

تحلیل ترمودینامیکی پدیده تگرگ در شمال غرب کشور (۲۰۰۹-۱۹۹۲) و ارائه مدل ناپایداری

سیدحسین میرموسوی^۱

زهرا حیدری منفرد^۲

شهاب شفیع^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۰۷/۰۳

چکیده

توفان‌های تندری به همراه پدیده‌های فرعی ناشی از آن به مانند تگرگ یکی از جلوه‌های خشن طبیعت است. بنابراین در تحقیق حاضر برای دستیابی به مدیریت ریسک تگرگ در شمال غرب کشور، جهت کاهش خسارات ناشی از آن، با استفاده از شاخص‌های ناپایداری به ارزیابی این پدیده مخرب پرداخته شد. برای شناسایی شرایط ترمودینامیکی وقوع این پدیده طی دوره آماری ۱۸ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۹)، شاخص‌های ناپایداری جوی $SI, LI, SW, KI, C.T, V.T, T.T, PWC$ و سطح یخبندان نمودارهای اقلیمی $Skew-T \log P$ ، ۲۳ مورد وقوع تگرگ ایستگاه‌های تبریز و کرمانشاه- به منظور پوشش کامل منطقه- از وب سایت دانشگاه وایومینگ آمریکا استخراج و بررسی شد. نتایج حاصل از کلیه شاخص‌های فوق با استانداردهای ناپایداری جوی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در این بررسی مغایرت‌هایی بین ارقام مشاهداتی و ارقام پیشگویی شده ملاحظه گردید و نهایتاً شاخص‌های ناپایداری منطقه به شرح زیر تعیین شده‌اند:

$$SI \leq 20/71, LI \leq 17/63, SW \geq 19/99, KI \geq 14/30, C.T \geq 11/50, V.T \geq 24/70 \text{ و } T.T \geq 41/80$$

همچنین مشخص گردید که در سال‌های اخیر بر شدت ناپایداری جو منطقه افزوده شده است. به طوری که شاخص SI و LI در این سال‌ها به مقدار صفر نزدیک شده و سایر شاخص‌ها، هر یک میل صعودی به سوی حداکثر آستانه‌های خود داشته‌اند و نیز سطح یخبندان در روزهای تگرگی مورد مطالعه، بین ۸۵۰ تا ۶۵۰ هکتوپاسکال یعنی بین ارتفاع ۱۳۹۳ تا ۳۷۸۸ متری در نوسان می‌باشد که در ماه‌های گرم سال این سطح افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ترمودینامیکی، تگرگ، شاخص‌های ناپایداری، شمال غرب.

۱- استادیار، گروه جغرافیای دانشگاه زنجان، زنجان h.mousavi@znu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد جغرافیای طبیعی (اقلیم شناسی سینوپتیک)، دانشگاه زنجان heydari.monfared@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه یزد shafieshabab@gmail.com

مقدمه

رخ داده طی سال‌های ۱۹۸۹-۱۹۰۴ در جنوب کوهستان رودوپس^۳ بلغارستان را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتیجه به دست آمده مقادیر بسیار بالایی از شاخص‌های ناپایداری و بی ثباتی جوی را نشان می‌دهد. کاستا و همکارانش^۴ (۲۰۰۱)، شاخص‌های ناپایداری برای سه دسته اصلی توفان‌های شمال ایتالیا شامل گردبادها، توفان‌های تگرگ‌زا و باران‌های شدید را طی ۳ سال (۱۹۹۹-۱۹۹۷) مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تعامل بین جریان سینوپتیکی و کوه شیب‌دار آلپ عامل اصلی ایجاد انواع مختلف توفان‌های شدید بوده است. سیوتاس و فلوکاس^۵ (۲۰۰۳)، گردش جوی همدید متداول در طول روزهای همراه با تگرگ در شمال یونان را در طی ۲۶ سال (۲۰۰۱-۱۹۶۷) در فصل گرم مورد بررسی قرار داده‌اند. نتیجه حاصل از این تحقیق نشان داد که جریان‌های جنوب غرب و تراف^۶ موج کوتاه جنوب غرب، بیشترین تأثیر را در فعالیت توفان تگرگ داشته است. همچنین توزیع فراوانی شاخص‌های ناپایداری برای دوره ۱۱ ساله (۲۰۰۱-۱۹۹۱) در ارتباط با انواع همدید و نقش آنها را به عنوان پیش‌بینی کننده فعالیت‌های توفان‌های تگرگ در مناطق همرفتی، نشان داده‌اند. کروما و همکاران^۷ (۲۰۰۶)، به بررسی الگوهای تغییر پذیری فضایی-زمانی توفان تگرگ در مراویا^۸ و سیلسیا^۹ برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۶۱ پرداخته و نتایج حاکی از این بود که حداکثر بارش تگرگ در منطقه هرابی جسینیک^{۱۰} و کوه‌های بسکیدس^{۱۱} بوده و نیز ۵۰ درصد روزهای بارش توفان‌های تگرگ در ماه می و ژوئن بوده است. در نهایت بر اساس طبقه بندی سینوپتیکی نشان داده‌اند که در ۸۸ درصد روزهای همراه با بارش تگرگ شرایط سیکلونی در منطقه حاکم بوده است.

شناسایی الگوها و مدل‌های سینوپتیکی که در منطقه ایجاد ناپایداری و بارش می‌کنند، ضروری می‌باشد. سیستم‌هایی که وارد منطقه می‌شوند، اگر دارای ساختار ترمودینامیکی مناسب باشند، یعنی ناپایداری آنها زیاد باشد، با داشتن رطوبت و گرمای مناسب بارش‌های مناسبی را در منطقه ایجاد می‌کنند (امیدوار، ۱۳۸۶: ۹۴ و ۸۴). در شمال غرب کشور با توجه به شرایط جغرافیایی آن، علاوه بر سیستم‌های سینوپتیک (جبهه‌های سرد سیستم‌های کم فشار) ناپایداری‌های محلی نیز موجب رگبار می‌شوند (در این ناپایداری‌ها هم صعود هوای مرطوب عامل ایجاد بارش است) و گاهی به علت وجود هر دو پدیده (سیستم سینوپتیک و ناپایداری محلی) رگبارهای شدید باران و تگرگ رخ می‌دهند. بنابراین، شناسایی شرایط ناپایداری نیز برای پیش‌بینی زمان وقوع رگبارها و اختطار به موقع جهت آمادگی، ضرورت دارد (زاهدی و چوبدار، ۱۳۸۶: ۲۴). شاخص‌های ارزیابی پایداری که به شاخص‌های ناپایداری معروف‌اند، روابطی هستند که به کمک آنها می‌توان، ناپایداری همرفتی مناطق مختلف جو را بررسی کرد. این شاخص‌ها در پیش‌بینی فعالیت‌های همرفتی به کار می‌روند و عمدتاً به کمک نمودارهای ترمودینامیکی و داده‌های رادیوسوند محاسبه می‌شوند (صادقی حسینی و رضائیان، ۱۳۸۵: ۸۳). در بررسی این شاخص‌ها مطالعات فراوانی صورت پذیرفته است که در زیر به چند نمونه از آنها اشاره خواهد شد:

چنگ و همکاران^۱ (۱۹۸۵)، توزیع ابعاد دانه‌های تگرگ و ارتباط آنها با توفان‌های ترمودینامیکی تابستان‌های ۱۹۸۰، ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳ در آلبرتا را با استفاده از روش‌های اندازه گیری و نمونه‌گیری تگرگ بررسی نموده و به این نتیجه رسیده‌اند که در قانون قدرت در مورد هر یک از توفان‌ها، بین پارامتر عرض از مبدأ (شدت توفان) با پارامتر شیب از توزیع (اندازه تگرگ)، همبستگی قوی برقرار است. سیمونوف و گئورگیوف^۲ (۲۰۰۱)، شاخص‌های ناپایداری گردبادهای

3- Rhodopes

4- Costa, et al

5- Sioutas & Flocas

6- Trough

7- Chroma, et al

8- Moravia

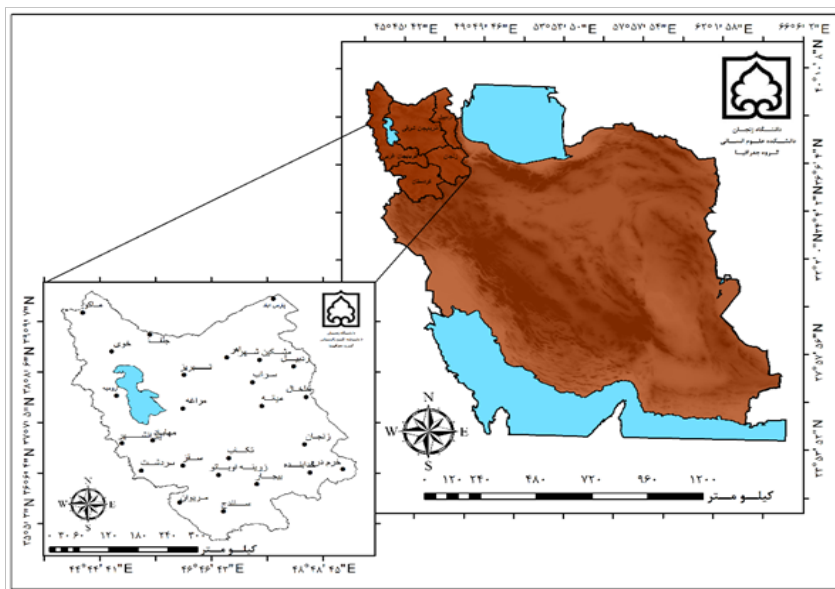
9- Silesia

10- Hruby Jesenik

11- Beskids Mountains

1- Cheng, et al

2- Simeonov & Georgiev



نگاره ۱: نقشه موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه شمال غرب ایران

