

Identification of Clutter in Bushehr Weather Doppler Radars and Their Removal

Karimkhani, M.¹  | Rahnama, M.¹  

1. Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: meh.rahnama@gmail.com

(Received: 14 July 2025, Revised: 2 Aug 2025, Accepted: 18 Oct 2025, Published online: 16 Dec 2025)

Summary

The word Radar from the term Radio Detection and Ranging means target radio tracking and ranging, an electromagnetic system that is used to detect and determine the position and speed of a target. Most meteorological radars are of Pulse-Doppler type, which have the ability to detect the movement of raindrops and the intensity of precipitation. Both types of this information can be analyzed to determine the structure of the storm and its potential for producing severe weather. Also, Doppler type radars measure rainfall and wind direction and speed at certain times and in a wide area. These types of radars display the position of the target and reflectivity with the help of a computer by combining colors on the display screens (Reinhart, 1997). Ground echo is a challenge for meteorological radar data analysis, especially in hydrology and precipitation estimation. Therefore, the removal of ground clutter is a prerequisite for the use of meteorological radar for both quantitative and qualitative purposes. An important part in the quality control of radar data is the removal of clutter.

Several researches have been conducted to provide different algorithms for removing ground clutter and abnormal echoes emitted by radar data (Gabela and Notarpietro, 2002; Layton et al., 2013; Zheng et al., 2016; Kaman et al., 2018; Proft et al., 2019; Adaba et al., 2021; Xie et al., 2021; Wang et al., 2022; Yan et al., 2020).

The aim of the current research is to present a simple and fast algorithm by selecting the most appropriate thresholds to remove ground clutter and unusual echoes presented in radar reflection data, so that it has the least impact on showing meteorological phenomena.

In the present study, the effectiveness of removing ground clutter as well as determining the best thresholds has been quantitatively evaluated on the meteorological Doppler radar of Bushehr, located in the southwest of Iran.

This algorithm has been used in rainy condition (squall line event On March 19, 2017 at 04:00UTC) using the Bushehr Doppler Weather Radar data which includes spatial-proximity filter and compactness test. The spatial-continuity filter that is applied to each pixel eliminates data that are weakly and spatially correlated to the surrounding. Therefore, when the difference between each pixel and the surrounding pixels is less than a certain threshold (tr_1), its value is assumed to be a meteorological echo. The compactness test identifies adjacent pixels of not null intensity; thus, choosing a threshold level (tr_2) slightly greater than one, will eliminate most of the unwanted clutter. To determine the best threshold, (tr_1) for 3 to 8 values and tr_2 between 1.1 to 2.6 are examined.

Removal of ground noises in Bushehr weather Doppler radar reflection data (tr_1) equal to 3, 4, 5, 6, 7 and 8 and (tr_2) with a threshold of 1.1 for 04UTC on March 19, 2017 showed that the difference in tr_1 does not make a significant change in the removal of clutter.

Due to the fact that the change in tr_1 does not have much change in the removal of clutter, so in the following, tr_1 is equal to 8 and the change in tr_2 is examined. The results showed that the present algorithm has a significant ability to remove the ground clutter from the Doppler radar reflectivity data. Varying the tr_1 values from 3 to 8 did not have a significant effect on noise removal. This is likely due to the saturation of tr_1 after reaching a certain threshold, which may result from the homogeneity of the area's texture (coastal region). Also, in the examined thresholds, tr_1 equal to 8 and tr_2 equal to 1.8 has the best result by removing most ground clutters and unusual echoes in the radar reflectivity data, as well as preserving storm convective cells.

Keywords: Ground Clutter, Radar Reflectivity Radar, Squall line Event, Bushehr Doppler Weather Radar.

Cite this article: Karimkhani, M., & Rahnama, M. (2025). Identification of Clutter in Bushehr Weather Doppler Radars and Their Removal. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(3), 689- 701. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.398518.1007703>

E-mail: (1) mahnaz_karimkhany@yahoo.com



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.398518.1007703>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

شناسایی نوفه‌های موجود در رادارهای داپلر هواشناسی بوشهر و حذف آنها

مهناز کریم‌خانی^۱ | مهدی رهنما^۱✉

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: meh.rahnama@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۱۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۷/۲۶، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۹/۲۵)

چکیده

در پژوهش حاضر یک الگوریتم ساده برای از بین بردن نوفه‌های زمینی و آکوهای غیرعادی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار ارائه شده است به‌طوری‌که کمترین تأثیر را در حذف پدیده‌های هواشناسی داشته باشد. این الگوریتم در شرایط آسمان بارانی (پدیده خط تندوزه در تاریخ ۱۹ مارس ۲۰۱۷ ساعت ۰۴ UTC) با استفاده از داده‌های رادار داپلر هواشناسی بوشهر مورد استفاده قرار گرفته است که شامل دو فیلتر پیوستگی مکانی و تست فشردگی است. فیلتر پیوستگی مکانی برای هر پیکسل داده‌هایی را که از نظر مکانی، همبستگی ضعیفی با پیکسل‌های اطراف دارند حذف می‌کند بنابراین هنگامیکه تفاوت بین هر پیکسل با پیکسل‌های اطراف کمتر از یک آستانه مشخص (tr_1) باشد، مقدار آن یک اکوی هواشناسی فرض می‌شود. تست فشردگی پیکسل‌های مجاور با شدت غیر صفر را مشخص می‌کند بنابراین، انتخاب یک آستانه دوم (tr_2) بزرگ‌تر از یک، بیشتر نوفه‌ها را از بین می‌برد. جهت تعیین بهترین آستانه، tr_1 برای مقادیر ۳ تا ۸ و tr_2 بین ۱/۱ تا ۲/۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم حاضر توانایی قابل‌توجهی در حذف نوفه‌های داده‌های بازگشت‌پذیری رادار را دارد. تغییر مقادیر tr_1 در بازه ۳ تا ۸ تأثیر قابل‌توجهی بر حذف نوفه‌ها نشان نداد. این موضوع احتمالاً به دلیل اشباع شدن tr_1 پس از دستیابی به آستانه مشخص رخ می‌دهد، که می‌تواند ناشی از همگنی بافت منطقه مورد مطالعه (کنار دریا) باشد. همچنین آستانه tr_1 برابر با ۸ و tr_2 برابر با ۱/۸ با حذف بیشترین نوفه‌های زمینی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار و همچنین حفظ سلول‌های همرفتی، بهترین نتیجه را نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: نوفه‌های زمینی، داده‌های بازگشت‌پذیری رادار، پدیده خط تندوزه، رادار داپلر هواشناسی بوشهر.

