

## بررسی امکان پیش آگاهی وقوع پدیده تگرگ با استفاده از رادار

اعظم صانعی<sup>۱\*</sup>، فروزان ارکیان<sup>۲</sup>، پری سیما کتیرایی<sup>۳</sup> و محمد ریحانی پروری<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۳- گروه هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

۴- بخش رادار، سازمان هواشناسی کشوری

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۲۷

### چکیده

تگرگ ناشی از توفان های تندری تابستانه، یک پدیده ی کوچک مقیاس است و اغلب از نظر زمانی دارای تداوم کمی می باشد. تگرگ درون توفان تندری نوعی در کسری از ساعت تولید شده و گسترش بارش آن می تواند در حدود صد متر باشد. در این تحقیق با استفاده از اطلاعات و محصولات بدست آمده از رادارهای هواشناسی مربوط به سه ایستگاه تهران، اهواز و خزر شرقی در طی سال های ۲۰۰۸-۲۰۱۰ احتمال وقوع پدیده تگرگ مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا با بررسی اطلاعات مربوط به ایستگاه های همدیدی و همچنین گزارش های هواشناسی، ۳۰ مورد بارش تگرگ در مناطق تحت پوشش راداری در بازه زمانی ذکر شده استخراج شد. روش های متعددی جهت تشخیص تگرگ با استفاده از محصولات رادار موجود است. در این تحقیق از روش ، الگوریتم والدوگل (waldvogel) که دقت بالایی در تعیین احتمال و آستانه ی مناسب برای پیش آگاهی وقوع تگرگ دارد، استفاده شد. در این الگوریتم اختلاف ارتفاع تراز دمای صفر در جو که از طریق گمانه زنی روزانه بدست می آید با ارتفاع تراز بازتابش ۴۵dBZ که از تصاویر و داده های رادار بدست می آید، معیار تعیین احتمال وقوع تگرگ می باشد. بررسی ها نشان داد که در شرایطی که اختلاف ارتفاع دو تراز ذکر شده حدود ۴/۵ کیلومتر باشد، می توان وقوع تگرگ را محتمل دانست. البته این مقدار در مناطق با اقلیم های سرد و گرم می تواند تا حدود ۱ کیلو متر تغییر کند.

واژه گان کلیدی: محصول احتمال رخداد تگرگ، بالاترین ارتفاع بازتابش ۴۵ dBZ، سطح دمای صفر، تگرگ،

## مقدمه

در میان پدیده‌های جوی، پدیده‌های همرفتی با توجه به شرایط دینامیکی حاکم بر آنها و اثرات مخربی که می‌توانند داشته باشند از گذشته‌های دور مورد توجه بوده‌اند. با توجه به اینکه توفان‌های تگرگ را سالانه خسارت زیاد از نظر مالی در نواحی مختلف کشور، خصوصاً در بخش محصولات کشاورزی وارد می‌آورند.

در دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ محققین پی بردند که امواج الکترو مغناطیسی مانند امواج نوری و صوتی پس از برخورد به مانع منعکس می‌شوند. از این رو استفاده از رادار برای شناسایی و اندازه‌گیری تگرگ مورد توجه آنها قرار گرفت. آنها پی بردند احتمال وقوع تگرگ با افزایش بازتاب رادار (Z) افزایش می‌یابد، به این معنی که مقادیر فاکتور بازتابندگی برابر  $10^5 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$  و بزرگتر از آن شاخص‌های خوبی برای شناسایی تگرگ می‌باشد. یعنی اگر اکوها با شدت زیادی و با رشد عمودی بالا مشاهده شوند احتمال وقوع تگرگ در سطح زمین افزایش می‌یابد. یک روش برای شناسایی تگرگ بوسیله Atlas و همکاران در سال ۱۹۹۷ پیشنهاد شد. اساس این روش بر پایه وابستگی شدید بازتابندگی طول موج رادار در ناحیه پراکندگی مای (Mie) و عدم وابستگی طول موج رادار به بازتابندگی در ناحیه پراکندگی رایلی قرار داشت. Battan در سال ۱۹۷۳ رابطه بین Z (فاکتور بازتابندگی) و R (نرخ بارش) را برای اندازه‌گیری تگرگ‌هایی که قانون پراکندگی Mie برای آنها برقرار می‌باشد، پیشنهاد داد.

Wolf و Amburn (۱۹۹۹) روی ضریب هم‌بستگی بین چگالی انتگرال عمودی آب مایع (Vertically integrated liquid density) و اندازه تگرگ مطالعه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه چگالی انتگرال عمودی آب مایع از مقدار ۳/۵ گرم بر متر مکعب بیشتر باشد، احتمال تشکیل تگرگ با اندازه درشت بالاتر می‌شود. تحقیقات قبلی در خصوص تشخیص تگرگ‌های شدید روی محصولات خروجی از رادار مانند انتگرال عمودی آب مایع (Vertically integrated liquid) متمرکز شده بود Vshepherd و Paxton (۱۹۹۳) همچنین (۱۹۷۷) Lemon نشان دادند که رشد ذرات یخ داخل ابر فوق سرد برای اینکه جرم آنها به اندازه کافی رشد کند وابسته به حرکت بالا رو است آنها معادله آب قابل بارش را توسعه دادند. Thompson (۲۰۰۳) همچنین Donavon و Jungbluth (۲۰۰۷) اختلاف ارتفاع بازتاب ۵۰dBZ که از صفحه نمایش ارتفاع دریافت می‌شود و سطح دمایی صفر که از نمودار ترمودینامیکی بدست می‌آید را مورد مطالعه قرار داد و به این نتیجه رسید که بستگی خطی شدیدی بین احتمال رخداد تگرگ و اختلاف ارتفاع این دو عدد وجود دارد.

