



ارزیابی مدل برف واسنجی شده طرحواره سطح NOAA-MP جفت شده در مدل WRF با تصاویر سنجنده مودیس در نواحی با ویژگی‌های متفاوت سطح

مهرانه خدامرادپور^{۱*}، پرویز ایران‌نژاد^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷

چکیده

پوشش برف اثر قابل توجهی در کشاورزی، منابع آب و اقلیم دارد و به دلیل تغییرات شدید مکانی و زمانی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در طرحواره‌های سطح است. مدل برف طرحواره سطح NOAA-MP جفت شده در مدل WRF با فاکتور ذوب برف واسنجی شده با تصاویر روزانه کسر پوشش برف سنجنده مودیس ماهواره ترا در بارش‌های سنگین برف در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ ارزیابی شده است. منطقه مورد مطالعه که شامل استان‌های غربی (همدان و کردستان) و استان‌های شمالی (اردبیل، گیلان و مازندران) است به نواحی جنگلی، مرتع، پست و کم‌ارتفاع و کوهستانی دارای شیب کم و زیاد تقسیم شد. مدل ضعیف‌ترین (بهترین) عملکرد در برآورد کسر پوشش برف (کمینه دمای هوا) را با بیش‌ترین (کم‌ترین) میانگین مربعات خطاهای نرمال شده و انحراف معیار نرمال شده بیش‌تر از (نزدیک به) یک دارد. مدل عدم قطعیت بالایی در برآورد کسر پوشش برف و ارتفاع برف در نواحی دارای توپوگرافی پیچیده (با ضریب کارایی بسیار کوچک مثبت، ۰/۰۱) و نواحی دارای ناهمگنی سطح (نواحی مرتع و جنگلی با ضرایب کارایی منفی و خطاهای بزرگ) دارد. بهترین عملکرد مدل در برآورد کسر پوشش برف و ارتفاع برف در نواحی پست و کم ارتفاع با بالاترین ضرایب کارایی (به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۴۰) و کوچک‌ترین میانگین مطلق خطا (به ترتیب ۸ و ۶/۴ cm) است.

واژه‌های کلیدی: طرحواره سطح NOAA-MP، کسر پوشش برف، مدل WRF، سنجنده مودیس

مقدمه

انرژی، شار انرژی سطح را با تقسیم تابش خالص ورودی به شارهای گرمای نهان، محسوس، خاک و انرژی ذوب برف محاسبه می‌کند؛ در حالی که در بخش بودجه آبی، شار آب با تقسیم بارش به تبخیر/تعرق، رواناب و تغییرات رطوبت خاک و ذوب برف (در صورت وجود برف) محاسبه می‌شود. پارامترسازی برف با توجه به نقش آن در هر دو بودجه آبی و انرژی طرحواره‌های سطح دارای اهمیت قابل ملاحظه‌ای است که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترسازی برف، از مدل تک لایه‌ای ساده برف و مدل ساده تاج پوشش گیاهی (Chen and Dudhia, 2001) تا مدل‌سازی‌های پیچیده شامل مدل چند لایه‌ای برف و مدل‌های پیشرفته تاج پوشش گیاهی و وارد کردن اثر حضور پوشش گیاهی در هنگام بارش برف (Roesch et al., 2001; Niu et al., 2011) در طرحواره‌های سطح خشکی‌ها وارد می‌شود. ارتفاع برف و کسر پوشش برف از مهم‌ترین متغیرها در پارامترسازی برف به شمار می‌روند. کسر پوشش برف در مدل‌های برف

برف با ویژگی‌های فیزیکی خاص شامل آلبیدو، گسیلندگی بالا (عمل کردن به عنوان جسم سیاه در ناحیه فروسرخ گرمایی) و رسانایی بسیار پایین می‌تواند اثر بسیار مهمی بر دمای هوا، خاک و حتی تبادل کربن در سطح مشترک خاک- جو داشته باشد (Zhang, 2005). مدل برف در بخش طرحواره‌های سطح خشکی‌ها واقع در هسته فیزیکی مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا وارد می‌شود. طرحواره‌های سطح خشکی‌ها تبادل تکانه، جرم و انرژی در سطح مشترک جو- سطح بر اساس بودجه‌های آبی و انرژی بر عهده دارند. بودجه

^۱ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(*نویسنده مسئول: mkhodamorad@basu.ac.ir)

DOI: 10.22125/agmj.2018.120644.1005

^۲ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

MP با فاکتور ذوب برف واسنجی شده جفت شده در مدل پیشرفته تحقیقاتی و پیش‌بینی WRF ارزیابی می‌شود و هم‌چنین در بخش بودجه انرژی، با توجه به تأثیر کسر برف بر آلبیدوی سطح و شار انرژی، کمینه روزانه دمای هوا با توجه به اهمیت آن در پیش‌بینی‌های هواشناسی کشاورزی ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

این بخش ابتدا به معرفی منطقه مورد مطالعه می‌پردازد. سپس مدل WRF و پارامترسازی مدل برف در طرحواره سطح NOAH-MP به طور خلاصه ارائه می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه محدوده غربی (استان‌های همدان و کردستان) و نوار شمالی ایران (استان‌های اردبیل، مازندران و گیلان) است (شکل ۱). ایستگاه‌های محدوده مورد مطالعه، با بررسی نقشه‌های ارتفاعی و کاربری اراضی به پنج ناحیه پوشش گیاهی، مرتع، پست و کم‌ارتفاع (ارتفاع کمتر از ۱۰۰ متر) و نواحی کوهستانی با شیب‌های کم (انحراف معیار ارتفاع کوچک‌تر یا مساوی ۲۰۰ متر) و زیاد (انحراف معیار ارتفاع بزرگ‌تر از ۲۰۰ متر) تقسیم می‌شود (شکل ۱).

جزئیات فیزیکی مدل WRF و طرحواره سطح NOAH-MP

مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF، مدل میان‌مقیاس پیشرفته تحقیقاتی است که نخستین نسخه آن در دسامبر ۲۰۰۱ ارائه شد (Schamarock et al., 2001). مدل WRF دارای دو هسته دینامیکی و طرحواره‌های فیزیکی است. هسته دینامیکی شامل دو هسته ARW، جرم‌ویلری و مدل نآب‌ایستای میان‌مقیاس (NMM) است که شامل معادلات فرارفت، گرادیان فشار، اثر کوریولیس، پخش و طرحواره زمانی است. طرحواره‌های فیزیکی مدل نیز شامل نسخه‌های متفاوت طرحواره‌های پارامترسازی تابش، لایه مرزی، سطح، همرفت و میکروفیزیک است. در این مطالعه نسخه 3.5.1 هسته ARW مدل اجرا شد. طرحواره سطح NOAH-MP جفت شده در مدل پیش‌بینی عددی WRF ابتدا توسط Niu et al. (2011) ارائه شد. اساس این طرحواره، طرحواره سطح