۱. مقدمه

رادارهای هواشناسی از نوع پالسی-داپلری هستند که توانایی شناسایی حرکت قطره‌های باران و شدت بارش را دارند. همچنین رادارهای نوع داپلر در زمان‌های معین و در منطقه وسیع، میزان بارندگی و سمت و سرعت باد را اندازه‌گیری می‌کنند. این نوع رادارها به‌کمک رایانه موقعیت هدف و بازگشت‌پذیری را با ترکیب رنگ‌ها در صفحه‌های نمایشگر نمایان می‌سازند (رینهارت، ۱۹۹۷). اکو و نوفه‌های زمینی یک چالش برای تحلیل داده‌های رادار هواشناسی به‌ویژه در هیدرولوژی و تخمین بارش است. بنابراین حذف آنها یک پیش شرط برای استفاده از رادار هواشناسی هم برای اهداف کمی و هم برای اهداف کیفی است. چهار دسته خطا در داده‌های رادار به شرح زیر

کلمه Radar از عبارت Radio Detection And Ranging به معنای ردیابی و مسافت‌یابی رادیویی هدف است، یک سامانه الکترومغناطیسی که برای تشخیص و تعیین موقعیت و همچنین سرعت حرکت هدف به کار می‌رود. رادار هواشناسی سامانه سنجش از دوری است که با ارسال امواج الکترومغناطیس و دریافت آن، اطلاعات مفیدی از هدف‌های متحرک و ساکن به ما می‌دهد. رادارهای هواشناسی برای مکان‌یابی بارش، محاسبه حرکت آن و تخمین نوع آن (باران، برف، تگرگ و غیره) به کار می‌رود که از مزیت‌های آن پیوستگی زمانی و مکانی اندازه‌گیری‌ها است که به عنوان داده‌های تکمیلی در پیش‌بینی دقیق‌تر مکان و زمان وقوع پدیده‌های جوی به کار می‌رود. بیشتر

سخت‌افزاری که با استفاده از صافی در مرحله ریزموج‌ها نوفه‌های ناخواسته را حذف کنند.

طراحی نرم‌افزاری برای رفع خطاهای ایجاد شده بر روی داده‌های نهایی رادار مانند بازگشت‌پذیری و سرعت شعاعی.

راهکارهای اول و دوم ذکر شده، نیازمند انتخاب مناسب ملزومات سخت‌افزاری و مکان نصب رادار است که معمولاً با دقت انجام می‌گیرد ولی در شرایطی که بعد از نصب رادار اختلالات الکترومغناطیسی رخ دهد، مهم‌ترین اقدام ضروری و قابل‌اجرا استفاده از راهکار سوم یعنی اصلاح داده‌های خروجی رادار است (صفر و همکاران، ۱۳۹۴).

یک راه‌حل ساده برای حذف نوفه‌ها استفاده از نقشه نوفه ایستا است که از مجموعه‌ای از تصاویر رادار در شرایط آسمان صاف (به‌عنوان مثال نقشه متوسط نوفه زمینی) تعیین می‌شود. نوسانات بزرگ و سریع کوتاه‌مدت نوفه یک مشکل جدی در انتخاب آستانه حذف ایجاد می‌کند: در طول اندازه‌گیری‌های گسترده با رادار باند C غیر داپلر، تعیین شده که آستانه‌ای که $3/5$ دسی بل بزرگ‌تر از میانگین سطح مقطع نوفه زمینی باشد، ۹۰ درصد اکوهای نوفه زمینی را حذف می‌کند. غالباً با استفاده از یکی از توزیع‌های ریلی (والاس، ۱۹۵۳)، رایس (کر، ۱۹۸۷)، لوگ نرمال (لینل، ۱۹۶۶)، ویبول (بوت، ۱۹۶۹) می‌توان توزیع اکوهای متغیر زمانی را تنظیم کرد. در روش نقشه ایستا به‌وضوح نوفه‌ها باقی می‌مانند و مقدار قابل‌توجهی از بارش تجمعی حذف می‌شود.

گئوتیس و سیلور (۱۹۷۶). یک روش کارآمدتر برای حذف اثر نوفه‌های زمینی، با عنوان تشخیص و حذف سیگنال اکو مربوط به نوفه‌های زمینی را ارائه کردند. در این زمینه، استفاده از راداری با تفکیک بالا (100 m) و اطلاعات سرعت داپلر، احتمال داشتن حداقل اطلاعات راداری بدون نوفه برای هر پیکسل از محصول عملیاتی دکارتی را به حداکثر می‌رساند.