در کشور ایران مطالعات انجام شده روی پدیده تگرگ بر اساس شاخص‌های ناپایداری و یک مورد استفاده از ماهواره می‌باشد و در رابطه با پیش‌آگاهی پدیده تگرگ با استفاده از رادار کاری صورت نگرفته است.

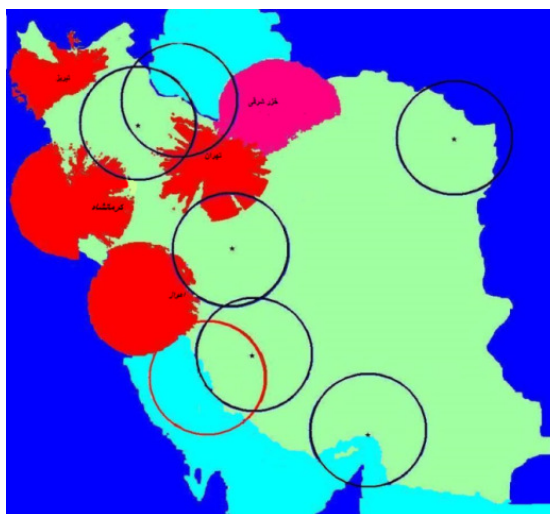
هدف اصلی در این تحقیق، بررسی و ارزیابی روش‌های پیش‌آگاهی وقوع پدیده تگرگ با استفاده از داده‌های رادار می‌باشد. در این بررسی، نواقص و اشکالات موجود در الگوریتم‌های تشخیص تگرگ مورد بررسی قرار می‌گیرد و جهت هماهنگ‌سازی با شرایط اقلیمی مناطق مورد مطالعه بهینه‌سازی می‌شوند.

## مواد و روش‌ها

تگرگ در قسمت‌های بالایی و میانه همه توفان‌ها یافت می‌شود. اندازه تگرگ معمولاً با افزایش شدت سلول توفان زیاد می‌شود. شروع تشکیل تگرگ از یک قطره یخ زده و یک بلور یخی است. حرکت بالا سو قوی در هوا گرم و حرکت پایین سو در هوای سرد ذره یخ را به سمت بالا و پایین و در ترازهای مختلف حرکت می‌دهند در این صورت لایه‌ای از ذرات یخ روی سطح قطره جمع می‌شود و ساختار لایه تگرگ را تشکیل می‌دهد. برای تشکیل تگرگ تعداد زیادی از قطرات ابر سرد در کنار یکدیگر جمع می‌شوند این قطرات باید ۵ تا ۱۰ دقیقه در ابرهای توفان باقی بمانند. برای تشکیل تگرگ‌ها با سایز بزرگتر از ۵ سانتی متر، قطره یخ باید در توفان تندی که جریان بالا رو قوی دارد قرار گیرد برای این منظور هسته تگرگ باید زمانی را در نواحی ابری که غنی از آب ابرسرد است بگذرانند.

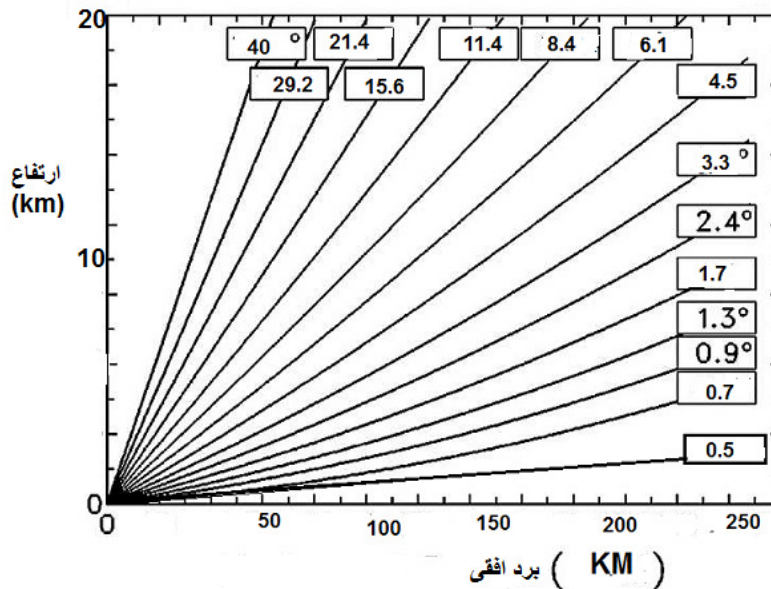
زمانی که یک ابر توسط پرتو رادار اسکن می‌شود مقدار بازتابش از هدف بسته به نوع ذرات داخل ابر از قبیل قطرات باران، کریستال‌های یخ و تگرگ... تغییر می‌کند. دانه‌های تگرگ به دلیل چگالی بالایی که دارند بیشترین بازتابش را دارا هستند. والدوگل در معیار خود بازتابش راداری ۴۵ dBZ را به تگرگ نسبت داد بنابراین هر چه ارتفاع این بازتابش نسبت به تراز دمای صفر بالاتر باشد نشان دهنده این است که تگرگ تا ارتفاعات بالاتری در سامانه‌ی همرفتی صعود کرده است. حرکات بالاسو و پائین سو در یک ابر همرفتی، لازمه‌ی رشد تگرگ می‌باشد هنگامی که تگرگ تا ارتفاعات بالاتری در ابر صعود کند رشد بیش تری را خواهد داشت.

