا به این دلیل که پارامتر های ورودی در SCOPE بدون هیچ گونه محدودیتی، اعمال شده و موجب ایجاد نتایج غیر واقعی شده اند؟ آیا به دلیل نبود واقعیت در SCOPE شبیه سازی شده نقطه داغ که ارزیابی آن به دلیل عدم مستند سازی در مراجع دشوار می باشد، این موضوع اتفاق افتاده است؟

ما نشان داده ایم که RL دارای عملکردی مناسب در یک مطالعه موردی با داده های هواشناسی (به ویژه زوایای اوج خورشیدی) می باشد که می تواند عرض جغرافیایی 45 درجه را برآورده کند. این موضوع در صورت استفاده از آن در ناحیه گرمسیری که خورشید در ناحیه اوج خود به مدت دو بار در سال قرار می گیرد، تعجب آور می باشد. در واقع در

این پیکره بندی هندسی، ΔT_{HS} به صفر درجه میل می کند، زیرا موقعیت نقطه داغ و سمت القدم بر یکدیگر منطبق می شوند. بایستی این نتیجه به طور دقیق تر با پایگاه های داده واقعی اندازه گیری شده در این عرض های جغرافیایی مورد مطالعه قرار گیرد، اما در چارچوب این مطالعه، ما نمی توانیم امکان در نظر گرفتن مقدار K را به میزان $LAI/4$ لحاظ کنی

4. مقایسه بین قابلیت های RL و وینیکو

4.1. روش کرنل وینیکو

وینیکو و همکاران (2012) یک مدل پارامتریک را بر اساس سه کرنل طراحی شده جهت تعدیل LST اندازه گیری شده توسط ماهواره ارائه کرده اند:

$$\frac{T(\theta_s, \theta_v, \varphi)}{T_{nadir}} = 1 + A \cdot E(\theta_v) + D \cdot S(\theta_v, \theta_s, \varphi) \quad (5)$$

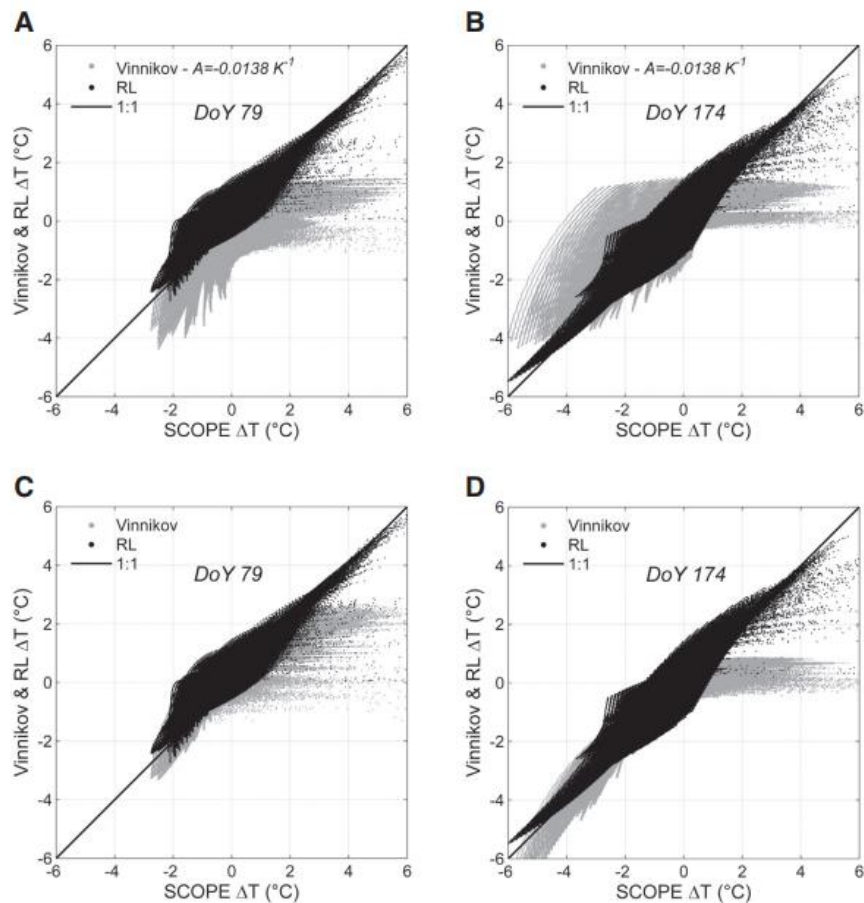
که $T(\theta_v, \theta_s, \phi)$ نشان دهنده دمای (بر حسب کلوین) اندازه گیری شده خارج از سمت القدم و T_{nadir} نشان دهنده دما در سمت القدم (بر حسب کلوین) می باشند. عبارت اول (1) نقش مهمی را در کرنل همسانگرد ایفا می کند به طوری که موجب ارائه مساوی شدن نسبت $\frac{T(\theta_v, \theta_s, \varphi)}{T_{nadir}}$ با 1 هنگامی که $T(\theta_v, \theta_s, \phi)$ در سمت القدم اندازه گیری شود، می گردد.