جاس و لی (۱۹۹۵) یک رویکرد پیچیده و کارآمد ارائه کردند که تمام اطلاعات موجود در مورد بازگشت‌پذیری رادار را ترکیب می‌کند. الگوریتم درخت تصمیم با یک

هستند (صفر و همکاران، ۱۳۹۴):

- دسته اول خطاهایی که مربوط به مشخصات فنی رادار است، عبارت‌اند از:

(۱) نوفه سخت‌افزاری رادار حاصل از مقاومت گرمایی قطعات الکترونیکی، دقت آنتن، دقت در پردازش سیگنال (جیکت و همکاران، ۲۰۰۴)

(۲) خطاهای نامرتبط با پدیده‌های جوی نظیر اختلال الکترومغناطیسی ناشی از تابش خورشید، گسیلنده‌های ریزموج ساخت بشر و تضعیف به‌علت خیس‌بودن و یخ‌زدگی پوشش آنتن (جرمن و جوس، ۲۰۰۴؛ هوبرت و همکاران، ۲۰۰۳)

(۳) انتشار ناهمگون باریکه رادار به‌دلیل گرادیان دما و رطوبت و همچنین بازگشت‌پذیری‌های ناشی از حرکت پرندگان و حشرات (بینگتون و همکاران، ۲۰۰۷).

- دسته دوم از خطاها مربوط به راهبرد پویش راداری، هندسه باریکه رادار و درونیایی داده‌ها است (بیچ و همکاران، ۲۰۰۷).

- دسته سوم خطاها ناشی از چگونگی رفتار یک پدیده جوی در مقایسه با هندسه باریکه راداری است.

- دسته چهارم خطاها اختصاص به پدیده‌های جوی دارد که بصورت مستقیم داده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند و شامل موارد

(۱) تضعیف ناشی از فازهای مختلف بارش و همچنین تضعیف به‌علت طول موج و توان رادار، بخصوص در نوارهای بسامد c و x که باعث فروتخمین بارش می‌شود.

(۲) تعیین رابطه بین بارش و برگشت‌پذیری راداری

(۳) نوع بارش همرفتی و یا پوششی (شالک و همکاران، ۲۰۰۴)، است.

به‌صورت کلی برطرف کردن خطاهای شرح داده شده در محصولات راداری از سه راه امکان‌پذیر است (اشتینر و اسمیت، ۲۰۰۲):

مکان‌یابی مناسب و نصب رادار در منطقه‌ای که کمترین تداخل و مانع طبیعی در مسیر انتشار امواج وجود داشته باشد.

انجام اصلاحات و طراحی مدارها و سامانه‌های

نقشه نوفه تطبیقی ترکیب شده و تمام شبکه رادار هواشناسی سوئیس (جاس و کاتوز، ۱۹۹۸) از این الگوریتم و از مؤلفه داپلر (شعاعی) سرعت موردنظر، پهنای طیف، کمینه سیگنال قابل تشخیص، نوسانات سیگنال یک و دو تأخیری، و گرادیان قائم بازگشت پذیری و همچنین یک نقشه نوفه وقوع استفاده می کند. این نقشه شامل یک شمارنده برای هر رادار است که با هر انتخاب قاطعی که در سیستم طبقه بندی درخت تصمیم انجام شود، به روزرسانی می شود، اما تنها در صورتی مورد بررسی قرار می گیرد که هیچ یک از تصمیمات موجود در درخت قطعی نباشد.

صفر و همکاران (۱۳۹۵) به کنترل کیفی داده های رادار هواشناسی تهران با استفاده از ساختار افقی و قائم برگشت پذیری پرداختند. نتایج این پژوهش نشان دهنده رفع مناسب نوفه های ناشی از کلاترهای ثابت و انتشار ناهمگون امواج راداری و همچنین نوفه های نقطه ای و محلی است. صافی به کار رفته، نوفه این منطقه را نیز به خوبی کاهش داده و در نتیجه کیفیت داده ها را اصلاح کرده است. میزان کارایی صافی ها بستگی به تنظیم آستانه حساسیت آنها دارد که بنا به کاربرد داده ها تنظیم پذیر است.

الگوریتم های مختلفی در مقالات متعدد (گابلا و نوتاریپترو، ۲۰۰۲؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ کامان و همکاران، ۲۰۱۸؛ پرافت و همکاران، ۲۰۱۹؛ یان و همکاران، ۲۰۲۰؛ آدبا و همکاران، ۲۰۲۱؛ خی و همکاران، ۲۰۲۱؛ زرکاوسکی و همکاران، ۲۰۲۱؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴) جهت حذف نوفه های زمینی و اکوهای غیرعادی منتشر شده ارائه شده است.

هدف پژوهش حاضر ارائه یک الگوریتم ساده و سریع با انتخاب مناسب ترین آستانه ها برای حذف نوفه های زمینی و اکوهای غیرعادی منتشر شده در داده های بازگشت پذیری رادار، به طوری که کمترین تأثیر را در حذف پدیده های هواشناسی داشته باشد.

۲. روش پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

در مطالعه حاضر، اثربخشی حذف نوفه های زمینی و همچنین تعیین برترین آستانه به طور کمی بر روی داده های بازگشت پذیری رادار داپلر هواشناسی بوشهر واقع در جنوب غربی ایران ارزیابی شده است. رادار داپلر باند C بوشهر در ارتفاع ۱۳۰ متر از سطح دریا در ۲۸/۹۴ درجه شمالی و ۵۰/۹۱ درجه شرقی واقع شده است. رادار بوشهر جنوب غرب ایران (خلیج فارس و استان بوشهر) را پوشش می دهد. داده های بازگشت پذیری آن هر ۱۵ دقیقه با تفکیک مکانی یک کیلومتر و زاویه ارتفاعی ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۱/۳، ۱/۷، ۲، ۲/۲، ۲/۸، ۳/۵، ۵/۳، ۶، ۷، ۸/۲، ۹/۵، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸، ۲۵ و ۴۰ درجه تولید می شود.