در این تحقیق، مناطق تحت پوشش رادارهای تهران، اهواز و خزر شرقی جهت بررسی وقوع تگرگ انتخاب شدند زیرا این رادارها از نظر مدت زمان و استمرار کار نسبت به رادارهای دیگر در وضعیت مناسب تری قرار داشتند. در شکل (۱) مناطقی که تحت پوشش رادار قرار دارند نشان داده شده است. همچنین نواحی که با دایره مشخص شده، مناطقی هستند که در آینده به سیستم رادار مجهز می‌شوند.



شکل ۱- مناطق تحت پوشش رادار کشور شامل پوشش سایت‌های نصب شده (قرمز) و محل نصب سایت‌های بعدی (دایره توخالی).

این رادارها از یک سیستم راداری باند C از نوع داپلری می‌باشد برد آنها ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. وضعیت اسکن حجمی این رادارها مطابق شکل (۲) می‌باشد و رادار ۱۵ اسکن مختلف با زوایای متفاوت را انجام می‌دهد. کمترین زاویه ارتفاعی ۰/۵ درجه و بیشترین زاویه ارتفاعی ۴۰ درجه می‌باشد.



شکل ۲- نموداری از وضعیت اسکن حجمی رادار تهران، یک اسکن حجمی، شامل ۱۵ زاویه ارتفاعی مختلف

به طور کلی سه نوع داده‌های خام دریافتی از رادار وجود دارد.

(۱) میزان بازتابش با نماد Z

(۲) سرعت پدیده با نماد V

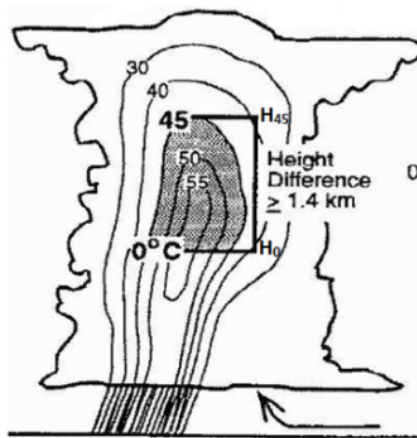
(۳) پهناى طیف سرعت با نماد W

در این تحقیق محصول احتمال رخداد تگرگ (Zhai) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این محصول به صورت تصویری توسط نرم افزار rainbow با استفاده از میزان بازتابش (Z) و الگوریتم به کار برده شده در این تحقیق تولید می‌شود. معیار الگوریتم والدوگل در تشخیص تگرگ، بر اساس اختلاف ارتفاع دو تراز (۱) ارتفاع تراز دمای صفر و (۲) بیشینه ی ارتفاع بازتابش dBZ ۴۵ می‌باشد. ارتفاع دمای صفر با استفاده داده های ایستگاه جو بالا و محصول "بیشینه ی ارتفاع بازتابش dBZ ۴۵" که بصورت تصویری ایجاد می‌شود. خروجی الگوریتم والدوگل، محصول "احتمال وقوع تگرگ" (ZHAIL) است که حاصل این دو کمیت تعریف شده در بالا می‌باشد. در این بخش از تحقیق، محصول ZHAIL در نواحی تحت پوشش رادار، در زمان‌هایی که وقوع پدیده ی تگرگ گزارش شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس احتمال وقوع پدیده ی تگرگ با استفاده از داده ها و محصولات سه ایستگاه راداری اهواز، تهران و خزر شرقی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. حدوداً ۳۰ رخداد تگرگ در طی سال های ۲۰۱۰-۲۰۰۸ توسط ایستگاه های سینوپتیک تحت پوشش این سه رادار ثبت شده است. در این تحقیق، شش مورد رخداد

تگرگ که داده های ایستگاه های سینوپتیک، جو بالا و رادار به طور همزمان در دسترس بوده مورد مطالعه قرار گرفته شده است. محصولات تگرگ برای همه ی نقاط بررسی شده و احتمال رخداد تگرگ ارزیابی و با گزارش تگرگ در منطقه مقایسه شده است.

### الگوریتم تولید محصول zhail (احتمال رخداد تگرگ) به روش والدوگل

در این الگوریتم، درصد احتمال وقوع تگرگ بر مبنای اختلاف ارتفاع بازتابش ۴۵dBZ از ارتفاع تراز دمای صفر محاسبه و تعیین می‌شود. احتمال بارش تگرگ با افزایش ارتفاع بازتاب ۴۵dBZ بالای تراز صفر افزایش می‌یابد. لزامهم ترین پارامتر تشخیص تگرگ اختلاف ارتفاع فوق الذکر می‌باشد. ارتفاع تراز صفر ( $H_T$ ) با استفاده از نمودار اسکیوتی بدست می‌آید. تراز صفر جایی است که خط همدمای صفر، خط دمای محیط را قطع می‌کند. مقدار ارتفاع تراز صفر در الگوریتم به صورت پیش فرض تعریف شده ولی برای بررسی دقیق تر مسئله ارتفاع تراز صفر در هر مورد از روی نمودار اسکیوتی استخراج شده و در الگوریتم وارد می‌شود. ارتفاع  $H_{Z45}$  ( $ETOP_{45}$ ) بالاترین ارتفاعی است که بازتابش آن ۴۵ dBZ می‌باشد. ارتفاع بازتابش ۴۵ dBZ از روی تصویر (محصول)  $H_{Z45}$  که بیانگر بیش ترین ارتفاع این بازتابش در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه است، بدست می‌آید. در شکل (۳) اساس کار الگوریتم والدوگل نمایش داده شده است.