تا قله ابر زیاد باشد، احتمال وقوع تگرگ بیشتر خواهد شد. ثنایی نژاد و همکاران (۱۳۸۹)، نتایج حاصل از بررسی علت عدم وقوع ناپایداری در روز ۲۸ جولای ۲۰۰۹ (۶ مرداد ۱۳۸۸) مناطق شمالی و شرق مشهد را با استفاده از داده‌های جو بالای حاصل از رادیو سوند، نمودار ترمودینامیکی اسکویوتی (Skew-T) چنین بیان می‌نمایند که وضعیت مناسب ساختار جو بالا در روز ۲۸ جولای و نامناسب بودن این ساختار در روز ۲۹ جولای برای وقوع توفان می‌باشد. شاخص‌های ناپایداری نیز همگی نشان‌دهنده‌ی احتمال بالای وقوع ناپایداری به طور ویژه توفان‌های تندری در روز ۲۸ جولای بوده‌اند. از سایر مطالعات داخلی در این زمینه، می‌توان به تحقیقات زاهدی و چویدار (۱۳۸۶)، قشلاقی (۱۳۸۶)، تاج بخش و همکاران (۱۳۸۸)، قویدل رحیمی (۱۳۹۰) و برنا و فاخرنسب (۱۳۹۱) اشاره داشت. آنچه که از تحقیقات انجام شده بر می‌آید، اهمیت و تأثیرگذاری شرایط اتمسفری جو بالا و نیز ویژگی‌های محلی مناطق تگرگ‌زا می‌باشد.

از آنجایی که شمال غرب یکی از مکان‌های تگرگ خیز ایران بوده، همواره مورد توجه محققین بسیاری بوده است. با توجه به این نکته که این منطقه جزء یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور نیز محسوب می‌شود، انجام تحقیقی

عبد منافی (۱۳۸۳)، به بررسی شاخص‌های ناپایداری، برش قائم باد و وضعیت‌های رطوبتی حداقل ۱۵ مورد وقوع تگرگ در تهران پرداخته است. نتیجه تحقیق نشان داده است که بیشترین تمرکز بارش تگرگ در فصل بهار و در ماه‌های اسفند تا اردیبهشت طی ساعات ۶ تا ۱۸ بوده است. حاج بابایی و همکاران (۱۳۸۴)، به تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی یک مورد تگرگ در مورخه ۲۶ اکتبر ۱۹۹۰ پرداخته و ضمن اینکه شمال غرب و غرب کشور را به عنوان منطقه‌ای با بیشترین فراوانی ریزش تگرگ معرفی نموده‌اند، علت اصلی این پدیده را وجود رطوبت کافی و صعود توده‌های هوا دانسته‌اند. صادقی حسینی و رضائیان (۱۳۸۵)، طی دوره ۱۲ ساله (۲۰۰۲-۱۹۹۱) برای منطقه اصفهان آب قابل بارش را بهترین شاخص ناپایداری جو معرفی نمودند. همچنین بیان داشته‌اند که مقادیر بالای شاخص K و شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی همراه با مقادیر منفی و کم شاخص شولتر نیز نشان دهنده بارندگی شدید بوده است. میرموسوی و اکبرزاده (۱۳۸۸)، براساس شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ در ایستگاه هواشناسی تبریز نظیر شاخص‌های LCL و CCL و K نشان داده‌اند که در ایستگاه مورد مطالعه هر اندازه سطح یخبندان کمتر از ۳۰۰ متر باشد، احتمال وقوع تگرگ کمتر و هر چقدر فاصله سطح یخبندان

پنج و شش ایستگاه را فرا گرفته، که در تمامی این موردها حدود ۷۰ درصد به بالا، وقوع تگرگ در ساعات گرمایش سطح زمین (۱۸-۰۹) به وقت گرینویچ بوده است. از هر گروه تک، دو و سه ایستگاه درگیر تگرگ، ۱۰ روز به شکل تصادفی انتخاب شد و ۷ روز مربوط به روزهای وقوع این پدیده در بیش از ۳ ایستگاه، نیز مورد انتخاب قرار گرفت. سپس به منظور مطالعه خصوصیات ترمودینامیکی هوایی که منطقه را از نظر پایداری و ناپایداری مورد تهاجم قرار می‌دهد و بررسی ویژگی‌های دینامیکی از نظر امکان تقویت و تضعیف سیستم‌های فشاری و جبهه‌ها در منطقه و نیز به سبب پوشش کامل منطقه، داده‌های جو بالای ۲ ایستگاه تبریز (تنها ایستگاه از نوع خود در منطقه) و کرمانشاه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱: وضعیت هوای حال (ww)، مربوط به بارش تگرگ

شدت	شرح پدیده	کد مخبره
-	رگبار تگرگ یا تگرگ همراه با باران، طی ساعت گذشته	۲۷
ملایم	رگبار تگرگ ریز و یا نرم با و یا بدون باران و یا مخلوط باران و برف	۸۷
متوسط و یا شدید	رگبار تگرگ ریز و یا نرم با و یا بدون باران و یا مخلوط باران و برف	۸۸
ملایم	رگبار تگرگ با و یا بدون باران و یا مخلوط باران و برف	۸۹
متوسط و یا شدید	رگبار تگرگ با و یا بدون باران و یا مخلوط باران و برف	۹۰
ملایم	برف یا مخلوط برف و باران و یا تگرگ توأم با رعد و برق در ساعت گذشته	۹۳
متوسط و یا شدید	برف یا مخلوط برف و باران و یا تگرگ توأم با رعد و برق در ساعت گذشته	۹۴
ملایم یا متوسط	رعد و برق توأم با تگرگ	۹۶
شدید	رعد و برق توأم با تگرگ	۹۹

مأخذ: علیجانی، ۱۳۸۱: ۳۵ - ۳۲.

دقیق به منظور شناخت و آگاهی از شرایط و عوامل مؤثر در وقوع پدیده تگرگ منطقه، امری بس ضروری و لازم به شمار می‌آید تا با بهره‌گیری از نتایج به دست آمده از این تحقیق زمینه مناسب جهت برنامه‌ریزی‌های دقیق برای کاهش خسارات ناشی از آن فراهم گردد. بنابراین به منظور کسب آمادگی برای برنامه‌ریزی و مواجهه با اثرات مخرب تگرگ، مطالعه و شناخت الگو و شرایط ترمودینامیکی جو، که موجب ناپایداری‌ها و بارش‌های تگرگ شمال غرب می‌شود، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. منطقه مورد مطالعه با پنج استان آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و کردستان؛ با مساحت ۱۵۱۳۶۳/۹۵ کیلومتر مربع بین ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ (GMT) قرار دارد (نگاره ۱).

داده‌ها و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل اطلاعات روزانه مربوط به بارش تگرگ در ۲۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک منطقه شمال غرب کشور می‌باشد. کدهای مربوط به بارش تگرگ (۲۷، ۹۰-۸۷، ۹۳، ۹۴، ۹۶، ۹۹) از ۱۰۰ کد مربوط به گروه هفتم (ww هوای حاضر) از داده‌های مربوط به ایستگاه‌های ذکر شده، استخراج و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است (جدول ۱). طی دوره آماری مورد بررسی (۲۰۰۹-۱۹۹۲)، ۶۶۹ روز، پدیده‌ی تگرگ در بخش‌های مختلف منطقه به وقوع پیوسته است. ۳۵۶ مورد از این تگرگ‌ها در یک روز خاص فقط در یکی از ایستگاه‌های مورد بررسی اتفاق افتاده است. ۸۷ مورد دیگر در یک روز خاص، در دو ایستگاه و ۱۹ مورد نیز در یک روز خاص، در سه ایستگاه به طور همزمان به وقوع پیوسته است. همچنین ۵ مورد دیگر از بارش تگرگ، در یک روز چهار ایستگاه را در بر داشته است و دو مورد دیگر از بارش‌های تگرگ هر کدام در یک روز خاصی،

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)
 تحلیل ترمودینامیکی پدیده تگرگ در شمال ... / ۱۸۷

جدول ۲: شاخص‌های ناپایداری جوی محلی، ایستگاه تبریز (۱۹۹۲-۲۰۰۹)