$E(\theta_v)$ و $S(\theta_v, \theta_s, \phi)$ به عنوان یک کرنل تابنده و به عنوان یک کرنل خورشیدی بیان می شوند. این مولفه ها به صورت زیر بیان می شوند:

$$E(\theta_v) = 1 - \cos(\theta_v) \quad (6)$$

$$S(\theta_v, \theta_s, \varphi) = \sin(\theta_v) \cos(\theta_s) \sin(\theta_s) \cos(\theta_s - \theta_v) \cos(\varphi) \quad (7)$$

A و D نشان دهنده ضرائب متناظر درجه حساسیت و کرنل های خورشیدی می باشند. وینیکو و همکاران (2012) یک مقدار جهانی را برای A ($A = -0.0138k^{-1}$) پیشنهاد کرده اند که منجر به یک مدل یک پارامتری شده و D به عنوان یک پارامتر جهت تنظیم شناخته می شود.



شکل 5. مقایسه نا همسانگردی RL برازش شده (مشکی رنگ) و برازش شده وینیکو (خاکستری رنگ) نسبت به ناهمسانگردی SCOPE شبیه سازی شده برای DoY 79 (a,c) و 174 (b,d). در (a) و (b) مدل وینیکو به نسبت به D تنظیم می شود در حالی که در (c) و (d) نسبت به A و D تنظیم می شود. در حال حاضر این مدل تنها مدلی است که موجب اصلاح داده های ماهواره نسبت به اثرات جهت می گردد. می توان RL را به عنوان یک شاخص برای این هدف شناخت. به همین دلیل دو روش با یکدیگر مقایسه می شوند.

4.2. مقایسه بین قابلیت های RL و وینیکو

این مقایسه با هدف ارزیابی تفاوت های بین دو مدل و جهت مطالعه کارایی احتمالی RL جهت اصلاح اندازه گیری های LST انجام می شود. پایگاه داده ترکیبی ایجا شده به وسیله SCOPE و معرفی شده در بخش 3.2 به عنوان مرجع در نظر گرفته می شود.

وینیکو و همکاران (2012) پارامتر A مدل آنها را به عنوان یک مدل جهانی در نظر گرفته اند که موجب می شود تا این روش به صورت 1 پارامتری بر خلاف RL که نیازمند معلوم بودن دو پارامتر K و ΔT می باشد، ارائه شود. با این حال، می توان از مدل وینیکو به عنوان یک روش دو پارامتری مطابق تحقیق پیرس و همکاران (2015) استفاده کرد. این نتایج نا همسانگردی مورد مقایسه قرار می گیرند:

• RL تنظیم شده با بازیابی هر دو K و ΔT

• وینیکو تنظیم شده با بازیابی تنها D

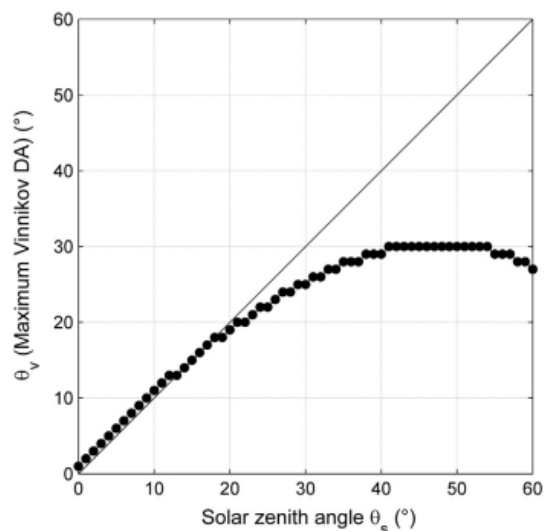
• وینیکو تنظیم شده با بازیابی A و D

هر دو روش به طور دقیق از یک تعریف در مورد نا همسانگردی استفاده نمی کنند: وینیکو و همکاران (2012) آن را به صورت نسبت بین دمای خارج از سمت القدم به دمای سمت القدم تعریف کرده است در حالی که RL ناهمسانگردی را به صورت تفاوت بین آنها در نظر می گیرد. جهت تفسیر ساده تر نتایج، ما از تعریف دوم استفاده کرده ایم. بنابراین معادله 5 وینیکو به صورت زیر می باشد:

$$T(\theta_s, \theta_v, \varphi) - T_{nadir} = T_{nadir} (A \cdot E(\theta_v) + D \cdot S(\theta_v, \theta_s, \varphi)) \quad (8)$$