به صورت نسبت مساحت پوشیده شده با برف هر سلول مربع شبکه به کل مساحت آن سلول تعریف می‌شود. کسر پوشش برف، با توجه به بیش‌ترین افت و خیز مکانی و زمانی در بین مؤلفه‌ها و تأثیر آن بر آلبیدوی سطح و در نتیجه ترازمندی تابش، از مهم‌ترین متغیرهای پیش‌یابی در طرحواره‌های پارامترسازی سطح است. کسر پوشش برف در مدل‌های منطقه‌ای و جهانی به‌طور نسبتاً ساده پارامتریزه می‌شود، به طوری که مدل‌های برف هنوز هم دارای عدم قطعیت بالایی، به ویژه در برآورد کسر پوشش برف هستند (Derksen and Brown, 2012; Brutle-). (Vuilmet et al., 2013). اکثر طرحواره‌های سطح، کسر پوشش برف را برای وزن دادن به آلبیدوهای بخش بدون پوشش برف و بخش دارای برف هر سلول شبکه، به صورت خطی، به کار می‌برند و بر این اساس آلبیدوی میانگین هر سلول شبکه برآورد می‌شود (Niu et al., 2011). ساده‌ترین پارامترسازی کسر پوشش برف بر اساس رابطه ساده‌ای از آب معادل برف یا ارتفاع برف و مقدار بحرانی آن‌ها است (Deckenson et al., 1993; Yang et al., 1997). (Irannejad and Shao, 1998). دریافتند که پارامترسازی کسر پوشش برف بر اساس این رابطه ساده سبب برآورد کمتری از کسر پوشش برف و در نتیجه آلبیدوی سطح می‌شود. پس آن‌ها کسر پوشش برف را به عنوان تابع تانژانت هیپربولیک از ارتفاع برف، چگالی برف و طول زبری سطح ارائه کردند؛ در حالی که برآورد کسر پوشش برف با این روش نیز فقط در نواحی پست و بدون پوشش گیاهی قابل قبول است (Roesch et al., 2001). کسر پوشش برف و ارتفاع برف دارای وابستگی فصلی هستند، به طوری که روند افزایش کسر پوشش برف با ارتفاع برف در پاییز سریع‌تر از روند کاهش آن با ارتفاع برف در فصل بهار (دوره ذوب برف) است. به همین دلیل (Niu and Yang (2004) در رابطه ارائه شده توسط Yang et al., (1997)، فاکتور ذوب برف را وارد کردند. فاکتور ذوب برف بر اساس ارتفاع و کسر پوشش برف ایستگاه‌های برف‌سنجی آمریکای شمالی مقدار یک برآورد شد. پژوهش حاضر به واسنجی فاکتور ذوب برف طرحواره NOAH-MP، با توجه به تغییرات زمانی و مکانی شدید کسر پوشش برف، با تصاویر سنجنده مودیس می‌پردازد. سپس کسر پوشش برف و ارتفاع برف در بخش بودجه آبی طرحواره سطح NOAH-

قابل توجه طرحواره NOAA (Bowling et al., 2003) شد. مدل چند لایه‌ای برف حداکثر به سه لایه بر اساس ارتفاع برف تقسیم می‌شود. ضخامت اولین لایه برف (از بالای مدل خاک) برای برآورد بهتر شار گرمایی خاک بسیار نازک در نظر گرفته می‌شود (۰/۰۴۵ m).

NOAH (Chen and Dudhia, 2001) است، که با وارد کردن پارامترسازی رواناب بر اساس تاپ مدل ساده شده (Niu et al., 2005) و مدل چند لایه‌ای برف در بخش بودجه آبی و مدل تاج پوشش گیاهی دینامیکی (Ball et al., 1987) در بخش بودجه انرژی سبب کاهش خطاهای

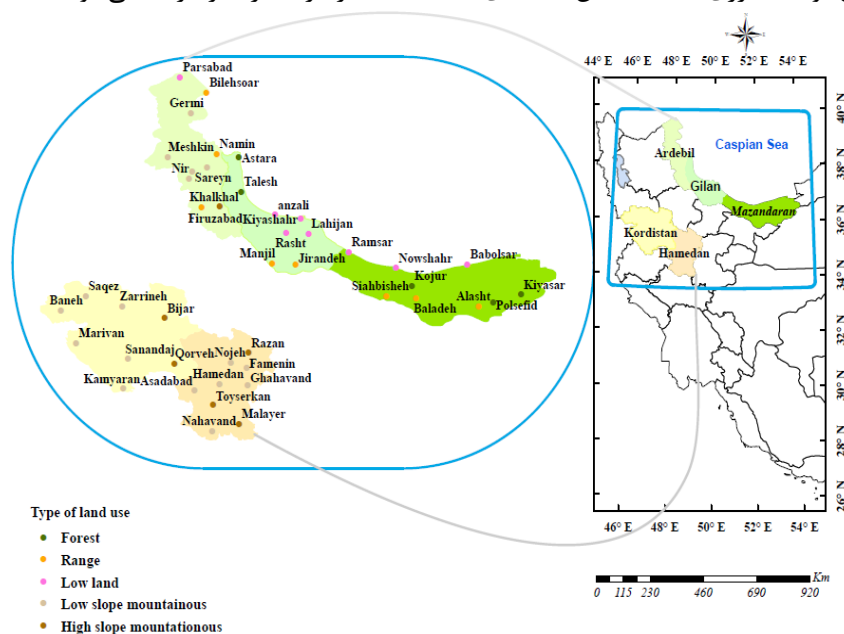


Figure 1- Geographic map of synoptic stations and their type of land use in the study area

شکل ۱- نقشه پراکنش جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک و نوع کاربری اراضی آن‌ها در محدوده مورد مطالعه

بعد از رسیدن به زمین فشرده می‌شود، که سبب تغییر چگالی و ضخامت آن می‌شود. در این مدل برف، فرآیندهای فشردگی شامل متامورفیزم مخرب (تغییرات فیزیکی دانه‌های برف در داخل بسته برف ناشی از اختلاف دما و فشار)، فشردگی ناشی از وزن لایه‌های بالایی برف و متامورفیزم ذوب برف است (Anderson, 1976). (ρ_{sn}) زبری سطح (z_0) و فاکتور ذوب برف (m) پارامتری می‌شود، که چگالی برف توسط چگالی برف تازه، ρ_{snow} مقیاس می‌شود (Niu et al., 2007).

$$f_{sno} = \tanh \left(\frac{h_{sno}}{2.5z_0 \left(\frac{\rho_{sn}}{\rho_{snow}} \right)^m} \right) \quad (2)$$

فاکتور ذوب برف هم از واسنجی داده‌های مشاهداتی کسر پوشش برف در ماه‌های مختلف در دوره‌های تاریخی برآورد می‌شود. کسر پوشش برف در این طرحواره سطح به شکل تابع تانژانت هیپربولیک ارتفاع برف (h_{sno}) ، چگالی کل برف در مدل NOAA-MP، مقدار پیش فرض فاکتور برف برابر یک است که سبب برآورد بهتر پوشش برف و آب معادل برف توسط مدل در نیم کره شمالی شده است