سال	ماه	روز	ساعت	SI	LI	SW	KI	C.T	V.T	T.T	PWC (mm)	سطح یخبندان (m)
۱۹۹۲	مارس	۱۴	۰۰	۶/۶۸	۶/۷۳	۴۳/۹۸	۱۸/۳۰	۲۰/۱۰	۲۶/۱۰	۴۶/۲۰	۷/۳۳	۱۴۸۵
۱۹۹۳	دسامبر	۱۸	۰۰	۱۲/۲	۱۱/۹۷	۵۴/۹۹	۵	۱۵	۱۹/۷	۳۴/۷	۹/۶۹	۳۴۵۸
۱۹۹۴	آوریل	۲۲	۰۰	۰/۶۴	۱/۰۳	۱۴۵/۸	۲۹/۷	۱۹/۳	۳۰/۳	۴۹/۶	۱۷/۸۶	۳۷۷۵
۱۹۹۴	آوریل	۲۲	۱۲	۱/۱۵	۱/۱۸	۱۷۴/۶	۲۵/۳	۱۳/۳	۳۵/۳	۴۸/۶	۱۲/۷۶	۳۷۸۳
۱۹۹۵	مارس	۱۴	۰۰	۶/۰۷	۵/۴۹	۵۴/۹۹	۱۸/۹	۱۹/۵	۲۵/۵	۴۵	۷/۴	۲۲۶۷
۱۹۹۷	فوریه	۱۱	۰۰	۱۵/۴۵	۱۵/۳۷	۱۹/۹۹	-۳/۹	۱۲	۱۹	۳۱	۳/۰۴	۱۵۲۴
۱۹۹۷	مارس	۸	۰۰	۷/۷۶	۸/۲۲	۳۸/۹۹	۷/۴	۲۰/۴	۲۶/۴	۴۶/۸	۲/۹۱	۱۴۸۷
۱۹۹۷	می	۳	۰۰	۵/۲۸	۵/۵۴	۴۸/۵۹	۲۱/۵	۱۶/۷	۲۶/۷	۴۳/۴	۱۱/۸۱	۳۰۷۰
۱۹۹۸	ژانویه	۱۶	۰۰	۱۳/۰۳	۱۳/۶۲	۸۱/۵۹	۸/۳	۱۶/۲	۱۹/۸	۳۶	۵/۸	۱۵۲۵
۱۹۹۸	مارس	۶	۰۰	۱۱/۲۴	۱۱/۲۳	*	۱۰/۵	۱۱/۵	۲۳/۵	۳۵	۷/۰۶	۱۵۲۰
۱۹۹۸	می	۴	۰۰	۷/۲۳	۷/۸۱	*	۵/۶۴	۱۶/۸۴	۲۳/۸۴	۴۰/۶۷	۵/۵۶	۳۱۳۰
۱۹۹۹	فوریه	۸	۰۰	۹/۷۶	۸/۵	*	۱۹/۹	۱۶/۹	۲۱/۱	۳۸	۱۲/۹۴	۲۲۲۳
۲۰۰۱	دسامبر	۱۶	۰۰	۴/۰۹	۳/۰۱	۱۱۵/۷	۲۱/۵	۲۲/۵	۲۸/۵	۵۱	۶/۸	۱۴۹۳
۲۰۰۲	فوریه	۱۶	۰۰	۵/۳۴	۵/۲۵	۷۹/۶۴	۱۹/۷	۱۹/۹	۲۶/۹	۴۶/۸	۸/۱۱	۲۰۰۴
۲۰۰۲	آوریل	۴	۰۰	۶/۹۹	۵/۹	۳۰	۲۰/۸۱	۲۱/۱۲	۲۳/۷	۴۴/۸۳	۱۰/۶۴	۱۴۵۷
۲۰۰۳	فوریه	۱۱	۰۰	۶/۰۹	۱/۸۷	۱۷۶/۷	۲۱/۹	۲۴/۵	۳۰/۵	۵۵	۶/۵	۱۴۵۵
۲۰۰۳	آوریل	۲۲	۰۰	۳/۸۱	۴/۰۷	۴۸/۵۶	۱۸/۹	۱۷/۷	۲۹/۷	۴۷/۴	۷/۷۷	۲۷۶۶
۲۰۰۳	می	۲۹	۰۰	۳/۴۵	۲/۹۹	۵۴/۵۱	۲۶/۳	۱۶/۷	۲۸/۷	۴۵/۴	۱۵/۱۵	۳۷۱۸
۲۰۰۴	ژانویه	۲۷	۰۰	۳/۸۲	۳/۶۳	۷۵/۴۲	۲۳/۷	۲۴/۷	۲۷/۱	۵۱/۸	۷/۹۲	۱۴۳۲
۲۰۰۴	آوریل	۳	۰۰	۴/۲۹	۴/۴۱	۶۲/۱۶	۱۸/۹	۱۸/۳	۲۸/۳	۴۶/۶	۱۰/۰۴	۲۷۱۸
۲۰۰۵	ژانویه	۲۳	۰۰	۱۲/۰۷	۱۰/۹۲	۳۱/۰۸	۱۰/۲	۱۷/۴	۲۰/۶	۳۸	۷/۱۳	۱۳۹۳
۲۰۰۵	آوریل	۲۷	۰۰	۴/۳۸	۴/۱۳	۱۵۴/۸	۲۹/۵	۲۰/۱	۲۲/۵	۴۲/۶	۲۰/۷	۳۰۴۳
۲۰۰۵	می	۱۹	۰۰	۳/۰۹	۲/۶۷	۱۱۳/۹	۲۴/۷	۱۸/۹	۲۶/۹	۴۵/۸	۱۴/۸۹	۳۷۸۸
۲۰۰۹	نوامبر	۲۱	۰۰	۰/۶۲	۶/۴۱	۳۰۹/۷	۲۸/۶	۲۳/۹	۳۰/۹	۵۴/۸	۹/۹۷	۱۹۸۶
حداقل	-	-	-	۰/۶۲	۱/۰۳	۱۹/۹۹	-۳/۹	۱۱/۵	۱۹	۳۱	۶/۵	۱۳۹۳
حداکثر	-	-	-	۱۵/۴۵	۱۵/۳۷	۳۰۹/۷	۲۹/۷	۲۴/۷	۳۵/۳	۵۵	۱۷/۸۶	۳۷۸۸
میانگین	-	-	-	۶/۴	۱/۷	۸۱/۷	۱۵/۲	۱۸/۵	۲۵/۹	۴۴/۴	۹/۶	۲۳۵۴

جدول ۳: شاخص‌های ناپایداری جوی محلی؛ ایستگاه کرمانشاه (۱۹۹۲-۲۰۰۹)

سال	ماه	روز	ساعت	SI	LI	SW	KI	C.T	V.T	T.T	PWC (mm)	سطح یخبندان (m)
۱۹۹۲	مارس	۱۴	۰۰	۵/۳۵	۵/۴۸	۷۰/۰۱	۲۴/۳	۱۹/۹	۲۵/۹	۴۵/۸	۱۲/۹۶	۲۰۳۵
۱۹۹۲	مارس	۱۴	۱۲	۴/۱۲	۳/۹۴	۲۳۹/۷	۲۰/۵	۱۸/۹	۲۷/۹	۴۶/۸	۱۱/۴۲	۲۵۴۲
۱۹۹۳	دسامبر	۱۸	۰۰	۱۰/۱۵	۱۴/۷۹	۴۹/۴۱	-۲۵/۵	۱۶/۳	۲۰/۳	۳۶/۶	۸/۱۹	۳۸۰۴
۱۹۹۳	دسامبر	۱۸	۱۲	۲۰/۷۱	۱۰/۲۳	۴۹/۰۱	-۳۶/۵	۲/۴	۱۴/۴	۱۶/۸	۴/۹۹	۳۸۰۴
۱۹۹۴	اوت	۳	۱۲	*	*	*	*	*	۳۶/۵	*	۰	*
۱۹۹۵	مارس	۱۴	۱۲	۱/۸	۳/۲۵	۵۲/۴۱	-۱۲/۷	۱۹/۱	۳۰/۱	۴۹/۲	۵/۷۸	۳۳۷۶
۱۹۹۷	فوریه	۱۱	۱۲	۲/۵۷	۲/۱۹	۱۲	۱۱/۵	۱۵/۱	۳۴/۱	۴۹/۲	۳/۹	۲۰۰۳
۱۹۹۷	مارس	۸	۱۲	۱۶/۷۵	۱۶/۶۳	۵۲	-۴۱/۷	۸/۶	۱۷/۶	۲۶/۲	۲/۳۶	۱۵۱۰
۱۹۹۷	می	۳	۱۲	۲/۳۵	۱/۷۴	۹۲	۲۲/۷	۱۳/۵	۳۳/۵	۴۷	۱۴/۰۳	۳۷۷۰
۱۹۹۸	ژانویه	۱۶	۱۲	۱۸/۸۱	۱۸/۲	*	-۲۶/۴	۱۰/۳	۱۴/۴	۲۴/۷	۲/۹۲	۴۰۰۷
۱۹۹۸	مارس	۶	۱۲	۱۰/۰۷	۹/۸۱	۷۶/۹۲	-۲/۹۱	۵/۸۹	۲۶/۸۹	۳۲/۷۸	۷/۷۷	۳۰۵۶
۱۹۹۸	می	۴	۱۲	۵/۸۸	۵/۴۴	*	۱۰/۹۳	۱۰/۷	۲۹/۷	۴۰/۴	۱۰/۸۳	۴۴۳۶
۱۹۹۸	جولای	۱	۱۲	۱/۰۸	۱/۸	۲۳۴/۸	۲۰/۲۸	۸/۴۳	۴۰/۱۵	۷۸/۵۸	۱۱/۹۸	۵۵۳۹
۲۰۰۱	دسامبر	۱۶	۱۲	۰/۵۹	۰/۶۲	۱۶۲/۲	۲۲/۱	۲۰/۱	۳۴/۱	۵۴/۲	۶	۲۲۹۴
۲۰۰۲	فوریه	۱۶	۱۲	۴/۷۴	۴/۸۷	۷۹/۶۴	۲۱	۱۹/۳	۲۷/۳	۴۶/۶	۶/۵۷	۲۱۰۳
۲۰۰۲	آوریل	۴	۱۲	۸/۱	۷/۸۶	۵۴/۳۹	۲۱/۳	۱۵/۷	۲۳/۷	۳۹/۴	۱۰/۲۴	۲۲۲۱
۲۰۰۳	فوریه	۱۱	۱۲	۳/۸	۳/۳۳	۱۱۳/۴	۲۲/۴	۲۳/۳	۲۷/۱	۵۰/۴	۸/۱۱	۲۰۱۵
۲۰۰۳	آوریل	۲۲	۱۲	۲/۱۱	۱/۸۲	۱۱۰/۲	۳۱	۱۸/۵	۲۹/۵	۴۸	۱۷/۰۲	۳۰۶۰
۲۰۰۳	می	۲۹	۱۲	۰/۱۳	۰/۴	۱۲۰/۵	۲۷/۵	۱۵/۳	۳۵/۳	۵۰/۶	۱۳/۳۳	۲۸۲۴
۲۰۰۴	ژانویه	۲۷	۱۲	۲/۶۴	۲/۸۵	۱۰۸/۲	۲۰/۳	۲۰/۷	۳۰/۷	۵۱/۴	۶/۲۲	۱۹۷۷
۲۰۰۴	آوریل	۳	۱۲	۱/۷۷	۱/۵۵	۲۷۰/۲	۲۹	۱۸/۹	۲۹/۹	۴۸/۸	۱۴/۸۶	۳۰۶۳
۲۰۰۵	ژانویه	۲۳	۱۲	۸/۶۱	۸/۴۹	۷۱/۸۷	۱۶/۸	۱۷/۱	۲۴/۱	۴۱/۲	۵/۸۱	۱۷۰۰
۲۰۰۵	می	۱۹	۰۰	-۱	-۰/۸۸	*	۲۷/۷	۱۸/۳	۳۴/۳	۵۲/۶	۱۵/۴۲	۴۱۴۱
۲۰۰۵	می	۱۹	۱۲	-۰/۴۵	-۰/۶۳	*	۱۶/۵	۹/۹	۴۰/۹	۵۰/۸	۱۰/۷۵	۴۱۴۸
۲۰۰۹	نوامبر	۲۱	۱۲	۶/۱۹	۶	*	۲۳/۲	۱۸/۷	۲۵/۷	۴۴/۴	۱۱/۳۲	۲۰۲۰
حداقل	-	-	-	-۱	-۰/۸۸	۱۲	-۳۶/۵	۹/۹	۱۴/۴	۲۴/۷	۰	۱۵۱۰
حداکثر	-	-	-	۲۰/۷۱	۱۶/۶۳	۲۷۰/۲	۲۷/۷	۲۳/۳	۴۰/۹	۷۸/۵۸	۱۷/۰۲	۳۹۵۵
میانگین	-	-	-	۶	۵/۴	۱۰۶/۳	۸/۸	۱۵/۲	۲۸/۶	۴۴/۷	۸/۹	۳۶۸۵

