

بررسی ساختار منطقه‌ای جو در زمان رخداد توفان تندری همراه با تگرگ از ۱۶ تا ۱۸

جولای ۲۰۱۶

مورد مطالعه: شمال غرب ایران

علی محمد خورشید دوست، استاد اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

مهدی اسدی^۱، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی کشاورزی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

حسن حاجی محمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۳۰

پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۲

چکیده

به دلیل همراهی توفان‌های تندری با رگبارهای باران و توفان‌های تگرگ و نقش مؤثر آن در ایجاد سیلاب‌های ناگهانی، هم از جنبه‌ی کشاورزی و هم از نظر خسارات مالی و جانی، این پدیده همواره مورد توجه محققان بوده است. برای این منظور ابتدا به بررسی مقادیر فشار، دمای هوا و دمای نقطه شبنم در لایه‌های مختلف جو پرداخته شد. سپس، برای بررسی دقیق‌تر شرایط جوی پارامترهای دمای هوا، فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و بیزه، سرعت قائم، مؤلفه باد مداری و مؤلفه نصف‌النهاری باد از تارنمای (NCEP/NCAR) اخذ شد. همچنین برای بررسی ناپایداری در سطوح مختلف جو از شاخص‌های صعود، موجودی انرژی پتانسیل فرارفتی، آب قابل بارش، K و هوای توفانی استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که صعود سریع بسته‌هوا در منطقه با انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس بالایی همراه بوده و سبب شده تا در این سه روز هوای صعودکننده تا لایه‌های فوقانی جو پیشروی کرده و جوی مغشوش را برای منطقه به وجود آورده است. با بررسی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز اول بارندگی مشخص شد که توفان تندری حاصل برهمکنش‌های مختلف جو بوده، بطوریکه در تراز میانی جو پشته بسیار قوی با گستره مکانی بیش از ۲۵ درجه عرض جغرافیایی بر روی دریای خزر ایجاد و تا حوالی مناطق عرض‌های قطبی گسترش یافته است. در روز دوم، توفان تندری در داخل پر ارتفاع تشکیل شده بر روی خزر هسته سرد چالی بر جانب شرق ترکیه، شمال عراق و شمال غرب ایران ایجاد شده که ارتفاع مرکزی آن ۵۷۵۰ ژئوپتانسیل متر می‌باشد. در روز سوم، هسته سردچال به بریده کم‌فشاری بر روی منطقه تشکیل شده که بیشینه تاوایی مثبت در داخل این سیستم جوی است.

واژگان کلیدی: توفان تندری، بارش، تگرگ، شرایط جوی، شمال غرب.

مقدمه

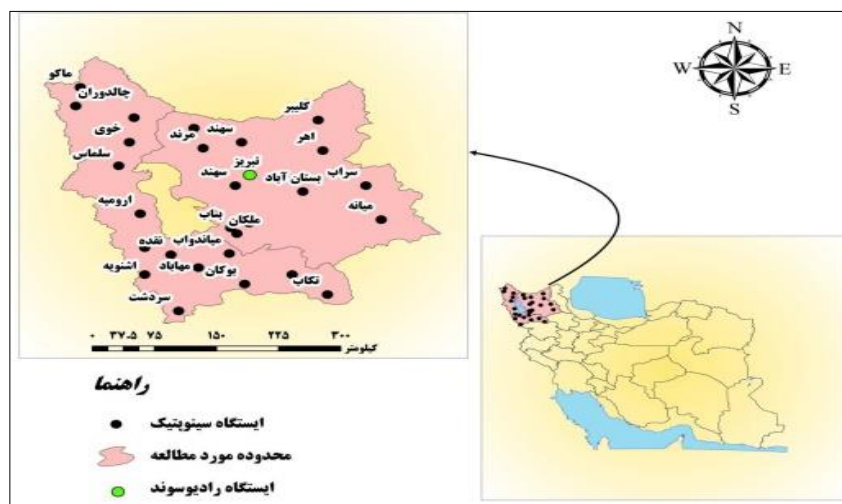
توفان تندری جزء اولین پدیده‌های هواشناسی است که توجه انسان را به خود جلب نموده است. به دلیل همراهی توفان‌های تندری با رگبارهای باران و توفان‌های تگرگ و نقش مؤثر آن در ایجاد سیلاب‌های ناگهانی، هم از جنبه‌ی کشاورزی و هم از نظر خسارات مالی و جانی، این پدیده همواره مورد توجه محققان بوده است. تگرگ بارندگی گلوله‌های یا تکه‌های یخ است که به علت صعود بسیار شدید هوا همراه با پدیده‌های الکتریکی به وجود می‌آید (خالدی، ۱۳۷۵: ۳۱). معمولاً این پدیده با گرمایش سطحی و صعود سریع بسته هوا در امتداد جبهه جبهه سرد ظهور می‌کند (جعفرپور، ۱۳۸۵: ۹۵). تمام خصوصیات بارز یک طوفان تندری مانند رویت برق، صدای رعد، وزش باد شدید، نزول تگرگ و بارش‌های رگباری خفیف تا بسیار شدید تماماً حاصل تولید چرخه حیات سلول‌های همرفتی کوچک و بزرگ در جو زمین است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۴۵). تگرگ از دانه 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 و این امر باعث می‌شود که نطفه‌های تگرگ قطرات آب را به دور خود جذب کنند و سبب انجماد آن‌ها شوند (علیجانی و کاویانی، ۱۳۸۷: ۲۶۴). تعداد کمی از توفان‌های تندری تگرگی به زمین می‌رسند و بسیاری از آن‌ها، حتی در مناسب‌ترین قسمت ابر، بدون تگرگ‌اند (بنی‌هاشم و همکاران، ۱۳۷۷: ۴۲۸). ایجاد و ریزش تگرگ، وجود هوای گرم و مرطوب در پایین جو و صعود ابرهای انباشته با ارتفاع و سرمای زیاد توأم با تداوم شرایط حداکثر ناپایداری هواست. به دلیل اهمیت رخداد تگرگ، مطالعاتی در زمینه‌ی تشکیل و رشد آن در کشورهای مختلف جهت پیش‌بینی آن‌ها انجام گرفته است. در ارتباط با تگرگ و توفان‌های تگرگ از تحقیقات بسیاری انجام شده که می‌توان به کار، کاستا و همکارانش (Costa and et al, ۲۰۰۱) اشاره کرد، که شاخص‌های ناپایداری را برای سه طبقه‌ی مهم از توفان‌هایی که از سال ۱۹۹۷-۱۹۹۹ در شمال ایتالیا رخ داده بود، محاسبه کردند.