دمای سطح برف با روش تکرار از روابط ترازمندی انرژی برآورد می‌شود. دماهای برف و خاک برای برآورد انرژی ذوب یا انجماد $(H_{m,i})$ برای لایه برف و لایه‌های خاک به کار می‌رود به طوری که مازاد یا کمبود انرژی مورد نیاز برای تغییر دمای برف یا خاک به نقطه انجماد T_{fiz} به صورت معادله ۱ تعریف می‌شود (Niu et al., 2011).

$$H_{m,i} = C_i \Delta z_i \frac{T_i^{N+1} - T_{fiz}}{\Delta t} \quad i = i_{sno} + 1, 4 \quad (1)$$

که Δz_i ضخامت لایه، T_i^{N+1} دمای لایه برف یا خاک، Δt گام زمانی و i_{sno} کل لایه‌های برف و C_i ظرفیت گرمایی حجمی در $i = i_{sno} + 1, 0$ است که تابعی از کسر حجمی یخ و آب در لایه برف یا خاک و ظرفیت گرمایی حجمی یخ، آب و خاک و تخلخل خاک است. هنگامی که در معادله ۱، $T_{fiz} < T_i^{N+1}$ باشد و برف یا یخ در لایه خاک وجود داشته باشد ذوب برف رخ می‌دهد؛ در حالی که اگر آب مایع در حضور برف و یا در خاک وجود باشد، انجماد رخ می‌دهد. باقی‌مانده انرژی هم صرف گرم یا سرد شدن لایه برف یا خاک می‌شود. برف

لازم و یکی کردن تصاویر از روش موزائیک و سپس استخراج کسر پوشش برف در ایستگاه‌های هواشناسی مورد نظر توسط نسخه ۵/۳ نرم‌افزار ENVI انجام شد. سپس مدل پیش‌بینی منطقه‌ای WRF نسخه 3.5.1 جفت شده با طرحواره سطح NOAA-MP با فاکتور ذوب برف واسنجی شده اجرا شد. نسخه دیگر طرحواره‌های فیزیکی جفت شده با مدل WRF شامل طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای YSU، طرحواره همرفت کومه‌ای Kain-Fritsch، طرحواره تابش موج بلند RRTM، طرحواره تابش موج کوتاه Dudhia، طرحواره لایه سطحی MM5 و طرحواره خرد فیزیک Kessler است. شبیه‌سازی مدل در دو حوزه به روش آشیانه‌ای یک‌سویه (استفاده از داده‌های شبکه مادر با توان تفکیک ۱۵ کیلومتر به عنوان شرایط مرزی شبکه داخلی با توان تفکیک ۵ کیلومتر) در دو محدوده غرب و نوار شمالی کشور با داده‌های سه ساعته GFS^۱ با گام مکانی ۰/۵ درجه انجام شد (شکل ۲).

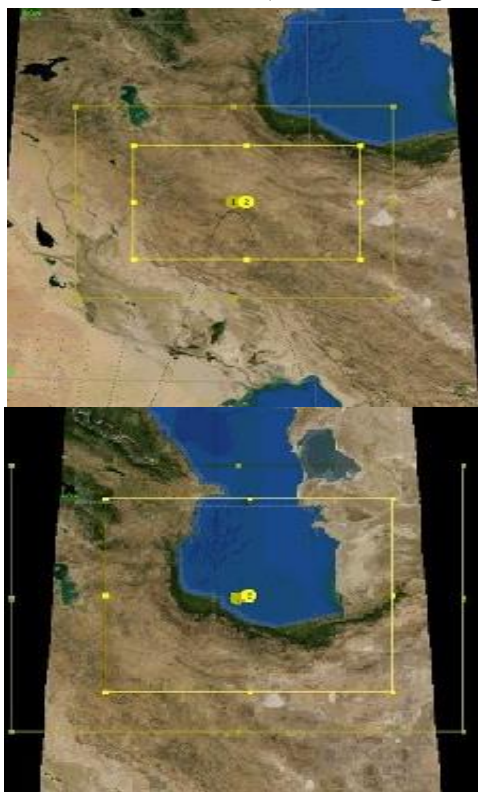


Figure 2- Domains of WRF for the study area
شکل ۲- محدوده‌های مدل WRF برای منطقه مورد مطالعه

مدل در این دو محدوده در دوره‌های زمانی متفاوتی، با توجه به متفاوت بودن زمان بارش برف، اجرا شد، به‌طوری که بازه‌های زمانی اجرای مدل در غرب

(Niu et al., 2011). آلبیدوی سطح (α_g) در هر مربع شبکه پوشیده شده با برف، از میانگین وزنی آلبیدوهای خاک و برف (α_{soil} و α_{sno}) پارامتره می‌شود.

$$\alpha_g = (1 - f_{sno})\alpha_{soil} + f_{sno}\alpha_{sno} \quad (3)$$

این طرحواره سطح در مدل کردن برف روی تاج پوشش گیاهی اثر هر دو فاز مایع و جامد آب را در نظر می‌گیرد. کسر پوشش برف روی تاج پوشش گیاهی به

شکل $f_{sno} = \left(\frac{M_{ice}}{M_{ice,max}} \right)^2$ برآورد می‌شود، که M_{ice}

ذخیره برف خشک تاج پوشش ($kg\ m^{-2}$) و $M_{ice,max}$ بیشینه تحمل تاج پوشش برای برف خشک است (Bonan, 1996).

روش‌ها

نخست جهت واسنجی فاکتور ذوب برف، کسر پوشش برف از معادله ۳، با فاکتورهای متفاوت ذوب برف شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۵ در ماه‌های اکتبر تا آوریل به صورت روزانه برآورد می‌شود. سپس با مقایسه آن‌ها با کسر پوشش برف مستخرج از تصاویر روزانه سنجنده مودیس بر اساس شاخص‌های ارزیابی شامل خطای اریبی، ریشه دوم میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا، فاکتور ذوب برف واسنجی شده در هر ناحیه به دست می‌آید. داده‌های روزانه کسر پوشش برف، به دلیل عدم اندازه‌گیری ایستگاه‌های هواشناسی، از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا (محصول MOD10A1) از سایت www.ncids.org، با توان تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و توان تفکیک زمانی روزانه، استخراج شد. اعتبارسنجی تصاویر کسر پوشش برف ماهواره مودیس نشان از توافق بالای آن‌ها با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های تله‌متری در نواحی مختلف جهان (در حدود ۹۳٪) دارد (Maurer et al., 2003; Haung et al., 2011). کسر پوشش برف در این تصاویر از اختلاف شاخص نرمال شده برف ناشی از بازتاب برف در دو باند مرئی سنجنده (باند چهار، طول موج ۰/۵۵ میکرومتر) و نزدیک فروسرخ (باند شش، ۱/۶ میکرومتر) برآورد می‌شود. با توجه به گستردگی منطقه مورد مطالعه، در هر روز دو تصویر از سنجنده مودیس شامل MOD10A1.h21v05 و MOD10A1.h22v05 مورد نیاز بود. پردازش تصاویر شامل تصحیحات هندسی

¹ Global Forecast System

هر چه خطاهای مدل (MAE و BIAS) کوچک تر باشند مدل عملکرد بهتری دارد. هم‌چنین دیگر شاخص ارزیابی، نمودار تیلور (Taylor, 2001) است که روشی گرافیکی برای بررسی همبستگی، میانگین مربعات خطاها و تغییرات آن‌ها (بر اساس انحراف معیار) است که بر اساس ارائه معادله بین پارامترها، مشابه قانون کسینوس‌ها، است.