بالا روی بر اساس معادله زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرد
(تویدل رحیمی، ۱۳۹۰: ۱۹۲-۱۹۱):

$$L = T500 - TD \quad (۱)$$

در معادله فوق TD دمای نقطه D بر واحد درجه سانتی گراد می‌باشد.

ب- ضرایب $C.T^3$ ، $V.T^4$ ، $T.T^5$

مقدار ضرایب بالا بر حسب دما (t) و دمای نقطه شبنم (t_d) در سطوح مختلف به درجه‌ی سانتی گراد از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$C.T = t_d 850 - t 500 \quad (۲)$$

$$V.T = t 850 - t 500 \quad (۳)$$

$$T.T = (t + t_d)_{850}^{-2} t 500 \quad (۴)$$

شاخص $V.T$ و $T.T$ برای نشان دادن احتمال فعالیت شدید رعد و برق بوده است (زاهدی و چویدار، ۱۳۸۶: ۲۹-۲۸).
مقادیر مختلف شاخص $T.T$ برای ناپایداری در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مقادیر آستانه شروع ناپایداری و وقوع توفان بر

اساس شاخص $(T.T)$

مقدار نمایه $T.T$	وضعیت
کمتر از ۴۴	وقوع توفان تندی طبیعی
بین ۴۴ تا ۴۸	احتمال توفان تندی پراکنده با احتمال کم از توفان تندی شدید
بین ۴۸ تا ۵۲	امکان توفان تندی شدید
بیشتر از ۵۲	احتمال بالای توفان تندی شدید

مأخذ: A GUIDE TO THE SKEW-T / LOG-P DIAGRAM: 8.

ت- شاخص صعود (SI^2)

شاخص SI تفاوت دمای محیط و دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است در شرایطی که فرض شود

- 3- Cross Totals Index
- 4- Vertical Totals Index
- 5- Total Totals Index
- 6- Showalter Index

جدول ۴: مقادیر آستانه شروع ناپایداری و وقوع توفان بر

اساس شاخص (LI)

مقدار نمایه LI	وضعیت
بیشتر از ۲	بدون فعالیت همرفتی
۰ تا ۲	احتمال رگبار و رعد و برق پراکنده
۰ تا -۲	احتمال وقوع رگبارهای باران و برف
کمتر از -۲ تا -۵	احتمال وقوع توفان
کمتر از -۵ تا -۶	احتمال توفان شدید
کمتر از -۶ تا -۷	احتمال وقوع تورنادو (دیوباد)

مأخذ: همان.

به منظور استخراج نمودار اقلیمی Skew-T log P و شاخص‌های ناپایداری صعود ایستگاه‌های مذکور در روزهای وقوع پدیده، از وب سایت دانشگاه وایومینگ آمریکا بهره گرفته شده است. داده‌های این بخش از تحقیق را ۸ شاخص ناپایداری جوی (SI ، LI ، SW ، KI ، $C.T$ ، $V.T$ ، $T.T$ ، PWC) و سطح یخبندان در ایستگاه‌های مذکور مربوط به ۲۳ مورد وقوع تگرگ موجود در سایت از ۳۷ روز منتخب، تشکیل داده‌اند (جدول‌های ۲ و ۳). در جدول‌های نام برده برخی از شاخص‌ها بدون ذکر مقادیر مربوطه بوده است. این مسئله می‌تواند ناشی از اشکال در رادیو سوندها و عدم اندازه‌گیری صحیح حسگرهای دستگاه‌های اندازه‌گیری بوده باشد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۲). همچنین در این مطالعه برای تحلیل دینامیک فعالیت‌های همرفتی از چند شاخص ترمودینامیک متداول به شرح زیر استفاده شده است:

الف- شاخص بالاروی (LI^2)

در نمودارهای اسکیوتی از LCL (به محل تلاقی خطوط اُفتاهنگ آدیاباتیک بی دررو خشک و نسبت اختلاط نقطه LCL گفته می‌شود) ارتفاع ۵۰۰ متری زمین به موازات اُفتاهنگ بی دررو اشباع خطی ترسیم می‌شود تا در نقطه‌ای به نام D خط فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال را قطع کند. شاخص

- 1- Tornado
- 2- Lifted Index

ث - ضریب SW^۲

در نمودار مذکور دمای نقطه شبنم سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (Td)، ضریب (T.T) و سرعت (SK) و جهت باد (DIR) در سطوح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال را در رابطه‌ی ۶ قرار داده، مقدار ضریب SW محاسبه می‌شود (زاهدی و چویدار، ۱۳۸۶: ۲۹).

$$SW = 12 (Td850) + 20 (T.T-49) + 2 (SKT850) + SKT500 + 125 [\sin (DIR500-DIR850) + 0.2]$$

لازم به ذکر است که، اگر $T.T < 49$ باشد، مقدار $20 (T.T-49)$ صفر فرض می‌شود. همچنین اگر یکی از شرایط زیر محقق شود مقدار $125 [\sin (DIR500-DIR850)]$ صفر فرض می‌شود:

- جهت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال بین ۱۳۰ تا ۲۵۰ درجه نباشد. جهت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال بین ۲۱۰ تا ۳۱۰ درجه نباشد. مقدار $(DIR500 - DIR850)$ بزرگتر از صفر نباشد. همچنین سرعت‌های باد در سطوح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال هیچ کدام بزرگتر یا مساوی ۱۵ نات نباشند.

جدول ۷: مقادیر آستانه شروع ناپایداری و وقوع توفان بر

اساس شاخص (SW)

مقدار شاخص SW	وضعیت
۱۵۰-۳۰۰	توفان با شدت ضعیف
۳۰۰-۴۰۰	توفان با شدت متوسط
بیشتر از ۴۰۰	احتمال تورنادو

مأخذ: Haby, J, 2013

ج - شاخص KI^۳

مانند شاخص صعود، شاخص KI نیز از اطلاعات اسکیتوی به دست آمده و به صورت رابطه شماره ۷ تعریف می‌شود.

$$KI = (T850 - T500) + D850 - (T700-D700) \quad (۷)$$

T دمای هوا و D دمای نقطه‌ی شبنم بر حسب درجه‌ی

بسته اولیه در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال قرار داشته باشد. این شاخص، پایداری کلی را برای توده‌های هوا بیان می‌کند و امکان ناپایداری را بین ترازهای ۸۵۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال اندازه‌گیری می‌کند. اما اگر رطوبت در ترازهای پایین‌تر از ۸۵۰ هکتوپاسکال قرار داشته باشد و یا زمانی که مرز جبهه یا وارونگی^۱ قوی بین لایه‌های ۸۵۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال وجود داشته باشد، این شاخص نمی‌تواند نمایانگر ناپایداری باشد (صادقی حسینی و رضائیان، ۱۳۸۵: ۸۶). شاخص SI بدین طریق محاسبه می‌شود، که ابتدا با استفاده از دما و دمای نقطه شبنم از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، LCL تعیین می‌شود. سپس از LCL، خطی موازی با نزدیکترین بی دررو اشباع رسم شده تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را قطع نماید. دمای خوانده شده در آن تراز برابر است با دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، که با $T'500$ نشان داده می‌شود. در آخر تفاوت دمای محیط در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال که با $T500$ نشان داده می‌شود و $T'500$ مشخص کننده مقدار شاخص SI است.

$$SI = T500 - T' \quad (۵)$$

اگر SI بیشتر از ۴+ باشد از ابرهایی با ساختار کومه‌ای باران شکل نمی‌گیرد اما اگر مقدار SI از ۴+ کمتر باشد رگبارها و توفان تندری بیشتری روی می‌دهد. مقدار منفی شاخص نیز ناپایداری لایه مرزی جو نسبت به جو میانی بیان می‌دارد (جدول ۶).

