

امکان‌سنجی پیش‌بینی رخداد آذرخش با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF در منطقه ایران

مریم قرایلو^{۱*}، سمانه ثابت‌قدم^۱ و سرمد قادر^۲

۱. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۲/۲۱، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

امروزه با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا و شناخت بیشتر پدیده‌های مخرب جوی می‌توان از خسارت‌های ناشی از آن‌ها جلوگیری کرد. یکی از بلاهای جوی و اقلیمی، آذرخش است که شبیه‌سازی‌های صریح از فرایندهای در مقیاس ابر می‌توانند به پیش‌بینی رخداد آن بینجامند. در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی‌های جریان‌های بالارو و پارامترهای خردفیزیکی ابر شامل نسبت‌های اختلاط یخ، برف و گویچه برف به کمک مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF، شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (LPI) برآورد می‌شود. این شاخص، انرژی جنبشی جریان بالارو در ابر همرفتی در حال توسعه است که با پتانسیل تفکیک بار بر مبنای نسبت‌های یخ و آب مایع در منطقه بار مقیاس‌بندی می‌شود. درستی نتایج پیش‌بینی شاخص پتانسیل رخداد آذرخش با استفاده از داده‌های مشاهداتی سنجنده LIS و یکی از شاخص‌های ناپایداری شبیه‌سازی‌شده بر مبنای پارامترهای ناپایداری ترمودینامیکی (برای نمونه KI) در دو مطالعه موردی از رخداد توفان تندی ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که LPI پیش‌نشانگر مفیدی برای امکان رخداد آذرخش است. مقادیر KI پهنه وسیع مستعد فعالیت همرفتی و دارای احتمال زیاد رخداد آذرخش را پیش‌بینی می‌کند. مقایسه نتایج پیش‌بینی‌شده KI و شاخص LPI با مقادیر به‌دست‌آمده از داده‌های مشاهداتی سنجنده LIS بیانگر آن است که مکان رخداد آذرخش با استفاده از پارامترهای خردفیزیکی ابر در مقایسه با پارامترهای ترمودینامیکی با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آذرخش، پیش‌بینی، سنجنده LIS، شاخص K، مدل WRF، LPI.

۱. مقدمه

باران‌های سیل‌آسا همراه است. در حال حاضر تعداد زیادی از سامانه‌های آشکارسازی آذرخش زمان واقعی، توانایی تعیین مکان تأثیر آذرخش ابر به زمین را دارند (برای نمونه شکل ۱). با وجود این، امکان پیش‌بینی پتانسیل رخداد آذرخش در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت تا حد کمی ایجاد شده است. اگرچه چندین شاخص از قبیل CAPE، (K-Index) KI، (Lifted index) LI و (Convective Available Potential Energy) CPTP و (Cloud Physics Thunder Parameter) توسط هواشناسان به‌منظور پیش‌بینی احتمال رخداد توفان‌های تندی به‌کار می‌رود، ولی این شاخص‌ها بر مبنای پارامترهای ناپایداری ترمودینامیکی تعریف می‌شوند و براساس خردفیزیک تفکیک بار در توفان‌های تندی به‌دست نیامده‌اند (آکرمین و نوکس، ۲۰۰۳؛ برایت و همکاران، ۲۰۰۵). لین و یایر (۲۰۰۸) و یایر و همکاران