۲-۲. معرفی الگوریتم برای حذف نوفه های زمینی و

اکوهای غیرعادی منتشر شده از داده های بازگشت پذیری رادار هواشناسی

استفاده از معادلات پایه راداری (Radar Equation) می تواند مبنای مناسبی برای توصیف منشأ نوفه های زمینی باشد. بر اساس معادله کلاسیک رادار:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^2 L} \quad (1)$$

که در آن P_r توان برگشتی دریافت شده، P_t توان فرستنده، G بهره آنتن، λ طول موج، σ سطح مقطع راداری (RCS) هدف یا موانع، R فاصله تا هدف و L تلفات سیستم است. در نوفه های زمینی، مقدار σ به دلیل بازتاب های شدید از عوارض زمینی (کوه، ساختمان، زمین مرطوب) بسیار بزرگ است، در حالی که سرعت نسبی هدف تقریباً صفر است. به همین دلیل با وجود استفاده از فیلترهای داپلر، بخش بزرگی از انرژی برگشتی در بازه سرعت صفر باقی می ماند و به صورت نوفه مشاهده می شود.

شکل ۱ مراحل مختلف شناسایی نوفه های موجود در رادارهای هواشناسی بر مبنای الگوریتم گابلا و نوتاریپترو (۲۰۰۲) را نشان می دهد. در ادامه در خصوص هر مرحله به طور کامل توضیح داده می شود.



شکل ۱. مراحل مختلف شناسایی نوفه‌های موجود در رادارهای هواشناسی.

صورت، پیکسل تحت تأثیر نوفه زمینی در نظر گرفته شده و یک پرچم (Flag) جایگزین مقدار آن می‌شود. انتخاب آستانه مشخص باید براساس ابزارهایی باشد که قادر به تعیین کمیت تداوم مکانی میدان‌های بارش از طریق تحلیل شاخص‌های آماری چند مقیاسی باشند (به‌عنوان مثال، طیف قدرت فوریه فضایی، تابع ساختار تعمیم یافته، تجزیه و تحلیل مقیاس گشتاور، هریس و همکاران، ۲۰۰۱). جرمن و جوز (۲۰۰۱) حذف نوفه‌های زمینی را براساس مطالعه مبتنی بر واریوگرام انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که اگر هر پیکسل نسبت به ۸ پیکسل اطراف با فاصله حدود یک کیلومتر در نظر گرفته شود، برای یک سیستم همرفتی میان مقیاس (در حدود ۱ ساعت و بیشتر) واریانس میانگین از ۶dBZ بزرگ‌تر نیست. بنابراین انتخاب آستانه و پنجره به وضوح می‌تواند بر روند حذف نوفه تأثیرگذار باشد. گابلا و نوتارپیترو (۲۰۰۲) با بررسی ویژگی‌های حذف نوفه‌های زمینی رادارهای هواشناسی بیان کردند که انتخاب آستانه باید در محدوده بین ۳ تا ۹dBZ و پنجره بین ۶ تا ۱۰ پیکسل اطراف باشد. در پژوهش حاضر یک پنجره ۸×۸ در نظر گرفته می‌شود و tr_1 بین ۳ تا ۸ (۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸) جهت تعیین برترین آستانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بخش دوم الگوریتم، پیکسل‌های مجاور با شدت غیر صفر را مشخص می‌کند: اگر پیکسل‌ها به هر یک از هشت جهت ممکن (از جمله جهت‌های مورب) برخورد کنند، به یک گروه تعلق می‌گیرند. نسبت (R) (تعداد کل پیکسل‌های

الگوریتم بر این واقعیت استوار است که نوفه‌های زمینی و اکوهای غیرعادی منتشر شده به سرعت با یکدیگر ادغام شده و تا حد زیادی از نظر مکانی ناهمگن هستند. نشانه وجود آنها در داده‌های بازگشت‌پذیری قابل شناسایی است، زیرا تغییرات مکانی آنها بزرگ‌تر از اکوهای هواشناسی است. این تکنیک بر تغییرپذیری مکانی افقی میدان بازگشت‌پذیری رادار متمرکز است. از این رو، باید فقط برای داده‌های بازگشت‌پذیری با ارتفاع یکسان اعمال شود. با این حال، مشاهده می‌شود که حتی زمانی که برای داده‌های بازگشت‌پذیری که دقیقاً به یک ارتفاع تعلق ندارند (به‌عنوان مثال داده‌های بیشینه بازگشت-پذیری) اعمال می‌شود، نیز مؤثر است. این الگوریتم به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش اول فیلتر "پیوستگی مکانی (Spatial-continuity)" و بخش دوم فیلتر "تست فشردگی".

فیلتر پیوستگی مکانی که برای هر پیکسل اعمال می‌شود، داده‌هایی را که از نظر مکانی همبستگی ضعیفی با پیکسل‌های اطراف دارند حذف می‌کند. برای این منظور، به‌عنوان مثال یک پنجره ۵×۵ پیکسلی (n_p) در اطراف پیکسل مورد نظر در نظر گرفته می‌شود (یا bin)، اگر داده‌های بازگشت‌پذیری قطبی تجزیه و تحلیل شوند). زمانی که تفاوت بین هر پیکسل با پیکسل‌های اطراف در پنجره ۵×۵ کمتر از یک آستانه مشخص (tr_1) باشد، مقدار آن یک پژواک هواشناسی فرض می‌شود. در غیر این

گروه به تعداد پیکسل‌هایی که مرز آن‌را مشخص می‌کنند) برای هر گروه تعریف می‌شود. در تعدادی از نقشه‌های راداری تأیید شده است که گروه‌های نوفه باقی مانده اغلب R نزدیک به ۱ دارند (گابلا و نوتارپیترو، ۲۰۰۲). بنابراین، انتخاب یک سطح آستانه دوم (tr_2) کمی بزرگ‌تر از یک، بیشتر نوفه‌های ناخواسته را از بین می‌برد. سلول‌های توفان‌های تندری بسیار کوچک با عمر متوسط حدود نیم‌ساعت و امتداد جانبی چند کیلومتر مربع متأسفانه با این روش حذف می‌شوند. در پژوهش حاضر مقدار tr_2 بین ۱/۱ تا ۲/۶ (۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴ و ۱/۵، ۱/۶، ۱/۸، ۱/۹، ۲/۵ و ۲/۶) جهت تعیین مناسب‌ترین آستانه بررسی می‌شود.