جدول ۶: شاخص صعود (SI)

شاخص صعود	شانس وقوع توفان تندری شدید
بیشتر از ۳	بدون فعالیت همرفتی و وقوع توفان
۰ تا ۳	احتمال رگبار پراکنده با احتمال خیلی ضعیف
۰ تا -۲	احتمال ضعیف
-۱ تا -۵	احتمال متوسط
≥ -۶	احتمال قوی

مأخذ: سیف، ۱۳۷۵: ۱۰۲.

2- Sweat Index

3- K Index

1- Inversion

چ- شاخص آب قابل بارش PWC

مقدار آب چگالیده شده‌ی موجود در یک ستون هوای نمناک، آب قابل بارش نامیده و بر حسب سانتی متر یا میلی متر بیان می‌شود. برای محاسبه آب قابل بارش در نقش شاخصی برای پیش بینی فعالیت همرفتی می‌توان از رابطه ساده زیر استفاده کرد:

$$PWC = \left(\frac{1}{g} \frac{P_{EL}}{P_{CCL}} - rdp \right) \times 10^{-1} \quad (۸)$$

جدول ۹: استانداردهای ناپایداری جوی

Ohio State University Atmospheric sciences program http://www.twister.sbs.ohio-state.edu/severe	S<4
	C.T>17
	V.T>25
	T.T>43
	K>15
	LI<0
College of Dupage Next Generation Weather Lab http://www.srh.noaa.gov/ffc/html/gloss2.shtml	SW>272
	S<3
	K>20
	T.T>60
The Weather Prediction.Com The grand site of Weather analysis and Forecasting education http://www.weather.cod.edu/sirvatka/si.html	LI<0
	SW>250
	S<0
	K>15
	T.T>44
NOAA National Oceanic and Atmospheric (Administration) National Weather Service forecast office http://www.theweatherprediction.com	LI<0
	SW>150
	S<3
	T.T>44
	K>15
SW>300	LI<0
	LI<0
	LI<0
	LI<0
	LI<0
	LI<0

سانتی گراد (سطوح فشاری ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰ هکتوپاسکال) است. در معادله ارائه شده از دمای سطوح فوقانی ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال و دمای نقطه شبنم دو تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال برای آشکارسازی و محاسبه ناپایداری استفاده شده است. جمله‌ی اول آهنگ کاهش دما را در حرکت بالارو بین سطوح ۸۵۰ هکتوپاسکال و ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد.

جمله‌ی دوم رطوبت اولیه جو را نشان می‌دهد. جمله‌ی سوم (با علامت منفی) اختلاف بین دمای واقعی و دمای نقطه شبنم تراز جو ۷۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد. این رابطه مهم ترمودینامیک نشان می‌دهد که هر اندازه جمله اول (کاهش دما در حرکت بالارو) و جمله دوم (رطوبت آغازین) بیشتر باشند و از سوی دیگر جمله سوم (کمبود اشباع در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال) کمتر باشد، بر شدت ناپایداری جو افزوده می‌شود. بنابراین اگر مقدار خروجی معادله کمتر از ۱۵ باشد، جو فاقد ناپایدار و حرکات همرفتی است. اگر خروجی شاخص بین ۱۵ تا ۲۵ باشد، پتانسیل همرفت در حد کم، بیش از ۲۵ تا ۳۹ گویای پتانسیل همرفت متوسط و ارقام بیش از ۴۰ معرف پتانسیل همرفت شدید هستند. در جدول ۸، ارتباط بین KI و احتمال وقوع توفان تندی توده‌ی هوا نشان داده شده است (قویدل رحیمی، ۱۳۹۰: ۱۱۹).

جدول ۸: احتمال وقوع توفان‌های تندی بر اساس

شاخص KI

شاخص KI	احتمال وقوع توفان تندی به درصد
۰ تا ۱۵	۰
۱۵ تا ۲۰	۲۰
۲۰ تا ۲۵	۴۰ تا ۲۰
۲۵ تا ۲۶	۶۰ تا ۴۰
۲۶ تا ۳۰	۸۰ تا ۶۰
۳۰ تا ۳۱	۹۰ تا ۸۰
۳۱ تا ۳۶	بیشتر از ۹۰
بیشتر از ۳۶	بیشتر از ۹۰

جدول ۱۰: شاخص‌های جهانی ناپایداری جوی مبنای

مقایسه						
SI	LI	SW	KI	C.T	V.T	T.T
< 4	< 0	> 150	> 15	> 17	> 25	> 43

مأخذ: زاهدی و چویدار، ۱۳۸۶.

در بررسی و مقایسه شاخص‌های ناپایداری جدول ۲ مربوط به روزهای وقوع تگرگ در شمال غرب با جدول مذکور نتایج زیر حاصل گشته است:

- مقادیر SI در همه‌ی روزهای مورد بررسی به جز روزهای ۲۲ آوریل ۱۹۹۴، ۲۲ آوریل و ۲۹ می ۲۰۰۳، ۲۷ ژانویه ۲۰۰۴، ۱۹ می ۲۰۰۵ و ۲۱ نوامبر ۲۰۰۹ یعنی حدود ۷۳/۹٪ از روزهای منتخب، بزرگتر از ۴ هستند.

- مقادیر LI در همه‌ی روزهای مورد بررسی بزرگتر از صفر بوده است. یعنی ارقام مشاهداتی روزهای منتخب ۱۰۰٪ با ارقام پیشنهادی شاخص‌های جهانی مغایرت داشته است.
 - مقادیر SW در همه روزهای مربوطه به جز روزهای ۲۲ آوریل ۱۹۹۴، ۱۱ فوریه ۲۰۰۳، ۲۷ آوریل ۲۰۰۵ و ۲۱ نوامبر ۲۰۰۹ حدود ۸۲/۶٪ از روزهای مورد بررسی کمتر از ۱۵۰ می‌باشند.

- مقادیر کمتر از ۴۳ شاخص T.T مربوط به روزهای ۱۸ دسامبر ۱۹۹۳، ۱۱ فوریه ۱۹۹۷، ۱۶ ژانویه و ۶ مارس و ۴ می ۱۹۹۸، ۱۸ فوریه ۱۹۹۸، ۲۳ ژانویه و ۲۷ آوریل ۲۰۰۵ بوده است. به عبارت دیگر می‌توان اشاره داشت که حدود ۳۴/۸٪ از مشاهدات روزهای مورد نظر با شاخص‌های جهانی مغایرت داشته است.

- روزهای کمتر از ۱۵، KI نیز شامل ۳۰/۴٪ از روزهای مورد مطالعه می‌باشد. یعنی روزهای ۱۸ دسامبر ۱۹۹۳، ۱۱ فوریه و ۸ مارس ۱۹۹۷، ۱۶ ژانویه و ۶ مارس و ۴ می ۱۹۹۸ و ۲۳ ژانویه ۲۰۰۵.

- مقادیر C.T در حدود ۳۹٪ از روزهای مورد بررسی شامل روزهای ۱۸ دسامبر ۱۹۹۳، ۲۲ آوریل ۱۹۹۴، ۱۱ فوریه و ۳ می ۱۹۹۷، ۱۶ ژانویه و ۶ مارس و ۴ می ۱۹۹۸، ۸ فوریه ۱۹۹۹ و ۲۹ می ۲۰۰۳ کمتر از رقم پیشنهادی

که در این رابطه \bar{r} مقدار متوسط نسبت اختلاط بین سطوح فشار P_{CCL} و P_{EL} (فشار در پایه و قله ابر) است. باید توجه شود در محاسبه آب قابل بارش هرگاه وارونگی دما بین دو لایه فشاری در بالای پایه‌ی ابر وجود داشته باشد، مقدار (rdp) برای آن لایه با علامت منفی در نظر گرفته می‌شود. چون با افزایش دما، پتانسیل پذیرش رطوبت بسته هوا افزایش می‌یابد، کمبود اشباع ایجاد می‌شود و تبخیر در اثر این افزایش دما نیز نمی‌تواند این کمبود اشباع را جبران کند (صادقی حسینی و رضائیان، ۱۳۸۵: ۱۵).