شکل 5 نشان دهنده نا همسانگردی مطابق آنچه که شبیه سازی شده است به صورت تابعی از ناهمسانگردی شبیه سازی شده به وسیله SCOPE می باشد. نتایج به دست آمده با مدل تنظیم شده وینیکو بر روی D تنها برای DOY 79 و 174 در شکل های 5a و b به دست آمده اند. دو شکل پایین متناظر (شکل 5c و d) برای تئوری وینیکو با دو پارامتر ارائه شده نشان داده شده اند. با این حال مدل وینیکو نشان دهنده توزیع بیشتر نسبت به مدل RL می باشد به طوری که A به میزان $0.0138K^{-1}$ ارائه می شود. آمارها نشان می دهند که RL دارای عملکرد بهتر نسبت به روش وینیکو با RMSE بین SCOPE و RL 0.26 درجه برای دو روز می باشد، هر چند که به دمای 0.55 بین SCOPE و وینیکو دست می یابد. به طور مشابه، ضرائب همبستگی بین SCOPE و RL به میزان 0.84 و 0.92 برای DoY 79 و 179 ($0.9R^2$) برای پایگاه داده کلی) نسبت به 0.59 و 0.65 بین SCOPE و وینیکو می باشند. مقایسه شکل 5a-b از یک سو و شکل 5c-d از سوی دیگر نشان می دهد که استفاده از A موجب محدود شدن در حالت کلی گردد.

می توان این مورد در مقاله وینیکو را با مطالعه موردی داده های ماهواره ای زمینی ثابت که در آن مقیاس پیکسلی بزرگ موجب ایجاد اثر یکنواخت و توزیع کمتر در تغییرات جهتی حاصله می شود، بیان کرد. این اثر تعدیل کننده ناشی از دو منبع مختلف می باشد. اول، تغییرات مکانی کاربری زمین و اصلاح اراضی می باشد که در مقیاس به مراتب کوچکتر از اندازه پیکسل رخ می دهد. پیکسل های ماهواره ای ثابت زمین شامل اطلاعاتی ترکیبی می باشند که مشابه یکدیگرند. می توان اثر احتمالی خطا های ثبتي را هنگام ارائه پیکسل ها از دو ماهواره متفاوت در زوایای دید مختلف کاهش داد. ثانيا همان طور که توسط لاگورده و همکاران (2015) اشاره شد، محدودیت تغییرات زمانی دمای سطحی ناشی از آشفتگی جریان اتمسفری در پیکسل های بزرگ قابل مشاهده می باشد. شکل 5c و d نشان می دهد که عملکرد های مدل وینیکو هنگام برآزش با استفاده از دو پارامتر A و D بهبود می یابد و RMSE به میزان 0.23 و 0.35 درجه برای DoY79 و 174 می شود (RMSE=0.3 هنگام مقایسه کل پایگاه داده) و $0.86R^2$ برای هر روز. برای DOY79 آمار های روش وینیکو اندکی بهتر از RL می باشند. با این حال نتایج در مدل RL بهتر می باشند. به ویژه علی رغم مشکلات در هر دو مورد، شبیه سازی ناهمسانگردی در مجاورت نقطه داغ (که متناظر با نقاط انحرافی تحت خط 1:1 می باشد) از کیفیت کمی نسبت به مدل وینیکو برخوردار است.



شکل 6. مقایسه زاویه دید اوج که در آن مدل وینیکو به حداکثر مقدار ناهمسانگردی خود نسبت به زاویه اوج

خورشید دست می یابد.

در حقیقت معادله 5 قادر به بیان نقطه داغ به صورت صحیح نمی باشد. شکل 6 می تواند به این مسئله کمک کند: این شکل نشان می دهد که زاویه اوج که برای نا همسانگردی شبیه سازی می شود، متناظر با زاویه اوج خورشید نمی باشد، در حالی که بایستی مطابق با تعریف نقطه داغ باشد.

در نهایت به نظر می رسد که بایستی از دو مدل به عنوان روش های دو پارامتری استفاده کرد. در واقع با اعمال $A=0.0138$ ، عملکرد مدل وینیکو مناسب نبوده و ضعیف تر از مدل RL می باشد. ما همچنین نشان می دهیم که مدل پیرس و همکاران (2015) از این فرآیند تبعیت نکرده و آنها استفاده از مدل وینیکو را به عنوان یک روش دو پارامتری با A و D پیشنهاد کرده اند.

5. بحث

5.1. محدودیت های روش های پارامتریک

مسئله ای که موجب عدم بهره وری مناسب روش وینیکو به عنوان یک روش مناسب جهت اصلاح نا همسانگردی نزدیک به نقطه داغ می گردد، ناشی از استفاده از کرنل های تطبیقی می باشد. مدل RL که با این فرض که ناهمسانگردی TIR و اپتیکال به صورت یکسان رفتار می کنند، و از مدل ارائه شده برای دامنه خورشیدی که مبتنی بر ملاحظات فیزیکی می باشند ارائه شده است در تحقیق روزان (2000) به طور کامل مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین معرفی فاصله بین جهت های خورشید و نما (معادله 2) به عنوان یک موضوع مهم برای کیفیت این روش ساده شده به شمار می آید. این موضوع توسط جاپ (2000) که به بررسی اهمیت معرفی زاویه فاز در توسعه کرنل ها پرداخته است، تایید شده است. نبود این زاویه در معادله 5 موجب بروز ضعف مدل وینیکو شده است.