سیمونوف و گئورگیوف (Simonov and Gergiev, ۲۰۰۳) بر روی توفان‌های شدید باد و تگرگ رخ داده در صوفیه بلغارستان تحقیقی انجام داده و شاخص‌های ناپایداری برای این توفان‌ها را محاسبه کردند. وایتمن (Whiteman, ۲۰۰۳) با روش تحلیل همدیدی، پدیده‌های اقلیم کوهستانی به‌ویژه توفان‌های رعدوبرقی، تگرگ و روزهای توأم با بارش‌های سنگین را مطالعه کرد. استرلینگ (Sterling, ۲۰۰۳) از توفان‌های تندری به‌عنوان معضل مهم آمریکا در قرن بیستم یاد کرده و پیامدهای محیطی و اقتصادی ناشی از توفان‌های تندری و پدیده‌های مربوط به آن (تگرگ، سیل و باد شدید) را بر اقتصاد قشر کشاورز آمریکا بررسی کرده است. در ایران نیز مطالعاتی در زمینه‌ی تگرگ و توفان‌های تندری صورت گرفته است. بهراد (۱۳۶۲) خسارات وارده از سرما، تگرگ و یخبندان به باغات انگور کشور و روش‌های مقابله با آن را مورد مطالعه قرار داده است. بروودی (۱۳۸۱) به شناخت و راه‌های مقابله با خسارت تگرگ پرداخته است. صناعی و همکاران (۱۳۸۲) در ارتباط با کاهش خسارت تگرگ، از بررسی مدل آماری استفاده کرده‌اند. آن‌ها برای اولین بار فراوانی رخداد تگرگ را در سطح استان‌های کشور شناسایی کردند. این مطالعه مشخص نمود که بیشترین فراوانی بارش تگرگ در محدوده‌ی غرب و شمال غرب ایران و کمترین آن در نیمه‌ی شرقی کشور است. عبدمنافی (۱۳۸۳) در مطالعه‌ی بارش تگرگ در منطقه‌ی تهران با بررسی تغییرات باد با ارتفاع و محاسبه‌ی شاخص‌های ناپایداری و تحلیل همدیدی، به این نتیجه رسید که این پدیده بر اثر ناپایداری همرفتی توده‌ی هوا و یا بر اثر عبور جبهه‌ی سرد به وقوع می‌پیوندد. در این زمینه می‌توان به مطالعات دیگری همچون خورشیددوست و قویدل (۱۳۸۵)، میر موسوی (۱۳۸۷)، خالدی (۱۳۸۹)، صلاحی (۱۳۸۹)، قویدل رحیمی (۱۳۹۰)، خورشیددوست و

همکاران (۱۳۹۲)، خزایی (۱۳۹۳)، خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۴)، خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۴) و خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۵) نیز اشاره کرد. مشاهده می‌شود که به دلیل اهمیت رخداد این پدیده در مناطق مختلف در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی از جنبه‌های مختلف در این زمینه صورت پذیرفته تا هم از جنبه‌های هوا شناختی و هم از نظر رفتاری پدیده توفان تندی مورد کاوش قرار گیرد. هدف از این تحقیق بررسی ساختار منطقه‌ای جو در زمان رخداد توفان تندی در شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های همدید می‌باشد.

داده‌ها و روش کار

بنا به گزارش سازمان هواشناسی در روزهای ۱۶ تا ۱۸ جولای ۲۰۱۶ مصادف با ۲۶ تا ۲۸ تیرماه ۱۳۹۵، توفان تندی همراه با تگرگ فراگیر بخش‌های شمال غرب کشور، به خصوص مناطق آذربایجان غربی و شرقی را تحت تأثیر خود قرارداد که بیشینه شدت آن در استان آذربایجان شرقی بود. طبق گزارش این سازمان، با ریزش شدید باران و به همراه آن بارش تگرگ شدید، سبب شد تا در مناطق شهری با آب‌گرفتگی معابر و خرد شدن شیشه‌ها و در سایر مناطق با طغیان رودخانه‌ها همراه گردید (گزارش سازمان هواشناسی، ۱۳۹۵). شکل ۱ موقعیت نسبی منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت نسبی منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های مورد بررسی

به‌منظور بررسی توفان تندی و تگرگ‌های به وقوع پیوسته در منطقه، اقدام به بررسی شرایط جوی شد. این امر ابتدا با بررسی مقادیر فشار، دمای هوا و دمای نقطه شبنم در لایه‌های مختلف جو که توسط رادیو سوند اندازه‌گیری شده است، بررسی و تفی‌گرام پلات شده موردنظر از سایت NOAA اخذ گردید. در مرحله بعد برای بررسی دقیق‌تر شرایط جوی پارامترهای دمای هوا (Air)، فشار تراز دریا (SLP)، ارتفاع ژئوپتانسیل (Hgt)، نم‌ویژه (Shum)، سرعت قائم (Omega) مؤلفه باد مداری (Uwnd) و مؤلفه نصف‌النهاری باد (Vwnd) از تارنمای متعلق به مرکز ملی و پیش‌بینی محیطی/علوم جو (NCEP/NCAR) اخذ شد. برای بررسی ناپایداری در سطوح مختلف جو از شاخص‌های ناپایداری زیر استفاده گردید.

• شاخص صعود (LI)

شاخص صعود توسط گالوی (Galway, ۱۹۵۶) با انجام اصلاحاتی در شاخص شوالتر معرفی شد. از این رو بانام شاخص گالوی نیز شناخته می‌شود. این شاخص که به شاخص صعود معروف است و برحسب درجه سلسیوس بیان می‌شود، برای اندازه‌گیری ناپایداری جو زمانی که اختلاف بین دمای ذره بالارونده و محیط در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال موجود باشد، بکار برده می‌شود (مرادی، ۱۳۸۵). این شاخص به شیوه شاخص شوالتر محاسبه می‌شود با این تفاوت که صعود بسته‌ها به‌صورت بی‌دررو اشباع، از سطح تراکم صعود (LCL) مربوط به سطح زمین صورت می‌گیرد؛ و به کمک رابطه ۱ تعریف می‌شود (Galway, ۱۹۵۶):

$$LI = T_{D500} - TD \quad \text{رابطه ۱:}$$

در این رابطه LI (°C) معرف شاخص بالابری برای تعیین ناپایداری، (°C) T_{D500} دمای محیط در تراز ۵۰۰ میلی‌باری و (°C) TD_{500} دمای نقطه شبنم بسته‌ها در تراز ۵۰۰ میلی‌باری است که به‌صورت بی‌درروی خشک از سطح زمین تا تراز LCL و سپس به‌صورت بی‌درروی مرطوب تا تراز ۵۰۰ میلی‌باری صعود کرده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که احتمال وقوع توفان بر اساس این شاخص را می‌توان به کمک جدول ۱ برآورد کرد:

جدول ۱: مقادیر آستانه شروع ناپایداری و وقوع توفان بر اساس شاخص LI (قویدل رحیمی، ۱۳۹۰، ۱۹۲)

آستانه مقادیر	وضعیت وقوع توفان	ردیف
۰ تا ۲ -	احتمال وقوع رگبارهای باران و برف	۱
کمتر از ۲ تا ۵ -	احتمال وقوع توفان	۲
کمتر از ۵ تا ۶ -	احتمال وقوع توفان شدید	۳
کمتر از ۶ تا ۷ -	احتمال وقوع تورنادو (دیوباد)	۴