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر شاخص‌های ناپایداری جوی مربوط به روزهای وقوع تگرگ شمال غرب کشور (جدول ۲)، استخراج شده از نمودارهای اسکیتوی مربوطه با استانداردهای ناپایداری جوی دانشگاه‌ها و مراکز هواشناسی آمریکا (جدول ۹) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در این مقایسه بزرگترین رقم شاخص‌های SI و LI و کوچک‌ترین رقم شاخص‌های C.T، KI، V.T، T.T و SW از ارقام داخل جدول مذکور مورد توجه قرار گرفته است. به طور مثال در مورد SW چهار دانشگاه و مرکز هواشناسی ذکر شده به ترتیب $SW > 272$ ، $SW > 250$ ، $SW > 150$ و $SW > 300$ را شرط ناپایداری قید کرده‌اند و باید $SW > 150$ مبنای مقایسه قرار داده شود. چرا که مقادیر ۲۵۰، ۲۷۲ و ۳۰۰ بزرگتر از ۱۵۰ هستند و $SW > 150$ در همه آنها صدق می‌کند. در مورد SI نیز چهار دانشگاه و مرکز هواشناسی ذکر شده به ترتیب $SI < 4$ ، $SI < 3$ ، $SI < 0$ و $SI < 3$ را شرط ناپایداری قید کرده‌اند و باید $SI < 4$ مبنای مقایسه قرار داده شود، چرا که مقادیر ۳ و صفر کوچکتر از ۴ هستند و $SI < 4$ در همه‌ی آنها صدق می‌کند. حال اگر چنانچه مقدار SW و SI در روز وقوع تگرگ به ترتیب کمتر از ۱۵۰ و بیشتر از ۴ بوده باشد در خارج از استانداردهای مذکور قرار گرفته است. بنابراین مبنای مقایسه شاخص‌های ناپایداری جوی منطقه در مقایسه با شاخص‌های جهانی به شرح جدول ۱۰ می‌باشد:

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۱۹۳)
تحلیل ترمودینامیکی پدیده تگرگ در شمال ... / ۱۹۳

جدول ۱۰ بوده است. $SI \leq 20/71$ شرط ناپایداری قید شده است و باید $SI \leq 20/71$ مبنای مقایسه قرار داده شود، چرا که مقادیر $7/12$ و $15/45$ کوچکتر از $20/71$ هستند و $SI \leq 20/71$ در همه آنها صدق می کند. حال اگر چنانچه مقدار SW و SI در روز وقوع تگرگ به ترتیب کمتر از $11/65$ و بیشتر از $20/71$ بوده باشد در خارج از استانداردهای مذکور قرار خواهد گرفت. بنابراین شاخص های ناپایداری جوی شمال غرب کشور به شرح جدول زیر تعیین شده است.

جدول ۱۱: شاخص های ناپایداری جوی منطقه شمال غرب

کشور						
SI	LI	SW	KI	C.T	V.T	T.T
$\leq 20/71$	$\leq 16/63$	$\geq 19/99$	$\geq 14/30$	$\geq 11/50$	$\geq 24/70$	$\geq 41/80$

در روابط جدول ۱۱، حالت تساوی نشانگر حداقل ناپایداری محلی است که احتمال وقوع پدیده تگرگ در آن شرایط وجود دارد و افزایش $V.T$ ، $C.T$ ، KI ، SW و $T.T$ از مقادیر درج شده در جدول به اعداد بزرگتر و کاهش SI و LI به اعداد کوچکتر نشانگر افزایش شدت ناپایداری محلی و افزایش احتمال وقوع تگرگ می باشد. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که سطح یخبندان در روزهای تگرگی بین سطوح 850 تا 650 هکتوپاسکال (بین ارتفاع 1393 تا 3788 متری) در نوسان می باشد که در ماه های گرم سال این سطح حالت صعودی داشته است. به عبارت دیگر تراز نوسان این سطح در ماه های آوریل و می سال های همراه با پدیده تگرگ، بین ارتفاع 2718 متری (۳ آوریل ۲۰۰۴) تا 3788 متری (۱۹ می ۲۰۰۵) در نوسان می باشد (جدول ۲). پایین بودن سطح یخبندان در ماه آوریل (نسبت به ماه های گرم دیگر) که دارای بالاترین فراوانی بارش تگرگ نیز در منطقه بوده، می تواند ناشی از اثرات توأم سیستم های جوی و عوامل محلی باشد. پرفشار سبیری از میانه ای اکتبر تا میانه ای آوریل بر آسیا حاکم است؛ که پرفشار سبیری نقش دمایی و مهمی هم در ایران بازی می کند. به طوری که عمدتاً از شمال شرق و گاهی از شمال

جدول ۱۰ بوده است. - مقادیر کمتر از ۲۵ شاخص $V.T$ نیز شامل روزهای ۱۸ دسامبر ۱۹۹۳، ۱۱ فوریه ۱۹۹۷، ۱۶ ژانویه و ۶ مارس و ۴ می ۱۹۹۸، ۸ فوریه ۱۹۹۹، ۴ آوریل ۲۰۰۲ و ۲۳ ژانویه ۲۰۰۵ می باشد. به عبارت دیگر حدود $34/8\%$ از روزهای مورد مطالعه با ارقام شاخص های جهانی مغایرت داشته است. بزرگترین مقادیر SI و LI و کوچکترین مقادیر KI ، $V.T$ و $T.T$ به ترتیب برابر با $15/45$ ، $15/37$ ، $19/99$ ، $3/9$ ، 19 و 31 مربوط به وقوع تگرگ در تبریز در ساعت ۱۲ و به تاریخ ۱۱ فوریه ۱۹۹۷ می باشد. کوچکترین مقدار $C.T$ ($11/5$) نیز مربوط به بارش تگرگ در تبریز ولی به تاریخ ۶ مارس ۱۹۹۸ بوده است. همان طور که ملاحظه شد، مقایسه ای این شاخص های ناپایداری جوی، مغایرت هایی را در برخی موارد بین ارقام مشاهداتی و ارقام پیشگویی شده ای جهانی، نشان داده است. شاخص های ناپایداری مورد استفاده دانشگاه ها و مراکز هواشناسی آمریکا در واقع با توجه به شرایط جغرافیایی و آب و هوایی آمریکا تعیین شده اند و نمی توانند به طور مطلق در سایر کشورها ملاک عمل قرار بگیرند (زهدی و چویدار، ۱۳۸۶: ۳۷). بنابراین با توجه به ویژگی های جغرافیایی و اقلیمی شمال غرب که منجر به دارا بودن پتانسیل بالا برای وقوع برخی از پدیده های خاص جوی به مانند پدیده تگرگ بوده، به مقایسه و بررسی و شاخص های ناپایداری ایستگاه تبریز و کرمانشاه (مربوط به دوره مورد مطالعه در این تحقیق) پرداخته شده است. در این مقایسه نیز بزرگترین رقم شاخص های SI و LI و کوچکترین رقم شاخص های KI ، $T.T$ ، $V.T$ ، $C.T$ و SW از رقم های داخل جدول های ۲، ۳ و ۱۰ مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان نمونه در مورد SW به ترتیب $11/65 \geq SW$ ، $19/99 \geq SW$ و $12 \geq SW$ شرط ناپایداری جو منطقه بوده و باید $11/65 \geq SW$ مبنای مقایسه قرار داده شود. چرا که مقادیر $19/99$ و 12 بزرگتر از $11/65$ هستند و $11/65 \geq SW$ در همه آنها صدق می کند. در مورد SI نیز به ترتیب $SI \leq 7/12$ ، $SI \leq 15/45$ و $71/20$

چشمگیری داشته است. ریزش جوی به شکل بارش در روزهای وقوع پدیده تگرگ، بسیار ناچیز و در بیشتر موارد به میزان صفر بوده است. برای ایجاد بارندگی وجود هوای مرطوب و عامل صعود لازم است (علیجانی، ۱۳۸۹: ۱۰۵). در روزهای مورد بررسی رطوبت در جو وجود داشته که در آوریل و می این میزان رطوبت رو به افزایش بوده است. چون در بهار رطوبت هنوز توسط بادهای غربی از دریای مدیترانه می‌رسد و سرما و پایداری زمستان هم وجود ندارد (علیجانی، ۱۳۸۹: ۱۱۷). در شمال غرب ناپایداری‌های بهاری که از یک سو متأثر از شرایط ناهمواری و از سوی دیگر ناشی از سامانه‌های غربی است تندررها را پدید می‌آورد (مسعودیان و کاویانی، ۱۳۸۷: ۹۶). بدین ترتیب شرایط برای تشکیل تگرگ وجود داشته، چرا که تگرگ حاصل حرکات قائم شدید قطرات باران است که در توفان‌های رعد و برق مشاهده می‌گردد. در چنین حالتی قطرات آب درون یک توده‌ی هوا در نتیجه حرکات قائم سریع به سطح زیر نقطه انجماد رسیده و به سرعت منجمد شده و با انباشتگی از برف و آب در سطوح متفاوت رشد می‌کنند (جعفرپور، ۱۳۸۵: ۱۶۳). بنابراین بیشترین میزان رطوبت جو در بخشی از روز تحت شرایط صعود شدید و ناگهانی در فرایند تشکیل تگرگ دخالت داشته و موجب بروز بارش‌های رگباری تگرگ شده است. از آنجایی که این نوع بارش‌ها شدیداً ناگهانی بوده فقط میزان کمی از رطوبت جو تبدیل به بارش گشته است. در بررسی شاخص‌های ناپایداری طبق نمودارهای نگاره ۲ در سال‌های اخیر (۲۰۰۵-۲۰۰۰) بر شدت ناپایداری جو افزوده شده است. به طوری که شاخص SI و LI در این سال‌ها به مقدار صفر نزدیک شده و سایر شاخص‌ها، هر یک میل صعودی به سوی حداکثر آستانه‌های خود داشته‌اند. همچنین در این دوره میزان آب قابل بارش جو روند افزایشی داشته است و نیز بیش از یک ایستگاه درگیر بارش تگرگ بوده و در آوریل و می رگبار تگرگ ریز یا نرم با شدت بارشی ملایم و شدید رخ داده است (جدول ۱۲). این نوع از تگرگ‌ها از ابرهای کومولونیمبوس توأم با

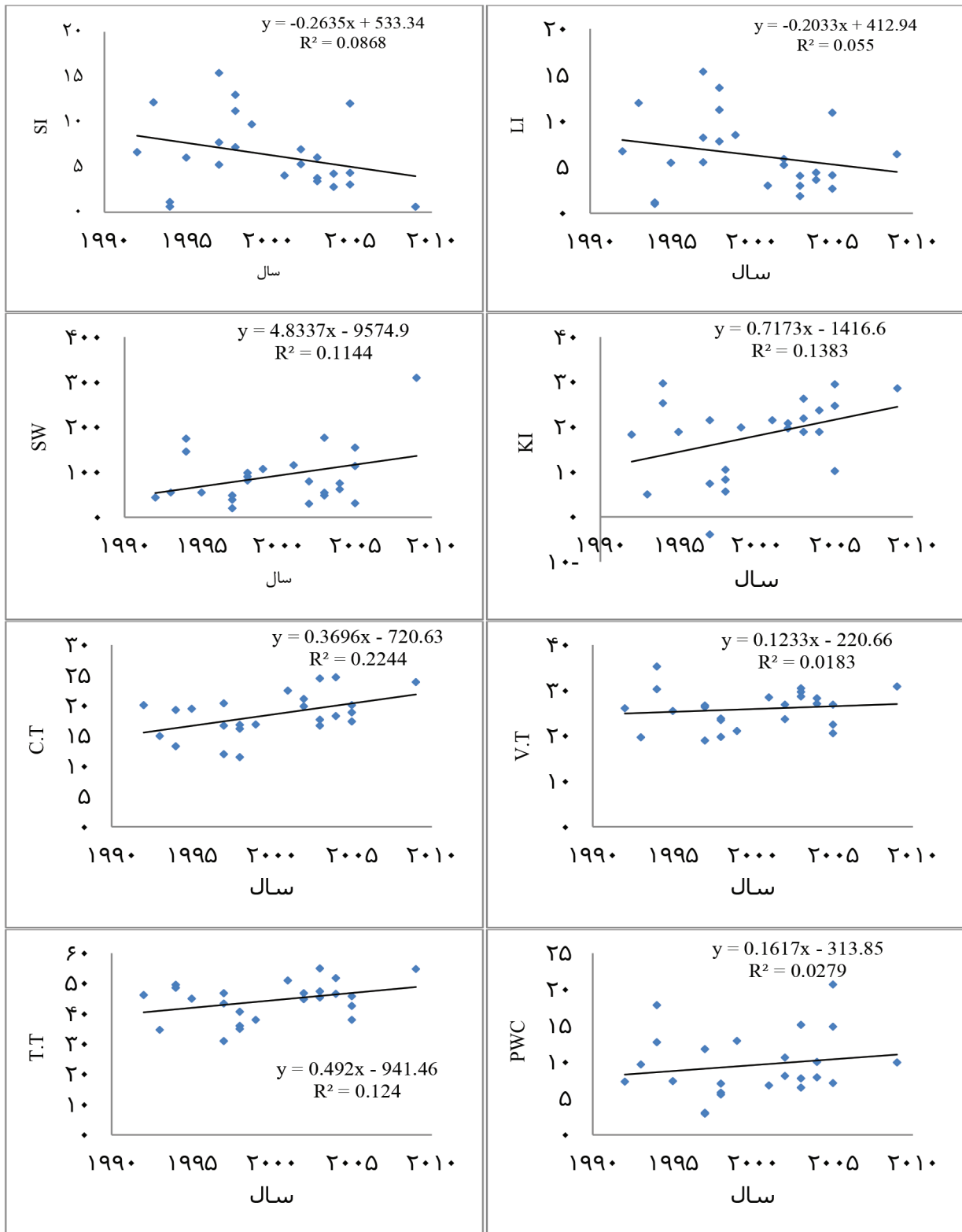
غرب در ایران نفوذ می‌کند و هوای بسیار سرد و خشک را بر بخش‌هایی از کشور سرازیر می‌کند (مسعودیان و کاویانی، ۱۳۸۷: ۲۱ و ۲۳). با این وجود در منطقه تعداد روزهای بارندگی نسبت به زمستان کاهش نیافته است. برای اینکه هنوز بادهای غربی از آذربایجان خارج نشده‌اند و از طرف دیگر بر اثر تابش عمودی آفتاب به دامنه‌های آفتابگیر سطح زمین بسیار گرمتر از اتمسفر مجاور شده و همرفت دامنه‌ای و نهایتاً ناپایداری شدید را سبب می‌شود (علیجانی، ۱۳۸۹: ۱۱۷). به عبارت دیگر در ماه آوریل که جزء ماه‌های انتقالی گرم (بهار) بوده، به دلیل گرم شدن سریع سطح زمین و لایه‌های زیرین جو (افزایش طول روز و نزدیک شدن خورشید به خط قائم) و بالا بودن رطوبت هوا (بارش‌های فصل قبل) ناپایداری زیاد شده و جریان‌های همرفتی شدت یافته و تحت شرایط مناسب، ابرهای همرفتی رشد کرده و باعث ایجاد توفان تندری می‌شوند. شرایط توپوگرافی منطقه نیز به این امر کمک کرده و باعث پایین آمدن سطح یخبندان و در نتیجه تبدیل توفان تندری به توفان تگرگ می‌شود (لشکری و امینی، ۱۳۸۹: ۵۸).

بنابراین می‌توان اشاره داشت که بالا بودن فراوانی بارش تگرگ در آوریل همراه با سطح پایین یخبندان‌ها، نتیجه عملکرد با هم عوامل محلی و گسترش سیستم‌های فشار نواحی مجاور ایران مانند فرابار سیبری بوده است. در ماه می نیز به دلیل عقب نشینی پرفشار سیبری و بادهای غربی، عوامل محلی در کنترل رفتار اقلیم منطقه نقش بارزتری را پیدا نموده است. گرمایش سطح زمین در این ماه نسبت به ماه آوریل بالاتر بوده و باعث افزایش ارتفاع صعود شده است. بنابراین فرایند یخبندان در سطوح بالاتر بیشتر ناشی از لیس ریت و عوامل محلی بوده است. به طوری که عامل همرفتی به ویژه همرفت دامنه‌ای در ناحیه شمال غربی ۳۳ درصد کل عوامل صعود را به خود اختصاص داده است (علیجانی، ۱۳۸۹: ۱۰۸). همان طور که در جدول ۱۲ ملاحظه می‌شود، مقدار آب قابل بارش (مقدار آب موجود در جو یک مکان) برای روزهای مورد مطالعه با میزان بارندگی همان روزها تفاوت

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)
تحلیل ترمودینامیکی پدیده تگرگ در شمال ... / ۱۹۵

جدول ۱۲: مقایسه میزان شاخص ناپایداری PWC با بارندگی شمال غرب در روزهای وقوع پدیده تگرگ (۱۹۹۲-۲۰۰۹)

سال	ماه	روز	ساعت	PWC (mm)	بارندگی (mm)	ایستگاه درگیر پدیده تگرگ	ساعت	نوع بارش تگرگ (کد)
۱۹۹۲	مارس	۱۴	۰۰	۷/۳۳	۰	تبریز	۰۹	۲۷
۱۹۹۳	دسامبر	۱۸	۰۰	۹/۶۹	۰	تبریز	۱۲	۸۷
۱۹۹۴	آوریل	۲۲	۰۰	۱۷/۸۶	۰/۹	تبریز	۱۵	۸۷
۱۹۹۵	مارس	۱۴	۰۰	۷/۴	۰	تبریز	۱۲	۲۷
۱۹۹۷	فوریه	۱۱	۰۰	۳/۰۴	۰	تبریز	۱۲	۲۷
۱۹۹۷	مارس	۸	۰۰	۲/۹۱	۰	تبریز	۱۲	۲۷
۱۹۹۷	می	۳	۰۰	۱۱/۸۱	۰	تبریز	۲۱	۲۷
۱۹۹۸	ژانویه	۱۶	۰۰	۵/۸	۰	تبریز	۰۳	۸۷
۱۹۹۸	مارس	۶	۰۰	۷/۰۶	۰	تبریز	۱۲	۸۷
۱۹۹۸	می	۴	۰۰	۵/۵۶	۰	تبریز	۰۳	۹۶
۱۹۹۹	فوریه	۸	۰۰	۱۲/۹۴	۰	تبریز	۱۲،۰۹	۲۷،۸۸
۲۰۰۱	دسامبر	۱۶	۰۰	۶/۸	۰	تبریز	۰۰	۸۷
۲۰۰۲	فوریه	۱۶	۰۰	۸/۱۱	۰/۸	تبریز	۰۶	۸۷
۲۰۰۲	آوریل	۴	۰۰	۱۰/۶۴	۹	تبریز	۱۵	۸۷
۲۰۰۳	فوریه	۱۱	۰۰	۶/۵	۰/۶	تبریز	۱۲	۸۷
۲۰۰۳	آوریل	۲۲	۰۰	۷/۷۷	۸، ۳ و ۴	تبریز، زنجان، میانه	۱۲	۹۶
۲۰۰۳	می	۲۹	۰۰	۱۵/۱۵	۲، ۰ و ۲۶/۳	بیجار، تبریز، زنجان	۰۹، ۱۲	۹۶
۲۰۰۴	ژانویه	۲۷	۰۰	۷/۹۲	۰، ۰	ارومیه، تبریز	۱۵، ۱۲	۲۷، ۸۷
۲۰۰۴	آوریل	۳	۰۰	۱۰/۰۴	۳/۴	سقز	۱۵	۹۹
۲۰۰۵	ژانویه	۲۳	۰۰	۷/۱۳	۱۲	تبریز	۰۶	۲۷
۲۰۰۵	آوریل	۲۷	۰۰	۲۰/۷	۴/۹	تبریز	۰۹	۲۷
۲۰۰۵	می	۱۹	۰۰	۱۴/۸۹	۰، ۳	بیجار، تبریز	۰۰، ۱۲	۲۷، ۹۶
۲۰۰۹	نوامبر	۲۱	۰۰	۹/۹۷	۷	تبریز	۰۰، ۱۲	۸۷
حداقل	-	-	-	۶/۵	۰	-	-	-
حداکثر	-	-	-	۱۷/۸۶	۲۶/۳	-	-	-
میانگین	-	-	-	۹/۶	۳/۴	-	-	-



نگاره ۲: نمودار پراکنندگی شاخص‌های ناپایداری نسبت به سال‌های وقوعشان، در شمال غرب کشور (۱۹۹۲-۲۰۰۹)

موجود در جو طی فرایند شکل‌گیری تگرگ مشارکت داشته‌اند. در سال‌های اخیر ناپایداری‌های جو منطقه شدت یافته به طوری که در این دوره میزان آب قابل بارش جو روند افزایشی داشته است و نیز بیش از یک ایستگاه درگیر بارش تگرگ بوده است. در ماه آوریل و می‌رگبار تگرگ ریز یا نرم با شدت بارشی ملایم و شدید رخ داده است. این امر بیانگر ویژگی‌های دمایی سطوح مختلفی است که تگرگ اغلب در بهار و یا فصول انتقالی سال می‌بارد، زیرا در این فصول اغتشاشات شدید اتمسفری بسیار قوی است.

منابع و مأخذ

- ۱- برنا، فاخرنسب؛ رضا، احمد؛ ۱۳۹۱، بررسی شاخص‌های ناپایداری LI، L.C.L و L در وقوع توفان‌های تندری در ایستگاه دزفول، اولین همایش ملی جغرافیا، مخاطرات محیطی و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز، اهواز، ۷-۱.
- ۲- تاج بخش، غفاریان، میرزایی؛ سحر، پروین، ابراهیم؛ ۱۳۸۸، روشی برای پیش بینی رخداد توفان‌های تندری با طرح دو بررسی موردی، مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۴، ۱۶۶-۱۴۷.
- ۳- ثنائی نژاد، صالحی، بابائیان؛ سیدحسین، حسن، ایمان؛ ۱۳۸۸، تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی پدیده‌های همرفتی محلی به منظور بهبود پیش بینی آنها/ مطالعه موردی: توفان و تگرگ مورخه ۶ مرداد ۱۳۸۸ در مشهد، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، دانشگاه تهران، ۵-۱.
- ۴- جعفرپور، ابراهیم، ۱۳۸۵، اقلیم شناسی، چاپ ششم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۷۲-۱.
- ۵- حاجی بابایی، نصیری، معزی؛ نوید، آزاده، مینا؛ ۱۳۸۴، بررسی سینوپتیکی بارش تگرگ، مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی مخاطرات زمین، بلایای طبیعی و راه کارهای مقابله با آنها، دانشگاه تبریز، تبریز.
- ۶- زاهدی، چویدار؛ مجید، اصغر، ۱۳۸۶، مقایسه‌ی شاخص‌های ناپایداری جوی حوضه‌ی آبریز آجی چای با استانداردهای ناپایداری جوی و تعیین الگو برای این

باران فرو می‌ریزد. وقتی تگرگی بشکند اشکال متحدالمرکزی را نشان می‌دهد که در مراحل پی در پی و زیر سطح انجماد تشکیل شده است. این امر بیانگر ویژگی‌های دمایی سطوح مختلفی است که تگرگ اغلب در بهار و یا فصول انتقالی سال می‌بارد، زیرا در این فصول اغتشاشات شدید اتمسفری بسیار قوی است (جعفرپور، ۱۳۸۵، ۱۶۵).

نتیجه‌گیری

شمال غرب کشور به عنوان منطقه‌ای با فراوانی بیشترین بارش تگرگ در ایران شناخته شده است. پیش آگاهی از وقوع این پدیده، برای برنامه‌ریزی‌های بلند مدت و کاهش خسارات وارده توسط این پدیده دارای اهمیت بوده است و می‌توان شرایط ویژه آب و هوایی در هنگام وقوع پدیده را بررسی نمود. با تلفیق شاخص‌های ناپایداری به دست آمده از نمایه عمودی جو و نمودار (Skew-T) با متغیرهای متعدد دیگر، می‌توان هشدارهای به موقعی از وقوع پدیده‌های همرفتی مخربی مانند توفان و تگرگ ارائه وصحت پیش‌بینی‌های صادره از این نوع پدیده‌ها را تا حد زیادی بالا برد. این شاخص‌ها از کشوری به کشور دیگر تغییر می‌کند در واقع تعیین شاخص‌های ناپایداری مورد استفاده دانشگاه‌ها و مراکز هواشناسی آمریکا با توجه به شرایط آب و هوایی و جغرافیایی آمریکا تعیین شده‌اند و نمی‌توانند در سایر کشورها ملاک سنجش قرار بگیرند. بنابراین برای تعیین شاخص‌های ناپایداری شمال غرب کشور داده‌های جو بالای منطقه در ۲۳ روز وقوع تگرگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. شاخص‌های ناپایداری جوی این منطقه به شرح زیر تعیین شد:

$$SI \leq 20/71, LI \leq 16/63, SW \geq 19/99, KI \geq 14/30, \\ C.T \geq 11/50, V \geq 24/70, T.T \geq 41/80$$

همچنین در این بررسی مشخص گردید که در ترازهای ۶۵۰ الی ۸۵۰ هکتوپاسکال سطح یخبندان دارای نوسان بوده است که در ماه می این سطح افزایش می‌یابد. تحقیق حاضر نشان داد که طی دوره‌ی مورد مطالعه بیشترین رطوبت

هواشناسی تبریز، مجله علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، شماره ۲۵، ۱۰۸-۹۵.

17- A GUIDE TO THE SKEW-T/ LOG-P DIAGRAM: Available at: http://kiwi.atmos.colostate.edu/group/todd/Extras_files/Skew-T-Manual.pdf

18- Cheng, L. English, M. Wong, R. 1985, Hailstone size distributions and Their Relationship to Storm Thermodynamics: Journal of Climate and Applied Meteorology Vol. 24, pp. 1059-1067.

19- Chroma, K., Brázdil, K. and Tolasz, R. 2006, Temporal and Spatial Variability of Hailstorms in Moravia and Silesia (Czech Republic) in the 19th-20th centuries: Geophysical Research Abstracts Vol. 8, 04367.

20- Costa, S, Mezzasalma, P, Levizzani, V, Alberoni, P, P, Nanni, S. 2001, Deep convection over Northern Italy: synoptic and thermodynamic analysis: Atmospheric Research 56, pp. 73-88.

21- Haby, J, 20013, Severe Weather Indices Page, Available at: http://www.theweather_prediction.com/severe/indices/, (dec, 2013).

22- Simeonov, Petio, Georgiev, G. 2001, A case study of tornado-producing storm south of Rhodopes mountain in the Eastern Mediterranean: Atmosphere 57, pp. 187- 199.

23- Siouts, M. V. Flocas, H. A. 2003, Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment: Theor, Appl, Climatol 75, pp. 189-20.

حوضه، جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره ۹، ۴۴-۲۳.
۷- سیف، مهرزاد، ۱۳۷۵، بررسی توزیع بارش تگرگ در ایران و مطالعه موردی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران.

۸- صادقی حسینی، رضائیان، رضا، مهتاب؛ ۱۳۸۵، بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارور سازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان، فیزیک زمین و فضا، شماره ۲، ۹۸-۸۳.

۹- عبدمنافی، دینا، ۱۳۸۳، بررسی شاخص‌های ناپایداری برش قائم باد و وضعیت‌های رطوبتی در هنگام نزول تگرگ در تهران (حداقل ۱۵ مورد از سال ۲۰۰۰ به قبل)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.
۱۰- علیجانی، بهلول، ۱۳۸۸، اقلیم شناسی سینوپتیک، تهران، چاپ سوم، انتشارات سمت، ۲۵۷-۱.

۱۱- علیجانی، بهلول، ۱۳۸۹، آب و هوای ایران، چاپ دهم، نشر پیام نور، تهران، ۲۲۱-۱.

۱۲- قشلاقی، مینا، ۱۳۸۶، بررسی تأثیر تگرگ بر روی مناطق کشاورزی استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات.

۱۳- قویدل رحیمی، یوسف، ۱۳۹۰، کاربرد شاخص‌های ناپایداری جوی برای آشکارسازی و تحلیل دینامیک توفان تندری روز ۵ اردیبهشت ۱۳۸۹ تبریز، فصلنامه علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، شماره ۳۴، ۲۰۸-۱۸۲.

۱۴- لشکری، حسن و امینی، میترا، ۱۳۸۸، تحلیل سینوپتیک و پهنه بندی بارش تگرگ در خراسان بزرگ برای دوره‌ی آماری (۱۹۹۶-۲۰۰۵)، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز، شماره ۳۱، ۱۰۸-۵۱.

۱۵- مسعودیان، کاویانی؛ سید ابوالفضل، محمدرضا؛ ۱۳۸۷، اقلیم شناسی ایران، چاپ اول، اصفهان، انتشارات دانشگاه اصفهان، ۱۷۹-۱.

۱۶- میرموسوی، اکبرزاده؛ سیدحسین، یونس؛ ۱۳۸۸، مطالعه شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ در ایستگاه