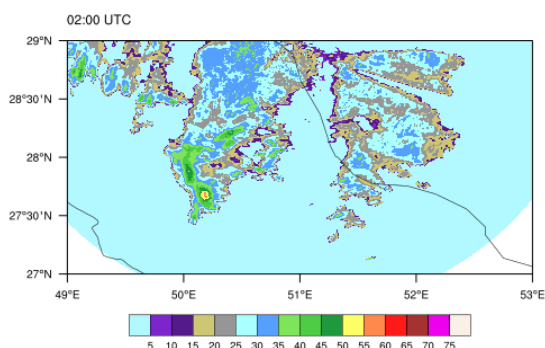
۳. بحث

۳-۱. بررسی موردی در پدیده خط تندوزه تشکیل شده

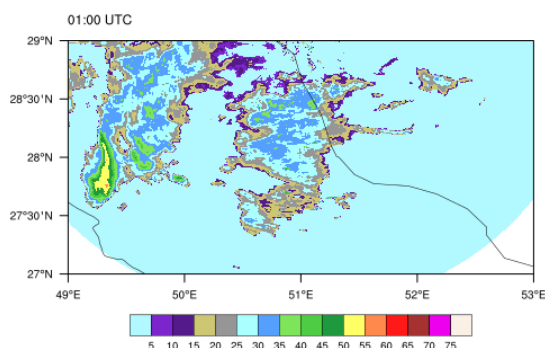
در تاریخ ۱۹ مارس ۲۰۱۷

شکل ۲ توزیع مکانی و زمانی بازگشت‌پذیری در زاویه

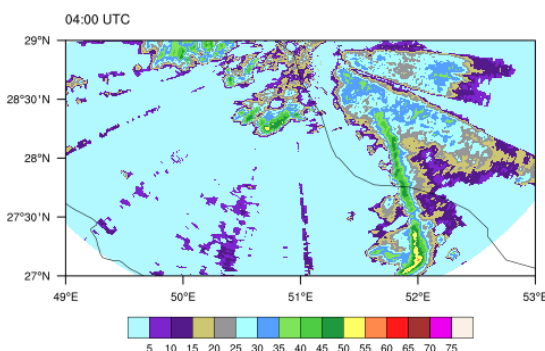
ارتفاعی ۰/۵ درجه مشاهده شده در رادار هواشناسی بوشهر را در ساعت‌های UTC ۰۱:۰۰ تا UTC ۰۴:۰۰ (بازه زمانی یک ساعته) در روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ (تولید، رشد و گسترش پدیده خط تندوزه) نشان می‌دهد. سلول‌های همرفتی بر روی غرب خلیج فارس در ساعت UTC ۰۰:۰۰ تشکیل می‌شوند. سپس این سلول‌ها رشد کرده و به سمت شرق حرکت کرده‌اند (شکل ۲-الف و ۲-ب) در ساعت UTC ۰۲:۳۰ و UTC ۰۳:۰۰ در مرکز خلیج فارس یک خط تندوزه شکل گرفته است (شکل ۲-پ). خط تندوزه بر روی بندر دیر در حدود ساعت‌های UTC ۰۴:۰۰ مشاهده می‌شود. این پدیده از ساعت UTC ۰۵:۰۰ شروع به تضعیف می‌کند. گذر خط تندوزه، باد قوی و نشست هوای سرد بر روی خلیج فارس، منجر به شکل‌گیری یک موج ایستاده و پدیده سیش بر روی بندر دیر شده است. بر روی شکل ۲ نوفه‌های زمینی و اکوهای غیرعادی (شکل ۲-پ و ۲-ت) به رنگ بنفش در جنوب و جنوب شرق تصویر به صورت خط‌های ممتد مشاهده می‌شود.



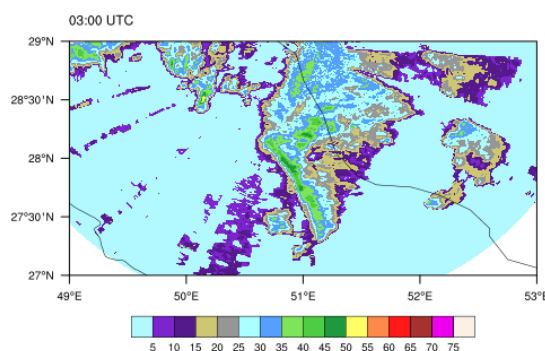
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۲. سری زمانی بازگشت‌پذیری مشاهده شده در رادار بوشهر در زاویه ارتفاعی ۰/۵ درجه برای ساعت‌های (الف) ۰۱:۰۰، (ب) ۰۲:۰۰، (پ) ۰۳:۰۰ و (ت) ۰۴:۰۰ به وقت UTC در تاریخ ۱۹ مارس ۲۰۱۷.