با این حال، یک مدل ریاضی تحت بررسی در فرمول بندی RL هنگامی که خورشید به طور کاملاً قائم تحت تابش قرار می گیرد ($\theta_s=0$) ظاهر می شود، زیرا منجر کسر در معادله (1) به صفر میل می کند که موجب غیر ممکن شدن محاسبه نا همسانگردی می گردد. این هندسه خاص تنها دو بار در سال و تنها در ناحیه گرمسیری و استوایی رخ می دهد. در این حالت، نمای سمت القدم و موقعیت نقطه داغ بر یکدیگر منطبق می شوند که موجب $\Delta T_{HS}=0$ با مقادیر

منفی نا همسانگردی برای دیگر هندسه های مشاهداتی می گردد. همچنان می توان تحقیق را به منظور ارزیابی نحوه غلبه بر این معضل در موارد اجرایی پرداخت. با این حال، تست های مقدماتی برازش مدل RL بر روی یک پایگاه داده نا همسانگرد جهت ایجاد شده با SCOPE در کنگو (4.5 S, 12E) با استفاده از یک پایگاه داده هواشناسی موجود در آزمایشگاه با یک تاریخ انتخابی (28 DoY اکتبر ساعت 11) برای مشاهده زاویه اوج خورشیدی نزدیک به 1 انجام شده اند. نتایج از کارایی لازم برخوردار بوده و دارای یک برازش بسیار خوب با RL بر روی شبیه سازی های SCOPE می باشد، اما تحقیقات دیگری نیز جهت تایید آن مورد نیاز است.

یک معضل مشتری در مورد روش های RL و وینیکو، شاخصه غیر متقابل بودن آنها می باشد. تقابل به عنوان یک خصوصیت ریاضی شناخته می شود که نشان می دهد که یک تابع چند متغیره با معکوس کردن دو متغیر آن همچنان ثابت باقی می ماند. در این مورد، بایستی شاخصه تقابل را با معکوس کردن زوایای اوج خورشید و نما مورد بررسی قرار داد؛ سایه های ایجاد شده به وسیله خورشید به عنوان المان های مخفی و پنهانی برای یک ناظر شناخته می شود و بالعکس. مدل های کرنل ارائه شده در محدوده خورشید هموازه این وضعیت را مورد ارزیابی قرار می دهند و می توان فرض کرد این حالت در TIR نیز صادق می باشد. با این حال، هیچ کدام از دو روش وینیکو و RL شاخصه تقابل را مورد بررسی قرار نمی دهند. مدل اول به دلیل تجربی بودن و مدل دوم بر خلاف مدل ارائه شده توسط روجین (2000) به دلیل تعریف ناهمسانگردی که تحت عنوان سمت القدم شناخته می شود، از این نقص برخوردار می باشند.

در نهایت با توجه به این که هر دو مدل RL و وینیکو نسبت به داده های نا همسانگردی SCOPE شبیه سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفته اند، می توان پرسشی را در صورت عدم اریب شدگی اطمینان در نتایج به وسیله کیفیت SCOPE مطرح کرد. در نهایت ممکن است استفاده از پارامتر نقطه داغ در SCOPE سوال برانگیز باشد. تعریف شکل نقطه داغ حرارتی به ندرت در مراجع مورد بررسی قرار گرفته و به تحقیقات و آزمایشات بیشتر نیاز دارند.

علی رغم محدودیت های فوق، می توان بیان کرد که هر دو روش RL و وینیکو عوامل اصلی نا همسانگردی (دافور و همکاران 2015) را در مورد واداشت هواشناسی (که موجب حاکم شدن ΔT_{HS} و T_{nadir} می گردد) و از سویی در مورد ساختار سایبان (با توجه به پارامتر k و کرنل درجه تابش) به طور تلویحی مد نظر قرار می دهند.

5.2. کاربرد های RL در داده های ماهواره و محلی

5.2.1. ارزیابی کیفی اندازه گیری های محلی

علاوه بر سنجش از راه دور، می توان کاربرد های متعددی را برای مدل RL یافت. می توان از این فرآیند جهت ارزیابی تغییرات جهتی ناهمسانگردی حرارتی استفاده کرد، اما از سویی می توان از آن جهت طراحی پروتوکل های آزمایشگاهی زمین نیز بهره برد. در این خصوص، این فرآیند می تواند به تعیین تنظیم بهینه رادیومتر های TIR یا دوربین ها بر اساس FOV، زاویه انحراف تجهیزات، موقعیت و زمان سال و جهت پیش بینی مفهوم و کیفیت اندازه گیری ها پردازد.