شکل ۳- شمای الگوریتم تشخیص تگرگ به روش والدوگل

ذکر این نکته در این قسمت لازم است که با توجه به اینکه پرتو رادار با فاصله از آن گسترده می‌شود، برای تعیین ارتفاع دقیق بالاترین ارتفاع بازتابش ۴۵ dBZ تصحیحی صورت می‌گیرد.

$$D_{r, dB} H'_{Z45} \propto H_{Z45} \propto a \quad (1)$$

در این رابطه  $H'_{Z45}$  و  $H_{Z45}$  بالاترین ارتفاع بازتابش ۴۵ dBZ به ترتیب قبل و بعد از اعمال تصحیحات پهن شدگی می‌باشد. در این رابطه  $D_{r, dB}$  قطر پرتو و  $a$  فاکتور پهن شدگی پرتو است. مقدار  $a$  بین ۱/۱ تا ۰/۲ می‌باشد. قطر پرتو با استفاده از فاصله ی نقطه مورد نظر از رادار و پهنای پرتو آنتن محاسبه می‌شود که اگر پهنای پرتو را  $\Delta$  در نظر

گرفته شود و فاصله از رادار را با نماد  $r$  نشان داده شود، قطر پرتو با استفاده از رابطه  $D = \frac{r}{180}$  محاسبه می‌گردد.

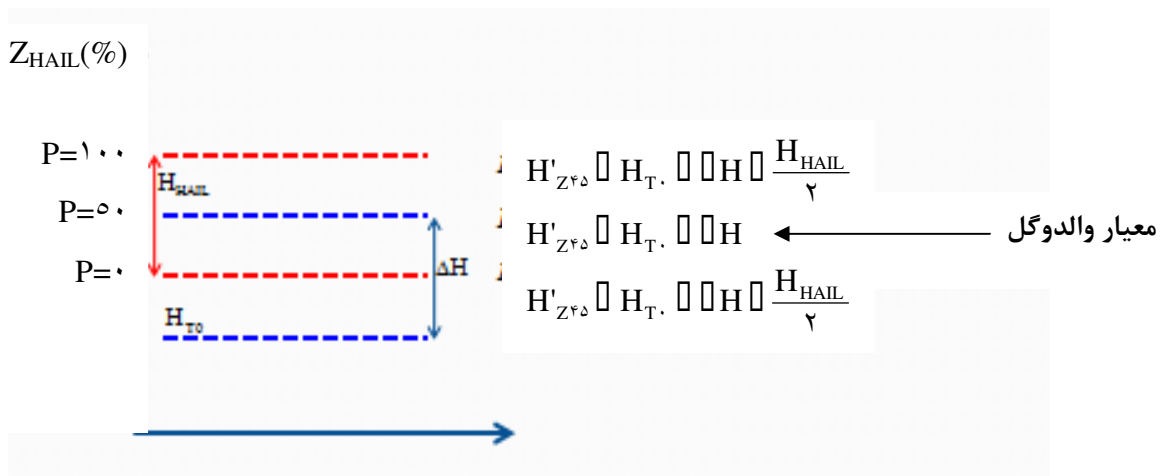
اگر سطح دمای صفر با  $H_T$  نشان داده شود و اختلاف ارتفاع بازتابش  $45 \text{ dBZ}$  و سطح دمای صفر با  $\Delta H$  نمایش داده شود، می‌توان نوشت:

$$\Delta H = H'_{Z45} - H_T \quad (2)$$

محصول احتمال رخداد تگرگ (zhail) با استفاده از اطلاعات بازتابش (Z) در یک اسکن سه بعدی تولید می‌شود. با استفاده از محصول ZHAIL، نواحی اخطار را برای تگرگ سبک، تگرگ متوسط و تگرگ شدید مشخص کرد. بر اساس نتایج Holleman (۲۰۰۱) درباره احتمال تگرگ، فرمول احتمال رخداد تگرگ را مطابق رابطه (۳) می‌باشد.

$$\left(\frac{100\%}{HHAIL}\right) \times H'_{Z45} - (H_T + \Delta H) + \frac{HHAIL}{2} Z_{HAIL} = \quad (3)$$

در این فرمول  $\Delta H$  همان اختلاف ارتفاع بازتابش  $45 \text{ dBZ}$  و سطح دمای صفر است و HHAIL ضخامت لایه‌ای است که احتمال وقوع تگرگ در آن لایه از صفر تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌کند. در حالتی که ارتفاع بازتابش  $45 \text{ dBZ}$  با سطح دمای صفر  $1/4$  کیلومتر باشد احتمال وقوع تگرگ ۵۰ درصد است. در شکل (۴) سه حالت مختلف برای احتمال صفر، ۵۰ و ۱۰۰ روی شکل نشان داده شده است.



