مطالعه عددی عملکرد شاخص تهدید آذرخش در پیش‌بینی آذرخش

نرگس صالح[۱]، مریم قرایلو[۲] و مجید مزرعه فراهانی[۳]

[۱]دانشجوی دکتری هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، nargess.saleh@ut.ac.ir

[۲]استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، gharaylo@ut.ac.ir

[۳]دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mazraeh@ut.ac.ir

چکیده

در حال حاضر، تعداد زیادی از سامانه‌های زمان واقعی آشکارسازی آذرخش توانایی آشکارسازی آذرخش ابر به زمین (Cloud-to-Ground; CG) را دارند. با این وجود، پیش‌بینی آذرخش در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدّت تا حد کمی برآورده شده است. شاخص تهدید آذرخش (LTI) توسط فریزبی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از برخی پارامترهای هواشناسی برگرفته از شبیه‌سازی‌های مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP) برای شناسایی مناطق رخداد آذرخش معرفی شد. این پارامترها شامل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی (CAPE)، شاخص بالابری (LI)، آهنگ کاهش دمای پتانسیلی هم‌ارز، دمای ۸۵۰ هکتوپاسکال، آب بارش‌شو و رطوبت نسبی در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد بودند. در این تحقیق، عملکرد LTI با استفاده از شبیه‌سازی‌های مدل میان‌مقیاس WRF برای ۷ رخداد در منطقهٔ تهران مورد بررسی قرار گرفت. بررسی توزیع فضایی مقادیر میانگین LTI و محلّ رخداد آذرخش حاصل از داده‌های ماهواره‌ای LIS و داده‌های زمین‌پایهٔ شبکهٔ گستردهٔ موقعیّت آذرخش (WWLLN) نشان داد که شاخص LTI عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی مکان‌های رخداد آذرخش برای موارد مطالعاتی دارند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی آذرخش، LTI، WWLLN

Numerical simulation of the performance of Lightning Threat Index (LTI) in lightning prediction

Narges Saleh[1], Maryam Gharaylou[2] and Majid M. Farahani[3]

1 Ph.D. student, Institute of Geophysics, University of Tehran
2 Assistant professor, Institute of Geophysics, University of Tehran
3 Associate professor, Institute of Geophysics, University of Tehran

Abstract

Currently, a large number of real-time lightning detection systems are capable of detecting Cloud-to-Ground (CG) lightning. However, the possibility of lightning event prediction is less satisfied in short-term predictions. Lightning Threat Index (LTI) was introduced by Frisbie et al. (2009) using some meteorological parameters including CAPE, equivalent potential temperature lapse rate, precipitable water and relative humidity. In this research, the performance of LTI is investigated using the WRF mesoscale model simulations for seven thundercloud cases over Tehran area. The examination of spatial distribution of the time-averaged LTI and the location of lightning occurrence of World Wide Lightning Location Network (WWLLN) data shows that LTI has a comparable performance in prediction of lightning occurrence locations.

Keywords: Lightning prediction, LTI, WWLLN

۱ مقدمه

فعّالیّت‌های زیادی در زمینه پیش‌بینی آذرخش انجام شده که می‌توان آنها را در سه دسته کلّی تقسیم‌بندی کرد. در دسته اول می‌توان مطالعاتی که شاخص‌هایی را با استفاده از برخی متغیّرها از جمله انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی (CAPE)، شاخص بالابری (LI) و آهنگ کاهش دمای پتانسیلی هم‌ارز را معرفی کرده‌اند، جای داد. در این زمینه می‌توان به سولومون و بیکر (۱۹۹۴)، باروز و همکاران (۲۰۰۵)، و مادولاتا و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد. در دستهٔ دوم مطالعاتی قرار می‌گیرند که با توجه به خردفیزیک ابر و برخی از خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (سرعت قائم و نسبت‌های اختلاط گویچه برف و یخ) شاخصی را برای پیش‌بینی آذرخش پیشنهاد کرده‌اند. یایر و همکاران (۲۰۱۰) فعّالیّت‌های چشمگیری در این مورد انجام دادند و شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (LPI) که اندازه‌ای از میزان قابلیّت باردارسازی در درون ابر است را معرفی کردند. دستهٔ سوم، رطوبت را متغیّر اصلی معرفی کرده‌اند. فریزبی و همکاران (۲۰۰۹) شاخصی تحت عنوان شاخص تهدید آذرخش (LTI) را با توجه به پارامترهای جوّی از جمله رطوبت نسبی، دما، آهنگ کاهش دمای پتانسیلی هم‌ارز، CAPE، LI و آب بارش‌شو پیشنهاد کردند که عملکرد بسیار چشمگیری در شناسایی مناطق رخداد آذرخش در منطقه کلورادو داشت. گیجبن و همکاران (۲۰۱۶) از نرم‌افزارهای آماری برای شناسایی پارامترهای مؤثر در محاسبهٔ این شاخص با توجه به دسترسی به داده‌های فراوان حاصل از ۲۴ حسگر آشکارسازی آذرخش در منطقهٔ مورد مطالعه خود، بهره بردند.

وجود رطوبت کافی یکی از الزامات وقوع آذرخش است (باروز و همکاران، ۲۰۰۵). مطالعات بردکلیس و لیست (۲۰۰۱) نشان داد که همبستگی خوبی بین رطوبت نسبی و انتقال بار در منطقهٔ باردارسازی در ابر تندری وجود دارد. آب بارش‌شو نیز برای تخمین میزان رطوبت در جوّ استفاده می‌شود و همخوانی خوبی با منطقهٔ باردارسازی در ابر تندری دارد و نشان می‌دهد که رطوبت کافی در جوّ به منظور باردارسازی در ابر تندری لازم است (دوپلیکا و روتر، ۲۰۰۶).

در این پژوهش با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF، پارامترهای موردنیاز برای محاسبهٔ شاخص LTI معرفی شده توسط فریزبی و همکاران (۲۰۰۹) استخراج و عملکرد این شاخص در شناسایی مناطق فعّالیّت آذرخش در چند مورد از رخداد توفان تندری ارزیابی شده است. سپس درستی سنجی نتایج خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی انجام شده است.

۲ روش تحقیق

از آنجایی که سنجنده LIS[1] در سال ۲۰۱۵ خاموش شد، ۱۰ سال منتهی به سال ۲۰۱۵ (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴) به منظور انتخاب رخدادهای توفان تندری انتخاب شدند. سپس، بر مبنای اطلاعات دریافتی از سازمان هواشناسی (در قالب کُدهای همدیدی و متار) و نیز داده‌های کلّی آذرخش (درون‌ابری بعلاوهٔ ابر به زمین) برگرفته از LIS، ۶۵ مورد انتخاب شد. از آنجایی که سنجندهٔ LIS هر دو روز یک‌بار جعبه‌ای به مساحت ۴۰۰ کیلومتر مربع را برای ۲ دقیقه پوشش می‌دهد، این ۶۵ مورد به ۱۰ مورد تقلیل یافت. برای این ۱۰ مورد، داده‌های مکان و زمان رخداد آذرخش (فقط ابر به زمین) از WWLLN اخذ شدند (داده‌های WWLLN داده‌هایی هستند که با حسگرهای موقعیّت آذرخش که VLF[2] هستند، رصد می‌شوند. این سامانهٔ زمین‌پایه برای مشاهدهٔ آذرخش را دانشگاه واشنگتن در سیاتل برای ثبت موقعیّت آذرخش‌های CG راه‌اندازی کرده است). در بین این ۱۰ مورد، هفت مورد آن برای مطالعه حاضر انتخاب شد (رخدادهای توفان تندری ۲۰ و ۲۵ می ۲۰۰۸، ۲۹ آوریل۲۰۱۰، ۱۵ و ۱۷ آوریل و ۲۲ می ۲۰۱۲، ۲۱ می ۲۰۱۳).

شبیه‌سازی‌ها به کمک مدل WRF و با استفاده از داده‌های GFS با تفکیک نیم درجه (در راستای طول و عرض جغرافیایی) به مدت ۳۶ ساعت انجام شد و ۱۲ ساعت اوّل شبیه‌سازی به عنوان زمان Spin-up (زمانی که طول می‌کشد تا مدل به پایداری برسد) در نظر گرفته شد. پیکربندی اجرای مدل شامل ۳ آشیانه با تفکیک افقی به‌ترتیب ۲۷، ۹ و۳ کیلومتر می‌باشد. تعداد ۳۵ لایه در راستای قائم در هر سه آشیانه در نظر گرفته شده است. مرکز هر سه آشیانه ایستگاه

---

[1] Lightning Imaging Sensor

[۱] Very Low Frequency (3-30 kHz)

مهرآباد تهران (°E ۵۱/۳۱ و °N ۳۵/۶۹) در نظر گرفته شده است. برای انجام پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی تابش طول موج بلند از طرحواره[3] RRTM و تابش طول موج کوتاه از طرحواره دودیا استفاده شده است. طرحواره مونین-ابخوف برای شبیه‌سازی شارهای لایه سطحی، طرحواره انرژی جنبشی تلاطمی ملور-یامادا-یانیچ برای شبیه‌سازی شارهای لایه مرزی و برای شارهای سطح زمین از مدل سطح زمین NOAA استفاده شد. طرحواره همرفت کین-فریچ برای دو آشیانه بیرونی در شبیه‌سازی همرفت و برای طرحواره خردفیزیک نیز از طرحواره تامپسون استفاده شد.

بر اساس فریزبی و همکاران (۲۰۰۹)، شاخص LTI به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = (RH)^2 \times (\theta_e \Gamma) \times (LI)^2 \times (-1) \qquad (۱)$$

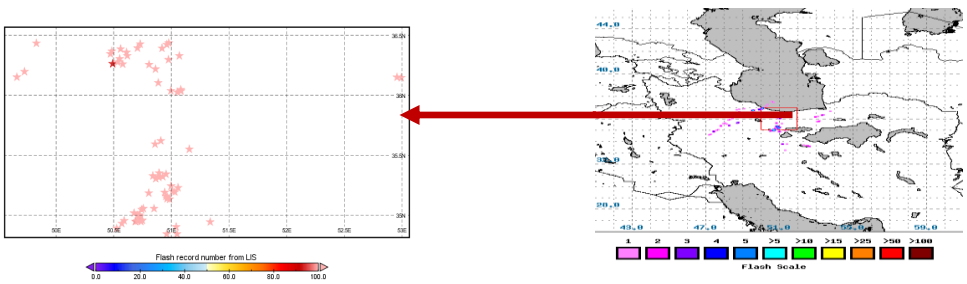
$$B = (muCAPE) \times (PW) \times (RH) \times 0.001 \qquad (۲)$$

$$\mathrm{LTI} = (A + B) \times (T_{850} - 272.15) \qquad (۳)$$

در اینجا، RH رطوبت نسبی در ۱۰-°C، $\theta_e\Gamma$ آهنگ کاهش دمای پتانسیلی هم ارز در ۶۰۰ هکتوپاسکال، LI شاخص بالابری، $muCAPE$ ناپایدارترین CAPE در تراز ۰-۳ کیلومتری بالای سطح زمین، PW آب بارش شو و T_{850} دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بر حسب کلوین است. در رابطهٔ (۱) اگر $LI>0$ باشد $LI=0$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین شرایط در نظر گرفته شده برای شاخص LTI به این صورت است که اگر LTI<0 باشد LTI برابر صفر و اگر LTI>20000 باشد LTI برابر ۲۰۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

۳ نتیجه‌گیری

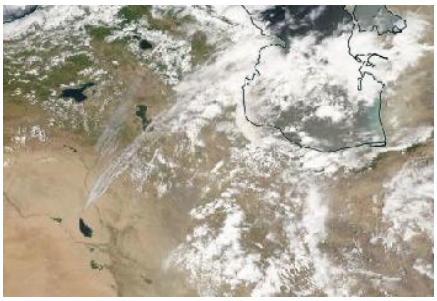
به منظور مقایسهٔ کیفی، توزیع افقی میانگینِ خروجی‌های مدل WRF برای شاخص LTI با پوشش ابر برگرفته از وبگاه ناسا[۴]، نقشهٔ مربوط به شاخص CAPE برای ساعت ۰۰:۱۲UTC و همچنین موقعیّت رخدادهای آذرخش برگرفته از سنجندهٔ LIS (داده‌ها میزان درخش‌های آذرخش کل است که هم شامل آذرخش ابر به ابر و هم آذرخش ابر به زمین است) و WWLLN برای ۷ مورد مطالعاتی مقایسه می‌شوند. لازم به ذکر است که برای تمامی رخدادها، داده‌های حاصل از سنجندهٔ LIS با بزرگنمایی بیشتر به منظور مقایسهٔ بهتر با استفاده از نرم‌افزار panoply برای درونی‌ترین آشیانهٔ شبیه‌سازی‌ها ترسیم شده‌اند. برای اختصار فقط نتایج مطالعه موردی ۲۸ مه ۲۰۰۸ در اینجا آورده شده است. در شکل ۱ نتایج مقایسهٔ کیفی برای این رخداد ارائه شده است. بر طبق داده‌های اخذ شده از WWLLN، این روز بیشترین زمان فعالیّت آذرخش (بین ساعت‌های ۷:۰۰ و UTC ۲۳:۰۰) را به خود اختصاص داده است. شرایط همدیدی- دینامیکی سهم بسزایی در وقوع این رخداد داشته است و این در مقادیر شاخص CAPE ترسیم شده در این رخداد گویا است (شکل ۲د). برای این مورد، همان‌طور که در شکل ۲ه و مشاهده می‌شود، شاخص LTI عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی مکان رخداد آذرخش دارد.



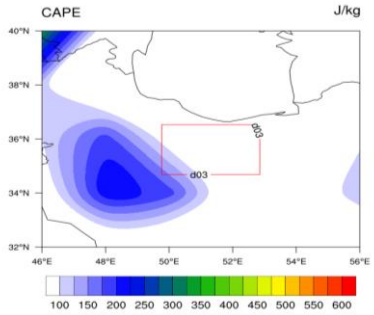
(ب) (الف)

[3] Rapid Radiative Transfer Model

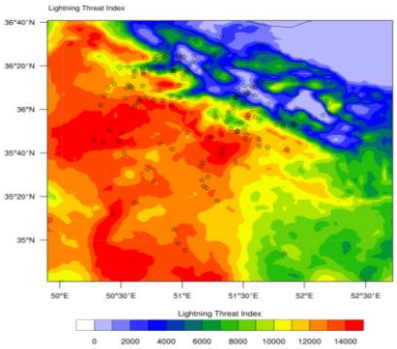
[۴] https://worldview.earthdata.nasa.gov



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۱ توزیع مکانی آذرخش کل (شامل درون‌ابری و ابر به زمین) حاصل از سنجندهٔ LIS، ب) بزرگنمایی توزیع ارائه شده در زیرشکل الف برای درونی‌ترین آشیانهٔ شبیه‌سازی، ج) تصویر ماهواره‌ای از پوشش ابر برگرفته از وبگاه ناسا، د) نقشهٔ شاخص CAPE (J/kg) برای ساعت UTC ۱۲ و ه) توزیع افقی میانگین شاخص LTI رخداد آذرخش برای ۲۸ مِه ۲۰۰۸. ستاره‌ها در زیرشکل‌های (ه) و (و)، مکان‌های رخداد آذرخش را نشان می‌دهند که با استفاده از داده‌های حاصل از WWLLN ترسیم شده‌اند.

به منظور مقایسهٔ کمّی نتایج حاصل از مدل با مشاهدات، ضریب همبستگی بین WWLLN و LTI در درونی‌ترین آشیانهٔ شبیه‌سازی در فاصلهٔ زمانی رخداد آذرخش برگرفته از داده‌های WWLLN برای ۷ مطالعه موردی محاسبه شد. نتایج نشان داد که در برخی رخدادهای توفان تندری همانند ۲۲ مه ۲۰۱۲ و ۱۵ آوریل ۲۰۱۲ همبستگی قابل قبول و در برخی موارد از جمله ۲۱ آوریل ۲۰۱۰، ۱۷ آوریل ۲۰۱۲، ۲۰ مه ۲۰۰۸ ، ۲۸ مه ۲۰۰۸ و ۲۱ مِه ۲۰۱۳ همبستگی ضعیفی بین نتایج مدل و مشاهدات وجود دارد. ضرایب همبستگی بین WWLLN و LTI برای ۷ مطالعه موردی از ۰/۶- تا ۰/۵۸ متغیّر است (جدول ۱). دلیل همبستگی ضعیف نتایج مدل با مشاهدات ممکن است عدم‌قطعیّت موجود در داده‌های WWLLN باشد.

جدول ۱ ضرایب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ LTI و مقادیر مشاهداتی برگرفته از WWLLN برای ۷ مورد مطالعاتی.

پارامتر	LTI						
مورد مطالعاتی	۲۰ مه ۲۰۰۸	۲۸ مه ۲۰۰۸	۲۹ آوریل ۲۰۱۰	۱۵ آوریل ۲۰۱۲	۱۷ آوریل ۲۰۱۲	۲۲ مه ۲۰۱۲	۲۱ مه ۲۰۱۳
تعداد رخداد برگرفته از WWLLN	۰.۱۵	-۰.۱۰	-۰.۵۴	۰.۵۸	-۰.۴۷	۰.۰۴	-۰.۶۰

منابع

Berdeklis, P. and List, R., 2001. The ice crystal–graupel collision charging mechanism of thunderstorm electrification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *58*(18), pp.2751-2770.

Burrows, W.R., Price, C. and Wilson, L.J., 2005. Warm season lightning probability prediction for Canada and the northern United States. *Weather and Forecasting*, *20*(6), pp.971-988.

Dupilka, M.L. and Reuter, G.W., 2006. Forecasting tornadic thunderstorm potential in Alberta using environmental sounding data. Part II: Helicity, precipitable water, and storm convergence. *Weather and Forecasting*, *21*(3), pp.336-346.

Frisbie, P.R., Colton, J.D., Pringle, J.R., Daniels, J.A., Ramey Jr, J.D. and Meyers, M.P., 2009. P1. 5 Lightning Prediction by WFO Grand Junction using Model Data and Graphical Forecast Editor Smart Tools.

Madhulatha, A., Rajeevan, M., Venkat Ratnam, M., Bhate, J. and Naidu, C.V., 2013. Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(1), pp.1-13.

Solomon, R. and Baker, M., 1994. Electrification of new mexico thunderstorms. *Monthly Weather Review*, *122*(8), pp.1878-1886.

Yair, Y., Lynn, B., Price, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Morin, E., Mugnai, A. and Llasat Botija, M.D.C., 2010. Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the WRF model dynamic and microphysical fields. *Journal of Geophysical Research, 2010, vol. 115, num. D04205, p. 1-13*.