

مهارت پیش‌بینی شاخص‌های ناپایداری TT ، L و K به‌دست‌آمده از تصاویر سنجنده مادیس (مطالعه موردی: ایستگاه ارومیه)

شبنم جعفری خسرق* - کارشناس ارشد هواشناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
علی‌اکبر آبکار - استادیار گروه مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
غلامعلی کمالی - دانشیار گروه هواشناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۵/۲۸ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۳/۰۳

چکیده

در این مطالعه به بررسی کارایی سه شاخص ناپایداری TT ، L و K به‌دست‌آمده از تصاویر سنجنده مادیس در ایستگاه هواشناسی ارومیه پرداخته شده است. با توجه به این موضوع که هسته بیشینه بارش بهاره در آذربایجان قرار دارد، از ایستگاه ارومیه در این مطالعه استفاده شد. مهارت پیش‌بینی هر یک از این شاخص‌های ناپایداری، بر اساس آستانه هر شاخص و به کمک جدول احتمال رویداد و پارامترهای امتیازدهی مانند هایدک (HSS) مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، ۱۸۱ تصویر مربوط به روزهای بدون ناپایداری و همراه با ناپایداری در دو ماه می و جولای از سنجنده مادیس استخراج شد. ۲۶ مورد از این تصاویر مربوط به روزهایی می‌شدند که پدیده رگبار و توفان گزارش شده بود. در بررسی مهارت این شاخص‌ها در پیش‌بینی توفان، بالاترین امتیاز HSS برای شاخص ناپایداری L با میزان $+۰/۳$ به‌دست آمد. بعد از L شاخص TT با $+۰/۲۴$ و K با $+۰/۲۱$ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بدین ترتیب ناپایداری نهان در پیش‌بینی ناپایداری جو در رده اول و ناپایداری‌های دینامیکی و پتانسیلی در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

کلیدواژه‌ها: پارامترهای امتیازدهی، جدول احتمال وقوع، شاخص‌های ناپایداری TT ، L و K ، مادیس.

مقدمه

پیش‌بینی توفان‌های تندری یکی از مشکل‌ترین موضوعات در پیش‌بینی وضع هوا به‌شمار می‌رود. ابرهای همرفتی عمیق در ابعاد کمابیش کوچک مکانی و زمانی، از مرتبه $۱-۱۰$ km و $۱-۱۲$ h گسترش پیدا می‌کنند. تا کنون مدل‌های عددی

کاربردی با تفکیک افقی حدود ۱۰ km، اغلب اوقات نه تنها در پیش‌بینی مکان و زمان، بلکه در نوع و شدت شروع همرفت با شکست مواجه شده‌اند (آنکواتین و همکاران، ۲۰۰۵). شرایط کلی مورد نیاز برای شکل‌گیری همرفت واضح است و توسط نویسندگان بسیاری مانند داسول (۱۹۸۷) بیان شده‌اند: ۱. هرگونه ناپایداری روی لایه‌ای با عمق مناسب؛ ۲. وجود یک لایه مرطوب در سطوح پایینی و ۳. یک سازوکار که همرفت را فعال کند. برای بررسی دو شرط اول، پارامترهای ترمودینامیکی و کنیماژیکی گوناگونی طی ۴۰ سال گذشته بر اساس داده‌های رادیوسوند به دست آمده است. هر کدام از آنها پتانسیل توفان یک توده هوا را نشان می‌دهد که قابلیت استفاده از این شاخص‌ها نسبت به زمان و مکان جغرافیایی تغییر می‌کند. در مطالعات بسیاری کارایی شاخص‌های ناپایداری مختلف به دست آمده از رادیوسوند، برای پیش‌بینی توفان بررسی شده است. برای مثال شولتز (۱۹۸۹)، لی و پسنر (۱۹۹۳)، هونت قایزر، شایسر، اشمید و والدوگل (۱۹۹۶).

هاکلاندر و وندلن (۲۰۰۳) در پژوهش خود به بررسی شاخص‌های پیش‌بینی توفان‌های تندری و میزان صحت این پیش‌بینی‌ها در هلند پرداختند. آنها ۳۲ شاخص پیش‌بینی‌کننده مختلف به دست آمده از مشاهدات رادیوسوند را برای هلند ارزیابی کردند. برای هر یک از این شاخص‌ها، صحت‌سنجی به منزله تابعی از آستانه‌های انتخاب شده، بر اساس ۱۰۲۸۰ مورد مشاهده شده شش ساعته رادیوسوند در دی بیل^۱ مورد بررسی قرار گرفت. این دو محقق با استفاده از پارامترهای صحت‌سنجی مانند TSS^۲ و HSS^۳، آستانه‌های بهینه شده برای تمام شاخص‌های پیش‌بینی‌دهنده توفان تندری را تخمین زدند. نتایج بررسی آنها نشان داد که شاخص ناپایداری L مربوط به تراز پایین تر از ۱۰۰ هکتوپاسکال، در صحت‌سنجی‌های دوبخشی^۴ (بله و خیر) بهترین امتیاز را از بین ۳۲ شاخص دیگر به دست آورده است. آنها به این نتیجه رسیدند که احتمال رویداد یک توفان تندری به طور عمده‌ای به ناپایداری نهفته (به ویژه نزدیک به سطح) و سپس به ناپایداری پتانسیلی و در نهایت به ناپایداری شرطی بستگی دارد.

کونز (۲۰۰۷) در پژوهش خود، به بررسی محیط آماده برای ایجاد همرفت در روزهای با توفان معمولی، گسترده و شدید در جنوب غرب آلمان پرداخت. پارامترهای مختلف ترمودینامیکی که از داده‌های رادیوسوند ساعت ۱۲:۰۰ UTC به دست آمده بودند، در مقابل توفان‌های تندری مشاهده شده از ایستگاه‌های همید، اطلاعات رادار و گزارش‌های خسارات ساختمانی از شرکت‌های بیمه، مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند. مهارت این شاخص‌ها در پیش‌بینی توفان به کمک جدول احتمال وقوع توفان، بر اساس آستانه هر شاخص و پارامترهای امتیازدهی مهارت مانند (HSS) تخمین زده شد. بهترین نتایج برای یک حدس معمولی در مورد انتظار توفان، از شاخص LI^{۱۰۰}، شاخص شولتز و شاخص Modified-K به دست آمد. اندرسون و اندرسون، جاکوبسن و نیلسون (۱۹۸۹) در مطالعه خود به بررسی چندین شاخص ترمودینامیکی برای پیش‌بینی توفان‌های توده هوا در تابستان سوئد پرداختند. با استفاده از شاخص K، آنها به ضریب همبستگی نزدیک به

1. De Bilt
2. True Skill Score
3. Heideke Skill Score
4. Dichotomous forecast

YI = ۰/۴۴ بین پیش‌بینی و مشاهده رویدادها رسیدند، درحالی‌که مقادیر شاخص‌های احتمال وقوع و احتمال هشدار اشتباه، به‌ترتیب $POD = ۹۳\%$ و $FAR = ۶۳\%$ به‌دست آمد.