• شاخص موجودی انرژی پتانسیل فرارفتی (CAPE)^۲

این شاخص نشان‌دهنده‌ی بیشینه انرژی جنبشی ممکن بسته‌های ناپایدار، بدون در نظر گرفتن اثر بخار آب و آب متراکم شده در اثر صعود، می‌باشد. محاسبه‌ی این شاخص با فرض عدم اختلاط بسته‌ها با محیط در هنگام صعود و انطباق فشار آن با فشار محلی محیط صورت می‌گیرد (Holton, ۱۹۹۳). مقدار شاخص موجودی انرژی پتانسیل فرارفتی در حقیقت برابر مساحت ناحیه مثبت بین دمای بسته‌ها و دمای محیط است که با انتگرال‌گیری عمودی از نیروی شناوری بسته‌ها، از سطح همرفت آزاد (FCL) تا سطح تعادل (EL)^۳ و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (McIlveen, ۱۹۹۲):

$$CAPE = g \int_{FCL}^{EL} \frac{\theta_p - \theta_E}{\theta_E} dz \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این رابطه CAPE شاخص موجودی انرژی پتانسیل فرارفتی (ژول بر کیلوگرم)، g شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)، θ_p دمای پتانسیل بسته‌ها (درجه سانتی‌گراد)، θ_E دمای پتانسیل محیط (درجه سانتی‌گراد) و d_z ارتفاع صعود بسته‌ها (متر) می‌باشد (McIlveen, ۱۹۹۲). به‌طور کلی مقادیر مثبت این شاخص، نشان‌دهنده‌ی وجود ناپایداری است و هر چه مقدار آن

۱- Lifted Index

۲ - Convective Available Potential Energy

۳ - Equilibrium Level

زیاد باشد اختلاف دمای بسته‌هوا با دمای محیط بیشتر شده و در نتیجه نیروی شناوری آن قوی‌تر بوده و بنابراین شتاب بالارو بیشتر خواهد بود (Miller, ۱۹۷۲; Moncrieff and Green, ۱۹۷۲).

• آب قابل بارش (PW^1)

بنا به تعریف، مقدار آب چگالیده شده موجود در یک ستون هوای نمناک را آب قابل بارش می‌نامند که برحسب سانتی‌متر یا میلی‌متر بیان می‌شود. برای مثال اگر یک ستون هوای نمناک ۳ سانتی‌متر آب قابل بارش داشته باشد، بدین معنی است که در ستون هوایی با سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع، مقدار ۳ گرم آب به صورت بخار وجود دارد که اگر به طریقی متراکم شود و به شکل آب تغییر شکل دهد، ارتفاع آن از کف ستون ابر بالغ‌بر ۳ سانتی‌متر خواهد شد. بایستی در نظر داشت که بنا به نظر مورد قبول راجز و یو، هیچ سازوکاری در طبیعت وجود ندارد که بتواند کل بخار آب موجود در هوا را به صورت باران متراکم سازد (Rogers and Yau, ۱۹۹۶). در واقع آب قابل بارش به صورت جرم بخار آب موجود در ستونی از هوا به سطح مقطع S از سطح زمین تا انتهای تروپوسفر یا بین هر دو سطح فشاری دلخواه در نظر گرفته می‌شود. مقدار آب قابل بارش از راه‌های متفاوت قابل محاسبه است (Manzato, ۲۰۰۳). برای محاسبه آب قابل بارش در نقش شاخصی برای پیش‌بینی فعالیت همرفتی از رابطه ۳ به شرح زیر استفاده کرده است (Manzato, ۲۰۰۳):

$$PW = \left(\frac{1}{g} \int_{P_{CCL}}^{P_{EL}} \bar{r} dP \right) \times 10^{-1} \quad \text{رابطه ۳:}$$

در معادله فوق، مقدار متوسط نسبت اختلاط بین سطوح فشاری P_{CCL} و P_{EL} (فشار در پایه و قله ابر) هستند. معادله ۳ را می‌توان به صورت معادله ۴ نیز نوشت (Manzato, ۲۰۰۳):

$$PW = g^{-1} \int_{P_{\delta..}}^{P_o} q dP \quad \text{رابطه ۴:}$$

در این رابطه PW برحسب گرم بر سانتی‌متر مربع، g شتاب جاذبه برحسب متر بر مجذور ثانیه و q رطوبت ویژه P_o . فشار سطح زمین، $P_{\delta..}$ فشار تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌باشند. باید توجه داشت که اگر در محاسبه آب قابل بارش وارونگی دما بین دولایه فشاری در بالای پایه ابر وجود داشته باشد، مقدار rdp برای آن لایه با علامت منفی در نظر گرفته می‌شود. چون با افزایش دما، پتانسیل پذیرش رطوبت بسته‌هوا افزایش می‌یابد، کمبود اشباع ایجاد می‌شود و تبخیر در اثر این افزایش دما نیز نمی‌تواند این کمبود اشباع را جبران کند (صادقی حسینی و رضاییان، ۱۳۸۵).

مقدار این کمیت در عرض‌های میانی از نیم اینچ (حدود ۱۰ میلی‌متر) در محتوای رطوبتی بسیار پایین تا ۲ اینچ (حدود ۵۰ میلی‌متر) در محتوای رطوبتی بسیار بالا نوسان دارد (مرادی، ۱۳۸۵). دماهای پایین، مقدار این شاخص را محدود می‌کند؛ بنابراین در سوندینگ‌های زمستانی با وجود آب قابل بارش پایین، هنگام شرایط اشباع و صعود، احتمال بارش قابل توجه نیز وجود دارد.

• شاخص K (KINX)^۲

مقدار این شاخص با استفاده از ارتباط زیر به دست می‌آید (Derubertis, ۲۰۰۵):

۱ - Precipitable Water

۲ - K Index

$$KINX = (T_{\delta\delta\cdot} - T_{\delta\cdot\cdot}) + T_d - (T_{\gamma\cdot\cdot} - T_{d\gamma\cdot\cdot}) \quad \text{رابطه ۵:}$$

در این رابطه، T و T_d به ترتیب دما و دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد) در سطوح ذکر شده است. جمله اول آهنگ کاهش دما بین سطوح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال ۵۰۰ است که اگر یک مقدار مثبت و بزرگ باشد، نشانه‌ای از ناپایداری است. جمله دوم رطوبت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال را بیان کرده که اگر این جمله زیاد باشد، تأثیر آن در ناپایداری زیاد است. جمله سوم (با علامت منفی) خشکی هوا را در سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال اندازه گرفته که اگر مقدار درون پرانتز زیاد باشد، هوا در آن سطح خشک بوده و تأثیر این جمله در ناپایداری منفی است. بنابراین اگر جو رطوبت زیاد داشته و آهنگ کاهش دما بزرگ باشد، شاخص K نیز بزرگ بوده و احتمال وقوع توفان تندری توده‌هوا زیاد است. در جدول ۲ ارتباط بین شاخص K و احتمال وقوع توفان تندری توده‌هوا نشان داده شده است.