شکل ۴- ارتباط کمیت‌های موجود در الگوریتم والدوگل و احتمال وقوع تگرگ

## نتایج

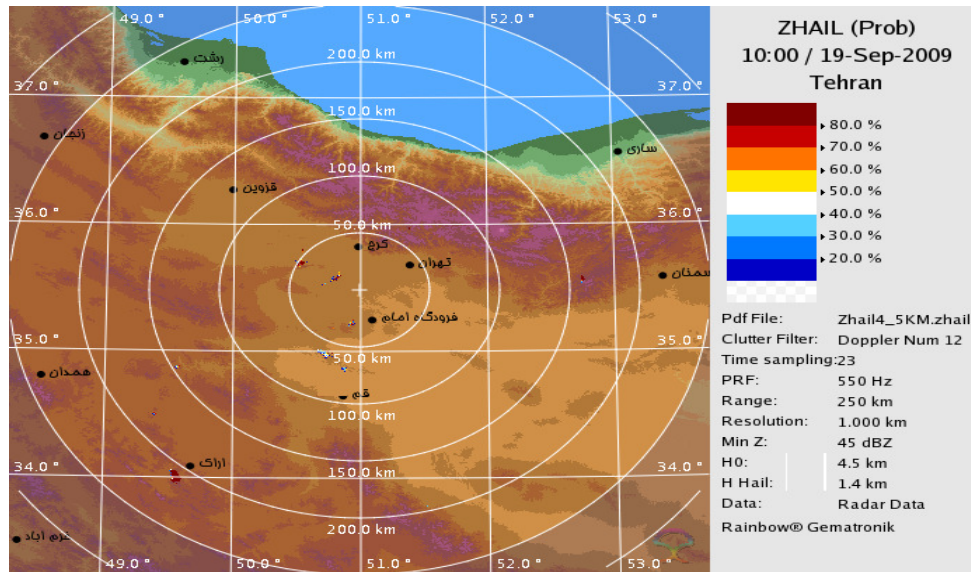
در تحقیق حاضر ۶ گزارش رخداد بررسی شد و نتیجه بررسی‌ها روی ۳ رخداد تگرگ که توسط ۳ رادار فعال کشور ثبت شده آورده شده است. در ابتدا احتمال وقوع پدیده ی تگرگ در منطقه تحت پوشش رادار تهران برای تاریخ ۱۹ سپتامبر ۲۰۰۹ با تفصیل بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بررسی نقشه‌های محصول ZHAIL در ساعت ۱۰ UTC نشان داد که احتمال وقوع تگرگ در منطقه ی تحت پوشش رادار تهران در این ساعت صفر بوده است. شکل (۵) احتمال وقوع تگرگ را در منطقه، ۱۵ دقیقه بعد در ساعت ۱۰:۱۵ نشان می‌دهد. دو سامانه ی فعال همرفتی تگرگ زا در نقاط A و B بر روی شکل مشاهده می‌شوند. یکی از این سامانه‌ها ی همرفتی (نقطه ی A) در شمال غربی ایستگاه مهر آباد به فاصله ی ۵/۴۵ کیلومتری از رادار با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب  $50/68^{\circ}E$  و  $35/80^{\circ}N$  قرار دارد. طبق شکل (۵)، الگوریتم والدوگل احتمال ۱۰۰٪ را برای وقوع پدیده ی تگرگ در این سامانه ارائه داده است. در شکل (۵) سامانه ی همرفتی دوم (نقطه B) در غرب ایستگاه مهرآباد و در ۱۸/۴ کیلومتری رادار در طول و عرض جغرافیایی به ترتیب  $50/96^{\circ}E$  و  $35/64^{\circ}N$  دیده می‌شود. با توجه به شکل احتمال وقوع تگرگ در این نقطه ۵۹/۸۴ درصد تعیین شده است.

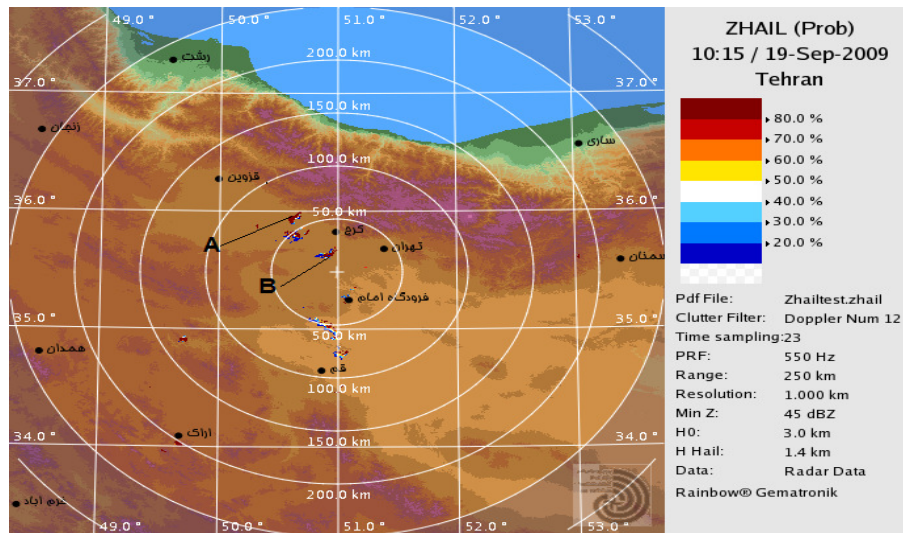
شکل (۶) احتمال وقوع تگرگ را در ۱۵ دقیقه بعد، در ساعت ۱۰:۳۰ نشان می‌دهد. نقاط A و B همان مناطق وقوع تگرگ در شکل (۵) می‌باشند که در این فاصله ی زمانی جابجا شده اند. در این زمان سامانه ی A در فاصله ۲۸/۸ کیلومتری از ایستگاه رادار، و به ترتیب در طول و عرض جغرافیایی  $51/16^{\circ}E$  و  $35/70^{\circ}N$  و سامانه ی B در فاصله ۶۲ کیلومتر و به ترتیب در طول و عرض جغرافیایی  $50/79^{\circ}E$  و  $36/06^{\circ}N$  قرار دارند. جهت وزش باد در منطقه غربی می‌باشد و سبب می‌شود این سیستم به سمت شرق حرکت کنند. طبق شکل (۶) احتمال وقوع تگرگ در سامانه ی A تغییری نکرده و ۱۰۰ درصد می‌باشد ولی در سامانه ی B احتمال وقوع تگرگ افزایش یافته و به مقدار ۱۰۰ درصد رسیده است. افزایش احتمال بیانگر رشد این سامانه در طی ۱۵ دقیقه سپری شده می‌باشد.