است. فشار سطح دریا در ساعت UTC ۰۳:۰۰ با مقدار ۱۰۱۱/۸ هکتوپاسکال کمترین مقدار خود را در ساعت UTC ۰۳ نشان داده است به عبارتی یک ساعت قبل از گذر خط تندوزه از روی ایستگاه فشار به کمترین مقدار خود رسیده و مجدداً افزایش یافته است. بنابراین کمیت‌های دما، سمت و سرعت باد و فشار سطح دریا رخداد پدیده خط تندوزه در ایستگاه همدید بندر دیر در ساعت UTC ۰۴:۰۰ را تأیید می‌کنند.

شکل ۳ بازگشت‌پذیری همراه با نوفه‌های زمینی در ساعت UTC ۰۴ روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ مربوط به رادار داپلر هواشناسی بوشهر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است خطوط یکپارچه در جنوب (A و B)، جنوب‌غربی (C، D و E)، غرب (F) و شمال شرقی (G و H) که بیانگر نوفه‌های راداری هستند، دیده می‌شود. دایره قرمز رنگ (Cell) در شکل ۳ نشان‌دهنده سلول همرفتی است،

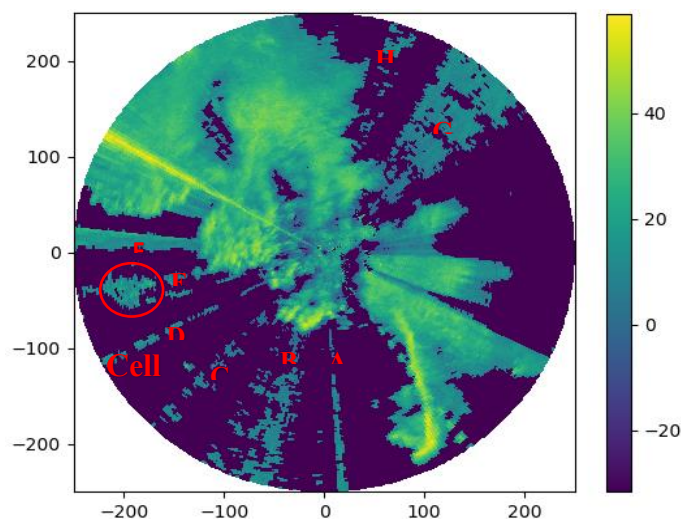
(الگوی بازتاب در این ناحیه دارای شکلی تقریباً گرد، منسجم، در فاصله‌ای دورتر از مرکز و به صورت لکه‌ای منفرد و مستقل است. چنین ساختاری مشخصه‌ی سامانه‌های همرفتی است، در حالی که نوفه‌ها معمولاً به صورت نقاط پراکنده، نزدیک به مرکز (محل استقرار رادار) یا در امتداد خطوط شعاعی ظاهر می‌شوند و انسجام مکانی ندارند) بنابراین نباید در حذف نوفه‌های زمینی به اشتباه حذف شود.

جدول ۱ داده‌های دیدبانی شده دما، سمت و سرعت باد افقی و فشار سطح دریا را از ساعت UTC ۰۰:۰۰ تا UTC ۰۶:۰۰ روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ در ایستگاه همدید بندر دیر نشان می‌دهد. طبق تصاویر رادار در ساعت UTC ۰۴:۰۰ روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ رخداد خط تندوزه در ایستگاه بندر دیر رؤیت شده است. مطابق با جدول ۱ دما در ساعت UTC ۰۳:۰۰ ۲۴ درجه سلسیوس، در ساعت UTC ۰۴:۰۰ به مقدار ۲۰ درجه سلسیوس و در ساعت UTC ۰۵:۰۰ به ۲۳ درجه سلسیوس رسیده است. مقدار دما در سه ساعت متوالی نشان می‌دهد که در زمان رخداد خط تندوزه (UTC ۰۴:۰۰) دما به میزان ۴ درجه سلسیوس کاهش یافته و مجدداً تا یک ساعت بعد از عبور از بندر دیر ۳ درجه افزایش داشته است. سرعت باد در ساعت‌های UTC ۰۳:۰۰، ۰۴:۰۰ و ۰۵:۰۰ به ترتیب برابر با مقادیر ۳/۰۵، ۶/۱۱ و ۳/۵ متر بر ثانیه ثبت شده است که این مقادیر نشان می‌دهند که سرعت باد در زمان رخداد خط تندوزه در ایستگاه همدیدی بندر دیر در حدود ۳ متر بر ثانیه افزایش داشته است و مجدداً تا یک ساعت بعد و گذشتن خط تندوزه از روی ایستگاه به اندازه ۳ متر بر ثانیه کاهش یافته است. با توجه به مقادیر سمت باد از ساعت UTC ۰۰:۰۰ تا ساعت UTC ۰۶:۰۰ قابل مشاهده است که سمت باد از ۵۰ درجه (شمال شرقی) در ساعت UTC ۰۱:۰۰ به ۳۰۰ درجه (شمال غربی) در ساعت UTC ۰۴:۰۰ تغییر جهت داشته

جدول ۱. دما (°C)، سمت باد افقی، سرعت باد افقی (m/s) و فشار سطح دریا (hPa) در ایستگاه همدیدی بندر دیر از ساعت ۰۰:۰۰ تا ۰۶:۰۰

UTC روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷

فشار سطح دریا (hPa)	سمت باد	سرعت باد افقی (m/s)	دما (°C)	ساعت (UTC)
۱۰۱۳	۲۸۰	۲	۲۳	۰۰:۰۰
۱۰۱۲	۵۰	۳	۱۷	۰۱:۰۰
۱۰۱۲	۳۱۰	۲	۱۸	۰۲:۰۰
۱۰۱۱/۸	۳۴۰	۳/۰۵	۲۴	۰۳:۰۰
۱۰۱۳	۳۰۰	۶/۱۱	۲۰	۰۴:۰۰
۱۰۱۳	۲۹۰	۳/۵	۲۳	۰۵:۰۰
۱۰۱۳/۲	۳۴۰	۵/۴	۲۳/۲	۰۶:۰۰