جدول ۲: شاخص K (Derubertis, ۲۰۰۵)

شاخص K	احتمال وقوع توفان تندری (درصد)
<۱۵	نزدیک به صفر
۱۵ تا ۲۰	۲۰
۲۱ تا ۲۵	۲۰ تا ۴۰
۲۶ تا ۳۰	۴۰ تا ۶۰
۳۱ تا ۳۵	۶۰ تا ۸۰
۳۶ تا ۴۰	۸۰ تا ۹۰
>۴۰	نزدیک ۱۰۰

• شاخص هوای توفانی (SWEAT)^۱

این شاخص برای برآورد توفان‌های سهمگین کاربرد دارد و مقدار آن با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید. McInthosh (McIlveen, ۱۹۹۲; and Thom, ۱۹۶۹):

رابطه ۶:

$$SWEAT = ۱۲(T_{d\delta\delta\cdot}) + ۲۰(TT - ۴۹) + (۲F_{\delta\delta\cdot} + F_{\delta\cdot\cdot}) + ۱۲۵[\sin(WD_{\delta\cdot\cdot} - WD_{\delta\delta\cdot})]$$

که در آن $T_{d\delta\delta\cdot}$ دمای نقطه شبنم در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (درجه سانتی‌گراد)، F سرعت باد در سطوح ذکر شده (نات)، WD جهت باد در سطوح ذکر شده (درجه) و TT شاخص مجموع مجموع‌ها بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$TT = (T_{\delta\delta\cdot} - T_{\delta\cdot\cdot}) + (T_{d\delta\delta\cdot} - T_{d\delta\cdot\cdot}) \quad \text{رابطه ۷:}$$

در این رابطه نیز T و T_d به ترتیب دما و دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد) در سطوح ذکر شده هستند. در مورد این شاخص، مقادیر کمتر از ۳۰۰ نشان‌دهنده ناپایداری ضعیف، ۳۰۰ تا ۳۹۹ ناپایداری متوسط، ۴۰۰ تا ۵۹۹ ناپایداری زیاد و بیشتر از ۶۰۰ ناپایداری خیلی زیاد می‌باشد (McIlveen, ۱۹۹۲; McInthosh and Thom, ۱۹۶۹).

^۱ - Storm Weather

• جبهه‌زایی

برای شناسایی بهتر توده هوایی که در رخداد توفان تندی نقش داشته‌اند، از تابع جبهه‌زایی استفاده شد. هر فرآیندی که منجر به افزایش بزرگی ∇T شود، فرآیند جبهه‌زا و چنین عملی را جبهه‌زایی می‌نامند. تابع جبهه‌زایی را می‌توان با رابطه زیر بیان کرد (مسعودیان، ۱۳۸۸: ۲۰۸-۲۱۱):

$$\mathfrak{J} = \frac{d|\nabla_p \theta|}{dt} \quad \text{رابطه ۸:}$$

این عبارت مبین آهنگ لاگرانژی تغییر بزرگی $\nabla_p \theta$ (شیو دمای بالقوه روی سطح هم‌فشار) است. می‌توان معادله ۸ را در فضای یک‌بعدی در نظر گرفت و شناخت بیشتری از ماهیت جبهه‌زایی به دست آورد؛ بنابراین به کمک رابطه زیر به بررسی فرآیندهایی پرداخته شد که بزرگی تباین دما در راستای محور x را تغییر می‌دهند.

$$\mathfrak{J}_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad \text{رابطه ۹:}$$

اگر

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

آنگاه

$$\mathfrak{J}_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d\theta}{dx} \right) - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

طبق معادلات یادشده چهار فرآیند فیزیکی که در غالب چهار جمله سمت راست معادله ۱۱ آمده‌اند در افزایش $\partial \theta / \partial x$ نقش دارند. اولین فرآیند اثر شیوهای گذاری جبهه بر گرمایش بادرو است که با $\partial / \partial x (d\theta / dt)$ نمایش داده شده است. اگر صعود هوا در جناح گرم منجر به آزادسازی گرمای نهان شود آنگاه شیو گذاری دمای بالقوه بزرگ می‌شود و $\partial / \partial x (d\theta / dt) > 0$ خواهد شد. در نتیجه اگر آزادسازی گرمای نهان از چنین پراکنشی برخوردار باشد منجر به جبهه‌زایی می‌شود.

• شار رطوبت

به‌منظور شناسایی منابع رطوبتی تأمین‌کننده بارش‌های مذکور و نحوه شارش آن به منطقه از تابع همگرایی شار رطوبتی استفاده گردید. بناکوس و شولز (Banacos and Schulta, ۲۰۰۴) به معرفی روش‌های مناسب جهت محاسبه همگرایی شار رطوبت^۱ پرداخته‌اند که صورت‌برداری معادله‌ی مزبور به‌صورت زیر است:

$$MFC = -\nabla \cdot (q \vec{V}_h) = -\vec{V}_h \cdot \nabla q - q \nabla \cdot \vec{V}_h, \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

$$MFC = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - q \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

۱- Moisture Flux Convergence (MFC)

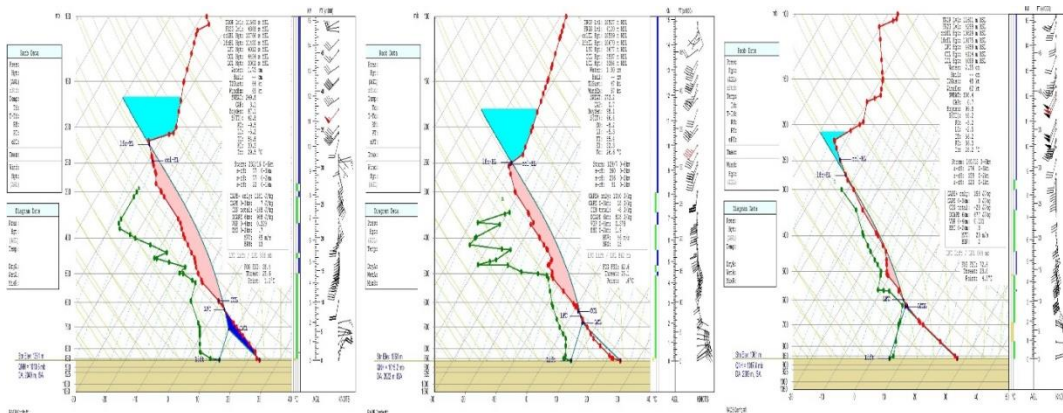
$(q\vec{V}_h) \cdot \nabla q$: همگرایی شار رطوبت، $-\vec{V}_h \cdot \nabla q$: وزش رطوبتی، $q\vec{V}_h \cdot \nabla \vec{V}_h$: همگرایی رطوبت، q : رطوبت ویژه، x و y : متغیرهای مستقل مکانی، u و v : مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد می‌باشد. مقادیر به‌دست‌آمده حاصل از معادله فوق به‌صورت مثبت (همگرایی) و منفی (واگرایی) شار رطوبتی است.