شکل (۷) احتمال وقوع تگرگ را ۱۵ دقیقه بعد، یعنی در ساعت ۱۰:۴۵ نشان می‌دهد. سامانه ی A به سمت شمال شرقی و سامانه ی B به سمت شرق حرکت کرده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود حرکت سامانه ی B به سمت شرق سبب شده است که در ساعت ۱۰:۴۵ در موقعیت ایستگاه مهر آباد قرار گیرد. ایستگاه در این ساعت، وقوع پدیده ی تگرگ را گزارش کرده است. احتمال محاسبه شده توسط الگوریتم والدوگل نیز برای نقطه B در این ساعت، ۱۰۰ درصد است که بیانگر دقت کافی این روش می‌باشد.

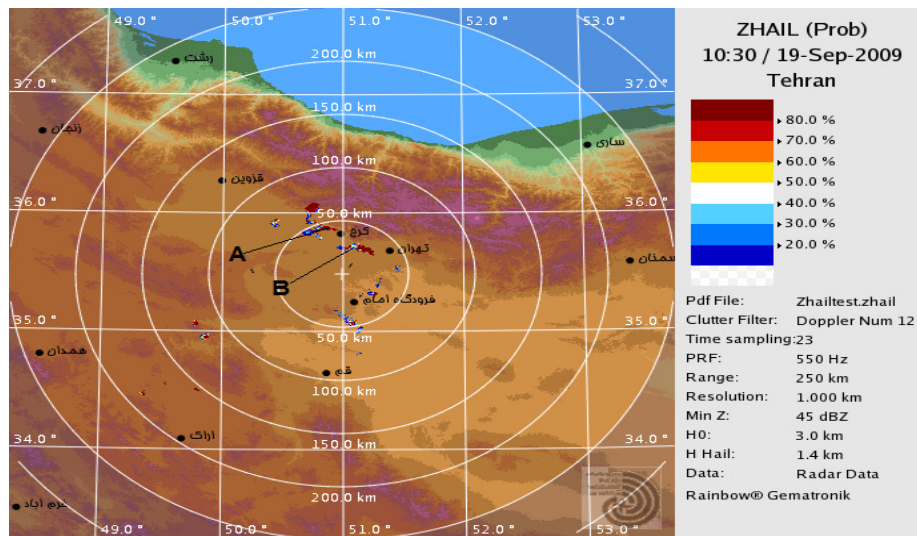




شکل ۵- محصول احتمال وقوع تگرگ در منطقه تهران برای تاریخ ۱۹ سپتامبر ۲۰۰۹ ساعت ۱۰:۰۰ UTC

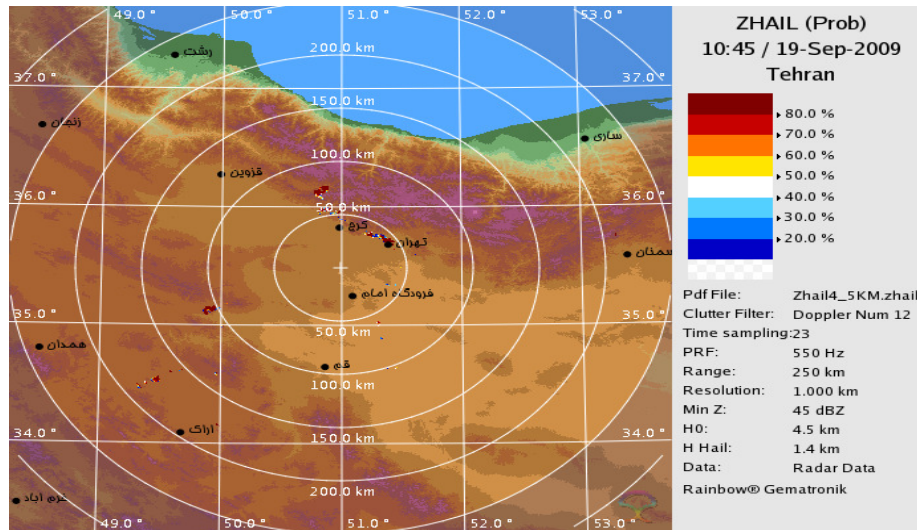


شکل ۶- محصول احتمال وقوع تگرگ در منطقه تهران برای تاریخ ۱۹ سپتامبر ۲۰۰۹ ساعت ۱۰:۱۵ UTC



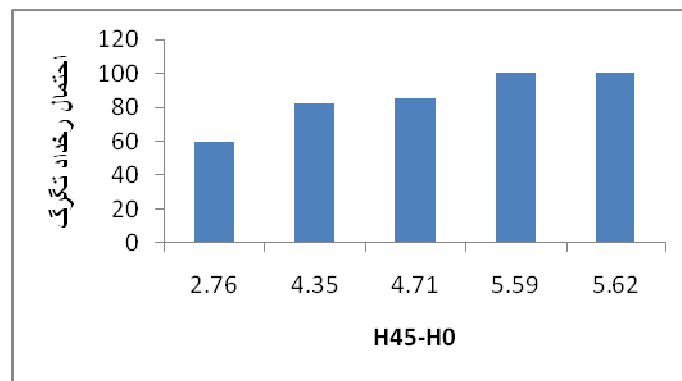
شکل ۷- محصول احتمال وقوع تگرگ در منطقه تهران برای تاریخ ۱۹ سپتامبر ۲۰۰۹ ساعت ۱۰:۳۰ UTC





شکل ۸- محصول احتمال وقوع تگرگ در منطقه تهران برای تاریخ ۱۹ سپتامبر ۲۰۰۹ ساعت ۱۰:۴۵ UTC

در مورد دو سامانه همرفتی بررسی شده توسط رادار تهران ارتفاع بازتابش راداری ۴۵dBZ اندازه گیری شد و ارتفاع تراز صفر نیز با استفاده از نمودار اسکیوتی، مقدار ۴/۵ کیلومتر بدست آمد. شکل (۹) اختلاف بیشینه ی ارتفاع بازتابش راداری ۴۵ dBZ و ارتفاع تراز دمای صفر را نشان می‌دهد. احتمال ۱۰۰ درصد وقوع تگرگ در منطقه تهران در  $\Delta H$  حدود ۴/۵۹ کیلومتر رخ داده است.