5.2.2. ارزیابی کیفیت ناهمسانگردی بر داده های ماهواره

مدل RL می تواند به تعریف برخی از مشخصات برای ماموریت های آینده LEO در شرایط مادون قرمز حرارتی به ویژه انتخاب توامان زمان عبور و انحراف مدار کمک کند. شکل 7 نشان دهنده موقعیت های احتمالی نقطه داغ در طی روز بین ساعت 8 و 16:30 و در طی سال بین فصل های زمستان و تابستان در سه عرض جغرافیایی خط استوا، گرمسیری شمالی و 45 درجه شمالی می باشد (طول جغرافیایی 0 می باشد). موقعیت های نقاط داغ در زمان محلی 10:30 (تقریباً هنگام عبور Landsat و MODIS/TERRA)، 13:30 (MODIS/AQUA, SUOMI, NOAA/AVHRR)، و عبور ماموریت های طراحی شده آینده) و ساعت 16:00 به وسیله نماد های مختلف نشان داده شده اند. همچنین فلش ها نشان دهنده جهت های خطوط پایش برای یک ماموریت مدار قطبی برای دو انحراف مدار می باشد. به منظور کاهش اثر تاثیرات ناهمسانگردی جهتی بر اندازه گیری ها، می توان تا حد امکان خط پایش را به صفحه عمود بر خورشید نزدیک کرد؛ این فرآیند موجب به حداقل رسیدن دامنه ناهمسانگردی و متقارن شدن آن در هر طرف مسیر زمین نسبت به ماهواره می گردد. بنابراین با توجه به شکل 7، می توان مشاهده کرد که انحراف مدار بر اساس سمت پرواز $0 <$ برای عبور در شروع بعد از ظهر در ساعت 13:30 (نسبت به اواسط صبح در سال 10:30) توصیه می شود. در نواحی گرمسیری شمالی (شکل 2b)، می توان همین موضوع را برای ماه های زمستانی مشاهده کرد. اما برای ماه های تابستانی، اندازه گیری ها در معرض اثرات نقطه داغ نسبت به انحراف مدار قرار می گیرند.

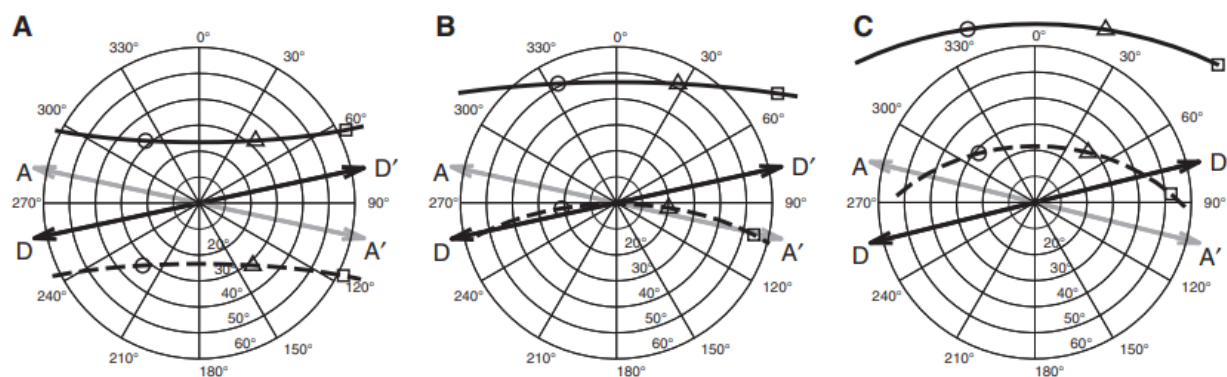
همچنین نسبت به خط استوا، توصیه قبلی همچنان صادق می باشد، اما برای دوره های ماهانه بهار و پاییز این موضوع متفاوت می باشد. در نیم کره جنوبی (نشان داده نشده است)، موقعیت نقطه داغ نسبت به جهت مخالف تغییر می کند به نحوی که می توان تحلیلی مشابه را ارائه کرد و توصیه های مشابه همچنان معتبر می باشند.

مدل RL می تواند نشان دهنده کارایی لازم جهت دستیابی به یک ارزیابی کیفی نسبت به اثرات جهتی برای ماموریت ECOSTRESS شامل نصب دستگاه رادیومتر مادون قرمز حرارتی HypSIRI الگو (PHyTIR) و ایستگاه فضایی بین المللی (ISS) باشد. در واقع زاویه انحراف مداری کوچک آن (51.6 درجه) و عدم خورشید آهنگ بودن آن موجب ایجاد هندسه هایی با دامنه نمایی بسیار بزرگ شده و موجب ایجاد زوایای نمای آزمون در تمامی جهات و زاویه نمای اج متناظر با حداکثر زاویه بررسی به میزان 25.5 درجه می گردد.

5.2.3. اصلاح نا همسانگردی جهتی TIR در داده های مکانی

مسئله واژگونی به عنوان یک نگرانی اصلی پیش از اعمال مدل RL به صورت اجرایی جهت اصلاح داده های ماهواره نسبت به اثرات DA شناخته می شود. در محدوده VNIR، فرض منطقی آن است که سایبان های دارای پوشش گیاهی دارای تغییرات سریع نسبت به روز های معدود مثلا به صورت هفتگی نمی باشند. بنابراین، جمع شدن اندازه گیری های ماهواره در این بازه زمانی تحت زوایای نمایی مختلف از معکوس شدگی مدل های کرنلی جهت انجام تحلیل و اصلاح اثرات نا همسانگردی پشتیبانی می کند. این موضوع در شرایط حرارتی مادون قرمز امکان پذیر نمی باشد، زیرا دمای سطحی به صورت پیوسته در حال تغییر با شرایط و تابش (متغیر های هواشناسی) و وضعیت آب (رواناب، آبیاری) می باشد. روش وینیکو جهت حل این مشکل با ترکیب 4 اندازه گیری از ماهواره های ثابت زمین GOES و GOES E و W در آمریکا در شب و روز جهت تعیین 2 ضریب کرنل و دمای سمت القدم پیشنهاد شده است. این روش برای نواحی دیگر مانند اروپا و آفریقا امکان پذیر نمی باشد به طوری که هیچ گونه همپوشانی بین ماهواره های ثابت در زمین قابل مشاهده نمی باشد. این مسئله به طور کلی در مورد ماهواره های LEO باقی می ماند به طوری که می توان یک اندازه گیری واحد در هر روز نسبت به مقدار پیکسل مشخصی را به دست آورد.

جهت غلبه بر مسئله نا همسانگردی جهتی، در پروژه های اخیر مانند MISTIGIRI (لاگوراده و همکاران 2013) یا THIRSTY (کرباسول و همکاران 2014)، ثابت نگه داشتن مسیر مدار زمین پیشنهاد شده است به نحوی که هر نقطه در سطح زمین همواره تحت زوایای دید یکسان مشاهده می شوند. علی رغم این که نمی توان از تغییرات زوایای خورشید در طی سال صرف نظر کرد، این مشخصه برای سهولت در تحلیل مجموعه های زمانی دمای سطحی در یک موقعیت مشخص اعمال شده است. جهت اصلاح TIR DA به وسیله این مدار، می توان مزیت های تغییرات مکانی را نسبت به تغییرات زمانی برای حوزه VNIR و انجام معکوس شدگی بر روی پیکسل های معدود با سایبان گیاهی یکسان انتخاب شده در امتداد خط پایش مشاهده کرد. با این حال این موضوع نیازمند فرضیاتی ضروری در مورد وضعیت آب و شرایط اعمال تابش و جهت اصلاح تفاوت ها در زمان محلی می باشد. علی رغم آن که این فرضیات به جای محدود کردن آن در نظر گرفته می شوند، بایستی آن را با اطلاعات کاربردی موجود از کانال های VNIR مورد ارزیابی قرار داد.



شکل 7. موقعیت نقطه داغ از ساعت 8 تا 16:30 برای یک پیکسل واقع در عرض جغرافیایی 0 (a) 23 درجه شمالی (b) و 45 درجه شمالی (c) برای تابستان (خط چین ها) و زمستان (خطوط توپر). دوایر، مثل ها و مربع ها نشان دهنده موقعیت نقطه داغ در ساعات 10:30، 13:30 و 16:00 می باشند. AA' و DD' نشان دهنده مدار های صعودی و نزولی برآورده شده برای یک ماهواره خورشید آهنگ می باشند.

6. نتیجه گیری

نیاز به اصلاح اندازه گیری های LST ماهواره نسبت به اثرات جهتی موجب ارائه روش های ساده ای شده است که در زنجیره پردازش داده های ماهواره قابل اجرا می باشند. مدل نا همسانگرد جهتی ساده پیشنهادی در این مقاله (تحت عنوان RL) نسبت به سایبان های تیره سراسری (پیوسته) تطبیق یافته است؛ این مدل نیازمند دو پارامتر (ΔT_{HS}) نشان دهنده نا همسانگردی در نقطه داغ K مرتبط با ساختار سایبان) می باشد. ما در ابتدا توانایی آن را جهت بازتولید علائم جهتی TIR با برازش آن نسبت به مجموعه داده های آزمایشگاهی نسبت به یک سایبان شهری (شهر تولوز) و یک سایبان جنگلی (جنگل کاج دریایی) نشان داده ایم. نتایج با شبیه سازی مناسب نقطه داغ و مقادیر RMSE برآورد شده نسبت به محدوده ای از جهت های مشاهداتی (تمامی جهت های آزیموت، زوایای مشاهده ای حداکثر بیشتر از 50 درجه) کمتر از 1C از کارایی زیادی برخوردار است. سپس به منظور تعمیم دادن نتایج، مدل RL نسبت به شرایط ورودی متفاوت داده های شبیه سازی شده SCOPE نیرو های اندازه گیری، ساختار سایبان و وضعیت آب خاک و گیاهان جهت شبیه سازی بیشترین شرایط که از نظر اجرایی قابل برآورده شدن می باشند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در محدوده $[0,50]$ برای θ_v و $[0,360]$ برای φ_v ، نسبت به $RMSE \leq 0.6C$ تناظر بین داده ها وجود دارد. برخی از تفاوت ها در مجاورت نقطه داغ مشاهده شده است، به طوری که مدل RL قادر به شبیه سازی شکل های نقطه داغ بسیار زیاد و حدی به صورت دقیق نبوده است. با این حال، مدل سازی نقطه داغ و درجه حساسیت حدی SCOPE نسبت به پارامتر نقطه داغ q دارای مشکلاتی می باشد. بنابراین شناخت بیشتری از نقطه داغ جهت ارزیابی عملکرد RL ضروری به نظر می رسد. ما همچنین دریافته ایم که هنگامی که نقطه داغ و سمت القدم بر یکدیگر منطبق می شوند، هنگامی که خورشید در بالاترین نقطه قرار دارد ($\theta_s = 0$)، مدل RL نا معین می باشد. بایستی یک تحقیق جهت ارزیابی رفتار مدل در این پیکره بندی خاص که دو بار در سال در کل ناحیه درون استوایی تکرار می شود، انجام گیرد.

برخی از روش های پارامتریک ساده جهت اصلاح اندازه گیری های LST ماهواره همچنان به ندرت انجام شده و روش پیشنهادی توسط وینیکو و همکاران (2012) به عنوان تنها روش موجود بر اساس اطلاعات ما می باشد. این روش با

مدل RL با استفاده از برخی از پایگاه داده نا همسانگرد SCOPE شبیه سازی شده مقایسه شده است. مدل RL نشان دهنده کارایی بیشتری نسبت به مدل وینیکو جهت شبیه سازی DA به ویژه نزدیک به نقطه داغ که مورد آخر به دلیل هسته های غیر تطبیق یافته از کارایی زیادی برخوردار نیست، می باشد. با این حال علی رغم برخی از موانع، حوزه های مطالعاتی مشاهده شده توسط 2 ماهواره به صورت همزمان و با فاصله کافی از نقطه داغ، روش وینیکو دارای مزیت معکوس شدگی ساده و نتایج واقعی می باشد، و این روش برای اصلاح داده های ماهواره ای ایستگاه زمین اجرا شده است.

مدل RL از نظر مفهومی به عنوان یک مدل مرتبط مناسب شناخته می شود، زیرا موجب بیان بهتر DA نزدیک به نقطه داغ شناخته می شود. همچنین نشان داده شده است که در وضعیت موجود، این روش می تواند به بررسی ارزیابی های کمی از DA برای اهداف مختلف کمک کند: آماده سازی آزمایشات محلی، تحلیل بحرانی اندازه گیری های انجام شده در مراجع، کمک به تعریف ماموریت های فضایی. با این حال، همچنان بایستی کارهای تحقیقاتی زیادی جهت انتقال مدل RL به یک ابزار اجرایی جهت اصلاح DA بر روی داده های ماهواره انجام داد. در حال حاضر چندین جهت در آزمایشگاه به صورت کوتاه در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در ابتدا، می توان داده های فرعی را جهت بهبود مدل RL معرفی کرد. دمای هوا به عنوان یک معیار شناخته می شود به طوری که وضعیت هوا دارای ارتباط غیر مستقیم به تبخیر واقعی و تفاوت بین سطح و دمای هوا می باشد. به طور مشابه نا همسانگردی VNIR ناشی از اندازه گیری های VNIR می تواند موجب ارائه اطلاعاتی مرتبط با ساختار سایبان گردد. همچنین تلاش هایی جهت بهبود شناخت پدیده نقطه داغ و آزمایشات محلی با استفاده از UAV ها بدین منظور در حال انجام می باشند. در نهایت، استراتژی های ارائه روش های معکوس RL جهت اصلاح DA برای ماهواره های LEO جهت غلبه بر عدم امکان ثبت تصویر همزمان در شرایط دید مختلف مورد مطالعه قرار می گیرند. بنابراین یک روش احتمالی می تواند انجام مدل معکوس نسبت به محل هایی با گیاهان مشابه مشاهده شده تحت زوایایی دید مختلف پس از بررسی دمای سطحی آنها را انجام دهد. بایستی این مطالعات موجب گسترش روشی جهت اجرای الگوریتم RL در پردازش داده ها توسط ماهواره ها مانند MODIS، SUIMI، NPP یا ماموریت های TIR با وضوح بالا در مرحله آماده سازی گردند.

References

- Béziat, P., Ceschia, E., Dedieu, G., 2009. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1628–1645. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.05.004>.
- Bréon, F.-M., Maignan, F., Leroy, M., Grant, I., 2002. Analysis of hot spot directional signatures measured from space. *J. Geophys. Res.* 107, 4282. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JD001094>.
- Cowan, I., 1977. Stomatal behaviour and environment. *Adv. Bot. Res.* 4, 117–228.
- Crebassol, P., Lgouarde, J.-P., Hook, S., 2014. Thirsty thermal infrared spatial system, 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City, QC 3021–3024 <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947113>.
- Duffour, C., Lagouarde, J.-P., Olioso, A., Demarty, J., Roujean, J.-L., 2015a. Driving factors of the directional variability of thermal infrared signal in temperate regions. *Remote Sens. Environ.* 177, 248–264 [doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.024](http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.024).
- Duffour, C., Olioso, A., Demarty, J., Van der Tol, C., Lagouarde, J.-P., 2015b. An evaluation of SCOPE: a tool to simulate the directional anisotropy of satellite-measured surface temperatures. *Remote Sens. Environ.* 158, 362–375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.019>.
- Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78–90. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00386231>.
- Gastellu-Etchegorry, J.-P., Martin, E., Gascon, F., 2004. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *Int. J. Remote Sens.* 25 (1), 73–96.
- Guillevic, P., Bork-Unkelbach, A., Goettsche, F.M., Hulley, G., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Olesen, F., Privette, J.L., 2013. Directional viewing effects on satellite land surface temperature products over sparse vegetation canopies - a multi-sensor analysis. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – Spec. Str. on Biophys. Var. and Spat. Heterog. in Agric. Landsc.* 10 (6), 1464–1468.
- Huang, H., Wang, L., Zhang, Y., Liu, Q., 2008. Temporal and spatial thermal radiation distribution analysis within and above crop canopies by 3D simulation. *Proc. 8th Int. Symp. on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, pp. 313–320 Shanghai, P. R. China, June 25–27.
- Jacquemoud, S., Baret, F., 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34, 75–91. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90100-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(90)90100-Z).
- Jupp, D., 2000. A Compendium of Kernel & Other (Semi-) Empirical BRDF Models Doc. www.cossa.csiro.au/tasks/brdf. pp. 1–18.
- Kabsch, Olesen, F.S., Prata, F., 2008. Initial results of the land surface temperature (LST) validation with the Evora, Portugal ground-truth station measurements. *Int. J. Remote Sens.* 29 (17/18), 5329–5345.
- Kimes, D.S., Kirchner, J.A., 1983. Directional radiometric measurements of row-crop temperatures. *Int. J. Remote Sens.* 4, 299–311. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168308948548>.
- Lagouarde, J.-P., Irvine, M., 2008. Directional anisotropy in thermal infrared measurements over Toulouse City centre during the CAPITOUL measurement campaigns: first results. *Meteorog. Atmos. Phys.* 102, 173–185. <http://dx.doi.org/10.1007/s00703-008-0325-4>.
- Lagouarde, J.-P., Ballans, H., Moreau, P., Guyon, D., Coraboeuf, D., 2000. Experimental study of brightness surface temperature angular variations of maritime pine (*Pinus pinaster*) stands. *Remote Sens. Environ.* 72, 17–34. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00085-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00085-1).
- Lagouarde, J.-P., Hénon, A., Kurz, B., Moreau, P., Irvine, M., Voogt, J., Mestayer, P., 2010. Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse City centre. *Remote Sens. Environ.* 114, 87–105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.012>.
- Lagouarde, J.-P., Bach, M., Sobrino, J.A., Boulet, G., Briottet, X., Cherchali, S., 2013. The MISTIGRI thermal infrared project: scientific objectives and mission specifications. *Int. Journal of Remote Sensing* 34 (9-10), 3437–3466. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716921>.

- Lagouarde, J.-P., Dayau, S., Moreau, P., Guyon, D., 2014. Directional anisotropy of brightness surface temperature over vineyards: case study over the Medoc Region (SW France). *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 11, 574–578. <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2013.2282492>.
- Lagouarde, J.-P., Irvine, M., Dupont, S., 2015. Atmospheric turbulence induced errors on measurements of surface temperature from space. *Remote Sens. Environ.* 168, 40–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.018>.
- Masson, V., et al., 2008. The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorog. Atmos. Phys.* 102, 135–157. <http://dx.doi.org/10.1007/s00703-008-0289-4>.
- Nelder, J.A., Mead, R., 1965. A simplex method for function minimization. *Comput. J.* 7, 308–313. <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.
- Pinheiro, A.C.T., Privette, J.L., Guillevic, P., 2006. Modeling the observed angular anisotropy of land surface temperature in a Savanna. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44 (4), 1036–1047.
- Pires, A., Ermida, S., Trigo, I., 2015. LST Merged Product. *Globtemp*, Reading.
- Roujean, J.-L., 2000. A parametric hot spot model for optical remote sensing applications. *Remote Sens. Environ.* 71, 197–206. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00080-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00080-2).
- Snyder, W.C., Wan, Z., 1998. BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 214–225. <http://dx.doi.org/10.1109/36.655331>.
- Su, L., Li, X., Friedl, M., Strahler, A., Gu, X., 2002. A kernel-driven model of effective directional emissivity for non-isothermal surfaces. *Prog. Nat. Sci.* 12, 603–607.
- Van der Tol, C., Verhoef, W., Timmermans, J., Verhoef, A., Su, Z., 2009. An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences* 6, 3109–3129. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-6-3109-2009>.
- Verhoef, W., Jia, L., Xiao, Q., Su, Z., 2007. Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 1808–1822. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2007.895844>.
- Vermote, E., Justice, C.O., Breon, F.-M., 2009. Towards a generalized approach for correction of the BRDF effect in MODIS directional reflectances. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47, 898–908. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2008.2005977>.
- Vinnikov, K.Y., Yu, Y., Goldberg, M.D., Tarpley, D., Romanov, P., Laszlo, I., Chen, M., 2012. Angular anisotropy of satellite observations of land surface temperature. *Geophys. Res. Lett.* 39, L23802. <http://dx.doi.org/10.1029/2012GL054059>.
- Wallace, J., Verhoef, A., 2000. Modelling interactions in mixed-plant communities: light, water and carbon dioxide. *Leaf Development and Canopy Growth*, pp. 204–250.
- Wanner, W., Li, X., Strahler, A.H., 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *J. Geophys. Res.* 100, 21077. <http://dx.doi.org/10.1029/95JD02371>.