نتایج و بحث

این بخش ابتدا به واسنجی فاکتور ذوب برف و سپس به ارزیابی کسر پوشش برف، ارتفاع برف و کمینه دمای هوای شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-NOAHMP با ضریب ذوب برف واسنجی شده در نواحی مورد مطالعه پرداخته شده است. سپس با استفاده از نمودار تیلور هر سه این متغیرها هم‌زمان بررسی می‌شود. جدول ۲ نشان از کوچک‌ترین خطاها در برآورد کسر پوشش برف با فاکتور ذوب برف برابر ۰/۵ در تمام نواحی، به جز ناحیه جنگلی با فاکتور ذوب برف برابر یک، دارد، به طوری که کوچک‌ترین (بزرگ‌ترین) خطا در نواحی پست و کم‌ارتفاع (مرتفع) است.

۲۰۱۳/۰۱/۱۰ تا ۲۰۱۳/۰۱/۱۶، ۲۰۱۳/۱۲/۰۴ تا ۲۰۱۳/۱۲/۲۰، ۲۰۱۴/۰۱/۱۱ تا ۲۰۱۴/۰۱/۲۱، ۲۰۱۴/۰۲/۰۴ تا ۲۰۱۴/۰۲/۰۹ و ۲۰۱۴/۰۲/۱۷ تا ۲۰۱۴/۰۲/۲۲ و در شمال کشور ۲۰۱۳/۰۳/۰۵ تا ۲۰۱۳/۰۳/۱۲، ۲۰۱۳/۱۲/۰۷ تا ۲۰۱۳/۱۲/۱۹ و ۲۰۱۳/۰۳/۰۱ تا ۲۰۱۴/۰۲/۱۳ انتخاب شد. شاخص‌های ارزیابی خطای خروجی‌های مدل در این بررسی بر اساس ضریب کارایی مدل (Nash and Sutcliffe, 1970)، خطای اریبی مدل (BIAS) و میانگین قدرمطلق خطاها (MAE) به شکل معادله‌های ۴ تا ۶ آورده می‌شود.

$$BIAS = \bar{M} - \bar{O} \quad (4)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{M} - \bar{O}) \quad (6)$$

که \bar{M} و \bar{O} ، M_i ، O_i به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در زمان i و میانگین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در کل گام‌های زمانی مورد نظر N است. مقادیر مثبت ضریب کارایی E نشان از برتری شبیه‌سازی‌ها بر پذیرش میانگین مشاهدات برای همه زمان‌ها دارد و مقادیر منفی آن بیان‌گر ناموفق بودن مدل است. هم‌چنین

Table 2- Evaluation of simulated snow cover fraction with different snow melting factor by Modis images during 2005 -2014 (October-April)

جدول ۲- ارزیابی کسر پوشش برف شبیه‌سازی شده با فاکتورهای ذوب برف مختلف توسط تصاویر مودیس در دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۵ (اکتبر - آوریل)

Type	Evaluation parameters	melting factor (m) Snow				
		m=2.5	m=2	m=1.5	m=1	m=0.5
Forest	MAE (%)	23.9	23.46	23.03	21.7	22.2
	RMSE (%)	36.6	36.04	34.48	33.5	34.41
Range land	MAE (%)	30.82	30.5	30.34	30	39.59
	RMSE (%)	40.79	40.48	40.24	39.88	39.38
Low land	MAE (%)	19.03	17.7	16.5	14.65	13.41
	RMSE (%)	32.35	30.14	28	24.57	22.38
Low slope Mountainous	MAE (%)	21.34	21.27	20.99	20.50	20.10
	RMSE (%)	38.7	38.3	37.9	36.7	35.21
High slope Mountainous	MAE (%)	24.40	23.98	23.60	22.84	22.33
	RMSE (%)	40.03	39.47	38.96	37.95	36.86

نواحی اریبی مثبت را نشان می‌دهد (جدول ۳ و شکل ۲). کسر پوشش برف در اکثر نواحی مورد مطالعه، به جز نواحی کم‌ارتفاع، فرابرابر می‌شود، به طوری که بیشترین فرابرابر را در نواحی مرتع (خطای اریبی مثبت ۰/۳۲۷٪) دارد. مدل در نواحی پست و کم ارتفاع، کسر پوشش برف را به طور کوچکی (خطای اریبی منفی ۰/۱۴٪) فرورآورد می‌کند (جدول ۳). بررسی ضرایب تبیین نشان‌دهنده برآورد بیش‌ترین تغییرات کسر پوشش برف تصاویر

نواحی جنگلی با فاکتور ذوب برف $m=1$ (به ترتیب ۲۲/۲ درصد و ۳۴/۴ درصد خطاهای MAE و RMSE) کوچک‌ترین خطاها را دارند، که نشان‌دهنده برآورد بهتری از کسر پوشش برف مدل با این فاکتور ذوب برف است. پس مدل WRF جفت‌شده با NOAHMP با وارد کردن فاکتور ذوب برف واسنجی‌شده، برای نواحی جنگلی فاکتور ذوب برف برابر با یک ($m=1$) و بقیه نواحی برابر ۰/۵ اجرا می‌شود. کسر پوشش برف شبیه‌سازی شده تقریباً در همه

کارایی منفی نشان از ناموفق بودن مدل در برآورد کسر پوشش برف در نواحی مرتع دارد، به طوری که مدل حتی نمی‌تواند به اندازه به کاربردن میانگین مشاهدات، کسر پوشش برف را برآورد کند.