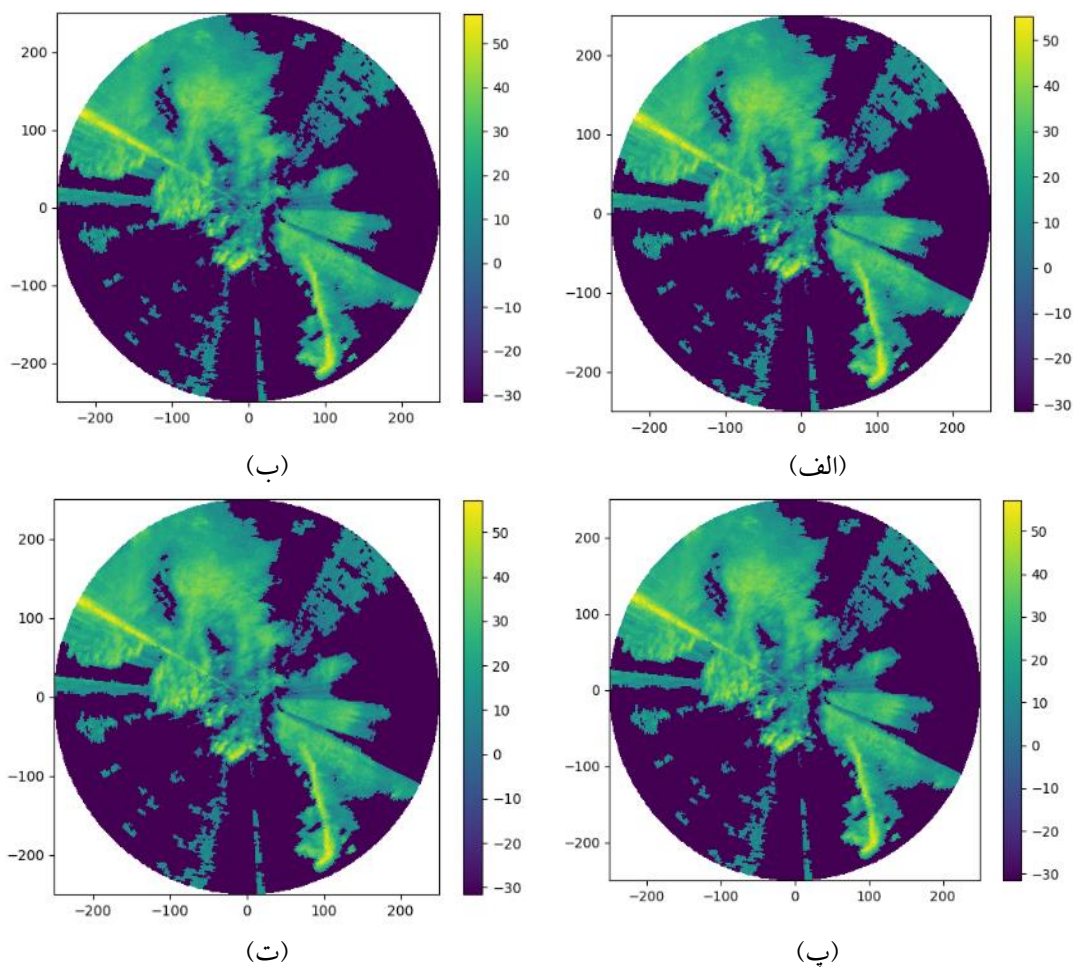


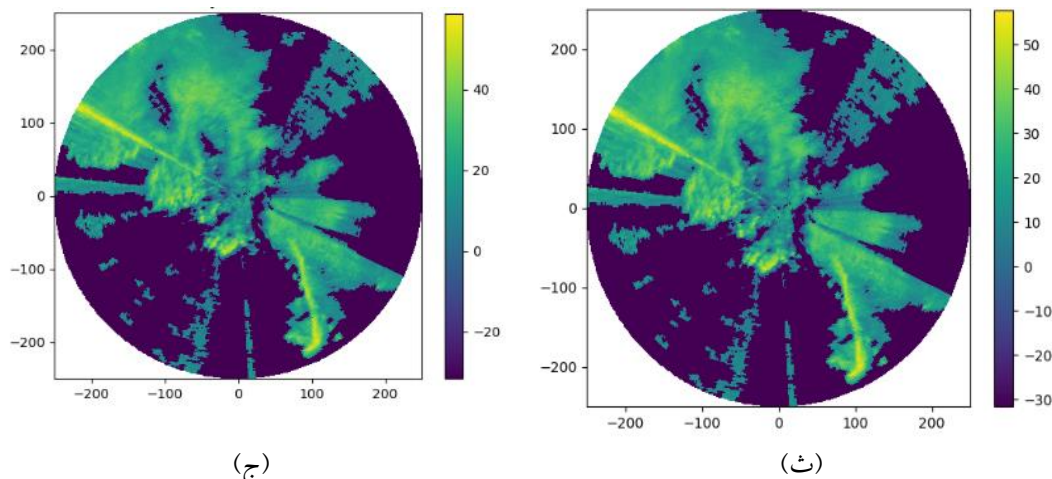
شکل ۳. تصویر بازگشت‌پذیری همراه با نوفه‌های زمینی در ساعت ۰۴ UTC روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷.

۲-۳. اعمال فیلتر پیوستگی مکانی

۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. با مقایسه اشکال با یکدیگر مشاهده می‌شود که تفاوت در tr_1 تغییر قابل توجهی در حذف نوفه‌ها ایجاد نمی‌کند.