علیچانی (۱۳۷۴: ۹۵) معتقد است که حداکثر توفان‌های تندری در شمال غرب ایران رخ می‌دهد. رسولی، بذاقی جمالی و جلالی (۱۳۸۶) تغییرات زمانی و مکانی و توزیع باران‌های تندری در شمال غرب ایران را مطالعه کردند و نشان دادند که احتمال وقوع بارش‌های تندری در بهار و تابستان بیشتر است، لذا فصل‌های بهار و تابستان برای این مطالعه انتخاب شدند. هم‌اکنون در کشور شاخص‌های ناپایداری و نمایه‌های دما و رطوبت از طریق داده‌های رادیوسوند تهیه می‌شود. با توجه به تعداد کم و پراکندگی توزیع مکانی ایستگاه‌های جو بالا و تفاوت در زمان دیدبانی آنها و هزینه بالای انجام دیدبانی‌ها، این نمایه‌ها و دیگر اطلاعات مورد نیاز از درون جو برای استفاده در مطالعات و کاربردهای روزانه پیش‌بینی وضع هوا به‌طور کامل در دسترس نیستند. با توجه به اینکه ماهواره‌های ترا^۱ و آکوا^۲ با گذر از روی یک منطقه می‌توانند محدوده بسیار وسیعی را پوشش دهند، لذا استفاده از اطلاعات سنجنده مادیس می‌تواند بخشی از کاستی‌های سامانه دیدبانی جو بالای موجود در کشور را جبران کند. استفاده و صحت‌سنجی نمایه‌های به‌دست آمده از تصاویر مادیس در مطالعات محدودی به‌کار رفته است.

کریسولاکیس، اسپیلیتوپولوس، دومینیکوتیس و دالزیوس (۲۰۰۳) برای بررسی پایداری جو، از اطلاعات رادیوسوند و نمایه‌های مادیس در منطقه جنوبی اروپا استفاده کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که سه شاخص ناپایداری K، L و بویدن^۳ به دست آمده از ماهواره، همبستگی قابل قبولی با نتایج حاصل از رادیوسوند دارند. لیو و کی (۲۰۰۳) با استفاده از نمایه‌های دمایی مادیس، وارونگی دمای منطقه قطب را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که محصولات دما و رطوبت مادیس به خوبی می‌توانند جزئیات جوی و وارونگی دما را در قطب توصیف کنند. جورو (۲۰۰۵) با استفاده از محصولات مادیس به بررسی امکان پیش‌بینی توفان‌های تندری در فصل تابستان در کشور فنلاند پرداخت.

میرموسوی و اکبرزاده (۱۳۸۸) در مطالعه شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ ایستگاه هواشناسی تبریز با بررسی شاخص‌های ناپایداری و ساعات وقوع این پدیده، دریافتند این شاخص‌ها بسته به شدت ناپایداری، می‌توانند حداکثر ۱۲ تا ۱۸ ساعت بعد از نشان دهند. اگر ناپایداری شدید نباشد، یعنی در واقع K حدود ۲۰ و مقدار Si نیز بزرگ باشد (بیشتر از ۳)، آنگاه نقشه‌های اسکوتی ساعت ۰۰ بارشی را نشان می‌دهند که ممکن است بعد از ساعت ۱۸ رخ دهد. چنانچه ناپایداری شدید باشد (مقادیر K بیش از ۳۰ بوده و مقدار Si زیر ۳ باشد)، احتمال وقوع بارش ۱۸ تا ۲۰ ساعت بعد نیز وجود دارد.

زاهدی و چوبدار (۱۳۸۶) برای بررسی هفتادویک مورد سیل از سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۳، مقادیر TT بزرگتر از ۴/۱۸، LI کوچکتر از ۶/۷۹ و K بزرگتر از ۱۴/۳ را در منطقه آچی‌چای به‌دست آوردند. در مطالعه دیگری تاج‌بخش، غفاریان و میرزایی (۱۳۸۹)، تعدادی شاخص ناپایداری را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های LI، KI، SWEAT و CAPE برای پیش‌بینی وقوع توفان تندری در شهر تهران از بقیه شاخص‌ها مناسب‌ترند.

1. Terra
2. Aqua
3. Boyden

حلیمی، آبکار، مشکاتی و صادقی نائینی (۱۳۹۰) در پژوهش خود به اعتبارسنجی نمایه‌های دما و دمای نقطه شبنم سنجنده مادیس با داده‌های رادیوسوند در ایستگاه مهرآباد پرداختند. در این پژوهش داده‌های نمایه دما از انطباق قابل قبولی با داده‌های رادیوسوند برخوردار بودند و برای آنها اریبی (بایاس^۱) کل ۱/۹۵ و خطای جذر میانگین مربعات ۲/۴۱ درجه کلوین برای سطوح بالاتر از ۷۸۰ میلی‌بار، به دست آمد.

هدف از این مطالعه بررسی عملکرد و کارایی سه شاخص ناپایداری به دست آمده از پروفایل‌های قائم مادیس در برآورد ناپایداری جو در ایستگاه ارومیه است.

مواد و روش‌ها

در این بخش به معرفی شاخص‌های ناپایداری، معرفی سنجنده مادیس، داده‌های مورد استفاده، پارامترهای آماری و پارامترهای امتیازدهی و روش کار پرداخته شده است.

شاخص‌های ناپایداری

شاخص بالاروی^۲ L: شاخص بالاروی L را گالوی در سال ۱۹۵۶ معرفی کرد. این شاخص برحسب درجه سلسیوس بیان می‌شود و برای اندازه‌گیری ناپایداری جو، هنگامی به کار برده می‌شود که بین دمای ذره بالارونده و محیط در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال اختلافی وجود داشته باشد. شاخص بالاروی بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$L = T_{500} - T_{D500} \quad \text{رابطه ۱}$$

گفتنی است در تمام روابط این مطالعه، T معرف دما و T_D معرف دمای نقطه شبنم است. جدول ۱ مقادیر آستانه شروع ناپایداری و وقوع توفان بر اساس شاخص L را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر آستانه شروع ناپایداری و وقوع توفان بر اساس شاخص L

ردیف	وضعیت	مقدار شاخص LI
۱	احتمال وقوع رگبارهای باران و برف	۰ تا -۳
۲	احتمال وقوع توفان	کمتر از -۳ تا -۶
۳	احتمال توفان شدید	کمتر از -۶ تا -۹
۴	احتمال وقوع تورنادو (دیوباد)	کمتر از -۹

منبع: دیانا دی روبرتیس، ۲۰۰۵

شاخص K^۳: شاخص K شاخصی است که با استفاده از آن می‌توان پتانسیل توفان تندی را بر اساس آهنگ کاهش قائم دما و میزان وسعت قائم رطوبت در سطوح پایین جو سنجید. رابطه‌ای که با استفاده از آن شاخص K محاسبه می‌شود به صورت زیر است.

1. Bias
2. Lifted Index
3. K Index

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{D850} - (T_{700} - T_{D700}) \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲ از دمای سطوح فوقانی ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال و دمای نقطه شبنم دو تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال برای آشکارسازی و محاسبه ناپایداری جو استفاده شده است. مقادیر بالاتر K می‌توانند بیانگر رطوبت و افت دمای بیشتر و افزایش و تشدید بارش‌ها به سمت بارش‌های سنگین باشند. جدول ۲ کم‌وکیف ناپایداری و درصد احتمال وقوع توفان‌های تندری بر اساس شاخص K را نشان می‌دهد.

جدول ۲. احتمال وقوع توفان‌های تندری بر اساس شاخص K

رديف	مقدار K	احتمال وقوع توفان تندری
۱	۰ تا ۱۵	۰ درصد
۲	۱۶ تا ۲۰	کمتر از ۲۰ درصد
۳	۲۱ تا ۲۵	۲۰ تا ۴۰ درصد
۴	۲۶ تا ۳۰	۴۰ تا ۶۰ درصد
۵	۳۱ تا ۳۵	۶۰ تا ۸۰ درصد
۶	۳۶ تا ۴۰	۸۰ تا ۹۰ درصد
۷	بیش از ۴۰	۱۰۰ درصد

منبع: دینا دی روبرتیس، ۲۰۰۵

شاخص TT^۱: این شاخص از دو جزء تشکیل شده است. میلر شاخص TT را در سال ۱۹۷۲ معرفی کرد که عبارت است از مجموع‌های قائم یا عمودی (VT) و مجموع‌های سطحی یا مقطعی (CT). رابطه شاخص مجموع مجموعه‌ها در حالت کلی به‌صورت زیر است.

$$TT = (T_{D850} - T_{500}) + (T_{850} - T_{500}) \quad \text{رابطه ۳}$$

جدول ۳ مقادیر آستانه شروع ناپایداری و وقوع توفان بر اساس شاخص TT را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقیاس ناپایداری و آشکارسازی توفان‌های تندری بر اساس شاخص TT

رديف	وضعیت	مقدار شاخص TT
۱	احتمال کم برای حرکات همرفتی	تا ۴۴
۲	احتمال تندر	بیش از ۴۴ تا ۵۰
۳	احتمال توفان تندری شدید	بیش از ۵۰ تا ۵۲
۴	توفان تندری حتمی	بیش از ۵۲ تا ۵۶
۵	توفان تندری شدید	بیش از ۵۶

منبع: میلر، ۱۹۷۲

سنجندۀ مادیس: سنجندۀ مادیس روی دو ماهواره آکوا و ترا قرار گرفته است. این سنجنده پهنه دیدی با عرض ۳۳۳۰ کیلومتر دارد و تمام سطح زمین را هر ۱ تا ۲ روز مشاهده می‌کند. گیرنده‌های آن ۳۶ باند طیفی از ۰/۴ تا ۱۴/۳۸۵ μm را اندازه‌گیری می‌کنند که محدوده مرئی تا مادون قرمز را شامل می‌شود. در هر شبانه‌روز دست کم می‌توان چهار تصویر با

قدرت تفکیک ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر از سنجنده مادیس استخراج کرد. بیش از ۷۰ محصول متنوع این سنجنده دارای اطلاعات بسیار مفیدی از سطح زمین، جو و اقیانوس‌ها است. محصول پروفایل‌های جوی سنجنده مادیس MYD07-L2 (ماهواره آکوا) و MOD07-L2 (ماهواره ترا) که در این پژوهش مد نظر است با تفکیک مکانی ۵ کیلومتر شامل پارامترهایی با نام آزون کل انباشته، پایداری جو، پروفایل‌های دما و رطوبت و بخار آب جو هستند. تمام این پارامترها طی شب و روز در سطح ۲، در پیکسل‌های ۵ در ۵ کیلومتری و در شرایطی که حداقل ۹ پهنه دید آسمان (FOVs)^۱ بدون ابر باشد، تولید می‌شوند.

داده‌های مورد استفاده: برای انجام این پژوهش از دو مجموعه داده شامل ۱. تصاویر ماهواره‌ای مادیس و ۲. گزارش‌های سه‌ساعته همدید استفاده شده است. مختصات این ایستگاه در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. مشخصات ایستگاه ارومیه

ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول (دقیقه - درجه)	عرض (دقیقه - درجه)	نام ایستگاه
۱۳۲۸	۴۵ - ۸۳	۳۷ ۵۳۳	ارومیه

تصاویر سنجنده مادیس: این تصاویر با مراجعه به پایگاه اینترنتی LAADS^۲ و وارد کردن اطلاعات مربوط به ایستگاه مورد نظر (مختصات مکانی، زمانی، نوع تصویر و...) به‌دست آمد. تصاویر مورد نیاز این پژوهش مربوط به محصولات Level2 اتمسفر هستند که در آن پارامترهای دما، رطوبت و ارتفاع ژئوپتانسیل را می‌توان در ۲۰ سطح فشاری ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۲۰، ۷۰۰، ۷۸۰، ۸۵۰، ۹۲۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال استخراج کرد. برای انجام پژوهش، حدود ۲۴۰ تصویر انتخاب و دانلود شد که حجم بسیار زیاد کار را نشان می‌دهد. با نوشتن برنامه در محیط IDL، شاخص‌های ناپایداری TT، L و K از تصاویر مادیس استخراج شدند. پس از بررسی و پردازش تصاویر، شماری از آنها به‌دلیل وجود ابر در منطقه قابل استفاده نبوده و از برنامه حذف شدند. در برخی موارد نیز با به‌دست آوردن شماره پیکسل مورد نظر و نتیجه‌نگرفتن از برنامه به‌دلیل ابرناکی، پیکسل‌های اطراف آن مختصات به کمک نرم‌افزار HDF Viewer بررسی شد، تا ناپایداری به فاصله ۵ کیلومتری اطراف نیز مد نظر قرار گیرد.

گزارش‌های سه‌ساعته روزانه ایستگاه‌های همدید: این گزارش‌ها که شامل اطلاعات سه‌ساعته دیده‌بانی شده نوع پدیده، ابرناکی و غیره است، از سازمان هواشناسی به‌دست آمد. پس از بررسی گزارش‌ها، ماه‌هایی را که در دو فصل بهار و تابستان بیشترین تعداد روز توفانی در آنها گزارش شده بود، ماه‌های شاخص در نظر گرفته شدند. با توجه به اینکه بیشترین میزان افزایش دمای زمین، حدود ۲ ساعت بعد از حداکثر دریافت انرژی خورشید توسط زمین در هنگام ظهر است، امکان وقوع توفان‌های همرفتی در این زمان از شبانه‌روز بیشتر است. همچنین به میزان ابرناکی ساعت‌های ابتدایی و میانی روز هم توجه شده است؛ به‌گونه‌ای که روزهای انتخاب‌شده دارای کمترین میزان ابرناکی در طول روز

1. Field of view

2. <http://www.ladsweb.nascom.nasa.gov>

بودند. با این کار احتمال در نظر گرفتن یک روز توفانی به دلیل وجود جبهه، بسیار کم شد. از آنجایی که دو ماهواره ترا و آکوا قابلیت تولید چهار تصویر در شبانه‌روز را دارند، به بررسی ساعت‌های عبوری این دو ماهواره از ایران و پدیده‌های گزارش شده در کمترین فاصله زمانی با عبور این ماهواره‌ها پرداخته شد.

جدول احتمال وقوع

پیش‌بینی‌های دوبخشی: پیش‌بینی دوبخشی بله و نه، به این معناست: بله = یک رویداد رخ می‌دهد و نه = یک رویداد رخ نمی‌دهد. برای صحت‌سنجی این نوع پیش‌بینی‌ها، از جدول احتمال وقوع^۱ استفاده می‌شود که نشان‌دهندهٔ بسامد «بله» و «نه» پیش‌بینی‌ها و رخ دادن رویدادها است. اطلاعات به‌دست‌آمده در یک جدول 2×2 شامل چهار عنصر a ، b ، c و d قرار می‌گیرد و بر این اساس است که آیا یک رویداد مشاهده شده (بله، خیر) و پیش‌بینی شده (بله، خیر) است. این روش‌ها برای صحت‌سنجی وضعیت هوا کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند و بسیاری از مطالعات نیز برای ارزیابی شاخص‌های پیش‌بینی توفان (هونت قایزر و همکاران، ۱۹۹۶ و داسول، دیویس جونز و کلر، ۱۹۹۰) از این جدول استفاده کرده‌اند. جدول ۵ چهار امکان ترکیب پیش‌بینی‌ها (بله، نه) و مشاهدات (بله، نه) را نشان می‌دهد.

جدول ۵. احتمال وقوع

کل	پیش‌بینی شده		مشاهده شده
	نه	بله	
a+b	B	A	بله
c+d	D	C	نه
کل	b + d	a + c	کل

a: رویداد پیش‌بینی شده و اتفاق افتاده است؛ b: پیش‌بینی شده که رویدادی رخ نمی‌دهد، اما رخ داده است؛ c: رخداد یک رویداد پیش‌بینی شده اما اتفاق نیفتاده است؛ d: رویدادی پیش‌بینی شده اتفاق نیفتد، اتفاق هم نیفتاده است.

جدول ۶. پارامترهای امتیازدهی

$$HSS = \frac{(a+b)(d-c) + (c+d)(a-b)}{(a+b)(b+d) + (c+d)(a+c)}$$

$$TSS = \frac{a}{a+b} - \frac{c}{c+d}$$

$$POD = 100a/(a+b)$$

$$FAR = 100c/(c+a)$$

با تعیین یک آستانه مناسب برای هر شاخص، مقادیر مورد بررسی به دو بخش تقسیم می‌شوند. برای شاخص‌هایی که در آنها مقادیر بالاتر از آستانه نشانگر احتمال رویداد توفان است (مانند K و TT)، یک روز توفانی پیش‌بینی می‌شود، اگر مقدار شاخص به آن آستانه رسیده یا از آن تجاوز کند. برای شاخص‌هایی که در آنها مقادیر پایین‌تر از حد آستانه

1. Contingency table

2. <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification>

نشانگر افزایش احتمال رویداد توفان است (مانند LI)، کاملاً برعکس مورد قبل است. برای ارزیابی مهارت شاخص‌های ناپایداری در پیش‌بینی توفان، اغلب هر دو پارامتر امتیازدهی TSS و HSS استفاده می‌شود. برای هر دو پارامتر، امتیازدهی بین مقادیر ۱ (بهترین پیش‌بینی)، صفر (پیش‌بینی کاملاً تصادفی) و پایین‌تر از صفر یا منفی (بدترین پیش‌بینی) قرار می‌گیرند. از شاخص‌های دیگری نیز می‌توان برای ارزشیابی میزان درستی شاخص‌های ناپایداری نام برد که در جدول ۶ به آنها اشاره شده است. در بهترین پیش‌بینی $b = c = 0$; $POD = 100$; $HSS = TSS = 1$; YI (Yule Index) = ۱ و FAR (False Alarm Ratio) = ۰ است. این بدان معناست که تمام اتفاق‌های یک رویداد دیده شده‌اند و هیچ هشدار اشتباهی وجود نداشته است. یک پیش‌بینی کاملاً اشتباه ($a = d = 0$; $POD = 0$; $FAR = 100$ و $FAR = -1$) فقط کارآمدی روش مورد مطالعه را هنگامی که رویدادی اتفاق می‌افتد یا پیش‌بینی می‌شود، بررسی می‌کند و به پیش‌بینی درست عدم وقوع نمی‌پردازد، درحالی‌که پارامتر امتیازدهی YI دومی را نیز شامل می‌شود، بنابراین در شرایطی که عدم وقوع برای ما مهم باشد سنجنده بهتری است.

از آنجا که فراوانی وقوع سالانه توفان‌های همرفتی در بهار و تابستان بیشتر است، بنابراین پژوهش به دو فصل بهار و تابستان سال ۲۰۰۸ محدود شده است. بررسی روزهای با توفان و بدون توفان، بر اساس مشاهدات زمینی است. سازمان جهانی هواشناسی کدهایی را به منظور تعیین وضعیت آب و هوای حال حاضر و گذشته مشخص کرده که با اعداد دو رقمی (۹۹-۰۰) نمایش داده می‌شوند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۷).

در این پژوهش از کدهایی که با فعالیت‌های توفان‌های تندی مرتبط هستند (۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۸۰ و ۹۹) استفاده شده است. براساس مطالعه جاکویدز و یونتانی (۱۹۹۰)، یک روز توفانی روزی است که توفان در ایستگاه بین ساعت ۰۰ آن روز و ۰۰ روز بعد رخ دهد. همچنین با توجه به تعداد روزهای توفانی دو فصل بهار و تابستان ۲۰۰۸، ماه می نماینده فصل بهار و ماه جولای نماینده فصل تابستان با بیشترین روزهای ناپایداری انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفتند. برای این بررسی، تصاویر ماهواره‌های ترا و آکوا در طول یک ماه از تارنمای LAADS استخراج شد و با مقایسه شاخص‌های ناپایداری به دست آمده از این تصاویر و گزارش‌های سه‌ساعته همدید، به بررسی میزان اعتبار این نتایج در مورد پیش‌بینی احتمال ناپایداری هوا و احتمال وقوع رگبارها و توفان‌های تندی پرداخته شد.

یافته‌های پژوهش

در مجموع ۸۳ تصویر مربوط به ماه می بررسی شد. ۱۴ مورد از این تصاویر به روزهایی اختصاص داشتند که پدیده رگبار و توفان گزارش شده بود. ۹۸ تصویر نیز در ماه جولای مورد بررسی قرار گرفت که ۱۲ تصویر مربوط به روزهای توفانی می‌شد. جدول ۷ به منظور مشاهده نحوه مقایسه شاخص‌های ناپایداری به دست آمده از تصاویر مادیس و گزارش‌های سه‌ساعته همدید آورده شده است. این جدول مربوط به روزهای هفتم و هشتم ماه جولای از فصل تابستان است. در ستون کد پدیده، نوع پدیده‌های مشاهده شده و در ستون زمان گزارش، ساعات درج کدهای مربوط آورده شده است. همان‌طور که در روش کار گفته شد، کدهای ۱۳ (برق بدون شنیدن صدای رعد) و ۹۵ (رعد و برق ملایم یا متوسط) وقوع ناپایداری را نشان می‌دهند. در تصویر اول، ماهواره در ساعت ۵۵ : ۰۹ از روی منطقه عبور کرده و با تصویربرداری

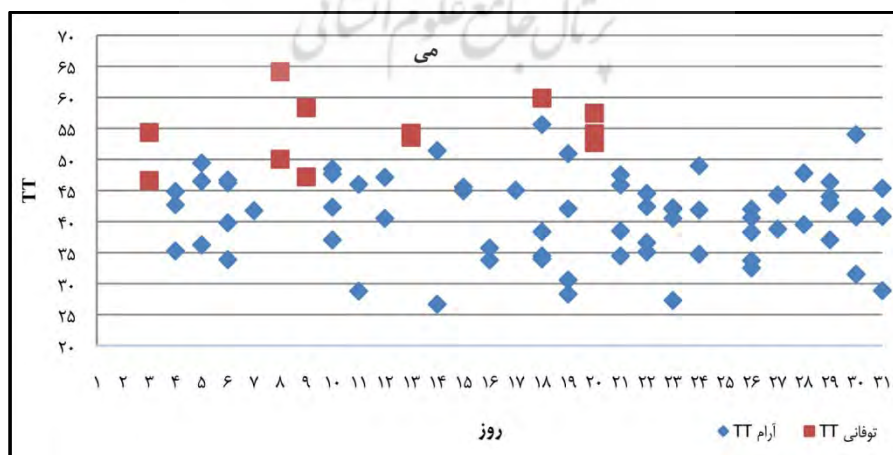
از سطح زمین، اطلاعات مفید بسیاری چون مقادیر شاخص‌های TT، L و K را در اختیار پژوهشگران قرار داده است. با نگاهی به این مقادیر، درمی‌یابیم که شاخص TT با مقدار ۴۶/۲۹ و K برابر با ۲۰/۵۳ مقادیری بالاتر از حد آستانه دارند؛ یعنی این شاخص‌ها ناپایداری را پیش‌بینی می‌کنند، اما شاخص L با مقدار ۱/۹۲ نمی‌تواند پیش‌بینی‌کننده توفان باشد. حال به بررسی مشاهدات زمینی همان روز در ساعات بعد از گذر ماهواره می‌پردازیم. در ساعت ۱۸ دیده‌بان کد ۱۳ را درج کرده، بنابراین ما شاهد ناپایداری در منطقه بوده‌ایم. طبق جدول توزیع احتمال، شاخص‌های TT و K ارزش a را به خود می‌گیرند؛ یعنی رویداد پیش‌بینی شده و اتفاق افتاده است، اما شاخص L ارزش b دریافت می‌کند به این معنا که پیش‌بینی شده است که رویداد اتفاق نیفتد، اما رخ داده است. بدین ترتیب تمامی شاخص‌های به‌دست‌آمده از تصاویر سنجنده، ارزش خاص خود را به‌دست آورده و در جداول توزیع احتمال قرار می‌گیرند.

جدول ۷. مقایسه شاخص‌های ناپایداری مادیس و گزارش‌های سه‌ساعته سینوپتیک ایستگاه ارومیه در فصل تابستان

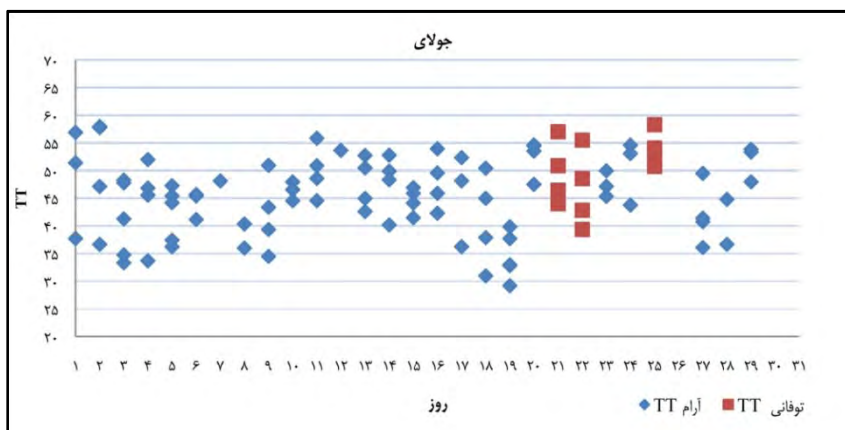
ماه	روز	روز از سال	گذر ماهواره	TT	L	K	کد پدیده	ابرنایکی	زمان گزارش پدیده
۷	۷	۱۸۹	۰۹ : ۵۵	۴۶/۲۹	۱/۹۲	۲۰/۵۳	*،*،۱۳	۲،۲،۳	۱۲،۱۵،۱۸
۷	۷	۱۸۹	۰۸ : ۲۰	۴۹/۵۷	-۰/۶۳	۲۴/۸۵	*،*،۱۳	۲،۲،۳	۱۲،۱۵،۱۸
۷	۷	۱۸۹	۱۹ : ۲۰	۴۹/۷	-۱/۷۷	۳۳/۲۷	۱۳،*	۳،۱	۱۸،۲۱
۷	۸	۱۹۰	۰۹ : ۴۰	۵۵/۰۷	-۴/۲۸	۴۳/۵	۹۵،۲،۱،*	۷،۷،۱،۱	۱۲،۱۵،۱۸،۲۱

* : گزارش نشده

شکل‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده پراکندگی شاخص TT در دو ماه می و جولای است. با در نظر گرفتن حد آستانه ۴۵ برای این شاخص، مشاهده می‌شود که مقادیر این شاخص در ماه می در مورد روزهای توفانی همه بالاتر از حد آستانه بوده و در ماه جولای در سه مورد کمتر از این حد قرار دارد.



شکل ۱. نمودار مقایسه شاخص TT در روزهای آرام و توفانی ماه می



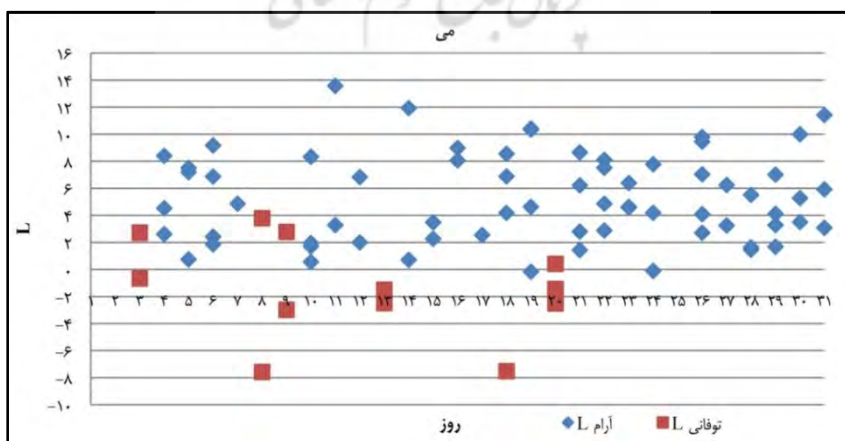
شکل ۲. نمودار مقایسه‌ی شاخص TT در روزهای آرام و توفانی ماه جولای

جدول ۸. احتمال وقوع و نتایج به‌دست آمده از مشاهدات زمینی و پیش‌بینی مادیس برای شاخص TT ماه می و جولای

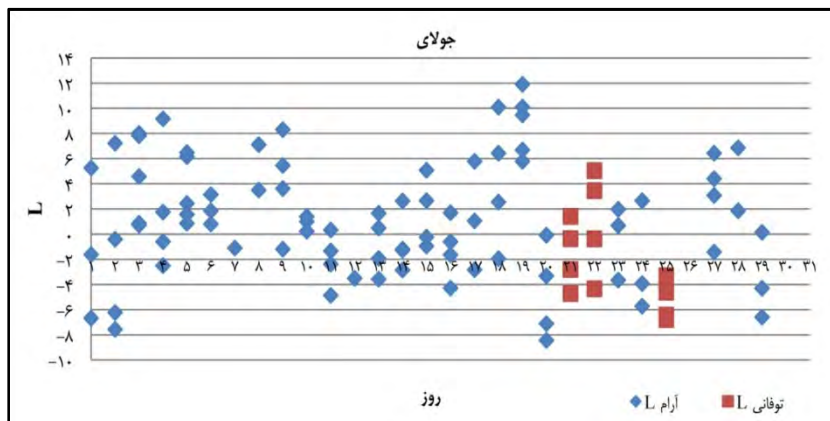
پیش‌بینی - مشاهده	بله	خیر	کل
بله	۲۲	۰	۲۲
خیر	۶۹	۹۰	۱۵۹
کل	۹۱	۹۰	۱۸۱

HSS = ۰/۲۴ TSS = ۰/۵۶ FAR = ۰/۷۵ POD = ۱

شکل‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده‌ی پراکنندگی شاخص L در دو ماه می و جولای است. مقادیر کمتر گویای احتمال بیشتر توفان است و برعکس. در تابستان، مقادیر عموماً کمتر از ماه می هستند که بیانگر بیشتر بودن ناپایداری نهان نسبت به ماه می است.



شکل ۳. نمودار مقایسه‌ی شاخص L در روزهای آرام و توفانی ماه می



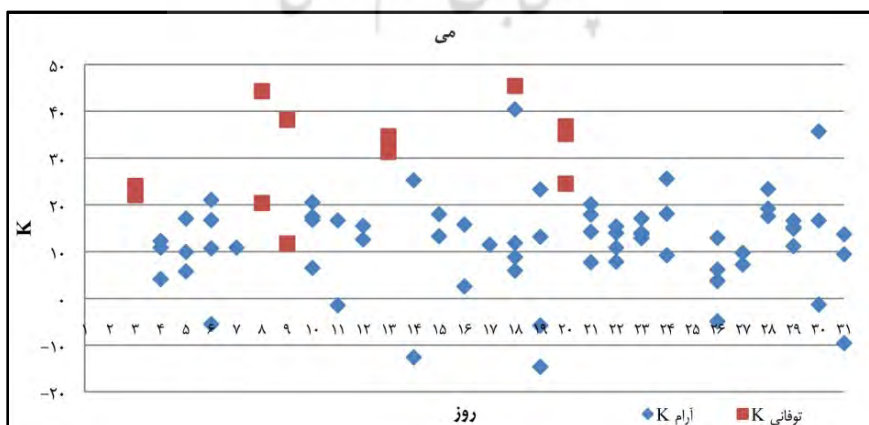
شکل ۴. نمودار مقایسه شاخص L در روزهای آرام و توفانی ماه جولای

جدول ۹. احتمال وقوع و نتایج به‌دست آمده از مشاهدات زمینی و پیش‌بینی مادیس برای شاخص L ماه می و جولای

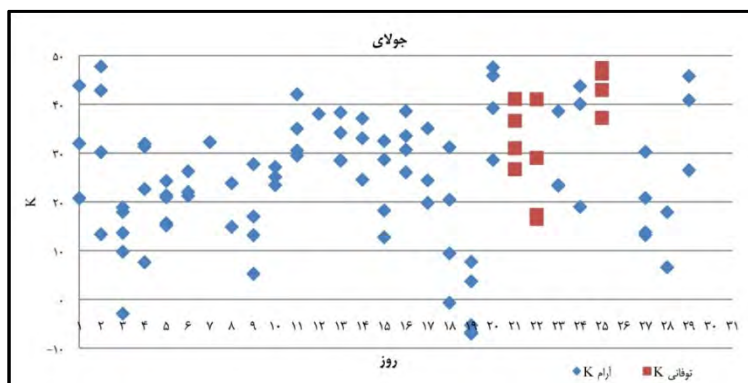
پیش‌بینی - مشاهده	بله	خیر	کل
بله	۱۷	۵	۲۲
خیر	۴۱	۱۱۸	۱۴۹
کل	۵۸	۱۲۳	۱۸۱

HSS = ۰/۳۰ TSS = ۰/۵۲ FAR = ۰/۸۹ POD = ۰/۷۷

شکل‌های ۵ و ۶ نشان‌دهنده پراکندگی شاخص K در دو ماه می و جولای است. مقادیر بیشتر گویای احتمال بیشتر توفان است و برعکس. در هر دو ماه به جز یک مورد، شاخص K در روزهای توفانی بالاتر از حد آستانه ۲۰ درجه قرار گرفته است.



شکل ۵. نمودار مقایسه شاخص K در روزهای آرام و توفانی ماه می



شکل ۶. نمودار مقایسه شاخص K در روزهای آرام و توفانی ماه جولای

جدول ۱۰. احتمال وقوع و نتایج به‌دست‌آمده از مشاهدات زمینی و پیش‌بینی مادیس برای شاخص K ماه می و جولای

پیش‌بینی - مشاهده	بله	خیر	کل
بله	۲۱	۱	۲۲
خیر	۷۰	۸۹	۱۵۹
کل	۹۱	۹۰	۱۸۱

HSS = ۰/۲۱ TSS = ۰/۵۱ FAR = ۰/۷۶ POD = ۰/۹۵

با بررسی جدول ۱۱، بالاترین امتیاز HSS برای شاخص ناپایداری L با میزان ۰/۳۰ به‌دست آمد. بعد از L شاخص TT با ۰/۲۴ و K با ۰/۲۱ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

جدول ۱۱. مقایسه پارامترهای امتیازدهی شاخص‌های ناپایداری و رتبه‌بندی آنها بر اساس بالاترین امتیاز HSS ماه می

شاخص	آستانه	HSS	TSS	POD	FAR
L	۰ <	۰/۳۰	۰/۵۲	۰/۷۷	۰/۸۹
TT	۲۰ >	۰/۲۴	۰/۵۶	۱	۰/۷۵
K	۴۵ >	۰/۲۱	۰/۵۱	۰/۹۵	۰/۷۶

بحث و نتیجه‌گیری

با بررسی جدول ۱۱، بالاترین امتیاز HSS برای شاخص ناپایداری L با میزان ۰/۳۰ به‌دست آمد و پس از آن TT با مقدار ۰/۲۴ و K با برابر ۰/۲۱ قرار گرفت. این یافته با نتایج مطالعات هاگلاند و وندلدن (۲۰۰۳) و کونز (۲۰۰۷) در مورد نتیجه بهترین شاخص ناپایداری برای پیش‌بینی‌های دوحشی همخوانی دارد. هاگلاند و وندلدن شاخص L را در چهار نوع با ۳۲ شاخص دیگر بررسی کرده بودند. این دو محقق برای شاخص TT مقادیر HSS = ۰/۳۹ و TSS = ۰/۵۰ و برای شاخص K مقادیر HSS = ۰/۲۹ و TSS = ۰/۵۱ و برای شاخص L مقادیر HSS = ۰/۲۱ و TSS = ۰/۳۵ را به‌دست آوردند. کونز نیز برای شاخص L مقدار ۰/۵۷ را برای HSS، برای شاخص TT مقدار ۰/۴۷ و برای شاخص K

مقدار ۰/۴۶ را در منطقه جنوب غرب آلمان به‌دست آورد. باید توجه کرد که در این مطالعه از حد آستانه‌های کلی استفاده شده، در حالیکه در مطالعات هاگلاندر و کونز این آستانه‌ها بر اساس آستانه‌های مربوط به همان کشور و منطقه تعیین شده است. برای مثال، حد آستانه معین شده در مورد شاخص TT در مطالعه هاگلاندر ۴۶/۷ درجه در نظر گرفته شده است. به‌دست آوردن حد آستانه هر شاخص به‌منظور افزایش مهارت شاخص‌های ناپایداری، نیاز به مشاهدات بلندمدت دارد که متأسفانه در این زمینه مطالعات داخلی محدودی صورت گرفته است. یافته‌ها نشان داد که شاخص TT امتیاز TSS بالاتری نسبت به شاخص L به‌دست آورد، این نتیجه به این علت است که TSS بیشتر روی مقادیر POD بالاتر و FAR پایین‌تر تکیه دارد، اما HSS بیشتر روی FAR با مقدار کمتر تأکید می‌کند.

عوامل مختلفی می‌تواند بر نتایج به‌دست آمده از مقایسه این شاخص‌ها تأثیرگذار باشند که به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: ۱. دقت سنجنده مادیس در تولید داده‌ها و ۲. خصوصیات این داده‌ها در مورد پیش‌بینی ناپایداری.

در خصوص دقت تصاویر، عوامل مختلفی چون شرایط سینوپتیکی موجود در جو، روز یا شب بودن زمان تصویربرداری و میزان ابرناکی، در مقادیر به‌دست‌آمده از تصاویر تأثیرگذارند. در مورد خصوصیات شاخص‌های ناپایداری باید در نظر داشت که عواملی چون تغییرات روزانه، تغییرات فصلی و نوع توفان تندی بر عملکرد شاخص تأثیر می‌گذارند. برای نمونه، شاخص L در ساعات ۱۲ تا ۱۸ روز تغییرات روزانه نسبتاً بزرگی را همراه با مقادیر بیشتر ناپایداری نسبت به شب‌هنگام نشان می‌دهد؛ زیرا در این ساعات به علت گرمایش خورشیدی، پتانسیل نهان در نزدیک سطح و در لایه مرزی جو افزایش می‌یابد. همچنین بعضی از شاخص‌های ناپایداری برای فصل خاصی طراحی شده‌اند و این موضوع باید در نظر گرفته شود. برای مثال، در مطالعه هاگلاندر و وندلن مشخص شد که حد آستانه برای شاخص K در زمستان نسبت به تابستان پایین‌تر است. نوع توفان عامل دیگری است که در ترتیب قرار گرفتن امتیازات شاخص‌ها اثرگذار است. برای مثال، شاخص بویدن برای بررسی احتمال وقوع توفان ناشی از عبور جبهه طراحی شده است. در این مطالعه توفان‌های تندی ناشی از همرفت با لحاظ کردن شرط ابری نبودن در ساعات اولیه روز و انتخاب فصول بهار و تابستان در نظر گرفته شده است.

همانند مطالعه هاگلاندر و وندلن که نتیجه گرفتند احتمال توفان‌های تندی بر اساس تابعی از شاخص‌های پیش-بینی‌کننده ناپایداری جو، بیشتر به ناپایداری نهان (مانند شاخص L)، سپس ناپایداری پتانسیلی و در آخر ناپایداری شرطی بستگی دارد، در این مطالعه نیز شاخص L (بیانگر ناپایداری نهان) در رتبه اول و شاخص‌های TT و K (بیانگر ناپایداری پتانسیلی و شرطی هر دو) در مقام بعدی قرار گرفتند.

سخن آخر اینکه مادیس می‌تواند ابزار مفیدی باشد برای تخمین ناپایداری مناطقی که فاقد رادیو سوند هستند.

منابع

- تاجبخش، س.؛ غفاریان، پ. و میرزایی، ا. (۱۳۸۹). روشی برای پیش‌بینی رخداد توفان‌های تندی با طرح دو بررسی موردی. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۵، شماره ۴، صص. ۱۶۶-۱۴۷.
- حلیمی، ف.؛ آبکار، ع. ا.؛ مشکاتی، ا. م. و صادقی نائینی، ع. (۱۳۹۰). اعتبارسنجی پروفایل‌های دما و دمای نقطه شبنم سنجنده مادیس با استفاده از داده‌های رادیوسوند در تهران، سنس از دور و GIS ایران، دوره ۱۰، شماره ۲، صص. ۸۷-۹۶.

رسولی، ع. ا.؛ بذاق جمالی، ج. و جلالی، ا. (۱۳۸۶). توزیع زمانی بارش‌های رعد و برقی منطقه شمال غرب ایران، مجله پژوهشی علوم انسانی، دوره ۲۲، شماره ۱، صص. ۱۷۰-۱۵۶.

زاهدی، م. و چوبدار، ا. (۱۳۸۶). مقایسه شاخص‌های ناپایداری جوی حوضه آبریز آجی‌چای با استانداردهای ناپایداری جوی و تعیین الگو برای این حوضه، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، دوره ۵، شماره ۹، صص. ۴۴-۲۳.

علیجانی، ب. (۱۳۷۴). آب و هوای ایران. چاپ اول، تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور.

میرموسوی، س. ح. و اکبرزاده، ی. (۱۳۸۸). مطالعه شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ در ایستگاه هواشناسی تبریز. مجله پژوهشی فضای جغرافیایی، دوره ۹، شماره ۲۵، صص. ۱۰۸-۹۵.

Alijani, B., 1995, **Iran's Climate**, Vol. 1, Payame Noor University Press, Tehran.

Andersson, T., Andersson, M., Jacobsson, C. and Nilsson, S., 1989, **Thermodynamic Indices for Forecasting Thunderstorms in Southern Sweden**, Meteorological Magazine, Vol. 118, No. 1404, PP. 141-146.

Anquwitin, S., Yates, E., Ducrocq, V., Samouillan, S., Chancibault, K., Davolio, B., Pasi, F., Pasqui, M., Garcia, A., Martorell, M., Romero, R., and Chessa, P., 2005, **The 8 and 9 September 2002 Flash Flood Event in France: A Model Intercomparison**, Natural Hazards & Earth System Sciences, Vol. 5, No. 5, PP. 741-754.

Chrysoulakis, N., Spilitopoulos, M., Domenikiotis, C. and Dalezios, N., 2003, **Towards Monitoring of Regional Atmospheric Instability Through MODIS/AQUA Images**, Proceeding of the International Symposium on Geographical Information Systems and Remote Sensing: Environmental Applications, 7-9 November, Volos, Greece, PP. 7-9.

Derubertis, D., 2005, **Recent Trends in for Common Stability Indices Derived from U.S Radiosonde Observations**, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 19, No. 3, PP. 309-323.

Doswell, C. I., Davies-Jones, R., and Keller, D., 1990, **On Summary Measures of Skill in Rare Event Forecasting Based on Contingency Tables**, Wea. Forecasting, Vol. 5, No. 4, PP. 576-585.

Galway, J.G., 1956, **The Lifted Index As a Predictor of Latent Instability**, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 37, PP. 528-529.

Haklander, A. J. and Van Delden, A., 2003, **Thunderstorm Predictors and Their Forecast Skill for the Netherlands**, Atmospheric Research, Vol. 67-68, PP. 273-299.

Halimi, F., Abkar, A., Meshkati, A., Sadeghi naeini, A., 2011, **Verification of Modis Temperature and Dew point Temperature Profiles Using Radiosonde Data in Tehran**, Iranian Remote Sensing and GIS, Vol. 3, No. 2, PP. 87-96.

Huntrieser, H., Schiesser, H.H., Schmid, W. and Waldvogel, A., 1996, **Comparison of Traditional and Newly Developed Thunderstorm Indices for Switzerland**, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 12, No. 1, PP. 108-125.

Jacovides, C.P., Yonetani, T., 1990, **An Evaluation of Stability Indices for Prediction in Greater Cyprus**, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 5, No. 4, PP. 559-568.

Joro, S., 2005, **Atmospheric Profiles Product in Finland a Feasibility Study**, EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 19-23 September, Dubrovnik, Croatia.

Kunz, M. 2007, **The Skill of Convective Parameters and Indices to Predict Isolated and Severe Thunderstorms**, Natural Hazards & Earth System Sciences, Vol. 7, No. 2, PP. 327-342.

Lee, R. R., and J. E. Passner, 1993, **The Development and Verification of TIPS: An Expert System to Forecast Thunderstorm Occurrence**, Weather and Forecasting, Vol. 8, No. 2, PP. 271-280.

Liu, Y., Key, J. R., 2003, **Detection and Analysis of Clear-Sky, Low-level Atmospheric Temperature Inversions with MODIS**, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 20, No. 12, PP. 1727-1737.

Miller, R.C., 1972, **Notes on Analysis and Severe-storm Forecasting Procedures of the Military Warning Center**. Air Weather Service (MAC), Technical Report. 200, Scott Air Force Base, IL, 181 pp.

Rasooli, A., Badagh Jamali, J., Jalali, A., 2007, **Temporal Distribution of Thundery Precipitations in North West of Iran**, Vol. 22, No. 1, PP. 156-170.

Schultz, P., 1989, **Relationships of Several Stability Indices to Convective Weather Events in Northeast Colorado**, Weather and Forecasting, Vol. 4, No. 1, PP. 73-80.