شکل ۹- نمودار ستونی اختلاف ارتفاع بازتابش ۴۵ dBZ و سطح دمای صفر

در جدول (۱) مشخصات نقاط بررسی شده توسط رادار تهران و محصولات راداری بدست آمده برای این نقاط در تاریخ ۱۹ سپتامبر ۲۰۰۹ آورده شده است

جدول ۱- محصولات رادار تهران در تاریخ ۱۹ سپتامبر ۲۰۰۹

درصد احتمال رخداد تگرگ	اختلاف ارتفاع $\Delta H$ (km)	بالاترین ارتفاع بازتابش dBZ $_{45}$	سطح دمای صفر km	زاویه سمت	فاصله از رادار km	ساعت
۱۰۰	۴/۵۹	۹/۰۹	۴/۵	۳۲۰/۴	۴۵/۵	۱۰:۱۵
۵۹/۸۴	۱/۷۶	۶/۲۶	۴/۵	۳۴۷/۵	۱۸/۴	۱۰:۱۵
۱۷.۸۲	۳/۳۵	۷/۸۵	۴/۵	۳۳/۷	۲۸/۸	۱۰:۳۰
۱۰۰	۵/۷	۱۰/۲	۴/۵	۳۳۸/۱	۶۴/۷	۱۰:۳۰
۸۵/۱۴	۳/۷۱	۸/۲۱	۴/۵	۵۰/۶	۴۲	۱۰:۴۵

در مورد سامانه همرفتی بررسی شده توسط رادار خزر شرقی ارتفاع بازتابش راداری ۴۵dBZ اندازه گیری شد و ارتفاع تراز صفر نیز با استفاده از نمودار اسکویوتی، مقدار ۳/۵ کیلومتر بدست آمد. در جدول (۲) محصولات رادار خزر شرقی در تاریخ ۱۲ اکتبر ۲۰۱۰ آورده شده است. مطابق این جدول احتمال ۱۰۰ درصد وقوع تگرگ در منطقه خزر شرقی در  $\Delta H$  حدود ۴/۸۹ کیلومتر رخ داده است.

جدول ۲- محصولات رادار خزر شرقی در تاریخ ۱۲ اکتبر ۲۰۱۰

درصد احتمال رخداد تگرگ	اختلاف ارتفاع $\Delta H$ (km)	بالاترین ارتفاع بازتابش dBZ $_{45}$	سطح دمای صفر km	زاویه سمت	فاصله از رادار km	ساعت
۸۵/۴۳%	۲/۷۴	۶/۲۴	۳/۵	۸۸/۶	۸۴	۲:۳۰
۱۰۰%	۴/۸۹	۸/۳۹	۳/۵	۹۱/۳	۸۸	۲:۳۰
۹۰%	۳/۵۹	۷/۰۹	۳/۵	۹۰	۸۸/۳	۲:۳۰
۳۴/۷%	۱/۵۲	۵/۰۲	۳/۵	۹۴/۵	۱۰۸	۲:۴۵
۷۹%	۲/۱۱	۵/۶۱	۳/۵	۹۰/۶	۱۰۲/۱	۲:۴۵

در مورد دو سامانه همرفتی بررسی شده توسط رادار اهواز ارتفاع بازتابش راداری ۴۵dBZ اندازه گیری شد و ارتفاع تراز صفر نیز با استفاده از نمودار اسکویوتی، مقدار ۴/۱ کیلومتر بدست آمد. در جدول (۳) محصولات رادار اهواز در تاریخ

۱۳ دسامبر ۲۰۱۰ آورده شده است. مطابق این جدول احتمال ۱۰۰ درصد وقوع تگرگ در منطقه اهواز در  $\Delta H$  حدود ۴ کیلومتر رخ داده است.

جدول ۳- مشخصات و محصولات رادار اهواز در تاریخ ۱۳ دسامبر ۲۰۱۰

درصد احتمال رخداد تگرگ	اختلاف ارتفاع $\Delta H$ (km)	بالاترین	سطح	زاویه سمت	فاصله از	
		ارتفاع بازتابش dBZ <sub>45</sub>	دمای صفر km		رادار	ساعت
۶۵/۷۵	۲/۱	۶/۲	۴/۱	۹۵/۹	۱۶۹	۱۰:۴۵
۱۰۰	۳/۷۵	۷/۸۵	۴/۱	۹۸/۸	۱۷۰	۱۰:۴۵
۵۷	۱/۱	۵/۲	۴/۱	۹۱	۱۷۱	۱۰:۴۵
۴۱	۰/۹	۵	۴/۱	۹۵/۹	۱۶۹	۱۱:۳۰
۵۷/۴۸	۱/۱۶	۵/۲۶	۴/۱	۹۴/۴	۱۸۴/۵	۱۱:۳۰

با توجه به مطالعه‌ی انجام شده پارامتر  $\Delta H$  (اختلاف ارتفاع بازتابش dBZ<sub>45</sub> و سطح دمای صفر) یک پارامتر بسیار مناسب برای تشخیص تگرگ می‌باشد و عملکرد مناسب رادار برای تشخیص تگرگ تایید می‌شود. این مسئله با مقایسه با گزارش‌های وقوع تگرگ و همچنین با استفاده از روش شاخص‌های ناپایداری مورد ارزیابی قرار گرفت.

### بحث و نتیجه گیری

درصد احتمال وقوع تگرگ بر مبنای اختلاف ارتفاع بازتابش dBZ<sub>45</sub> از ارتفاع تراز دمای صفر تعیین می‌شود. احتمال بارش تگرگ با افزایش ارتفاع بازتاب dBZ<sub>45</sub> بالای تراز صفر افزایش می‌یابد. والدوگل در معیار خود بازتابش راداری dBZ<sub>45</sub> را به تگرگ نسبت داد بنابراین هر چه ارتفاع این بازتابش نسبت به تراز دمای صفر بالاتر باشد نشان دهنده این است که تگرگ تا ارتفاعات بالاتری در سامانه‌ی همرفتی صعود کرده است. در این تحقیق وقوع قطعی تگرگ با مقدار  $\Delta H$  حدود ۴/۵ کیلومتر بدست آمد که بسته به نوع اقلیم منطقه می‌تواند تا ۱ کیلومتر تغییر کند. این اختلاف ارتفاع در مناطق سرد بیشتر از مناطق گرم است. طبق بررسی انجام شده توسط Witt (۱۹۹۸) برای رخداد قطعی تگرگ مقدار  $\Delta H$  برابر ۶ کیلومتر تعیین شد. و برای احتمالات کمتر برای وقوع تگرگ این اختلاف ارتفاع از این مقدار کمتر می‌باشد، این مقادیر همخوانی خوبی با نتایج این بررسی دارد. نتیجه دیگر اینکه معیار والدوگل در تشخیص تگرگ، در منطقه ایران دارای صحت قابل قبولی است بدین صورت که در مناطقی که طبق گزارشات سازمان هواشناسی تگرگ اتفاق افتاده است، از طریق استفاده از الگوریتم والدوگل محصول احتمال رخداد تگرگ (zhail) ۱۰۰ درصد بدست می‌آید که انطباق خوب الگوریتم را برای تشخیص تگرگ در منطقه ایران نشان می‌دهد.

در مقایسه با سایر بررسی‌های انجام شده روی پدیده تگرگ، چون پدیده تگرگ از نظر ابعاد در حد کوچک مقیاس می‌باشد و همچنین از نظر ابعاد زمانی نیز در حدود ۱۰-۲۰ دقیقه اتفاق می‌افتد، به وسیله رادار به طور پیوسته امکان دنبال کردن مسیر حرکت توفان و پیش‌آگاهی برای وقوع تگرگ با دقت زمانی و مکانی مناسب وجود دارد. در صورتی که در بررسی با شاخص‌های ناپایداری این شاخص برای ساعت‌های UTC ۰۰ و UTC ۱۲ بر اساس داده‌های گمانه زنی در جو محاسبه می‌شود بنابراین ممکن است تگرگ بین این دو ساعت اتفاق افتاده باشد و در این شرایط جو کاملاً متفاوت با آن چیزی است که در این دو ساعت مشاهده شده است.

در پایان پیشنهاد می‌شود با توجه به اهمیت تشخیص تگرگ، کارهای پژوهشی و مطالعاتی بیشتری برای مناطق مهم از نظر شهری و کشاورزی صورت گیرد، همچنین مطالعه بر روی روش‌های دیگر موجود در تشخیص تگرگ صورت گیرد و بین نتایج بدست آمده مقایسه انجام شود.

#### منابع

- کاشانی، ف. ۱۳۸۲. آشکار سازی رادار و سیستم‌های رد گیری. انتشارات فنی حسینیان. تهران، ایران.
- ریحانی پروری، م. ۱۳۸۸. اصول و کاربرد رادارهای هواشناسی. سازمان هوا شناسی کشور. تهران، ایران.
- Amburn, S.A. & Wolf, P. L. ۱۹۹۷. VIL density as a hail indicator. *Weather and Forecasting*, ۱۲: ۴۷۳-۴۷۸.
- Atlas, D., Rosenfeld, D., & Jameson, M. R. ۱۹۹۷. Evolution of radar rainfall measurements: steps and mis-steps. *Weather Radar Technology for Water Resources Management*, IRTCUD/University of Sao Paulo, Brazil and IHP-UNESCO.
- Battan, L. ۱۹۷۳. *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press. USA.
- Holleman, I. ۲۰۰۱. Hail detection using single-polarization radar. Scientific report, KNMI WR.USA.
- Lemon, L. R. ۱۹۷۷. New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: a preliminary report. NOAA Tech. Memo. NWS NSSFC-۱, National Severe Storms Forecast Center. Kansas City. USA.
- Paxton, C.H. & Shepherd, J.M. ۱۹۹۳. Radar diagnostic parameters as indicators of severe weather in central Florida. NOAA Technical Memorandum NWS SR-۱۴۹.

- Donavon, R. A. & Jungbluth, K. A. ۲۰۰۷. Evaluation of a technique for radar identification of large hail across the Upper Midwest and Central Plains of the United States. *Weather and Forecasting*, ۲۲: ۲۴۴-۲۵۴.
- Thompson, R. L., Edwards, R., Hart, J. A., Elmore, K. L. & Markowski, P. ۲۰۰۳. Close proximity soundings within super cell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Weather and Forecasting*, ۱۸: ۱۲۴۳-۱۲۶۱.
- Waldvogel, A., B. Federer, and P. Grimm: ۱۹۷۹, Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteor.* , ۱۸: ۱۵۲۱. ۱۵۲۵.
- Witt, A., Eilts, M. D. , Stumpf, G. J. , Johnson, J. T. , Mitchell, E. D. & Thomas, K. W. ۱۹۹۸. An enhanced hail detection algorithm for the wsr-۸۸d. *Weather and Forecasting*, ۱۳: ۲۸۶.۳۰۳