شکل ۴ حذف نوفه‌های زمینی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار داپلر هواشناسی بوشهر برای tr_1 برابر با ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ و tr_2 با آستانه ۱/۱ برای ساعت ۰۴ UTC روز ۱۹ مارس





شکل ۴. حذف نوفه‌های زمینی داده‌های بازگشت‌پذیری برای tr_1 برابر با الف (۳، ب) ۴، پ) ۵، ت) ۶، ث) ۷ و ج) ۸ و tr_2 برابر با ۱/۱ در ساعت ۰۴ UTC روز ۷ مارس ۲۰۱۷ در رادار هواشناسی بوشهر.

Cell در شکل ۳ که یک سلول همرفتی است با حذف نوفه‌های اطرافش از بین نرفته است. در شکل ۵-پ که مربوط به tr_2 برابر با ۱/۳ است، به‌طور کامل نوفه‌های A، C، D، E و H حذف شده‌اند و هیچ اثری از آنها قابل مشاهده نمی‌باشد. در خصوص نوفه B بخش قابل توجهی از نوفه‌ها از بین رفته است. همچنین Cell در شکل ۳ که یک سلول همرفتی است با حذف نوفه‌های اطرافش از بین نرفته است.

در شکل ۵-ت که مربوط به tr_2 برابر با ۱/۴ است، بخش بیشتری از نوفه B از بین رفته است. همچنین Cell در شکل ۳ که یک سلول همرفتی است با حذف نوفه‌های اطرافش از بین نرفته است.

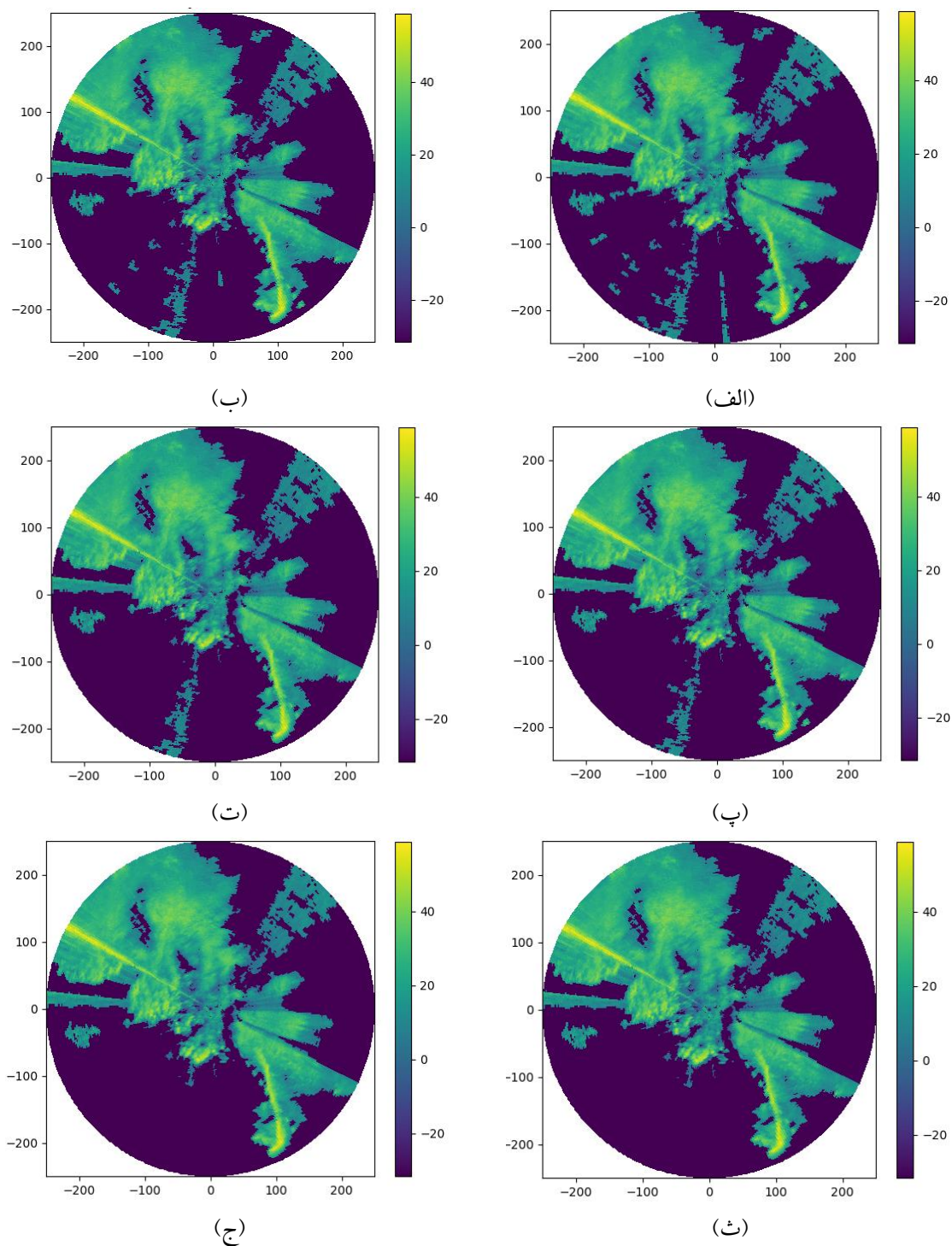
در شکل ۵-ث و ۴-ج که مربوط به tr_2 برابر با ۱/۵ و ۱/۶ است، به‌طور کامل نوفه B نیز از بین رفته است. همچنین Cell در شکل ۳ که یک سلول همرفتی است با حذف نوفه‌های اطرافش از بین نرفته است. تفاوت قابل توجهی در حذف نوفه‌ها با tr_2 ۱/۵ و ