

## واکاوی همدید مخاطره تگرگ در شهرستان بجنورد

سعید بازگیر\*

استادیار و عضو هیأت علمی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

علیرضا ایلدرومی (ildoromi@gmail.com)

دانشیار و عضو هیأت علمی گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر.

قربان صابر (gh\_saber2005@yahoo.com)

دانشجوی دکتری پژوهشکده انگور و کشمش، دانشگاه ملایر.

احمد ارشادی (Ershadi@basu.ac.ir)

دانشیار و عضو هیأت علمی گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینای همدان.

حمید نوری (h.nouri@malayeru.ac.ir)

استادیار و عضو هیأت علمی گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر.

(دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۱۹ - پذیرش ۱۳۹۷/۱۲/۲۶)

### چکیده

تگرگ یکی از مخاطرات جوی است که به سبب ناپایداری‌های جوی توسط ابرهای کومولونیمبوس و فعالیت شدید توفان‌های تندری بیشتر در فصول بهار و پاییز رخ می‌دهد. بیشترین خسارت، ناشی از بارش تگرگ در بخش کشاورزی است که همه‌ساله مقدار زیادی از محصولات باغی و زراعی در اثر این پدیده مخرب از بین می‌رود. در این مطالعه به منظور بررسی و تحلیل همدید سازوکار مؤثر بر شرایط رخداد تگرگ در شهرستان بجنورد از روش تحلیل خوشه‌ای طی دوره آماری (۱۳۹۶-۱۳۵۶) استفاده شده است. چهار الگو در شکل‌گیری تگرگ شناسایی شد: ۱. کم‌فشار دریای خزر؛ ۲. کم‌فشار پاکستان/ پرفشار آزر؛ ۳. پرفشار دریای خزر/ کم‌فشار عربستان؛ ۴. پرفشار شمال دریای خزر/ کم‌فشار پاکستان. نتایج نشان داد که بیشترین فراوانی پدیده تگرگ در ماه‌های فروردین و اردیبهشت در منطقه رخ داده است. در یک جمع‌بندی می‌توان گفت تشکیل سامانه‌های کم‌فشار و پرفشار در شمال و جنوب منطقه و تقویت جریان‌های نصف‌النهاری روی منطقه که سبب فرارفت رطوبت دریاهای عمان و خزر در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال می‌شود در بیشتر الگوها سبب تقویت حرکات صعودی و جو ناپایدار و تشکیل پدیده تگرگ شده است. از طرف دیگر ریزش هوای سرد عرض‌های بالا و صعود هوای گرم عرض‌های پایین روی منطقه در تشدید شیو دمایی و تقویت صعود روی منطقه از دیگر عوامل رخداد تگرگ بوده است. همچنین بیشترین رخداد تگرگ زمانی رخ داد که الگوی کم‌فشار پاکستان و پرفشار آزر بر منطقه استیلا داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: الگوی جوی، تحلیل خوشه‌ای، تگرگ، همگرایی شار رطوبت.

## مقدمه

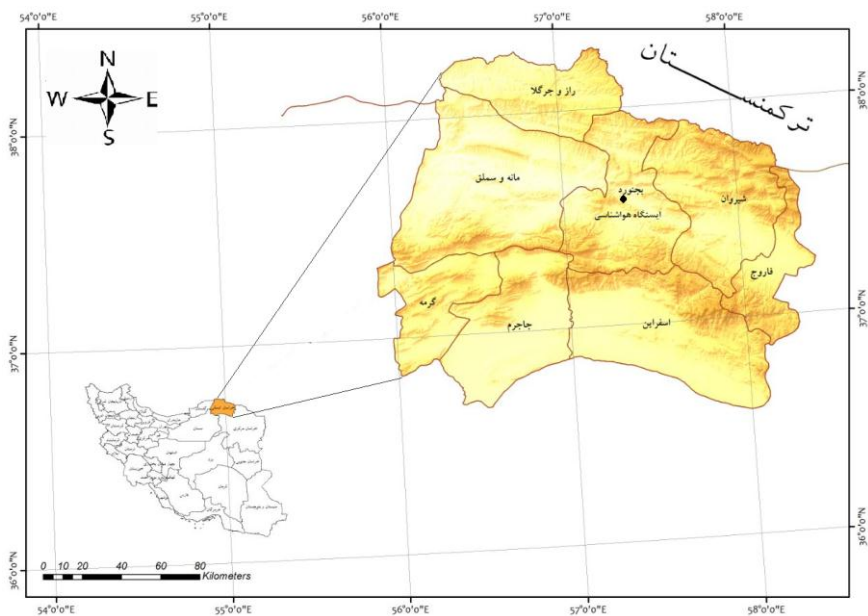
تگرگ یکی از پدیده‌های مخرب جوی است که بیشترین فراوانی رخداد آن در کشور در فصل بهار است [۱۸]. در اوایل فصل بهار، که همزمان با رشد گیاهان، گلدهی و میوه‌دهی بسیاری از درختان مثمر، تگرگ خسارات فراوانی به صاحبان محصولات زراعی و باغی وارد می‌کند [۱۸]. تحقیقات سال‌های اخیر نشان داده که روند رخداد توفان‌های تندری در ایران رو به افزایش است و به‌طور متوسط در هر سال حدود ۶ تن بر اثر توفان تندری در کشور جان خود را از دست می‌دهند. [۹، ۱۷، ۱۸].

خسارات طبیعی وارد به محصول توسط تگرگ، به شدت بارش تگرگ، بادهای شدید و باران توأم با تگرگ، مراحل رشد گیاه و نوع محصول بستگی دارد. تگرگ از دانه‌ها یا تکه‌های یخ به قطر ۵ تا ۵۰ میلی‌متر و گاهی بیشتر تشکیل شده است. رشد شدید تگرگ حاصل حرکات عمودی شدید و مکرر هوا در ابرهای کومولونیمبوس است که سبب می‌شود نطفه‌های تگرگ قطره‌های آب را به دور خود جذب کنند و سبب انجماد آنها شوند [۲۹، ۱۵]. ناپایداری هوا، رطوبت و صعود همراه با باد، مهم‌ترین عناصر دخیل در همه رخدادهای توفان تندری به‌شمار می‌روند [۲۵، ۱۹]. در زمینه تحلیل همدیدی بارش تگرگ پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. در خارج از کشور چنگون [۲۷]، در تحقیقی با عنوان فراوانی روزهای همراه با تگرگ و توفان رعدوبرق در منطقه ایلی‌نویز آمریکا در طی دوره آماری ۱۹۶۰-۱۹۵۱ به این نتیجه رسید که ماه‌های مارس و اکتبر توفان‌های رعد و برق بیشترین فراوانی را داشتند و یک‌سوم این توفان‌ها شامل توفان‌های تگرگ بوده است. در مطالعه‌ای از توفان‌های تندری به‌عنوان معضل مهم آمریکا در قرن بیستم ذکر شده و پیامدهای محیطی و اقتصادی توفان‌های تندری و پدیده‌های مربوط به آن (تگرگ، سیل و باد شدید) از عوامل تأثیرگذار بر اقتصاد و زندگی کشاورزان یاد شده است [۳۳]. سیوتاس و فلوکاس [۳۲]، با مطالعه الگوهای همدید و ترمودینامیک بارش تگرگ شمال یونان در فصل گرم بیان داشتند که جریان‌ها و تراف جنوب غربی بیشترین تأثیر را در بارش تگرگ منطقه داشته است. در تحقیق دیگری در شمال شرق چین [۳۱]، با بررسی ویژگی‌های اقلیمی کم‌فشارهای بریده، بارش تگرگ را با سامانه‌های گردشی، جبهه‌ها و کم‌فشارهای بریده مرتبط دانسته‌اند. چنگ و همکاران [۲۸] در بررسی توزیع ابعاد دانه‌های تگرگ و ارتباط آنها با توفان‌های ترمودینامیکی تابستان‌های ۱۹۸۰، ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳ در آلبرتا با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری و نمونه‌گیری تگرگ به این نتیجه رسیدند که در همه این توفان‌ها، همبستگی قوی و مستقیمی بین پارامتر شدت توفان و اندازه تگرگ

برقرار است. در تحقیقاتی در آمریکا به کمک مدل‌های عددی شبیه‌سازی شده توفان‌های تندری به این نتیجه رسیده‌اند که به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو عرض‌های بالا و گرم‌تر شدن هوا، ناپایداری‌های ناشی از آن بیشتر شده که افزایش فعالیت‌های همرفتی در این نواحی را در پی داشته است [۲۶]. در داخل کشور پژوهش‌های زیادی درباره تگرگ انجام گرفته که برخی از آنها در زمینه چگونگی تشکیل [۹، ۱۸]، توزیع مکانی [۲۱] و تحلیل همدید [۵، ۹، ۱۶]، ۱۰، ۲، بوده است. برای نمونه می‌توان به مطالعه سیف [۸] در خصوص تحلیل آماری-همدید تگرگ اشاره کرد که نتیجه گرفت کم‌فشارهای غربی که با فرارفت هوای گرم و مرطوب همراه‌اند، عامل اصلی فراوانی تگرگ در شمال غربی-غرب-شمال شرقی و جنوب شرقی دریای خزرند. بذاق جمالی و همکاران [۳] نیز در مقاله‌ای با عنوان بررسی پدیده تگرگ و روش‌های کنترل و مقابله با آن، از علل افزایش بارش تگرگ در غرب کشور را تفاوت‌های اقلیمی و توپوگرافی عنوان کرده‌اند. همچنین عبدمنافی [۱۰] در مطالعه بارش تگرگ در منطقه تهران با بررسی تغییرات باد با ارتفاع و محاسبه شاخص‌های ناپایداری و تحلیل همدیدی، به این نتیجه رسید که این پدیده بر اثر ناپایداری همرفتی توده هوا یا بر اثر عبور جبهه سرد به وقوع می‌پیوندد. در خصوص مطالعات همدید رخداد توفان‌های تندری نیز صلاحی و عالی جهان [۹]، در تحقیقی در دشت اردبیل، چهار الگوی فشار سطح زمین و چهار الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل را در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شناسایی کردند. درباره تحقیقات پدیده تگرگ در استان خراسان شمالی می‌توان به تحقیق هاشمی دوین و غفاریان [۲۴] اشاره کرد. ایشان در خصوص شرایط دینامیکی رخداد تگرگ در شهر پیش‌قلعه در خراسان شمالی به این نتیجه دست یافتند که رطوبت کافی، تشدید حرکات چرخشی و افزایش سرعت حرکات بالا و پایین‌سو، سبب رگبار شدید تگرگ در ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۲ شد. در خصوص شهرستان بجنورد نیز ذکر این نکته ضروری است که به دلیل کوهستانی بودن و قرار گرفتن در مسیر دو توده هوای سیبری و مدیترانه، هر ساله توفان‌های تندری و پدیده تگرگ رخ می‌دهد که خسارات فراوانی به باغداران این شهرستان وارد می‌کند [۶]. از طرف دیگر براساس گزارش‌های مدیریت بحران استانداری خراسان شمالی، خسارت ناشی از تگرگ به باغ‌ها و مزارع در سال ۱۳۹۰ برابر با ۳۱۲۸۲۵ میلیون ریال، در سال ۱۳۹۲ برابر با ۷۲۴۴ میلیون ریال، در سال ۱۳۹۳ برابر با ۱۲۵۹۸۰ میلیون ریال و در سال ۱۳۹۴ برابر با ۳۳۸۴۳ میلیون ریال بوده است [۲۳]. بنابراین شناخت سازوکار، تکوین و توسعه رخداد پدیده تگرگ می‌تواند در کاهش خسارت آن بسیار راهگشا باشد. بر این اساس هدف از این مطالعه، شناخت عوامل و الگوهای ایجاد تگرگ در شهرستان بجنورد در استان خراسان شمالی است.

### روش تحقیق

شهرستان بجنورد مرکز استان خراسان شمالی با ۳۶ کیلومتر مربع مساحت، در شمال شرق ایران در طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه در جنوب رشته کوه کپه داغ، شرق رشته کوه آلاداغ و شمال رشته کوه البرز واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۰۷۰ متر است (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه تحقیق

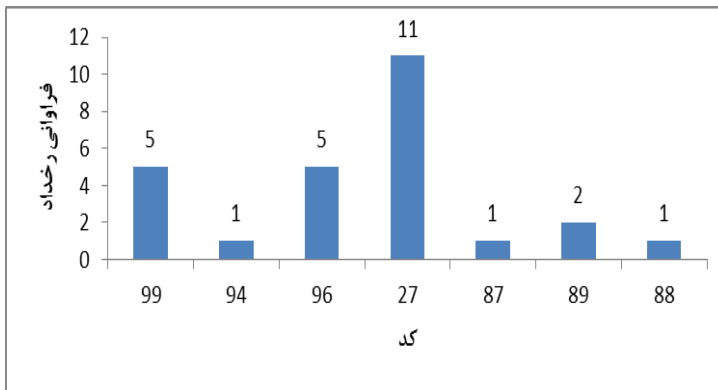
در این مطالعه، به منظور واکاوی همدید روزهای همراه با رخداد پدیده تگرگ در شهرستان بجنورد، داده‌های سه‌ساعته در دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳۵۶ از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. کدهای مربوط به رخداد تگرگ در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر فراوانی رخداد تگرگ براساس کدهای دیدبانی شده و در ساعات مختلف شبانه‌روز را نشان می‌دهند. بر این اساس کد ۲۷ دارای بیشترین فراوانی رخداد پدیده تگرگ در منطقه تحقیق است. همچنین بیشترین فراوانی رخداد تگرگ بین ساعات ۱۲ تا ۱۵ گرینویچ (۱۵:۳۰ تا ۱۸:۳۰ به وقت محلی) بوده است. دلیل این موضوع می‌تواند افزایش انرژی تابشی رسیده به زمین و ویژگی و پستی و بلندی سطح زمین باشد که به افزایش ناپایداری در این در این

ساعات از روز کمک می کند [۵،۲۲]. همچنین براساس داده های بلندمدت ایستگاه هواشناسی بجنورد با توجه به شکل ۴، در ماه های می و آوریل بیشترین فراوانی رخداد تگرگ در منطقه تحقیق به وقوع پیوسته است.

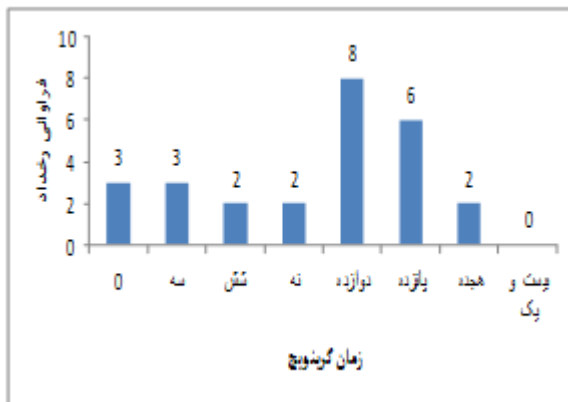
جدول ۱. توصیف کدهای دیدبانی بارش تگرگ براساس دستورالعمل دیدبانی سازمان جهانی هواشناسی\*

کد	پدیده
۲۷	رگبار تگرگ یا رگبار تگرگ همراه با باران در طی ساعت گذشته
۸۷	رگبار تگرگ ریز یا تگرگ نرم با یا بدون باران یا مخلوط باران و برف با ریزش ملایم
۸۸	رگبار تگرگ ریز یا تگرگ نرم با یا بدون باران یا مخلوط باران و برف با ریزش متوسط یا شدید
۸۹	رگبار تگرگ با یا بدون باران یا مخلوط باران و برف که توأم با رعدوبرق نیست با ریزش ملایم
۹۰	رگبار تگرگ با یا بدون باران یا مخلوط باران و برف که توأم با رعدوبرق نیست با ریزش متوسط و یا شدید
۹۶	رعدوبرق ملایم یا متوسط در وقت دیدبانی توأم با تگرگ در وقت دیدبانی
۹۸	رعدوبرق در وقت دیدبانی توأم با توفان گرد و خاک یا توفان شن در هنگام دیدبانی
۹۹	رعدوبرق شدید در وقت دیدبانی توأم با تگرگ در وقت دیدبانی

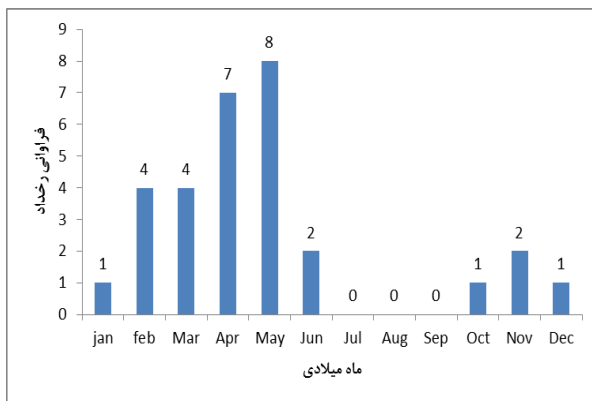
\* دستورالعمل دیدبانی تگرگ. منبع: سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۷ [۷]



شکل ۲. نمودار فراوانی رخداد کدهای پدیده تگرگ در منطقه تحقیق



شکل ۳. فراوانی رخداد تگرگ در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز



شکل ۴. فراوانی رخداد تگرگ در ماه‌های سال در بجنورد

در ادامه داده‌های فشار سطح متوسط دریا، دما، ارتفاع، نم نسبی، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری و مؤلفه قائم بردار باد متناظر با این روزها از تارنمای NCEP/NCAR (وابسته به سازمان ملی جو و اقیانوس‌شناسی ایالات متحده آمریکا) اخذ شد. در این بخش از پژوهش با تحلیل خوشه‌ای داده‌های فشار تراز دریا (SLP) روزهای همراه با بارش تگرگ، چهار خوشه اصلی از داده‌های فشار سطح دریا به دست آمد. روزهای نماینده هر خوشه (گروه) مشخص شد و با استفاده از داده‌های فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال و شار رطوبت و مؤلفه مداری و نصف‌النهاری نقشه‌های ترکیبی هم‌دید برای این روزها ترسیم شد و

الگوهای همدید عامل ایجاد و تداوم تگرگ بررسی و تحلیل شدند. مراحل این بخش عبارت‌اند از:

### الف) استخراج داده‌های جوی

در اولین گام به منظور طبقه‌بندی و محاسبات بعدی، با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Grad's داده فشار تراز دریا (SLP) و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای ۲۶ مورد (روز) رخداد بارش تگرگ در شهرستان بجنورد استخراج شد.

### ب) طبقه‌بندی داده‌های فشار تراز دریا

در گام بعدی با هدف طبقه‌بندی داده‌های فشار تراز دریا و شناسایی روزهای نماینده، تحلیل خوشه‌ای این داده‌ها انجام گرفت. هدف این تحلیل، شناسایی خوشه‌های مشابه در داده‌هاست، به طوری که داده‌هایی که شباهت بیشتری به یکدیگر دارند، در یک خوشه (گروه) قرار گیرند و پراش درون‌گروهی، کمینه و پراش بین‌گروهی، بیشینه شود. در این روش، گروه‌بندی داده‌ها براساس شباهت یا فاصله بین آنها صورت می‌گیرد. یکی از پرکاربردترین روش‌های اندازه‌گیری فاصله بین داده‌ها، روش فاصله اقلیدسی است که صورت ریاضی آن به شکل زیر است [۲۱].

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_{ik})^2} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $d_{jk}$  بیانگر فاصله اقلیدسی،  $x_{ij}$  مقدار متغیر مورد نظر در نقطه اول و  $x_{ik}$  مقدار همان پارامتر در نقطه دوم است که با به دست آمدن تفاضل آنها، فاصله دو نقطه مشخص شده و با محاسبه فاصله اقلیدسی برای همه نقاط مورد نظر، ماتریس فاصله‌ها تشکیل می‌شود. در پژوهش‌های اقلیمی به طور معمول از روش ادغام وارد<sup>۱</sup> (کمینه واریانس) استفاده می‌شود. در این روش، در طی هر مرحله از تحلیل، کمبود اطلاعاتی را که بر اثر دسته‌بندی افراد در دسته‌ها به وجود می‌آید، می‌توان توسط کل مجموع مربعات انحرافات (ESS) هر نقطه از میانگین دسته‌ای که به آن تعلق دارد به دست آورد. با استفاده از روش وارد، مقدار ESS از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱].

$$E.S.S = \sum_{i=1}^k \left[ \sum_{j=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \frac{1}{n_j} \left[ \sum_{j=1}^{n_j} X_{ij} \right]^2 \right] \quad (2)$$

در رابطه ۲  $X_{ij}$  امتیاز یا نمره فرد  $i$  ام است در دسته  $j$  ام،  $k$  تعداد کل دسته‌ها در هر مرحله و  $n_j$  تعداد افراد دسته  $i$  ام است. در ادامه این بخش با تحلیل خوشه‌ای داده‌ها توسط نرم‌افزار متلب، نمودار دارنمای<sup>۱</sup> آنها ترسیم شد و با مقایسه نقشه‌های گروه‌های مختلف و با استفاده از روش آزمون و خطا، محل مناسب برای برش نمودار و انتخاب تعداد گروه‌های نهایی مشخص شد.

### ج) تعیین روزهای نماینده

بعد از طبقه‌بندی داده‌های فشار تراز دریا، محل مناسب برای برش و تعیین روزهای نماینده مشخص شد. بدین منظور با استفاده از اسکریپت‌نویسی در محیط متلب، همبستگی نقشه‌های روزهای مختلف هر طبقه (دو تا شش گروهی) با ضریب ۰/۵ محاسبه شد. همبستگی بین روزها از رابطه زیر به دست آمد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

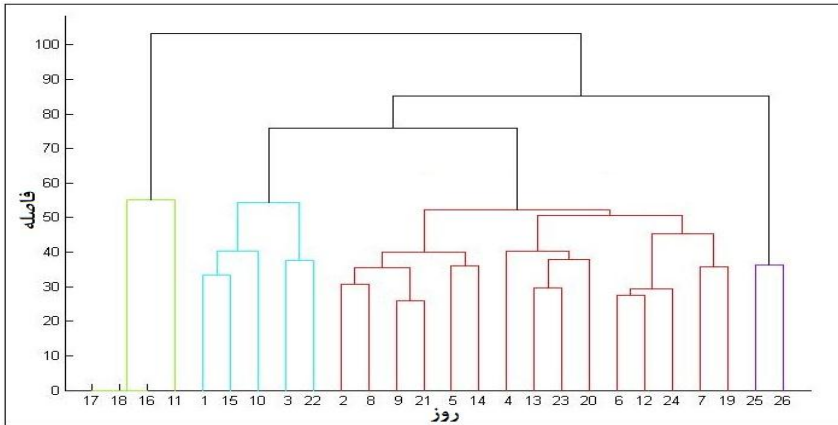
در رابطه ۳،  $X_i$  معرف متغیر مورد نظر در هر یک از  $N$  نقطه نقشه اول است؛  $Y_i$  مقدار همان متغیر در همان نقطه روی نقشه دوم است؛  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  نیز میانگین همه مقادیر روی نقشه‌های اول و دوم هستند.

در نهایت روزی که با دیگر روزهای هر طبقه در سطح همبستگی ۰/۵ بیشترین همبستگی را نشان می‌داد، به‌عنوان روز نماینده انتخاب شد. در نهایت بعد از استخراج روز نماینده، نقشه‌های ترکیبی فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه نصف‌النهاری و مداری باد، دما و شار همگرایی رطوبت ترسیم و بررسی و تحلیل شد. محاسبه شاخص شار رطوبت در تفاسیر همدید پدیده‌های هیدروکلیمایی به‌ویژه تخمین حداکثر بارش محتمل (PMP)، بارش‌های سنگین و رگباری بسیار کاربردی است [۱۲].

### بحث

با اجرای تحلیل خوشه‌ای روی داده‌های فشار همراه با رخداد تگرگ ایستگاه بجنورد چهار الگو شناسایی شد که نتایج آن در شکل ۵ و جدول ۲ آورده شده است.





شکل ۵. دندروگرام حاصل از تحلیل خوشه‌ای روی داده‌های فشار سطح زمین

جدول ۲. فراوانی رخداد ماهانه تگرگ در الگوهای شناسایی شده

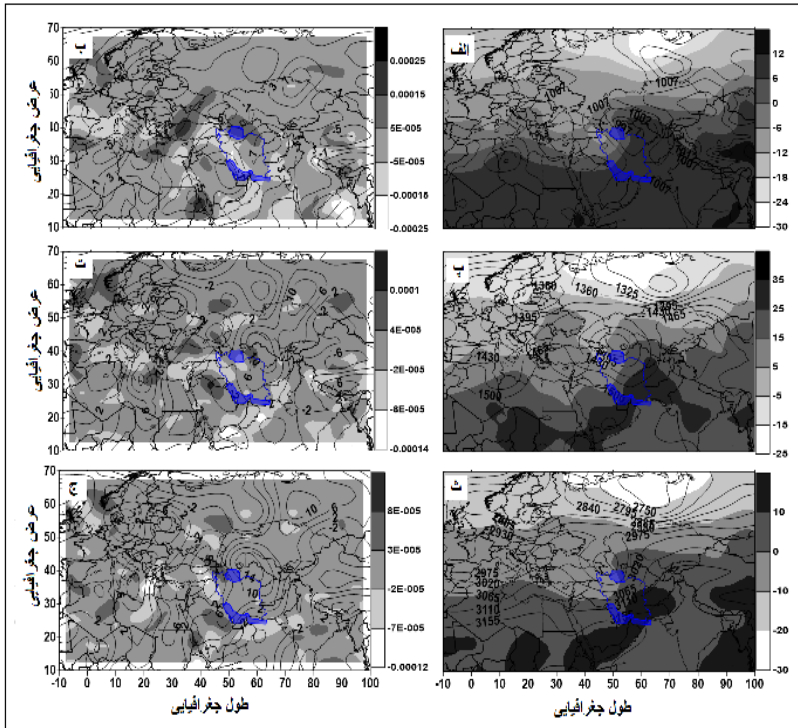
ماه	الگوی اول	الگوی دوم	الگوی سوم	الگوی چهارم
ژانویه	۰	۰	۰	۰
فوریه	۰	۰	۰	۰
مارس	۱	۰	۰	۰
آوریل	۴	۴	۰	۴
می	۰	۱۱	۰	۰
ژوئن	۰	۰	۲	۰
ژوئیه	۰	۰	۰	۰
آگوست	۰	۰	۰	۰
سپتامبر	۰	۰	۰	۰
اکتبر	۰	۰	۰	۰
نوامبر	۰	۰	۰	۰
دسامبر	۰	۰	۰	۰
سالانه	۵	۱۵	۲	۴

براساس جدول ۲، بیشترین رخداد تگرگ در ماه‌های آوریل و می و در مرتبه بعد در ماه ژوئن رخ داده است. این شرایط نشان می‌دهد که فراوانی رخداد تگرگ در ماه‌های به نسبت گرم سال اتفاق افتاده است. در ادامه به تحلیل الگوهای مختلف پرداخته شده است.

## الگوی اول: کم فشار دریای خزر

ساعت ۱۲ گرینویچ تاریخ ۲۵ آوریل ۱۹۷۸؛ در نقشه فشار و دمای هوا تراز سطح دریا (شکل ۶) مشاهده می‌شود که شمال شرق کشور و منطقه تحقیق تحت نفوذ کم فشار قوی در شرق دریای خزر بوده است. گسترش زبانه‌های پرفشار سیبری در جانب شرقی دریای خزر و آسیای میانه، مانع از حرکت شمال سوی کم فشار مذکور شده است. در ترازهای بالاتر یعنی ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۶، پ و ث) منطبق بر کم فشار سطح زمین مرکز کم ارتفاع با ارتفاع مرکزی ۱۴۰۰ ژئوپتانسیل متر بر روی دریای خزر قرار گرفته است که نسبت به کم فشار سطح زمین به سمت شمال غرب متمایل شده است، تا جایی که در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال کم ارتفاع مستقر روی غرب دریای خزر روی منطقه تحقیق قرار گرفته است. این شرایط به همراه زبانه هوای گرم روی نیمه شرقی و شمال شرق کشور در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال موجب تشدید حرکات قائم در ترازهای زیرین جو شده که سبب پیدایش شرایط کافی برای رخداد ناپایداری در منطقه تحقیق می‌شود. از طرف دیگر در بررسی نقشه‌های همگرایی شار رطوبتی و باد نصف‌النهاری (شکل ۳-ب، ۳-ت) در ترازهای ۱۰۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال به ترتیب روی منطقه تحقیق  $0/00004$  و  $0/00015$  کیلوگرم بر ثانیه در حال وزش است.

به طور کلی هسته شار همگرایی رطوبتی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال روی منطقه نسبت به ترازهای بالاتر قوی تر بوده است که با توجه به مثبت بودن باد، نشان از وقوع جریان‌های چرخندی شمال سو روی منطقه تحقیق دارد. در حالی که در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۶-ج) از شدت جریان همگرایی شار رطوبتی کاسته شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، نفوذ زبانه‌های کم فشار روی منطقه و هوای گرم از جنوب ایران روی شمال شرق کشور همراه با رشد قائم ابر، رطوبت فراوان، همرفت و صعود شدید و وضعیت کوهستانی شمال شرق کشور عامل مهمی برای ناپایداری و بارش تگرگ بوده است. به طور کلی، رخداد تگرگ در نواحی کوهستانی بیشتر از جاهای دیگر است، به طوری که مطالعه توزیع جغرافیایی خسارات ناشی از رخدادهای تگرگ در قبرس نیز نشان می‌دهد که نواحی مستعد تگرگ، اغلب در نواحی کوهستانی قرار دارد [۳۰].

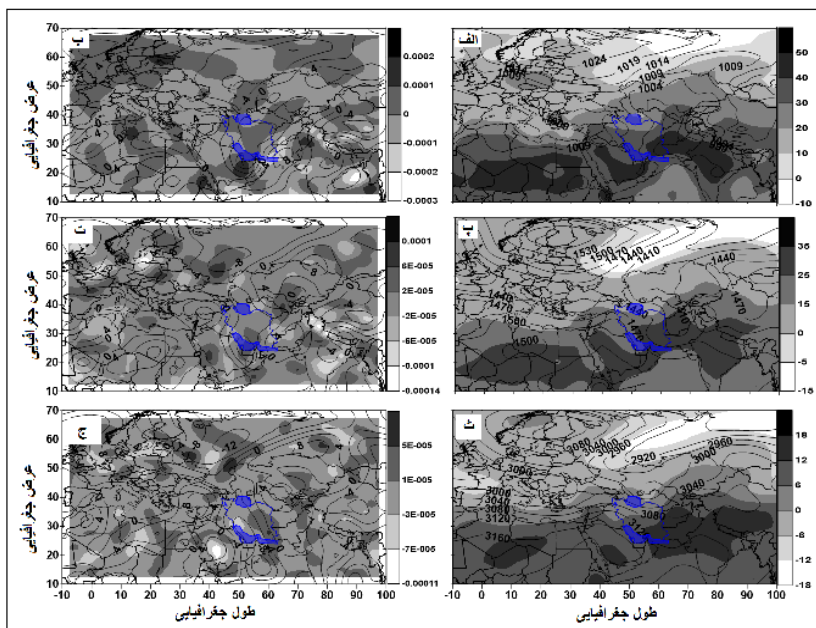


شکل ۶. نقشه فشار تراز دریا بر حسب هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب سلسیوس (الف)؛ نقشه شار رطوبت تراز سطح دریا بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف‌النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ب)؛ نقشه ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (پ)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف‌النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ت)؛ نقشه ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (ث)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف‌النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ج).

#### الگوی دوم: کم‌فشار پاکستان / پرفشار آزور

ساعت ۱۲ گرینویچ تاریخ ۱۳ می ۱۹۸۱؛ در نقشه فشار تراز دریا و دما (شکل ۷-الف)، زبانه‌های کم‌فشار پاکستان با گسترش شمال غرب سو تا شمال قزاقستان و تا نزدیکی منطقه تحقیق در ایران کشیده شده است. بر روی منطقه نیز دمای هوا به بیش از ۱۰ درجه سلسیوس رسید که ناشی از قرارگیری کم‌فشار حرارتی پاکستان روی بیشتر مناطق کشور و صعود هوای گرم و مرطوب آب‌های گرم عرض‌های پایین به روی منطقه تحقیق است. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

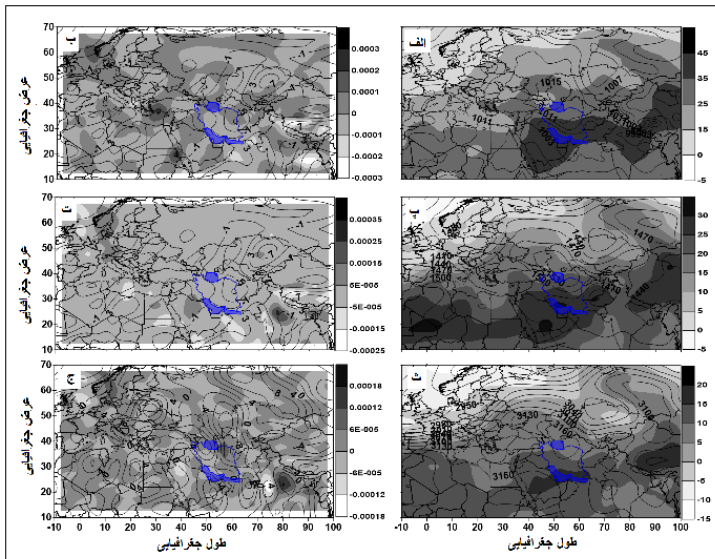
(شکل ۷- پ) قرارگیری ناوه روی منطقه مشخص است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۷- ث) قرارگیری محور ناوه کم ارتفاع بر روی منطقه سبب همگرایی هوا و جریان های مرطوب روی منطقه شد، به طوری که در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۷- ج) همگرایی شار رطوبتی به مقدار  $0/00008$  کیلوگرم بر ثانیه در حال وزش است که با توجه به قرارگیری ناوه روی کشور به خصوص بخش های شرقی کشور از روی دریای عمان تأمین می شود. در نتیجه، این عامل به همراه شرایط دمایی گرم که از عرض های پایین و منابع آبی گرم تأمین می شود سبب شد که ترازهای زیرین جو شرایط صعود شکل گرفته در نتیجه وجود ارتفاعات در منطقه تحقیق و تقویت همرفت در این زمان از سال (می)، موجب ناپایداری و ریزش های تندری روی منطقه شود.



شکل ۷. نقشه فشار تراز دریا برحسب هکتوپاسکال و دمای هوا برحسب درجه سلسیوس (الف)؛ نقشه شار رطوبت تراز سطح دریا برحسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ب)؛ نقشه ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و دمای هوا برحسب سلسیوس (پ)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برحسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف النهاری برحسب متر بر ثانیه (ت)؛ نقشه ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و دمای هوا برحسب درجه سلسیوس (ث)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف النهاری برحسب متر بر ثانیه (ج).

**الگوی سوم: پرفشار دریای خزر / کم فشار عربستان**

ساعت ۱۲ گرینویچ تاریخ ۴ آوریل ۱۹۹۴؛ نقشه فشار و دمای هوای تراز سطح دریا (شکل ۸-الف). سامانه چرخندی از روی عربستان و با عبور از روی خلیج فارس به روی ایران کشیده شده و از طرف دیگر پرفشار دریای خزر تا بخش های مرکزی کشور نفوذ کرده است. برهمکنش دو سامانه فشاری روی کشور سبب افزایش ناپایداری در مناطق مرکزی کشور شده است. چنانکه امیدوار و همکاران [۱] در تحلیل همدیدی سه نمونه تگرگ در جنوب غرب کشور (استان فارس) بیان داشتند که سامانه های کم فشار شرق دریای سرخ و عربستان در عرض های پایین جغرافیایی با عبور از روی آب های گرم جنوبی کشور، رطوبت کسب می کنند و در نواحی مرکزی، جنوب غربی با ایجاد ناپایداری سبب ریزش تگرگ می شوند. در همین وضعیت نیز شرایط دمایی در بیشتر مناطق کشور و منطقه تحقیق به گونه ای است که در سطح زمین مقادیر دمای بیشتر از ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس مشاهده می شود.



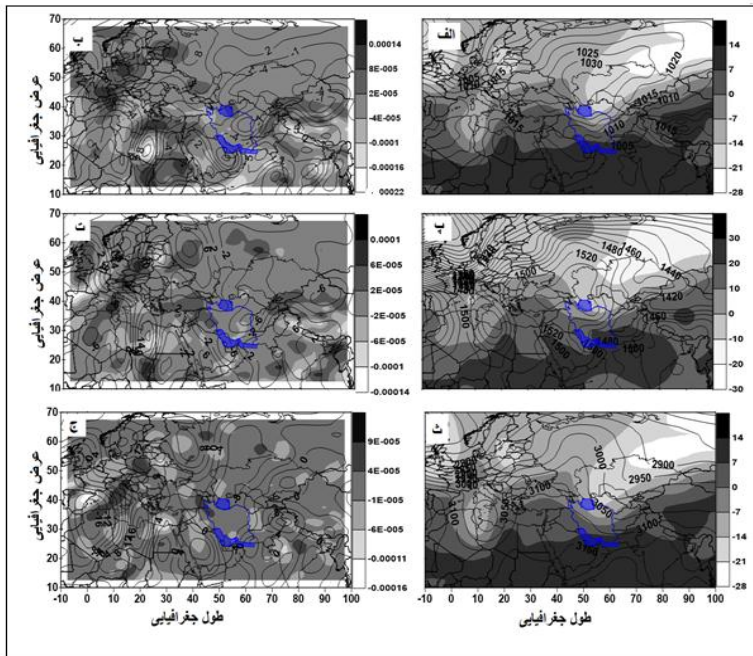
شکل ۸. نقشه فشار تراز دریا بر حسب هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (الف)؛ نقشه شار رطوبت تراز سطح دریا بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ب)؛ نقشه ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (پ)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ت)؛ نقشه ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (ث)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ج).

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۸- پ) بر روی کشور پرارتفاعی با ارتفاع مرکزی ۱۵۴۵ ژئوپتانسیل متر مستقر بوده که روی بخش‌های شمالی کشور تحت تأثیر حرکات نزولی هوای سرد عرض‌های بالاتر بوده است. در همین تراز نیز شرایط دمای جو نیز همانند تراز سطح زمین به نسبت گرم و بیانگر تقویت صعود و ناپایداری بر روی منطقه تحقیق شده است. همچنین در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸- ث) نیز مرکز پرارتفاع مشاهده می‌شود. به‌طور کلی در ترازهای مختلف (شکل ۵- ب، ت، ج) و در منطقه تحقیق، هسته همگرایی شار رطوبتی در حال وزش است که با توجه به زبانه‌های پرفشار و جریان واچرخندی باد نصف‌النهاری منفی از سمت عرض‌های بالا به روی منطقه در حال وزش است. این شرایط بیانگر رخداد تگرگ تحت تأثیر ناپایداری‌های محلی و تأثیر ارتفاعات در منطقه تحقیق در تغییر شرایط و آشفتنگی جوی منطقه در ترازهای زیرین جو و وقوع پدیده تگرگ بوده است.

#### الگوی چهارم: پرفشار شمال دریای خزر / کم‌فشار پاکستان

ساعت ۱۲ گرینویچ تاریخ ۱۱ ژوئن ۲۰۱۲؛ در بررسی نقشه فشار و دمای تراز سطح دریا (شکل ۹- الف) سامانه پرفشار با ایجاد حرکت ساعتگرد، سبب جریان هوای خنک عرض‌های شمالی در سطح زمین به سمت عرض‌های پایین در منطقه تحقیق شده است. با توجه به نقشه مؤلفه باد نصف‌النهاری و شار رطوبتی تراز دریا (شکل ۹- ب)، سمت بادهای جنوبی بوده که به معنای تقویت جریان بادهای از سمت شمال و در جهت حرکت واچرخندی به روی منطقه تحقیق است. از طرف دیگر ماهیت پرفشار شمال دریای خزر سرد بوده که سبب رخداد شرایط ویژه به نسبت خنک در شمال شرق کشور شده است. همچنین کم‌فشار حرارتی پاکستان تا مناطق مرکزی و جنوب شرقی کشور کشیده شده است. با توجه به ماهیت حرارتی و گرم کم‌فشار مذکور انتظار می‌رود در نیمه شرقی و مناطق شمال شرقی کشور، شاهد شرایط شیو دمایی و فشاری باشیم. همچنین شار رطوبتی در مناطق شمال شرقی کشور و منطقه تحقیق به مقدار  $0/00002$  کیلوگرم بر ثانیه مشاهده می‌شود (شکل ۹- ب). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۹- پ) نیز وضعیتی مشابه با تراز سطح دریا مشاهده می‌شود، به طوری که پرارتفاع شمال دریای خزر در این ارتفاع به عرض‌های پایین‌تر کشیده شده است، تا جایی که بیشتر مناطق خاورمیانه را تحت نفوذ خود قرار داده است. از طرف دیگر کم‌ارتفاع پاکستان نیز در این تراز روی مناطق جنوبی و جنوب شرقی کشور مستقر است و شرایط برای ایجاد اختلاف فشار در تراز فوق و تشدید ناپایداری و صعود روی کشور و مناطق شمال شرقی (بجنورد) مهیاست. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روی منطقه تحقیق در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۹- پ) دمای کمتر از صفر مشاهده می‌شود که بیانگر سرمای شدید ناشی از وجود سامانه پرارتفاع در این تراز و

نزول هوای به نسبت سرد عرض‌های بالاتر روی منطقه است. از طرف دیگر روی عرض‌های پایین‌تر نیز دما افزایش می‌یابد، به طوری که روی منطقه تحقیق، شیو دمایی مشاهده می‌شود. با توجه به نقشه مؤلفه باد نصف‌النهاری و شار رطوبتی (شکل ۹-ت) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روی منطقه تحقیق هسته همگرایی شار رطوبتی به مقدار  $0.0002$  کیلوگرم بر ثانیه مشاهده می‌شود که با توجه به سمت باد از جانب شمال و دریای خزر تأمین می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ناوهای با جهت شمال شرقی- جنوب شرقی روی آسیای میانه و شمال شرق کشور مستقر بوده است. از طرف دیگر محور ناوه نیز بر روی کشور قرار گرفته است. این وضعیت سبب تشدید همگرایی جریان‌ها و صعود جریان هوا در تراز فوق و ترازهای زیرین شده است.



شکل ۹. نقشه فشار تراز دریا بر حسب هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (الف)؛ نقشه شار رطوبت تراز سطح دریا بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف‌النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ب)؛ نقشه ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (پ)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف‌النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ت)؛ نقشه ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس (ث)؛ نقشه شار رطوبتی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و جریان باد نصف‌النهاری بر حسب متر بر ثانیه (ج).

در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۹-ث) در نیمه شمالی کشور دمای کمتر از ۳- درجه سلسیوس و در عرض‌های پایین‌تر دمای بین ۰ تا ۵ درجه سلسیوس بیانگر اختلاف دمایی شدید در تراز فوق است. در حالی که در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۹-ج) سمت باد نصف‌النهاری به‌ویژه روی مناطق شرقی کشور منفی بوده است. اما در عین حال هیچ گونه هسته همگرایی رطوبتی در تراز فوق دیده نمی‌شود. به‌طور کلی در این الگو رخداد پدیده تگرگ در بجنورد ناشی از قرارگیری پرفشاری با ماهیت سرد روی نیمه شمالی کشور است که سبب شده هوای سرد عرض‌های بالا را بر روی کشور شارش کند و نیز وجود کم‌فشار حرارتی پاکستان به‌خصوص در ترازهای زیرین سبب گسترش هوای گرم به روی بخش‌های مرکزی کشور شود. قندهاری [۱۴] نیز با استفاده از مدل MM5 بارش‌های رگباری شدید را شبیه‌سازی کرد و نفوذ زبانه پرفشار سیبری از شمال شرق و همچنین تأثیر زبانه‌های کم‌فشار گرم آفریقا روی جنوب غرب کشور را دلیل بارش‌های رگباری شدید در منطقه دانست. این وضعیت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز دیده می‌شود. سمت وزش باد نصف‌النهاری از شمال به جنوب روی منطقه تحقیق با همگرایی رطوبتی از جانب دریای خزر همراه بوده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز وجود ناوه و محل قرارگیری قسمت‌های مختلف آن روی کشور سبب ایجاد شرایط متفاوت دمایی و فشاری مختلفی شده است. به‌طور کلی در این الگو سامانه‌های فشاری روی کشور سبب ایجاد شیو دمایی شدیدی شده که بروز ناپایداری‌ها در منطقه تحقیق را در پی داشته است.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش برخلاف پژوهش‌های دیگر که با رویکرد همدید به بررسی و واکاوی عوامل رخداد تگرگ پرداخته‌اند، با استفاده از تحلیل خوشه‌ای شناسایی الگوهای همدید منجر به رخداد تگرگ در شهرستان بجنورد از استان خراسان شمالی انجام گرفته است. با توجه به سازوکار و عملکرد سامانه‌های جوی در ایجاد پدیده تگرگ در بجنورد در شمال شرق ایران، چهار الگو در شکل‌گیری تگرگ شناسایی شد. ۱. کم‌فشار دریای خزر؛ ۲. کم‌فشار پاکستان/ پرفشار آزر؛ ۳. پرفشار دریای خزر/ کم‌فشار عربستان؛ ۴. پرفشار شمال دریای خزر/ کم‌فشار پاکستان. بدین صورت که در الگوی اول قرارگیری کم‌فشار شرق دریای خزر سبب کشیدگی جریان‌های عرض‌های پایین روی منطقه تحقیق شده است. وضعیت دمایی جو در هر سه تراز، به‌نسبت گرم بوده که سبب بهترین شرایط در تشدید صعود در منطقه شده است. قرارگیری ناوه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در تشدید منطقه همگرایی تراز سطح زمین در این زمینه بی‌تأثیر نیست. در الگوی دوم، قرارگیری کم‌فشار پاکستان روی بیشتر مناطق شرقی و شمال شرقی کشور سبب



افزایش ناپایداری و صعود جریان‌های مرطوب دریای عمان به صورت نصف‌النهاری روی کشور شده است. در ترازهای بالاتر جو نیز قرارگیری قسمت جلویی ناوه روی نیمه شرقی کشور در شرایط دمایی گرم در لایه‌های مختلف جو سبب شکل‌گیری ناپایداری شده است. در الگوی سوم با قرارگیری پرفشار دریای خزر روی نیمه شمالی کشور وضعیت به نسبت پایداری فراهم شده است. همچنین این وضعیت، در ترازهای زیرین جو سبب وزش بادهای نصف‌النهاری و شارش رطوبت دریای خزر روی منطقه تحقیق شده که تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ادامه داشته است. به طور کلی در این الگو نقش ارتفاعات محلی در ایجاد ناپایداری و اختلاف دمای محیط در وقوع تگرگ مؤثر است. الگوی چهارم قرارگیری پرفشار سرد روی نیمه شمالی کشور است که سبب فرارفت هوای سرد عرض‌های بالا شده و وجود کم‌فشار حرارتی پاکستان به خصوص در ترازهای زیرین موجب گسترش هوای گرم روی بخش‌های مرکزی کشور شده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز وجود ناوه و محل قرارگیری قسمت‌های مختلف آن روی کشور سبب ایجاد شرایط متفاوت دمایی و فشاری مختلفی شده است. قربانی [۱۳] در تحقیق خود در زمینه تحلیل همدید بارش تگرگ استان اصفهان، فعالیت پرفشار سرد و ریزش هوای سرد به لایه‌های میانی جو در شمال غرب کشور و وجود کم‌فشار جنوبی در لایه‌های زیرین جو و جریان‌های گرم و مرطوب عربستان را سبب رشد ابرهای کومولونیمبوس و بارش تگرگ در منطقه دانسته است. منبع تأمین رطوبت این ناپایداری‌ها و رخداد تگرگ، دریای عمان و خزر بوده است. به خصوص در الگوی چهارم، شیو دمایی چشمگیر بین عرض‌های بالا و پایین روی کشور در پیدایش شرایط باروکلینیک در منطقه تحقیق و نیز ارتفاعات منطقه در وقوع همرفت و جریان‌های تندی در نتیجه رخداد تگرگ روی منطقه تحقیق مؤثر بوده است. خوش‌اخلاق و همکاران در بررسی بارش تگرگ فراگیر در شمال غرب کشور، نفوذ زبانه‌های کم‌فشار ایسلند به روی دریای خزر و منطقه تحقیق، همراه با عقب‌نشینی مراکز پرفشار آזור و سیبری به غرب و شرق را عامل ورود کم‌فشارهای دریای سرخ به سمت نیمه غربی کشور دانسته‌اند که خود، شرایط مناسب برای رخداد تگرگ را ایجاد کرده است [۴]. به طور کلی همان‌طور که در بررسی نقشه‌های همدیدی مشاهده شد، محل ورود سامانه‌ها به منطقه تحقیق بیشتر از سمت شمال و جنوب بوده و به همان نسبت این مناطق بیشتر تحت تأثیر پدیده تگرگ قرار گرفته‌اند.

منابع

- [۱]. امیدوار، کمال؛ صفرپور، فرشاد؛ و زنگنه اینانلو، اسماعیل (۱۳۹۲). «بررسی و تحلیل همدیدی سه رخدادهای تگرگ شدید در استان فارس»، *جغرافیا و توسعه*، ش ۳۰، ص ۱۷۸-۱۵۵.
- [۲]. امینی، لیلیا؛ و بروجنی، محمدرضا (۱۳۸۲). «بررسی همدیدی- ترمودینامیکی بارش تگرگ در استان اصفهان»، *یازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*.
- [۳]. بداق جمالی، جواد؛ جوانمرد، سهیلا؛ و فاتح، شاهرخ (۱۳۸۸). «بررسی پدیده تگرگ در ایران، روش‌های کنترل و مقابله با تگرگ»، *چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک، تهران*.
- [۴]. خوش‌اخلاق، فرامرز؛ محمدی، حسین؛ و شمسی‌پور، علی‌اکبر (۱۳۹۱). «واکاوی همدید بارش تگرگ فراگیر در شمال غرب ایران»، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ش ۲، ص ۶۹-۵۵.
- [۵]. خوشحال دستجردی، جواد؛ نظری، عبدالقدیر؛ و عبدی، ابوطالب (۱۳۹۴). «تحلیل ترمودینامیک - همدید رخداد تگرگ روز ۲۰ مهرماه ۱۳۸۹ در شهر گرگان»، *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ش ۲۲، ص ۲۴۴-۲۲۵.
- [۶]. خیری، هوشنگ؛ مقامی مقیم، غلامرضا؛ و حسینی صدیق، سید محمود (۱۳۹۴). «بررسی توفان تندری شهر بجنورد»، *چهارمین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی*.
- [۷]. سازمان هواشناسی کشور (۱۳۸۷). *مجموعه دستورالعمل کدها و روش‌های دیدبانی سطح زمین (سینوپ)*.
- [۸]. سیف، مهرزاد (۱۳۷۵). *بررسی توزیع بارش تگرگ در ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران*.
- [۹]. صلاحی، برومند؛ و عالی جهان، مهدی (۱۳۹۴). «استخراج و تحلیل الگوهای سینوپتیک منجر به توفان‌های تندری دشت اردبیل»، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، دوره ۴۷، ش ۳، ص ۳۹۹-۴۱۹.
- [۱۰]. عبدمنافی، دینا (۱۳۸۲). *بررسی شاخص ناپایداری و برش قائم و وضعیت رطوبتی هنگام نزول تگرگ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون دریایی*.
- [۱۱]. فرج‌زاده، منوچهر (۱۳۹۲). *مخاطرات اقلیمی ایران*. تهران: سمت.
- [۱۲]. قائمی، هوشنگ (۱۳۸۶). *هواشناسی عمومی*. تهران: سمت.

- [۱۳]. قربانی، اعظم (۱۳۸۵). تحلیل و بررسی پدیده تگرگ و طبقه‌بندی ابر با استفاده از RS و GIS در حوضه زاینده‌رود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۴]. قندهاری، شهرزاد (۱۳۸۵). بررسی امکان شبیه‌سازی بارش‌های شدید حاصل از سلول همرفتی با استفاده از مدل MM5 و مقایسه نتایج به صورت موردی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم جغرافیا، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات.
- [۱۵]. قویدل رحیمی، یوسف (۱۳۹۵). نگاشت و تفسیر سینوپتیک اقلیم. تهران: سها دانش.
- [۱۶]. لشکری، حسن؛ و امینی، میترا (۱۳۸۹). «تحلیل سینوپتیک و پهنه‌بندی بارش تگرگ در خراسان بزرگ برای دوره آماری (۱۹۹۶-۲۰۰۵)»، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ش ۳۱، ص ۵۱-۱۰۸.
- [۱۷]. مجرد، فیروز؛ کوشکی، سمیرا؛ معصوم‌پور، جعفر؛ و میری، مرتضی (۱۳۹۶). «تحلیل شاخص‌های ناپایداری توفان‌های تندری در ایران با استفاده از داده‌های بازتحلیل»، *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ش ۴، ص ۳۳-۴۸.
- [۱۸]. محمدی، حسین؛ خزایی، مهدی؛ ماهوتچی، محمدحسین؛ و عباسی، اسماعیل (۱۳۹۵). «تحلیل همدیدی توفان‌های تندری مخرب اصفهان»، *دانش مخاطرات*، ش ۲، ص ۱۷۰-۱۵۵.
- [۱۹]. مارتین، جاناتان (۱۳۸۸). *دینامیک جو در عرض میانه*، ترجمه سید ابوالفضل مسعودیان، تهران: سمت.
- [۲۰]. میرموسوی، سید حسین؛ و اکبرزاده، یونس (۱۳۸۸). «مطالعه شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ در ایستگاه هواشناسی تبریز»، *فضای جغرافیایی*، ش ۹، ص ۱۰۸-۹۵.
- [۲۱]. میرموسوی، سید حسین؛ و اکبرزاده، یونس (۱۳۸۹). «مطالعه زمانی و مکانی بارش تگرگ در فصل رشد گیاهان؛ مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی»، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ش ۳۳، ص ۱۷۵-۱۹۰.
- [۲۲]. میرموسوی، سیدحسین؛ حیدری منفرد، زهرا؛ و شفیع، شهاب (۱۳۹۴). «تحلیل ترمودینامیکی پدیده تگرگ در شمال غرب کشور (۲۰۰۹-۱۹۹۲) و ارائه مدل ناپایداری»، *فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی*، ش ۱۰۱، ص ۱۸۳-۱۹۸.
- [۲۳]. وزارت کشور (۱۳۹۵). *مجموعه گزارش‌های اولیه خسارت تگرگ به بخش کشاورزی*. سازمان مدیریت بحران کشور.

- [۲۴]. هاشمی دوین، مه‌ری؛ و الهی گل، علی (۱۳۹۴). «تحلیل چند توفان تندری بجنورد با استفاده از داده‌های سودار»، چهاردهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه بیرجند.
- [۲۵]. یارنال، برنت (۱۳۸۵). *اقلیم‌شناسی همدید و کاربرد آن در مطالعات محیطی*. ترجمه سید ابوالفضل مسعودیان، اصفهان: انتشارات دانشگاه اصفهان.
- [26]. Allen, J. T., Karoly, D. J., & Walsh, K. J (2014). "Future Australian Severe Thunder storm Environments", Part I: A Novel Evaluation and Climatology of Convective Parameters from Two Climate Models for the Late Twentieth Century. *Journal of Climate*, vol 27: pp 3848- 3868.
- [27]. Changnon, S. A., (1962). "Areal Frequencies of Hail and Thunderstorm Days in Illinois", *Monthly Weather Review*, vol 17: pp519-524.
- [28]. 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.
- [29]. Dou, J., Wang, Y., Bornstein, R., & Miao, S (2015). "Observed Spatial Characteristics of Beijing Urban Climate Impacts on Summer Thunderstorms", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol 54: pp 94-105.
- [30]. Lott, F (1999). "Alleviation of stationary biases in a GCM through a mountain drag parameterization scheme and a simple representation of mountain lift forces", *Monthly Weather Review*, vol127: pp788-801
- [31]. Nieto, R., & Coauthors, L (2005). "Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere", *Journal of Climate*, vol 18: pp 3085-3103.
- [32.] Sioutas, M., & Flocas H (2003). "Hailstorms in Northern Greece: Synoptic Patterns and Thermodynamic Environment" *Journal of Theoretical Applied Climatology*, vol 75: pp189-202.
- [33]. Sterling, R (2003). "Trend in U.S Climate during the twentieth century", *Journal of Theoretical Applied Climatology*, vol 2: pp182-201.