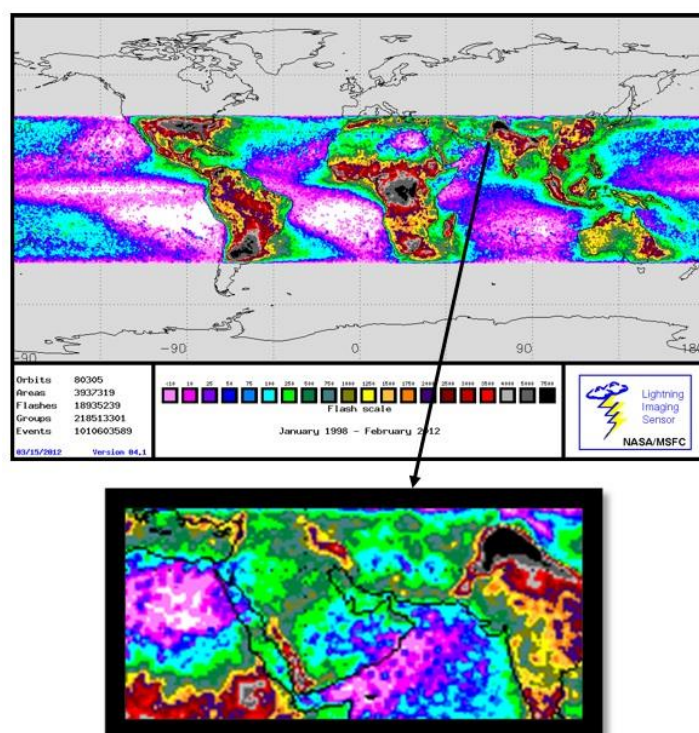
بلاهای طبیعی در طول زندگی بشر به فراوانی رخ داده‌اند، ولی امروزه با بهره‌گیری از فناوری‌های موجود، شناخت بیشتر این بلاها و ایجاد سامانه‌های پایش و پیش‌بینی، می‌توان از ابعاد روزافزون خسارت‌های ناشی از آن‌ها جلوگیری کرد. یکی از این بلاها آذرخش است. برخورد گویچه‌های برف با ذرات یخ یا برف در جریان‌های بالارو در حضور آب مایع آبراشباع موجب تفکیک بارهای الکتریکی در ابرها و ایجاد آذرخش می‌شود (سندرز و همکاران، ۱۹۹۱؛ میلر و همکاران، ۲۰۰۱؛ قرایلو و همکاران، ۱۳۹۳). آذرخش می‌تواند علاوه بر تلفات جانی، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم باعث اختلال و صدمات شدید در تجهیزات شبکه‌های قدرتمند مخابراتی و هواپیمایی شود.

آذرخش از مشخصه‌های سامانه‌های شدید وضع هوا به شمار می‌رود که اغلب با تگرگ‌های سنگین و

آذرخش که از داده‌های واقعی به دست آمده است، هم‌خوانی دارد. همچنین زمان رخداد بیشینه بارندگی در تمامی مطالعات موردی با زمان رخداد بیشینه این شاخص یکسان است؛ از این رو، این شاخص می‌تواند برای پیش‌بینی باران‌های سیل‌آسا نیز استفاده شود.

لین و یایر (۲۰۱۰) تفاوت بین پیش‌بینی آذرخش با استفاده از مدل WRF را برای دو منطقه مختلف در دو حوزه با تفکیک افقی ۱ و ۴ کیلومتر با هم مقایسه کردند و نشان دادند که مدل، پیش‌بینی قابل‌قبولی از رخداد آذرخش دارد که البته با زیادتیرشدن تفکیک افقی در محدوده موردبررسی، نتایج با مقادیر مشاهداتی همبستگی بیشتری دارند. همچنین نشان دادند استفاده از شاخص پتانسیل رخداد آذرخش در پیش‌بینی آذرخش برای اجرای عملیاتی مدل در حوزه با تفکیک افقی ۴ کیلومتر، اطلاعات ارزشمندی را به‌ویژه در مناطقی که امکان رخداد فعالیت‌های همرفتی و توفان‌های تندری زیاد است، ارائه می‌کند. همچنین پیشنهاد کردند که برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت و هشدار اولیه آذرخش می‌توان از الگوی پیش‌بینی این شاخص به‌همراه چگالی آذرخش استفاده کرد.

(۲۰۱۰) شاخص جدیدی را به نام شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (Lightning Potential Index, LPI) با استفاده از داده‌های خروجی مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا پیشنهاد دادند. این شاخص در سال‌های اخیر در برخی مناطق جهان از جمله ایتالیا، اسپانیا و یونان برای پیش‌بینی آذرخش استفاده شده است. یایر و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که این شاخص با مقادیر مشاهداتی چگالی آذرخش و همچنین بارندگی شدید دارای همبستگی مثبت و شدیدی است که البته مقدار همبستگی در مناطق مختلف متفاوت است. آن‌ها پیشنهاد کردند که از این شاخص می‌توان برای پیش‌بینی پتانسیل رخداد آذرخش و باران‌های شدید استفاده کرد. آن‌ها برای بررسی‌های بیشتر، از مدل پیش‌بینی عددی WRF با تفکیک ۱ کیلومتر در ۵ منطقه متفاوت در ناحیه مدیترانه استفاده کردند و در چند مطالعه موردی، درستی این شاخص را در مقایسه با دیگر شاخص‌های موجود از جمله شاخص KI و CPTP ارزیابی کردند. علاوه بر عملکرد دقیق‌تر این شاخص در مقایسه با شاخص‌های پیشین، نشان داده شد که مقدار شاخص به‌خوبی با مقدار درخش‌های ناشی از



شکل ۱. نقشه مجموع آذرخش در جهان و موقعیت ایران و غرب ایران از ژانویه ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ (برگرفته از وبگاه ناسا (<http://lightning.nsstc.nasa.gov/data/>))

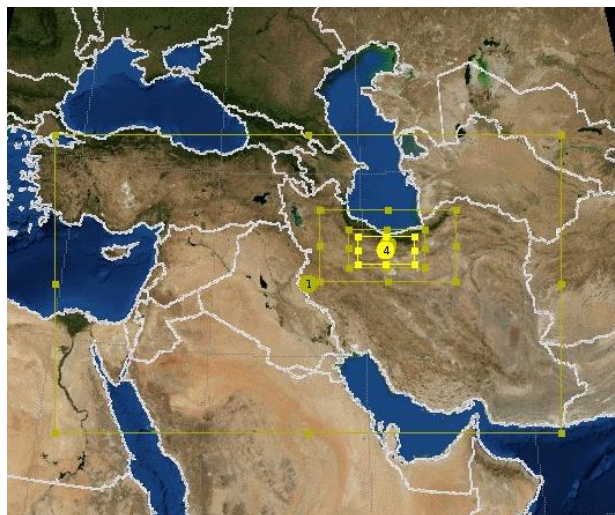
داده‌های باز تحلیل FNL مدل WRF برای تاریخ‌های منتخب اجرا شد. پیکربندی مدل شامل چهار حوزه به ترتیب با تفکیک افقی ۳۶، ۱۲، ۴ و ۱/۳۳ کیلومتر است (شکل ۲). کوچک‌ترین حوزه با مرکز تهران به‌عنوان منطقه هدف تعریف شده است، ولی از آنجا که ماهواره از حوزه دوم در تاریخ مورد مطالعه عبور کرده است، تفسیرهای صورت گرفته در بخش بحث و نتایج مربوط به حوزه دوم با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر است. شایان ذکر است که استفاده از این تفکیک افقی در کاربردهای عملیاتی مرسوم‌تر است. مدل WRF گزینه‌های فیزیکی متفاوتی دارد که در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی تابش طول‌موج بلند از طرح‌واره (RRTM) Rapid Radiative Transfer Model (مالور و همکاران، ۱۹۹۷) و برای تابش طول‌موج کوتاه از طرح‌واره دادها (دادها، ۱۹۸۹) استفاده شده است. طرح‌واره مونین-ابخوف (جانجیک، ۱۹۹۶) برای شبیه‌سازی شارهای لایه سطحی و طرح‌واره انرژی جنبشی تلاطمی ملور-یامادا-جانجیک (ملور و یامادا، ۱۹۸۲؛ جانجیک ۱۹۹۰ و ۱۹۹۴) برای شبیه‌سازی شارهای لایه مرزی استفاده شده است. شارهای سطح زمین با استفاده از مدل سطح زمین NOAA (چن و دادها، ۲۰۰۱) که توسط لیو و همکاران (لیو و همکاران، ۲۰۰۶) اصلاح شده است، به‌دست می‌آیند. طرح‌واره همرفت کین-فریچ (کین و فریچ، ۱۹۹۳) برای دو حوزه بیرونی اجرای مدل در شبیه‌سازی همرفت و طرح‌واره خردفیزیک تامپسون (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۴) برای دو حوزه درونی استفاده شده است.

در مقاله حاضر امکان کاربرد این شاخص به‌منظور پیش‌بینی رخداد آذرخش در منطقه ایران با استفاده از مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF در دو مطالعه موردی ارزیابی می‌شود. راست‌آزمایی نتایج به روش کیفی و بر اساس مقایسه نقشه‌های شاخص پتانسیل رخداد آذرخش با نقشه‌های تعداد درخش‌های آذرخش حاصل از سنجنده تصویربرداری آذرخش (Lightning Imaging Sensor, LIS) انجام می‌گیرد.

۲. داده‌ها و روش پژوهش

داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق شامل گزارش کد هوای حاضر از ایستگاه‌های همدیدی منتخب منطقه ایران، داده‌های بازتحلیل FNL برای اجرای مدل میان‌مقیاس WRF (نسخه ۱-۶-۳) و داده‌های مشاهداتی (برای نمونه تعداد درخش‌های آذرخش به شکل نقشه‌های ماهواره‌ای با استفاده از سنجنده LIS) برای راست‌آزمایی نتایج اجرای مدل برای دو نمونه رخداد آذرخش است. سنجنده LIS روی ماهواره (Tropical Rainfall Measurement Mission) قرار دارد. هر رخداد آذرخش، یک عنصر تصویری درخشان که دارای روشنایی بیش از حد آستانه تعریف شده است، در نظر گرفته می‌شود (کریستین و همکاران، ۱۹۹۲).

برای مطالعه، در ابتدا با بررسی داده‌های ایستگاه‌های همدیدی (داده‌های هوای حاضر) تاریخ‌های رخداد آذرخش برای نمونه در منطقه ایران استخراج شد؛ سپس با استفاده از



شکل ۲. موقعیت مکانی چهار حوزه اجرای مدل WRF

که در آن، Q_i نسبت اختلاط جرم آب مایع کل (برحسب kg/kg) و Q_i نسبت اختلاط کسری یخ است که از رابطه (۳) به دست می آید:

$$Q_i = q_g \left[\left(\frac{(q_s q_g)^{0.5}}{(q_s + q_g)} \right) + \left(\frac{(q_i q_g)^{0.5}}{(q_i + q_g)} \right) \right] \quad (۳)$$

که در آن، q_s ، q_i و q_g به ترتیب نسبت های اختلاط جرم برف، یخ ابر و گویچه برف (kg/kg) هستند.

علاوه بر شاخص LPI، از یکی از شاخص های بر مبنای پارامترهای ناپایداری ترمودینامیکی (برای نمونه KI) برای مقایسه نتایج پیش بینی LPI استفاده می شود. مقادیر KI بر اساس تغییرات قائم دما از رابطه زیر محاسبه می شود (گئورگی، ۱۹۶۰):

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (۴)$$

که در آن، T_{850} ، T_{700} و T_{500} به ترتیب دما در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال و T_{d700} و T_{d850} به ترتیب دمای نقطه شبنم در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال بر حسب درجه سانتی گراد هستند. جمله های سمت راست رابطه بالا به ترتیب اُفت دما، رطوبت و خشکی هوا را نشان می دهند. برای ایجاد ناپایداری باید دو جمله اول و دوم، بزرگ و جمله سوم، کوچک باشد. هرچه این شاخص بیشتر باشد، بر شدت ناپایداری افزوده می شود. رابطه مقدار شاخص K با ناپایداری جو در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس مقادیر شبیه سازی شده (شکل ۳-الف) و از مقایسه با جدول ۱ مشاهده می شود که در منطقه رخداده آذرخش که با دایره سیاه در شکل مشخص شده است، مقدار شاخص بیانگر ایجاد ناپایداری با احتمال ۶۰ تا ۸۰ درصد است.

۳. بحث و نتایج

۳.۱. رخداد آذرخش، ۹ دسامبر ۲۰۱۳

میانگین سه ساعته KI و LPI شبیه سازی شده با مدل WRF بین ساعت های ۱۶:۰۰ و ۱۹:۰۰ گرینویچ برای ۹ دسامبر ۲۰۱۳ در منطقه ایران به ترتیب در شکل های ۳-الف و ۳-ب نشان داده شده است. شایان ذکر است که مقادیر

پس از اجرای مدل برای دوره های مورد نظر، سرعت قائم و پارامترهای خردفیزیک ابر شامل نسبت های اختلاط یخ، برف و گویچه برف که برای تعیین پتانسیل رخداد آذرخش مورد نیاز است، استخراج شد. بر مبنای روابط پیشنهادی برای تعیین پتانسیل رخداد آذرخش، کدنویسی این روابط انجام گرفت. در نهایت خروجی شاخص پتانسیل رخداد آذرخش، به صورت کیفی با نقشه های ماهواره راست آزمایی شد.

بر اساس تعریف یایر و همکاران (۲۰۱۰) از شاخص پتانسیل رخداد آذرخش، حجم بین هم دماهای ۰ و ۴۰- درجه سانتی گراد که در آن آب ابر سرد می تواند هم زمان با یخ، گویچه برف و برف وجود داشته باشد، به عنوان منطقه تفکیک بار در توفان تندی در نظر گرفته می شود. این تفکیک بار بر مبنای نظریه نالقایبی (Non-inductive theory) صورت می گیرد که در آن برخورد آب شهاب ها منجر به تفکیک بار می شود (سندرز و همکاران، ۱۹۹۱؛ میلر و همکاران، ۲۰۰۱). شاخص LPI انرژی جنبشی جریان بالارو در ابر همرفتی در حال توسعه است که با پتانسیل تفکیک بار بر مبنای نسبت های یخ و آب مایع در منطقه بار (۰ تا ۲۰- درجه سانتی گراد) ابر مقیاس بندی می شود. این شاخص با استفاده از سرعت قائم و نسبت های اختلاط آب مایع، یخ ابر، برف و گویچه برف پیش بینی شده از مدل WRF محاسبه می شود. شاخص LPI به شکل رابطه (۱) تعریف می شود:

$$LPI = \frac{1}{V} \iiint \varepsilon w^2 dx dy dz \quad (۱)$$

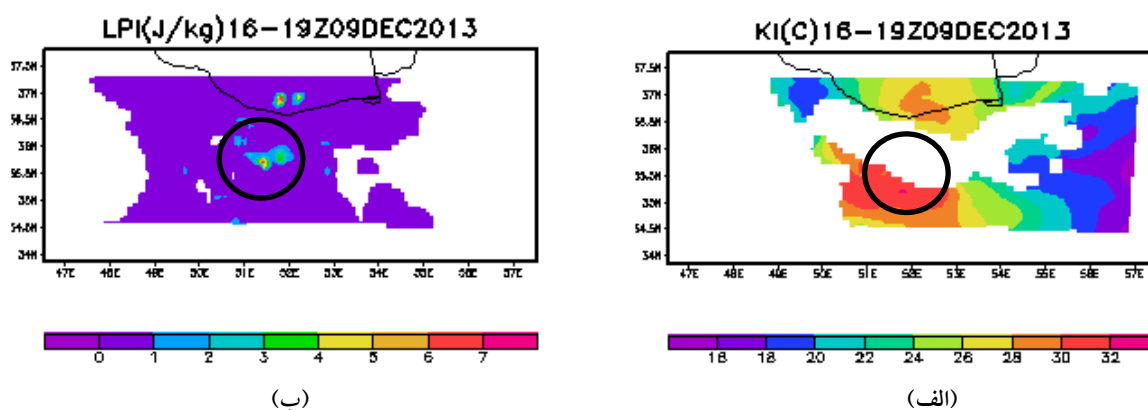
که V حجم هوای لایه بین ۰ و ۲۰- درجه سانتی گراد و w مؤلفه قائم باد (m/s) است. شایان ذکر است که شاخص LPI فقط در منطقه تفکیک بار ابر و در آن نقاط شبکه ای که سرعت قائم بیش از ۰/۵ m/s است، مقدار غیر صفر دارد. این شرط بیانگر مرحله رشد توفان تندی است (یایر و همکاران، ۲۰۱۰). ε عدد بی بعدی است که مقداری بین صفر و ۱ دارد و به شکل رابطه (۲) تعریف می شود:

$$\varepsilon = \frac{2(Q_i Q_l)^{0.5}}{(Q_i + Q_l)} \quad (۲)$$

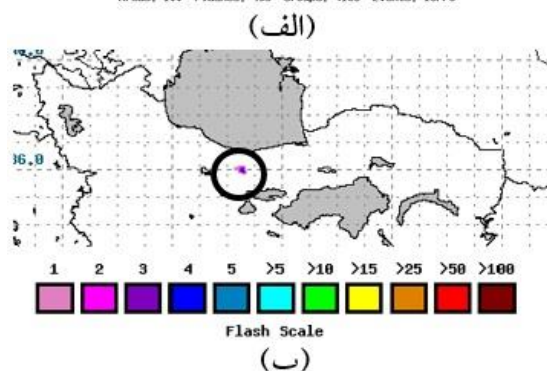
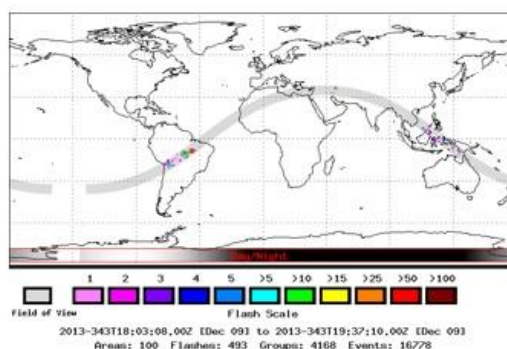
جدول ۱. رابطه بین شاخص K و ناپایداری جو

شاخص K	ناپایداری
کمتر از ۱۵	۰ درصد
۱۵-۲۰	کمتر از ۲۰ درصد
۲۱-۲۵	۲۰ - ۴۰ درصد
۲۶-۳۰	۴۰ - ۶۰ درصد
۳۱-۳۵	۶۰ - ۸۰ درصد
۳۶-۴۰	۸۰ - ۹۰ درصد
بیشتر از ۴۰	نزدیک ۱۰۰ درصد

LPI از نتایج کد نوشته شده بر مبنای روابط پیشنهادی یایر و همکاران (۲۰۱۰) و خروجی‌های مدل WRF به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد درحالی‌که مقادیر KI فقط دیدگاهی کلی از فعالیت آذرخش ارائه می‌کند، LPI توزیع مکانی درخش‌های آذرخش مشاهده شده را به‌درستی نشان می‌دهد (در مقایسه با شکل ۴). سنجنده LIS از حدود ساعت ۱۸:۰۰ تا ۱۹:۰۰ گرینویچ از روی منطقه ایران عبور کرده است و در ساعت ۱۸:۵۲ گرینویچ در سه طول و عرض جغرافیایی نزدیک به هم که در جدول ۲ مشخص شده‌است، تعداد درخش‌های آذرخش را به ثبت رسانده است.



شکل ۳. میانگین سه‌ساعته شاخص KI (الف) و LPI (ب) برای ساعت ۱۶:۰۰ تا ۱۹:۰۰ گرینویچ ۹ دسامبر ۲۰۱۳ در منطقه ایران.



شکل ۴. درخش‌های آذرخش حاصل از سنجنده LIS برای ۹ دسامبر ۲۰۱۳

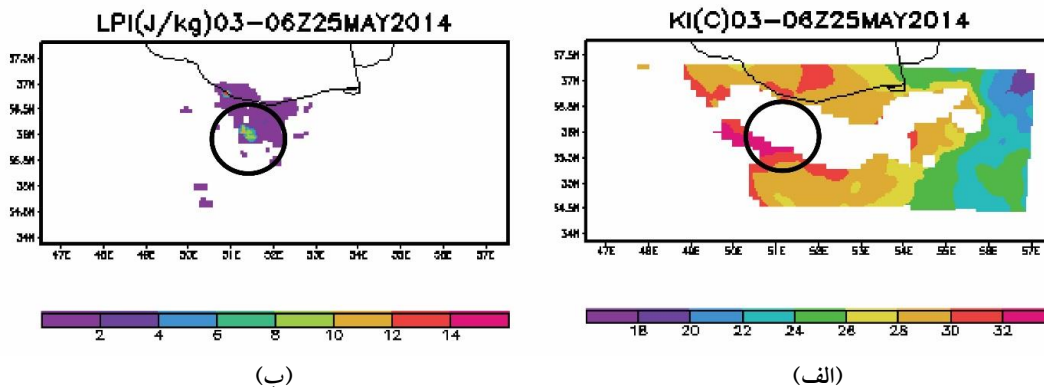
جدول ۲. مشخصات زمان و مکان آذرخش ثبت شده توسط سنجنده ماهواره LIS در ۹ دسامبر ۲۰۱۳ در منطقه ایران

تعداد رخداد	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تاریخ	زمان درخش (UTC)
۱۴	۵۵/۶۶۰	۳۵/۸۸۳	۹ دسامبر ۲۰۱۳	۱۸:۵۲:۳۲
۹	۵۵/۶۱۹	۳۵/۹۶۷	۹ دسامبر ۲۰۱۳	۱۸:۵۲:۵۶
۳۷	۵۵/۴۶۰	۳۵/۹۱۰	۹ دسامبر ۲۰۱۳	۱۸:۵۲:۵۷

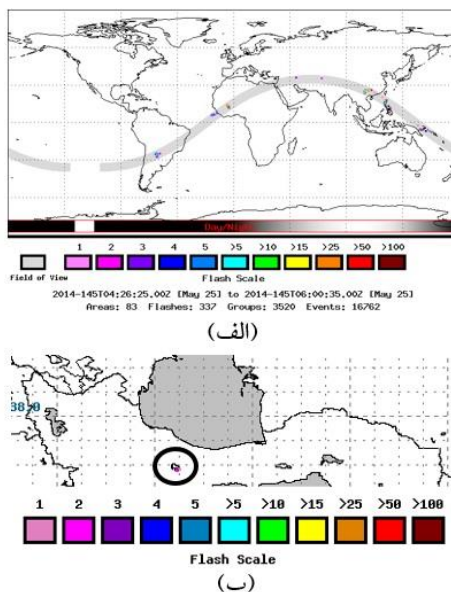
حاصل از تصاویر سنجنده LIS در این مطالعه موردی نیز وجود دارد، ولی شاخص K قابلیت کمتری در تعیین موقعیت مکانی دقیق درخش های آذرخش نشان می دهد. شکل ۶ داده های درخش آذرخش حاصل از سنجنده LIS برای رخداد توفان تندری در منطقه ایران در ۲۵ می ۲۰۱۴ را نشان می دهد. این سنجنده از حدود ساعت ۰۵:۰۰ تا ۰۶:۰۰ گرینویچ از روی منطقه ایران عبور کرده است و در ساعت ۰۵:۱۰ گرینویچ در سه طول و عرض جغرافیایی درخش های آذرخش را به ثبت رسانده است (جدول ۳).

۲.۳. رخداد آذرخش، ۲۵ می ۲۰۱۴

شکل ۵-الف میانگین سه ساعته پیش بینی شده مقادیر KI از مدل میان مقیاس WRF را برای ۲۵ می ۲۰۱۴ در منطقه ایران بین ساعت های ۰۳:۰۰ و ۰۶:۰۰ گرینویچ نشان می دهد. میانگین سه ساعته (بین ساعت های ۰۳:۰۰ و ۰۶:۰۰) مقادیر LPI برای ۲۵ می ۲۰۱۴ در شکل ۵-ب نشان داده شده است. مقایسه شکل های ۵-الف و ۵-ب با شکل ۶ نشان می دهد که همخوانی خوبی بین مقادیر شبیه سازی شده LPI و توزیع مکانی درخش های آذرخش



شکل ۵. میانگین سه ساعته شاخص KI (الف) و LPI (ب) برای ساعت ۰۳:۰۰ تا ۰۶:۰۰ گرینویچ ۲۵ می ۲۰۱۴ در منطقه ایران



شکل ۶. درخش های آذرخش حاصل از سنجنده LIS برای ۲۵ می ۲۰۱۴ در منطقه ایران

جدول ۳. مشخصات زمان و مکان آذرخش ثبت‌شده توسط سنجنده ماهواره LIS در ۲۵ می ۲۰۱۴ در منطقه ایران

زمان درخش (UTC)	تاریخ	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	تعداد رخداد
۵:۱۰:۴۸	۲۵ می ۲۰۱۴	۳۵/۷۷۲	۴۹/۹۲۷	۱۵۵
۵:۱۰:۴۸	۲۵ می ۲۰۱۴	۳۵/۷۵۵	۴۹/۹۲۱	۴۹
۵:۱۱:۰۸	۲۵ می ۲۰۱۴	۳۵/۷۷۸	۵۰	۱۶

۴. نتیجه‌گیری

رخداد آذرخش هستند، ولی شاخص LPI مکان رخداد آذرخش را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند. از این رو با توجه به عملکرد پذیرفتنی شاخص LPI در پیش‌بینی امکان رخداد آذرخش در دو مطالعه موردی ارائه شده در مقاله حاضر، پیشنهاد می‌شود در آینده به منظور پیش‌بینی امکان رخداد آذرخش در مناطق اقلیمی مختلف منطقه ایران، مطالعات گسترده‌تری اجرا شود. این مطالعات زمینه‌ای برای عملیاتی کردن این شاخص در پیش‌بینی‌های رخداد آذرخش را فراهم می‌کند.

مراجع

قرایلو، م.، پگاه فر، ن. و بیدختی، ع. ع، ۱۳۹۳، مدل‌سازی انتقال بار الکتریکی درون ابر (صاعقه) و پیاده‌سازی آن در یک مدل پیش‌بینی یک‌بعدی ابر قائم، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۱)، ۱۳۷-۱۴۸.

Ackerman, A. S. and Knox, A. J., 2003, *Meteorology understanding the atmosphere*, Toronto, Ontario, Canada.

Bright, D. R., Wandishin, M. S., Jewell, R. E. and Weiss, S. J., 2005, A physically based parameter for lightning prediction and its calibration in ensemble forecasts. Preprints, Conf. on Meteor, Applications of Lightning Data, San Diego, CA, Amer. Meteor. Soc., 4.3.

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, *Mon. Weather Rev.*, 129, 569-585.

Christian, H. J., Blakeslee, R. J. and Goodman, S. J., 1992, Lightning imaging sensor (LIS) for the Earth Observing System, NASA TM-4350, 44 pp.

Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077-3107.

George, J. J., 1960, *Weather forecasting for*

در مقاله حاضر شاخص LPI به منظور پیش‌بینی رخداد آذرخش در منطقه ایران با استفاده از خروجی‌های مدل WRF شامل سرعت قائم و پارامترهای خردفیزیک ابر مانند نسبت‌های اختلاط یخ، برف و گویچه برف و بر مبنای روابط پیشنهادی یایر و همکاران (۲۰۱۰) کدنویسی شده‌است.

داده‌های بازتحلیل FNL برای اجرای مدل میان‌مقیاس WRF و داده‌های تعداد درخش‌های آذرخش به شکل نقشه‌های ماهواره‌ای با استفاده از سنجنده LIS برای راست‌آزمایی نتایج اجرای مدل برای دو نمونه رخداد آذرخش در تاریخ‌های ۹ دسامبر ۲۰۱۳ و ۲۵ می ۲۰۱۴ در منطقه ایران استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که LPI پیش‌نشانگر مفیدی برای امکان رخداد آذرخش است. مقادیر KI پهنه وسیعی را پیش‌بینی می‌کند که مستعد فعالیت همرفتی و در نتیجه دارای احتمال زیادی برای

aeronautics, Academic Press, 673 pp.

Janjic, Z., 1990, The step-mountain coordinate: Physical package, *Mon. Weather Rev.*, 118, 1429-1443.

Janjic, Z., 1994, The step-mountain eta coordinate model: Further development of the convection, viscous sublayer, and turbulent closure schemes, *Mon. Weather Rev.*, 122, 927-945.

Janjic, Z., 1996, The Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP eta model, paper presented at 11th Conference on Numerical Weather Prediction, Am. Meteorol. Soc., Norfolk, Va., 19-23 Aug.

Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, in *The Representation of Cumulus in Numerical Models*, Meteorol. Monogr, 46, 165-177.

Liu, Y., F. Chen, Warner, T. and Basara, J., 2006, Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the joint urban 2003 project,

- J. Appl. Meteorol. Climatol, 45(7), 912-929.
- Lynn, B. H. and Yair, Y., 2008, Lightning potential index: a new tool for predicting the lightning density and the potential for extreme rainfall, Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly, Vienna.
- Lynn, B. H. and Yair, Y., 2010, Prediction of lightning flash density with the WRF model, Adv. Geosci., 23, 11-16.
- Mellor, G. L. and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- Miller, K., Gadian, A., Saunders, C., Latham, J. and Christian, H., 2001, Modeling and observations of thundercloud electrification and lightning, Atmos. Res., 58, 89-115.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, J. Geophys. Res., 102(D14), 16,663-16,682.
- Saunders, C. P. R., Keith, W. D. and Mitzeva, R. P., 1991, The effect of liquid water on thunderstorm charging, J. Geophys. Res., 96, 11007-11017.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3. National Center for Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
- Thompson, G., Rasmussen, R. M. and Manning, K., 2004, Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis, Mon. Weather Rev., 132, 519-542.
- Yair, Y., Lynn, B., Price, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Morin, E., Mugnai, A. and Llasat, M. C., 2010, Predicting lightning density in Mediterranean storms based on the WRF model dynamic and microphysical fields, J. Geophys. Res., Atmospheres (1984-2012), 115(D4).