شرح و تفسیر نتایج

بر اساس تعریف، میزان مقاومت یک توده هوا در مقابل حرکات صعودی را درجه پایداری توده هوا می‌نامند. لذا، مقدار و شدت صعود توده هوا در یک منطقه معین را می‌توان با پارامتر پایداری یا ناپایداری تعریف نمود. در بحث پایداری یا ناپایداری بسته هوا رابطه بین افت‌آهنگ قائم دما و افت‌آهنگ بی‌دررو (فرآیندهایی که طی آن تبادل حرارتی با محیط صورت نمی‌گیرد) در داخل توده‌های هوا، مهم‌ترین نقش را در پایداری و ناپایداری توده هوا ایفا می‌کنند. در همین راستا بررسی شاخص‌های ناپایداری نشان داد که در روز اول مقادیر شاخص صعودی (LI) -۲ بوده که در دو روز بعدی به مقدار آن افزوده شده است. این شرایط گویای این امر است که تشدید اغتشاشات اتمسفری در روزهای بعد بیش از روز اول می‌باشد. با بررسی ضخامت جو بر روی منطقه آذربایجان مشاهده می‌شود که ضخامت آن در روز ۱۶ جولای ۵۷۸۵ ژئوپتانسیل متر بوده که در روز بعد با کاهشی ۵۱ ژئوپتانسیل متر همراه بوده است. نتایج حاصل از محاسبه مقادیر آب قابل بارش‌شو جو نیز نشان داد که به ترتیب در سه روز مورد نظر مقدار شاخص ۱۷، ۱۸ و بیش از ۲۳ میلی‌متر در روز می‌باشد. با بررسی وضعیت شاخص هوای توفانی (SWEA) و K مشخص شد که از زمان رخداد توفان تندی در منطقه که از روز ۱۶ جولای شروع شده، با نزدیک شدن به‌روزهای پایانی به مقدار شاخص‌های یادشده افزوده شده که نشان می‌دهد تقویت توفان و سازوکار تخریبی آن در روز انتهایی بیش از سایر روزها بوده است. با بررسی نمودارهای ترمودینامیکی نیز وضعیت مقطع قائم جو مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که صعود سریع بسته‌هوا در منطقه با انرژی پتانسیل همرفتی بالایی همراه بوده و سبب شده تا در این سه روز هوای صعودکننده تا لایه‌های فوقانی جو پیشروی کرده و جوی مغشوش را برای منطقه به وجود بیاورد. در نمودارهای تهیه‌شده، میانگین تشکیل لایه‌های LCL، LCL و CCL و LFC مابین ترازهای ۸۰۰ تا ۶۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد. این شرایط بر این امر دلالت دارد که وجود ناپایداری در لایه‌های زیرین جو با تحریکات و اغتشاشات جوی ترازهای فوقانی جو همراه گشته و سبب شده تا در کمتر از چند ساعت بسته‌هوا با سرعتی قابل‌ملاحظه عروج یابد (شکل ۲).

جدول ۳: مقادیر به‌دست‌آمده شاخص‌های ناپایداری

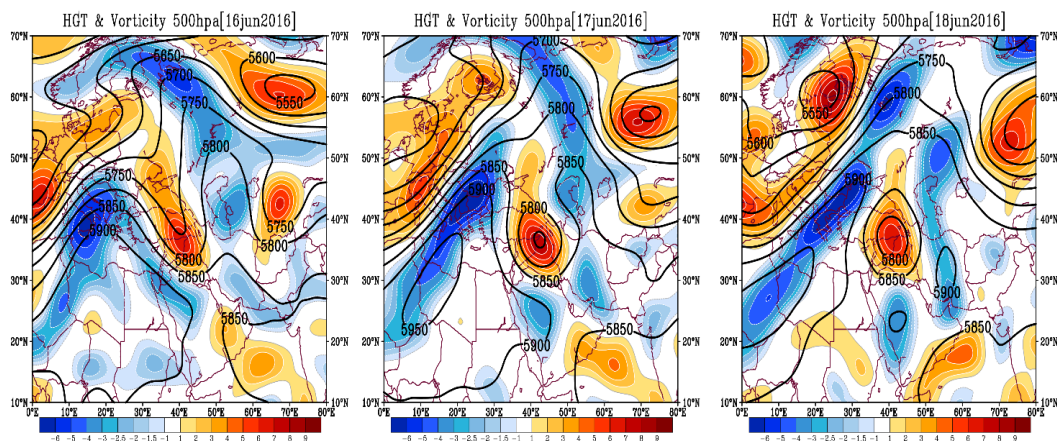
K index	SWEA	Perceptible water	Thickness(meter)	CAPE	LI	زمان (ساعت ۱۲ زولو)
۳۰/۳۰	۲۴۹/۸۱	۱۷/۴۱	۵۷۸۵	۲۱۷/۰۳	-۲/۰۱	۱۶ جولای ۲۰۱۶
۳۲/۳۰	۲۷۳/۱۹	۱۸/۰۷	۵۷۳۴	۲۶۸/۰۷	-۲/۹۹	۱۷ جولای ۲۰۱۶
۳۶/۳۰	۳۰۸/۳۸	۲۳/۵۹	۵۸۰۱	۳۸۰/۹۹	-۳/۰۹	۱۸ جولای ۲۰۱۶



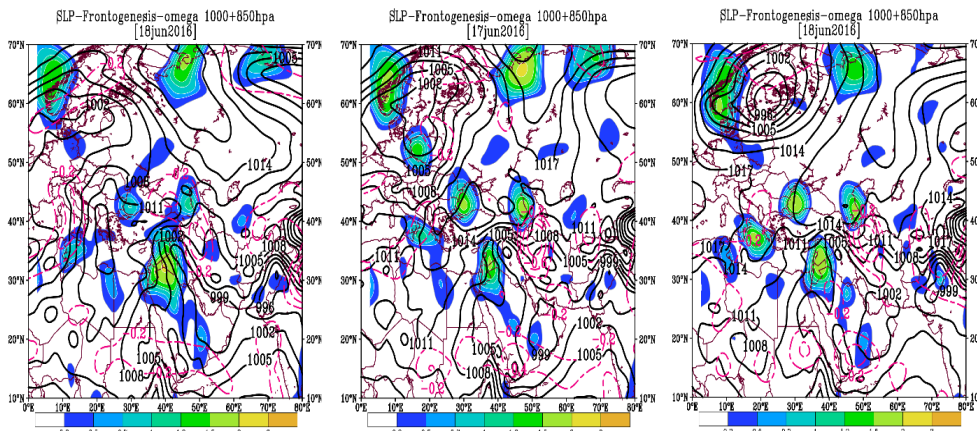
شکل ۲: نمودارهای Skew-t تهیه شده برای سه روز همراه با توفان تندری برای ایستگاه جو بالا تبریز

• بررسی نقشه‌های همدید در زمان رخداد توفان تندری

با بررسی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز اول بارندگی مشخص شد که توفان تندری به وجود آمده، حاصل برهمکنش‌های مختلف جو بوده، به طوری که در تراز میانی جو پشته بسیار قوی با گستره مکانی بیش از ۲۵ درجه عرض جغرافیایی بر روی دریای خزر ایجاد و تا حوالی عرض‌های قطبی گسترش یافته است. این وضعیت سبب شده تا بهمانند یک سد در مقابل جریان‌های غربی قرار گرفته و مانع از پیشروی حرکت شرق سوی جریان‌ها گردد. در طرف دیگر با حرکت شمال سوی پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای بر روی شمال آفریقا جریان ساعت‌گرد قوی در منطقه مذکور ایجاد گردیده است. این شرایط باعث شده تا در شرق این سامانه ناوه عمیق مابین دو پر ارتفاع وجود آید که در عمیق‌تر شدن آن نیز نقش چشمگیری را بر عهده دارند. به این جهت که با ایجاد جریان ساعت‌گرد و ریزش هوا به داخل ناوه و در نهایت تشکیل جریان پادساعت‌گرد در داخل این سیستم شرایط برای صعود سریع هوا فراهم آمده است. در روز دوم در دل پر ارتفاع تشکیل شده بر روی خزر هسته سرد چالی بر جانب شرق ترکیه، شمال عراق و شمال غرب ایران ایجاد شده که ارتفاع مرکزی آن ۵۷۵۰ ژئوپتانسیل متر می‌باشد. در روز سوم مشاهده می‌گردد که هسته سردچال به بریده کم‌فشاری بر روی منطقه تشکیل شده که بیشینه تاوایی مثبت در داخل این سیستم جوی است. با تشکیل و استقرار چندروزه این سامانه شرایط برای ناپایداری‌های بیش‌ازپیش در نواحی شمال غربی کشور فراهم شده است (شکل ۳).

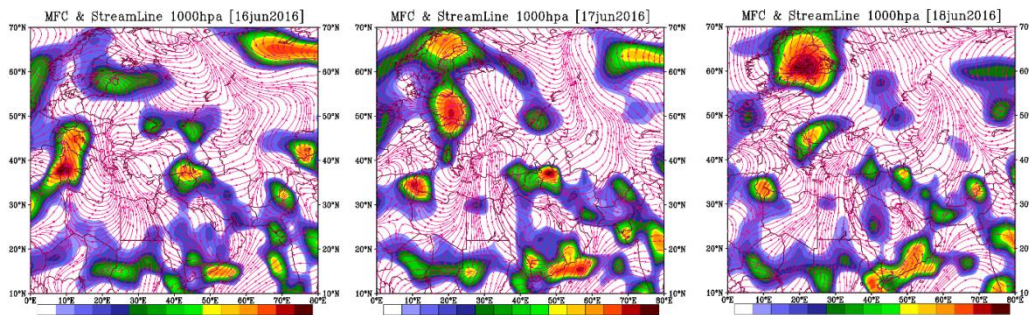


شکل ۳: نقشه وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای سه روز همراه با توفان تندری در شمال غرب



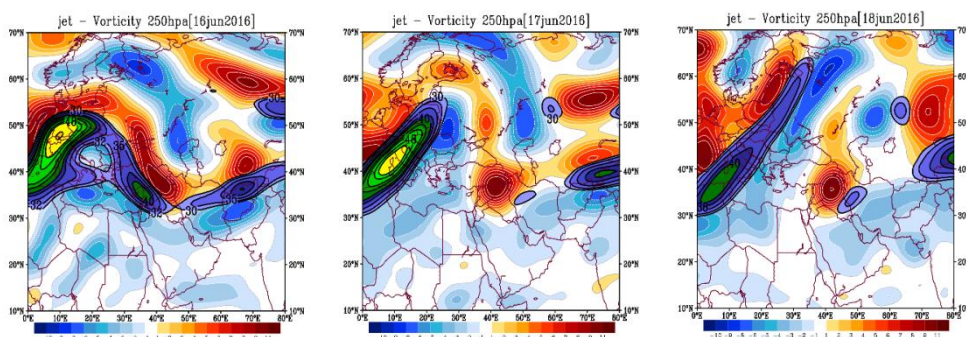
شکل ۴: نقشه وضعیت فشار تراز دریا، جبهه‌زایی و سرعت قائم برای سه روز همراه با توفان تندری در شمال غرب کشور

شرایط در سطح زمین نیز به گونه‌ای بود که در روز اول وقوع توفان در منطقه، پربندی از کم‌فشار بسیار قوی تشکیل شده در شمال شرق عربستان تا غرب و شمال غرب کشور کشیده شده است. در مقابل از دو سو یکی بر جانب دریای مدیترانه و دیگری شمال روسیه، پربندی از این دو پرفشار به منطقه خاورمیانه وارد شده است. کم‌فشار تشکیل شده بر روی شبه‌جزیره عربستان با کم‌فشار سطحی ایران مرکزی تلفیق شده و تقویت یافته‌اند که این مورد در تحقیق لشکری و همکاران (۱۳۹۴) نیز اشاره شده است. از طرفی پرفشارهای یادشده با ریزش هوای سرد در منطقه از سوی نواحی شمالگان همراه شده‌اند. با ایجاد چنین شرایطی محدوده جبهه‌زایی بسیار قوی از غرب خزر تا شمال عربستان ایجاد گشته که بیشینه آن بر غرب عراق با مقدار ۳ درجه کلونین در روز حاکمیت دارد. همچنین مشاهده می‌شود که منطبق بر پیشانی جبهه، یک هسته‌ی قوی از جریان بالاسو با سرعت $0/2$ پاسکال بر ثانیه در ترازهای زیرین جو (1000 تا 850 هکتوپاسکال) بوجود آمده که دارای دو هسته می‌باشد، اولی در شرق دریای سیاه و دیگری بر مناطق شمال غربی ایران مستقر هستند. در روز دوم با حرکت شمال سوی کم‌فشار سطحی سه هسته جداگانه در منطقه تشکیل شده که دو هسته در ایران مرکزی و دیگری بر روی عراق می‌باشد. این شرایط باعث شده تا پرفشار واردشده از مناطق شمالی و غربی عقب‌نشینی نمایند به گونه‌ای که با گسترش کم‌فشار و عقب‌نشینی پرفشار سطحی جبهه‌زایی نیز به مناطق دورتر کشور انتقال یافته است. این وضعیت در غرب دریای خزر با هسته جداگانه به مقدار $1/5$ الی 2 درجه کلونین جبهه بوجود آمده و دیگری به شمال دریای سرخ انتقال یافته است. در این روز دو هسته جداگانه سرعت قائم در نواحی شمال غرب کشور با یکدیگر ادغام و تبدیل به یک سلول بسیار ناپایدار شده که بیشینه سرعت در آن نزدیک به $0/9$ پاسکال بر ثانیه می‌رسد. روز سوم با گسترش پایین‌سوی پربند پرفشار قطبی به داخل کشور همراه گشته است. در طرف دیگر کم‌فشار عربستان نیز تا جنوب ترکیه نفوذ کرده و در منطقه شمال غرب ایران گرادبان شدید فشاری ایجاد شده است. به موازات گرادبان شدید فشاری جبهه‌زایی بر روی ارمنستان و جمهوری آذربایجان نیز تقویت و مقدار آن نزدیک به 2 درجه کلونین بر روز رسیده است. این وضعیت با جریانات بالاسوی قوی همراه بوده که در پیشانی این جبهه سرد با سرعت $0/6$ پاسکال بر ثانیه می‌رسد (شکل ۴).



شکل ۵: نقشه وضعیت همگرایی شار رطوبت برای سه روز همراه با توفان تندری در شمال غرب کشور

به منظور بررسی شار رطوبت به منطقه جهت تأمین انرژی مورد نیاز برای صعود بسته هوا و ریزش های جوی از تابع همگرایی شار رطوبتی استفاده گردید. بررسی ها نشان داد که در روز اول دو جریان جدا شده از جریانات پادساعت گردی، یکی در نواحی شمالگان و دیگری در شمال دریای مدیترانه به سمت منطقه روانه شده اند که در مسیر خود، شاخه ای از جریان شمالگان از روی دریای خزر عبور و وارد منطقه شده است. از طرفی جریان جدا شده از آنتی سیکلون تشکیل شده در منطقه مدیترانه دوشاخه شده، یکی از روی دریای سیاه و دیگری از روی مدیترانه عبور و در مناطق شمال غرب ایران و شرق ترکیه همگرا شده اند. این همگرایی سبب شده تا مقدار عظیمی از رطوبت از سه منبع رطوبتی به سوی منطق شارش یابد. به طوری که مقادیر شار رطوبتی در هسته تشکیل شده نزدیک به ۲۰ گرم بر کیلوگرم می رسد. در روز دوم جریانات مدیترانه دیگر وارد منطقه نشده و بیشتر جریان های عبوری از روی دریاهای خزر و سیاه به سوی نواحی شمال غربی ایران روانه شده اند. از طرفی شاخه ای دیگر از جریان وارد شده به کشور از جانب جنوب کشور از روی خلیج فارس طی یک جریان برگشتی به شمال غرب کشور وارد و همگرا شده اند. این امر سبب گردیده تا مقادیر شار رطوبتی در شمال غرب کشور به بیش از ۲۵ گرم بر کیلوگرم برسد. در روز سوم با مهاجرت پایین سوی پرفشار جنب قطبی به سمت عرض های پایین تر سبب شده تا اصلی ترین جریان ورودی به منطقه، شاخه جنوبی جدا شده از پرفشار مذکور به منطقه باشد. از طرفی جریانات مدیترانه و سیاه با ورود به کشور در جنوب غرب و شمال عربستان همگرا شده و هسته های جدای همگرایی بوجود آورده اند. مقدار رطوبت شارش یافته به مناطق شمال غربی کشور در این روز بین ۱۳/۵ تا ۱۵ گرم بر کیلوگرم در روز می باشد (شکل ۵).



شکل ۶: نقشه وضعیت رودباد و تاوایی تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برای سه روز همراه با توفان تندری در شمال غرب کشور

با بررسی شرایط سطوح فوقانی جو مشخص شد که در روز نخست جریان جت در شمال مدیترانه جهتی شمال سو پیدا کرده که این وضعیت با تاوایی مثبت در قسمت شمالی رودباد و جریان تاوایی منفی در قسمت زیرین آن همراه بوده است.

با سرازیر شدن جت با جهت شمال غرب- جنوب شرق، یک هسته بیشینه سرعت بر روی کشور عراق بوجود آورد است که این وضعیت با تشکیل هسته بیشینه تاوایی مثبت بر جانب مناطق شرقی ترکیه و شمال غرب کشور همراه می‌باشد. در روز دوم جریان رودباد بیشتر به غرب مدیترانه و شرق اروپا معطوف شده ولی در مناطق غربی یک هسته سرعت بیش از ۳۰ متر بر ثانیه بوجود آمده که در قسمت شمالی این هسته سرعت، جریان تاوایی مثبتی ایجاد شده که این امر در صعود شدید و ناگهانی بسته هوا نقش مهمی را برعهده دارد. در روز سوم سرعت هسته رودباد واقع در مناطق غربی ایران افزایش یافته که به تبع آن جریان تاوایی مثبت نیز افزایش یافته و به یک هسته مجزا بر روی منطقه تغییر شکل داده است (شکل ۶).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی دقیق‌تر شرایط جوی پارامترهای دمای هوا، فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و یخ، سرعت قائم، مؤلفه باد مداری و مؤلفه نصف‌النهاری باد از تارنمای (NCEP/NCAR) اخذ شد. همچنین برای بررسی ناپایداری در سطوح مختلف جو از شاخص‌های صعود، موجودی انرژی پتانسیل فرارفتی، آب قابل بارش، K و هوای توفانی استفاده شد. بررسی نمودارهای ترمودینامیکی نشان داد که صعود سریع بسته‌هوا در منطقه بالانرژی پتانسیل همرفتی در دسترس بالایی همراه بوده و سبب شده تا در این سه روز هوای صعودکننده تا لایه‌های فوقانی جو پیشروی کرده و جوی مغشوش را برای منطقه به وجود آورده است. همچنین با بررسی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز اول بارندگی مشخص شد که توفان تندری حاصل برهمکنش‌های مختلف جو بوده، بطوریکه در تراز میانی جو پشته بسیار قوی با گستره مکانی بیش از ۲۵ درجه عرض جغرافیایی بر روی دریای خزر ایجاد و تا حوالی مناطق عرض‌های قطبی گسترش یافته است. در روز دوم، توفان تندری در داخل پر ارتفاع تشکیل شده بر روی خزر هسته سرد چالی بر جانب شرق ترکیه، شمال عراق و شمال غرب ایران ایجاد شده که ارتفاع مرکزی آن ۵۷۵۰ ژئوپتانسیل متر می‌باشد. در روز سوم، هسته سردچال به بریده کم‌فشاری بر روی منطقه تشکیل شده که بیشینه تاوایی مثبت در داخل این سیستم جوی است. شرایط در سطح زمین نیز به گونه‌ای بود که در روز اول وقوع توفان در منطقه، پربندی از کم‌فشار بسیار قوی تشکیل شده در شمال شرق عربستان تا غرب و شمال غرب کشور کشیده شده است. در مقابل از دو سو یکی بر جانب دریای مدیترانه و دیگری شمال روسیه، پربندی از این دو پرفشار به منطقه خاورمیانه وارد شده است. کم‌فشار تشکیل شده بر روی شبه‌جزیره عربستان با کم‌فشار سطحی ایران مرکزی تلفیق شده و تقویت یافته‌اند که در بررسی تگرگ‌های فراگیر شمال غرب توسط خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۱) به تاثیر کم‌فشارهای وارد شده از جنوب غرب خاورمیانه به مناطق شمال غربی کشور در زمان رخداد تگرگ و توفان تندری نیز اشاره شده است.

منابع

- اسکورو، ژیزل. ۱۳۷۵. آب و هواشناسی علمی. ترجمه شهریار خالدي. نشر قومس. تهران.
- بایرز، هاریس رابرت. ۱۳۷۷. هواشناسی عمومی. ترجمه تاج‌الدین بنی‌هاشم، بهروز حاجبی و علیرضا بهروزیان. انتشارات مرکز نشر دانشگاهی. تهران.
- برودتی، مجید. ۱۳۸۱. شناخت و راه‌های مقابله با خسارات تگرگ. مجله مزرعه. ۶۲: ۲۵-۳۷.

- بهراد، عبدالاحد. ۱۳۶۲. خسارات وارده از سرما و تگرگ و یخبندان به باغات انگور کشور و روش‌های مقابله با آن. *مجله زیتون*. ۲۴.
- خالدی، شهریار؛ فرامرز، خوش‌اخلاق و مهدی، خزایی. ۱۳۸۹. تحلیل هم‌دید توفان‌های تندری سیلاب ساز استان کرمانشاه. *مجله چشم‌انداز جغرافیایی*. ۱۳: ۴۱-۲۱.
- خزایی، مهدی؛ احسان، مدیری و مهدی، مدیری. ۱۳۹۳. تحلیل هم‌دید توفان‌های تندری مخاطره‌آمیز اصفهان. *دانش مخاطرات*. ۲: ۲۰۳-۲۱۵.
- خورشید دوست، علی محمد؛ کامران، خلیل ولیزاده و جواد، عباس‌نژاد. ۱۳۹۲. مطالعه زمانی مکانی بارش تگرگ به منظور مکانیابی بهینه استفاده از دستگاه ضد تگرگ (مطالعه موردی شهرستان ماکو). پایان نامه کارشناسی ارشد. *دانشگاه تبریز*، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی.
- خورشید دوست، علی محمد؛ یوسف، قویدل رحیمی. ۱۳۸۵. کاربست نرم افزار Digital Atmosphere ۲۰۰۰ در تحلیل فضایی پدیده های اقلیمی ایران. *جغرافیای سرزمین*. ۱: ۴۸-۵۸.
- خورشید دوست، علی محمد؛ جواد، عباس‌نژاد و فاطمه، سرافروزه. ۱۳۹۴. بررسی توزیع زمانی - مکانی و تحلیل هم‌دید پدیده بارش تگرگ در استان آذربایجان شرقی. *کنفرانس ملی هواشناسی*. کد مقاله: ۸۵۹۴۹۱.
- خورشید دوست، علی محمد؛ جواد، عباس‌نژاد و فاطمه، سرافروزه. ۱۳۹۴. بررسی توزیع زمانی و تحلیل هم‌دید پدیده تگرگ ماکو. *کنفرانس ملی هواشناسی*. کد مقاله: ۱۳۱۹۹۹.
- خوش اخلاق، فرامرز؛ محمدی، حسین؛ شمسی پور، علی اکبر. ۱۳۹۱. واکاوی هم‌دید بارش تگرگ فراگیر در شمال غرب ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۲: ۵۵-۶۹.
- رسولی، علی اکبر؛ علی محمد، خورشید دوست و مجتبی، فخاری واحد. ۱۳۹۵. بررسی شرایط سینوپتیکی و ترمودینامیکی توفان تندری منجر به سیل شدید ۲۸ تیر ماه سال ۱۳۹۴ در البرز مرکزی. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۲.
- صادقی حسینی، علیرضا؛ مهتاب، رضاییان. ۱۳۸۵. بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان. *مجله فیزیک زمین و فضا*. ۲: ۸۳-۹۸.
- صلاحی، برومند. ۱۳۸۹. بررسی ویژگی‌های آماری و هم‌دید توفان‌های تندری استان اردبیل. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. ۷۲: ۱۴۱-۱۲۹.
- صناعی، بهرام؛ خداداد، باستانی و فاطمه، رفیع بخش. ۱۳۸۲. بررسی مدل آماری پدیده تگرگ در ایران. *مجله نیوار*. ۴۹-۲۰-۷: ۴۸.
- عبدمنافی، دینا. ۱۳۸۲. بررسی شاخص‌های ناپایداری و برش قائم و وضعیت رطوبتی هنگام نزول تگرگ. پایان نامه کارشناسی ارشد. *دانشگاه علوم و فنون دریایی*.
- قویدل رحیمی، یوسف. ۱۳۹۰. کاربرد شاخص‌های ناپایداری جوی برای آشکارسازی تحلیل دینامیک توفان تندری روز ۵ اردیبهشت ۱۳۸۹ تبریز. *فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی*. ۳: ۲۰۸-۱۸۲.
- کاویانی محمدرضا؛ بهلول، علیجانی. ۱۳۸۷. *مبانی آب و هواشناسی*. انتشارات سمت. تهران.

- لشکری، حسن؛ فرشاد، پژوه و محمد، بیتار. ۱۳۹۴. تحلیل هم‌دید بارش تگرگ فراگیر در غرب ایران. فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی/هر. ۵۰: ۸۳-۱۰۵.
- مرادی، حمیدرضا. ۱۳۸۵. پیش‌بینی وقوع سیلاب‌ها بر اساس موقعیت‌های سینوپتیکی در ساحل دریای خزر. پژوهش‌های جغرافیایی. ۵۵: ۱۰۹-۱۳۱.
- مسعودیان، ابوالفضل. ۱۳۸۸. دینامیک جو در عرض‌های میانه. مارتین، جانانان ای. چاپ اول. دانشگاه اصفهان. اصفهان.
- میرموسوی، سید حسین؛ اکبرزاده، یون. ۱۳۸۹. مطالعه زمانی مکانی بارش تگرگ در فصل رشد گیاهان؛ مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی دانشگاه تبریز. ۳۳: ۱۷۵-۱۹۰.
- Banacos, P. G. D. M. Schulta. ۲۰۰۴. Moisture Flux Convective Initiation Forecasting, www.ams.confex.com.
- Costa, S. Mezzasalam, p, Levizzani, V, able. P. P, and Nanni, S. ۲۰۰۱. Deep convection over northern Italy: synoptic and thermodynamic analysis. Atmos. Res, ۵۶, ۷۳, ۸۸.
- Derubertis, D. ۲۰۰۵. Recent Trends in for Common Stability Indices Derived from U.S Radiosonde Observations, Bulletin of the American Meteorological Society. ۳. ۳۰۹-۳۲۳.
- Galway, J. G. ۱۹۵۶. The lifted index as a predictor of latent instability. Bulletin of the American Meteorological Society. ۳۷: ۵۲۸-۵۲۹.
- Holton, J. R. ۱۹۹۳. An introduction to dynamic meteorology: ۳rd edition, Academic Press, ۵۱۱ pp.
- Manzato, A. ۲۰۰۳. A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods", Atmos, Res, ۶۸: ۴۱۷-۴۵۴.
- McIlveen R. ۱۹۹۲. Fundamentals of Weather and Climate, published by Chapman & Hall, ۲-۶ oundary Row, London SE۱ ۸HN, UK, ۴۹۷ pp.
- McInthosh D. H. and Thom A. S. ۱۹۶۹. Essentials of Meteorology, wykeham publications (London) LTD, ۲۳۹ pp.
- Miller, R. C. ۱۹۷۲. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. ۲۰۰ (R). Headquarters. Air Weather Service.USAF.۱۹۰ pp.
- Moncrieff, M. W. and Green, J. S. A. ۱۹۷۲. The propagation of steady convective overturning in shear. Q. J. Roy. Meteor. Soc. ۹۸: ۳۳۶-۳۵۲.
- Rogers, R. R. and Yau, M. K. ۱۹۹۶. A Short Course in Cloud Physics: Third edition, Butterworth-Heinemann.
- Simonov, p, and Gergiev, C. G. ۲۰۰۳. Severe wind/hail storms over Bulgaria in ۱۹۹۹-۲۰۰۱ period: synoptic and mesoscale factors for generation: atmosphere. ۶۸: ۶۲۹-۶۴۳.
- Sterling, R. ۲۰۰۳. Trend in U.S. climate during the twentieth century; consequences, Vol.۲.
- Whiteman, C.D. ۲۰۰۳. Mountain meteorology; oxford university press.