Table 3- The evaluation parameters for simulated snow cover fraction

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی کسر پوشش برف شبیه‌سازی شده

Type	Sample size	BIAS (%)	MAE (%)	Efficiency Coefficient
Range	139	27.3	28.1	-0.21
Forest	125	13.5	18.1	0.19
Low land	172	-1.4	8	0.71
Low slope mountainous	243	21.6	16.9	0.17
High slope mountainous	292	5.1	23.8	0.01

سنجنده مودیس توسط مدل در نواحی پست و کم‌ارتفاع (در حدود ۰/۷۶) است، در حالی که کم‌ترین تغییرات کسر پوشش برف مشاهداتی توسط مدل در نواحی مرتع (در حدود ۰/۳۵) تبیین می‌شود (شکل ۲). هم‌چنین مدل در برآورد کسر پوشش برف در نواحی پست و کم‌ارتفاع، دارای بالاترین ضریب کارایی مثبت (۰/۷۱)، به دلیل کوچک‌ترین میانگین مطلق خطا (۰/۸)، است (جدول ۳). خطاهای بزرگ مدل WRF-NOAHMP در شبیه‌سازی کسر پوشش برف در نواحی دارای پوشش مرتع (میانگین مطلق خطا، ۰/۲۸/۱) و نواحی کوهستانی با شیب زیاد (میانگین مطلق خطا، ۰/۲۳/۸) منجر به کارایی منفی مدل در نواحی مرتع (۰/۲۱-) و کارایی بسیار کوچک مثبت (۰/۰۱) در نواحی کوهستانی با شیب زیاد می‌شود. این

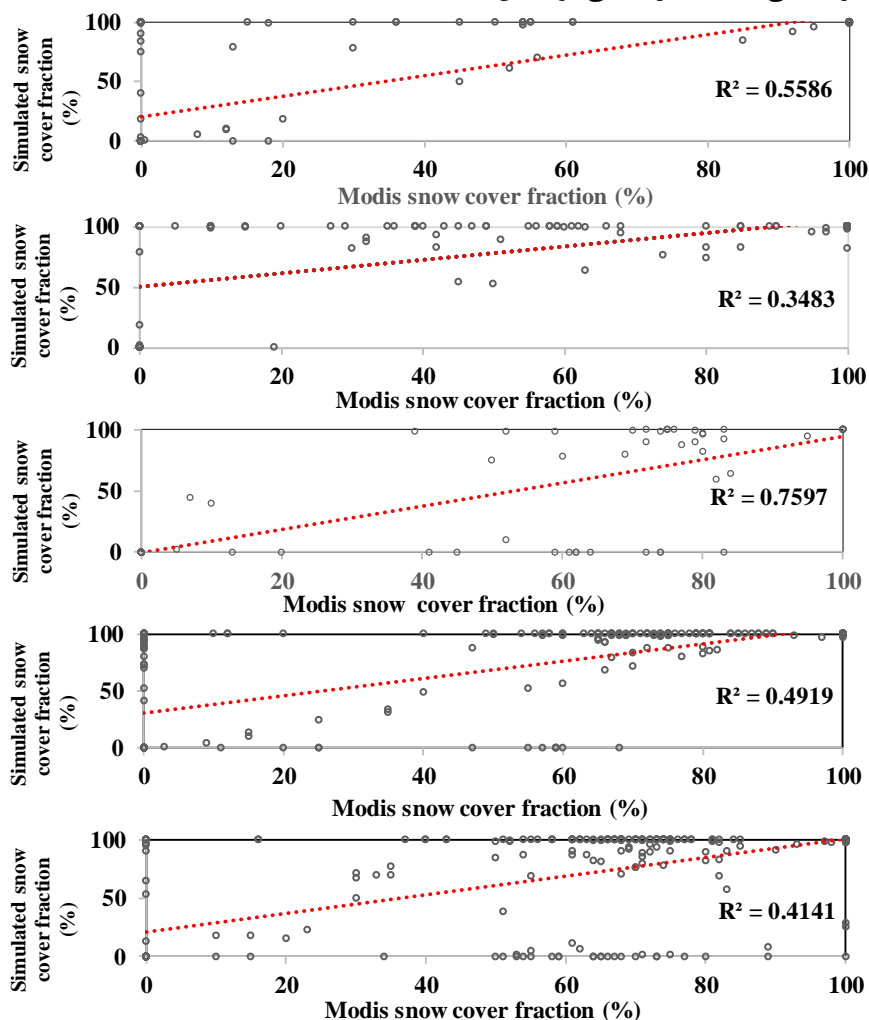


Figure 3- Daily simulated and observed (Modis image) snow cover fraction for a) Forest, b) Range land, c) lowland, d) low slope mountainous and e) high slope mountainous

شکل ۳- کسر پوشش برف روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (تصاویر مودیس) در نواحی (a جنگلی، (b مرتع، (c پست و کم ارتفاع، (d کوهستانی با شیب کم و (e کوهستانی با شیب زیاد

نواحی جنگلی نیز نشان از ناموفق بودن عملکرد مدل در برآورد ارتفاع برف دارد. بالاترین ضریب تبیین نیز در نواحی کوهستانی با شیب کم (۰/۷۸) و پایین‌ترین آن در نواحی جنگلی (۰/۲۴) می‌باشد (شکل ۴).

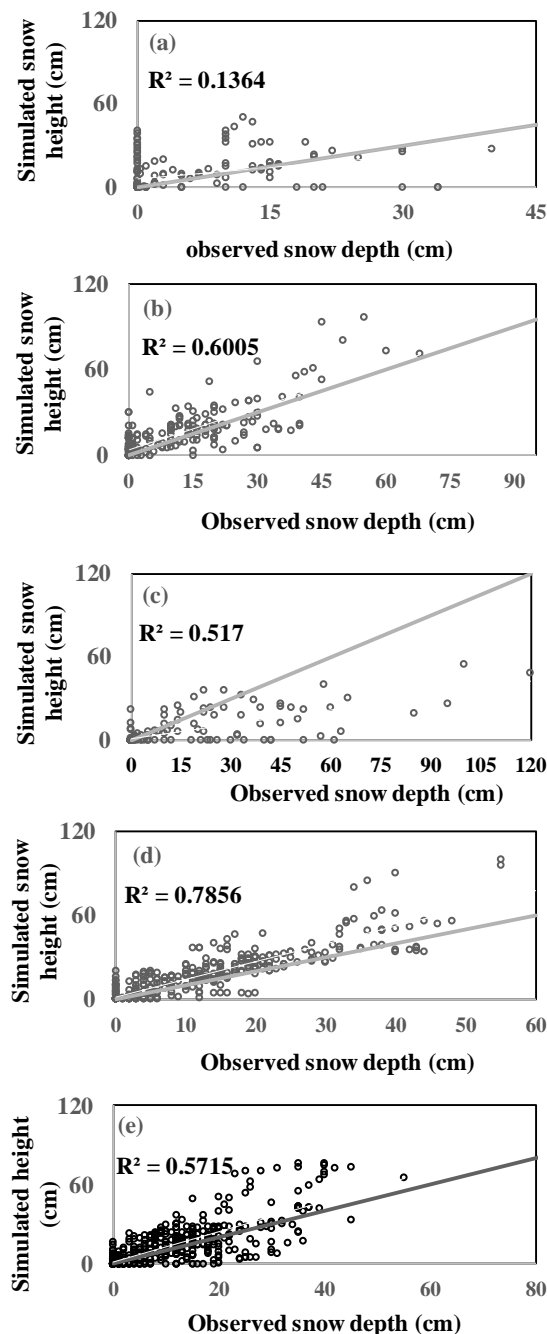


Figure 4- Simulated and observed snow depth (cm) for a) forest, b) range, c) low land, d) low slope mountainous and e) high slope mountainous

شکل ۴- ارتفاع برف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (cm)

در نواحی (a) جنگلی، (b) مرتع، (c) پست و کم ارتفاع، (d) کوهستانی با شیب کم و (e) کوهستانی با شیب زیاد

دقت پایین مدل WRF در طبقه‌بندی صحیح نوع پوشش سطح در نواحی دارای سطوح ناهمگن و نواحی دارای توپوگرافی پیچیده و تأثیر آن بر خروجی‌های طرحواره سطح، می‌تواند از دلایل عملکرد نامناسب مدل در برآورد کسر پوشش برف در این نواحی باشد (Gao and JIA, 2013). لازم به ذکر است حجم نمونه در جدول ۳ بیانگر تعداد داده‌های مشاهده شده در دسترس با توجه به عدم وجود داده‌های کسر پوشش برف در تصاویر سنجنده مودیس به دلیل پوشش ابر است. شکل ۴ نشان‌دهنده ارتفاع برف شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-NOAHMP و مشاهدات و جدول ۴ بیانگر شاخص‌های ارزیابی خطای مدل در برآورد ارتفاع برف است.

Table 4- The evaluation parameters for simulated snow depth (cm)

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی ارتفاع برف شبیه‌سازی شده (cm)

Type	BIAS (cm)	MAE (cm)	Efficiency coefficient
Range	3.7	6.9	0.30
Forest	3.6	8.6	-1.3
Low land	-5	6.4	0.40
Low slope mountainous	4.9	6.8	0.34
High slope mountainous	3	7.6	0.01

ارتفاع برف شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF با طرحواره سطح NOAHMP نسبت به مشاهدات در اکثر نواحی مورد مطالعه (شکل ۴) با توجه به قرار گرفتن اکثر نقاط بالای خط ۱:۱، به ویژه نواحی جنگلی و کوهستانی با شیب کم، بیشتر برآورد می‌شود، به طوری که نواحی کوهستانی با شیب زیاد و شیب کم به ترتیب کم‌ترین (خطای اریبی ۳cm) و بیش‌ترین فرابراورد (خطای اریبی ۴/۹cm) را در شبیه‌سازی ارتفاع برف را دارند (جدول ۴). فرورآورد ارتفاع برف شبیه‌سازی شده مدل تنها در نواحی پست و کم‌ارتفاع با اریبی منفی نسبتاً بزرگ (-۵cm) رخ می‌دهد. بالا بودن ضرایب کارایی مثبت (محدوده ۰/۳۰ تا ۰/۴۰) و خطاهای نسبتاً کوچک MAE (محدوده ۶/۴ cm تا ۶/۹ cm) در برآورد ارتفاع برف در نواحی مرتع، پست و کم ارتفاع و کوهستانی با شیب کم نشان از عملکرد موفق مدل در این نواحی در شبیه‌سازی ارتفاع برف دارد. هرچند کارایی مدل در برآورد ارتفاع برف در نواحی کوهستانی با شیب زیاد مثبت است، اما مقادیر بزرگ MAE (۷/۶ cm) سبب ضریب کارایی بسیار کوچک (۰/۱) شده است. مقادیر منفی ضریب کارایی (-۱/۳) در

مدل در برآورد کمینه دمای هوا در تمام نواحی مورد مطالعه، با ضریب کارایی مثبت و محدوده تغییرات ۰/۷۱-۰/۳۵، موفق است، به طوری که بالاترین عملکرد را در نواحی جنگلی با بالاترین ضرایب کارایی و کوچکترین MAE (۲/۳°C) دارد (جدول ۵). بررسی نمودار تیلور (شکل ۶) نشان از تغییرات ضریب همبستگی کمینه دمای هوا، کسر پوشش برف و ارتفاع برف شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های مشاهداتی در اکثر نواحی در محدوده ۰/۹۰-۰/۶۰ است (کمان اصلی)؛ در حالی که کمترین ضریب همبستگی در ارتفاع برف در نواحی جنگلی (۰/۵۱) است.

Table 5- Evaluation parameters for simulated minimum air temperature

جدول ۵- شاخص ارزیابی کمینه دمای شبیه‌سازی شده

Type	BIAS (°C)	MAE (°C)	Efficiency coefficient
Range	-3.1	3.6	0.35
Forest	-2.1	2.3	0.71
Low land	0.02	2.9	0.38
Low slope mountainous	0.12	2.4	0.65
High slope mountainous	1.05	3.2	0.47

بیشترین ضریب همبستگی بین ارتفاع برف مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در نواحی کوهستانی با شیب کم (۰/۸۹) است. انحراف معیار نرمال شده مدل (کمان‌های خط‌چین) بیش‌تر از یک در اکثر نواحی بیانگر تغییرات بزرگ‌تر کسر پوشش برف و ارتفاع برف شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهداتی است؛ در حالی که کمینه دمای روزانه هوای در اکثر نقاط، دارای انحراف معیار نرمال شده کوچک‌تر و یا نزدیک به یک است. انحراف معیار نرمال شده نزدیک به یک، به ویژه در نواحی مرتع و پست و کم‌ارتفاع، بیانگر عملکرد موفق مدل در برآورد کمینه دما در این نواحی است. هم‌چنین بررسی ریشه میانگین توان دوم خطاهای نرمال شده (کمان‌های توپر)، NRMSE، مدل WRF-NOAHMP نشان‌دهنده خطاهای کمتر مدل در برآورد کمینه دمای هوا (محدوده تغییرات ۰/۷۵-۰/۵) و خطاهای بزرگ‌تر مدل در برآورد کسر پوشش برف (محدوده تغییرات ۰/۷۵-۱) است. کوچکترین NRMSE مدل در برآورد کمینه دمای هوا در نواحی جنگلی است، در حالی که مدل در برآورد ارتفاع برف در نواحی جنگلی بزرگ‌ترین خطاها را دارد.

تأثیر پارامترسازی برف بر بودجه انرژی با بررسی کمینه دمای شبیه‌سازی شده توسط WRF-NOAHMP در محدوده مورد مطالعه انجام می‌شود. مدل WRF-NOAHMP کمینه دمای هوا را در نواحی جنگلی و مرتع، با توجه به خطای اریبی منفی، فروبرآورد و در سایر نواحی با خطای اریبی مثبت فرابرآورد می‌کند (جدول ۵). بالا بودن ضریب تبیین در نواحی جنگلی (۰/۷۷)، بیانگر برآورد ۷۷٪ تغییرات دمای کمینه مشاهده شده توسط مدل است (شکل ۵).

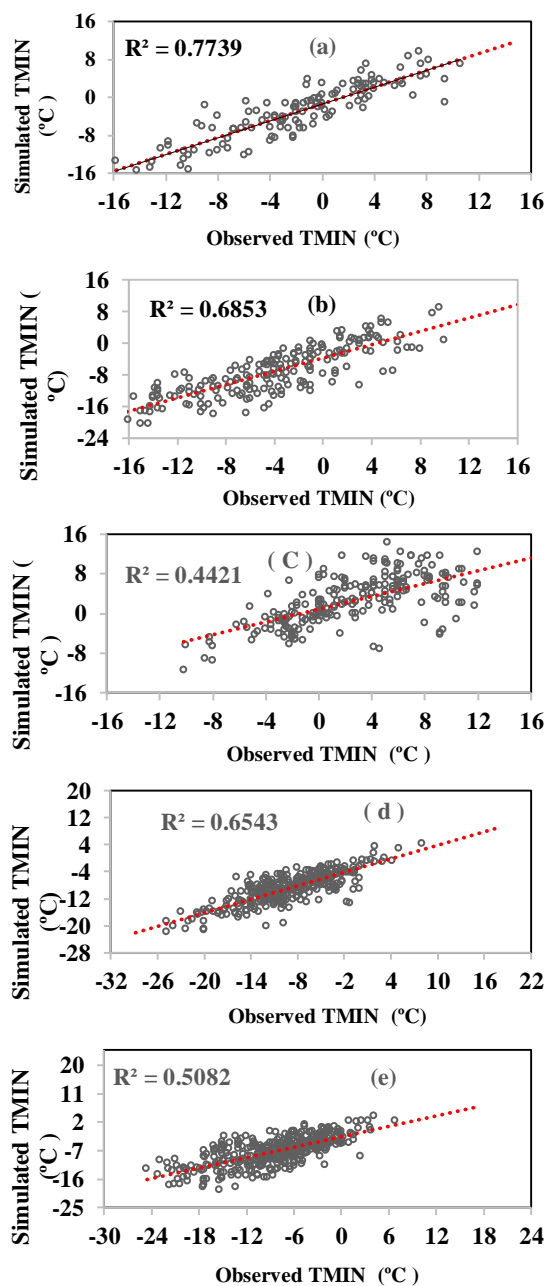


Figure 5- Same as figure 4, but for the minimum air temperature (°C)

شکل ۵- همانند شکل ۴، اما برای کمینه دمای هوا (°C)

ذوب برف استفاده شد. فاکتور ذوب برف واسنجی شده فقط در نواحی جنگلی با فاکتور ذوب برف پیش فرض مدل (یک) کمترین خطا را در برآورد کسر پوشش برف دارد؛ در حالی که فاکتور ذوب برف در سایر نواحی مقداری متفاوت با پیش فرض مدل، برابر ۰/۵، است. پس مدل WRF جفت شده با NOAHMP با فاکتور ذوب برف واسنجی شده، برای نواحی جنگلی برابر یک و بقیه نواحی برابر ۰/۵، در زمان های بارش سنگین برف در زمستان های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ اجرا شد. مدل در شبیه سازی کسر پوشش برف در اکثر نواحی، به جز نواحی دارای پوشش مرتع، به دلیل ضریب کارایی مثبت و خطاهای کوچک موفق است، به طوری که در نواحی پست و کم ارتفاع با بالاترین ضرایب کارایی (مثبت) و تبیین و کوچک ترین خطای مدل (اریبی و میانگین مطلق خطا) بهترین عملکرد را دارد. این نتایج با نتایج Roesch et al., (2001)، در خصوص عملکرد مناسب انتخاب تابع هیپربولیک برای برآورد کسر پوشش برف در نواحی پست و کم ارتفاع، مطابقت دارد. ضریب کارایی بسیار کوچک مثبت مدل در برآورد کسر پوشش برف در نواحی کوهستانی با شیب زیاد و ناموفق بودن مدل در نواحی مرتع با نتایج Wrzesien et al., (2015) و Minder et al., (2016) در عدم قطعیت بالای مدل های برف در برآورد کسر پوشش برف در نواحی کوهستانی با توپوگرافی پیچیده و نواحی دارای سطح ناهمگن توافق دارد. مدل WRF-NOAHMP در برآورد ارتفاع برف در نواحی جنگلی و نواحی کوهستانی با شیب زیاد ناموفق است؛ در حالی که در نواحی پست و کم ارتفاع بالاترین کارایی را دارد. همچنین مدل در برآورد کمینه دمای هوا در تمام نواحی، با ضریب کارایی مثبت، موفق است، به طوری که بهترین عملکرد را در برآورد کمینه دمای هوا در نواحی جنگلی، با بالاترین ضرایب کارایی و همبستگی بالاتر و کوچک ترین خطاها دارد. این نتیجه با یافته های Chen et al., (2014) در بهبود برآورد کمینه دمای هوا توسط طرحواره سطح NOAHMP در فصل زمستان در مقایسه با دو طرحواره NOAH و CLM در شرق آمریکا، توافق دارد. نمودار تیلور هم بیان گر کوچک ترین خطاهای نرمال شده مدل در برآورد دمای کمینه هوا در تمام نواحی مورد مطالعه و خطاهای بزرگ تر مدل در برآورد کسر پوشش برف و ارتفاع برف، به ویژه ارتفاع برف در نواحی جنگلی و مرتع، است. به طور کلی عملکرد مدل

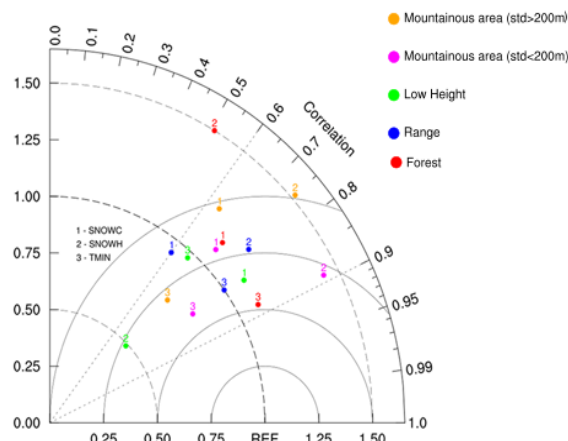


Figure 6- Taylor graph for daily simulated snow cover fraction (SNOWC), snow depth (SNOWH) and minimum air temperature (TMIN)

شکل ۶- نمودار تیلور برای شبیه سازی روزانه کسر پوشش برف (SNOWC)، ارتفاع برف (SNOWH) و کمینه دمای هوا (TMIN)

نتیجه گیری

این تحقیق به ارزیابی مدل برف طرحواره سطح NOAHMP جفت شده با مدل WRF، با فاکتور ذوب برف واسنجی شده، در نواحی غربی (استان های همدان و کردستان) و شمالی کشور (استان های گیلان، مازندران و اردبیل) می پردازد. فاکتور ذوب برف در طرحواره سطح NOAHMP به طور پیش فرض برابر یک، بر اساس داده های ایستگاه های برف سنجی آمریکای شمالی، در نظر گرفته شده است (Niu et al., 2011)، که نیاز به واسنجی دارد. واسنجی فاکتور ذوب برف در این مطالعه، به دلیل عدم اندازه گیری کسر پوشش برف در ایستگاه های زمینی نیازمند استفاده از تصاویر سنجنده های ماهواره ای است، که با توجه به دسترسی کمتر به تصاویر در روزهای برفی به دلیل پوشش ابرناکی، بازه زمانی طولانی تری برای واسنجی باید در نظر گرفته شود. از طرف دیگر با طولانی شدن بازه زمانی، زمان بیش تری باید صرف پردازش تصاویر و استخراج داده های کسر پوشش برف شود. لذا در این تحقیق به دلیل محدودیت های ذکر شده، ایستگاه های محدوده مورد مطالعه به پنج ناحیه شامل: نواحی دارای پوشش جنگلی، مراتع، پست و کم ارتفاع و نواحی کوهستانی دارای شیب کم و زیاد تقسیم شد و تصاویر روزانه سنجنده مودیس ماهواره ترا در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۵ در ماه های بارش برف (ماه های اکتبر تا آوریل) جهت واسنجی کسر پوشش برف با مقادیر مختلف فاکتور

کوهستانی با توپوگرافی پیچیده و پارامترسازی برف روی آسمانه گیاهی دارای عدم قطعیت بالایی است.

WRF جفت شده با طرحواره سطح NOAAHMP در برآورد کمینه دمای هوا مناسب است؛ در حالی که هنوز هم در برآورد کسر پوشش برف و ارتفاع برف در نواحی

منابع

- Anderson, E.A. 1976. A point of energy and mass balance model of snow cover: NOAA Technical Report NWS, 19: 1-150.
- Ball, J.T., Woodrow, I.E., Berry, J.A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In Progress in photosynthesis research (pp. 221-224). Springer Netherlands.China.
- Bonan, G.B. 1996. Land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and users guide. Technical note (No. PB--97-131494/XAB; NCAR/TN--417-STR). National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO (United States): Climate and Global Dynamics Division.
- Bowling, L.C., Lettenmaier, D.P., Nijssen, B., Graham, L.P., Clark, D.B., El Maayar, M., Essery, R., Goers, S., Gusev, Y.M., Habets, F., Van Den Hurk, B. 2003. Simulation of high-latitude hydrological processes in the Torne-Kalix basin: PILPS Phase 2 (e): 1: Experiment description and summary intercomparisons. *Global Planetary Change*, 38(1): 1-30.
- Brutel-Vuilmet, C., Ménégoz, M., Krinner, G. 2013. An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models. *The Cryosphere*, 7(1): 67-80.
- Chen, F. and Dudhia, J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4): 569-585.
- Chen, F., Liu, C., Dudhia, J., Chen, M. 2014. A sensitivity study of high-resolution regional climate simulations to three land surface models over the western United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119: 7271-7291.
- Derksen, C., Brown, R. 2012. Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letter*, 39(19): 1-14.
- Dickinson, R.E., Kennedy, P.J., Henderson-Sellers, A. 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. National Center for Atmospheric Research, Climate and Global Dynamics Division.
- Gao, H., Jia, G. 2013. Assessing disagreement and tolerance of misclassification of satellite-derived land cover products used in WRF Model applications. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(1): 125-141.
- Huang, X., Liang, T., Zhang, X., Guo, Z. 2011. Validation of MODIS snow cover products using Landsat and ground measurements during the 2001-2005 snow seasons over northern Xinjiang. *International Journal of Remote Sensing*, 32: 133-152.
- Irannejad, P., Shao, Y. 1998. Description and validation of the Atmosphere-Land-Surface Interaction Scheme (ALSIS) with HAPEX and Cabauw data. *Global Planetary Change*, 19: 87-114.
- Maurer, E.P., Rhoads, J.D., Dubayah, R.O., Lettenmaier, D.P. 2003. Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS. *Hydrological Process*, 17: 59-71.
- Minder, J.R., Letcher, T.W., Skiles, S.M. 2016. An evaluation of high resolution regional climate model simulations of snow cover and albedo over the Rocky Mountains, with implications for the simulated snow albedo feedback. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(15): 9069-9088.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3): 282-290.
- Niu, G.Y., Yang, Z.L. 2004. Effects of vegetation canopy processes on snow surface energy and mass balances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D23): 1-15.
- Niu, G.Y., Yang, Z.L., Dickinson, R.E., Gulden, L.E. 2005. A simple TOPMODEL based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D21).
- Niu, G.Y., Yang, Z.L., Dickinson, R.E., Gulden, L.E., Su, H. 2007. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D7).
- Niu, G.Y., Yang, Z.L., Mitchell, K.E., Chen, F., Ek, M.B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E. and Tewari, M. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP). Model description and evaluation

- with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- Roesch, A., Wild, M., Gilgen, H., Ohmura, A. 2001. A new snow cover fraction parametrization for the ECHAM4 GCM. *Climate Dynamic*, 17(12): 933-946.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J. 2001. Prototypes for the WRF (Weather Research and Forecasting) model. In Preprints, Ninth Conf. Mesoscale Processes, J11–J15, American Meteorology Society, Fort Lauderdale, FL.
- Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7): 7183-7192.
- Wrzesien, M.L., Pavelsky, T.M., Kapnick, S.B., Durand, M.T., Painter, T.H. 2015. Evaluation of snow cover fraction for regional climate simulations in the Sierra Nevada. *International Journal of Climatology*, 35(9): 2472- 2484.
- Yang, Z.L., Dickinson, R.E., Robock, A., Vinnikov, K.Y. 1997. Validation of the snow submodel of the biosphere–atmosphere transfer scheme with Russian snow cover and meteorological observational data. *Journal of Climate*, 10(2): 353-373.
- Zhang, T. 2005. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics*, 43(4).



Evaluation of the calibrated snow model of the NOAH-MP land surface scheme coupled in the WRF using MODIS images in areas with different land-surface features

M. Khodamoradpour^{1*}, P. Irannejad²

Received: 28/05/2018

Accepted: 09/10/2018

Abstract

Snow cover has a significant effect on agriculture, water resources and climate, and it is one of the most important components of land-surface schemes due to its high spatial and temporal variations. The snow model of the NOAHMP land-surface scheme coupled in the WRF model is evaluated with the calibrated snow melting factor by the Terra satellite's daily MODIS images of snow cover fraction during the heavy snowfalls in 2013 and 2014. The study area including western provinces (Hamedan and Kurdistan) and northern provinces (Ardebil, Gilan, and Mazandaran) of Iran is divided into forests, rangelands, lowlands, and mountainous areas with low and high slopes. The model has the weakest (best) performance in estimating snow cover fraction (minimum air temperature) with highest (lowest) normalized root mean square error and normalized standard deviation greater than (close to) one. The model has high uncertainty in estimating the snow cover fraction and snow depth in the regions with complex topography (with a very small positive efficiency coefficient, 0.01) and heterogeneous areas (rangelands and forests with a negative efficiency coefficient and large errors). The model has the best performance in estimating the snow cover fraction and snow depth in the lowlands with the highest efficiency coefficients (0.71 and 0.40, respectively) and the lowest mean absolute error (8 and 6.4 cm respectively).

Keywords: NOAHMP Land Surface Scheme, Snow Cover Fraction, WRF Model, MODIS Images



¹ Assistant Professor of the Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*Corresponding Author Email Address: mkhodamorad@basu.ac.ir)

DOI: [10.22125/agmj.2018.120644.1005](https://doi.org/10.22125/agmj.2018.120644.1005)

² Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran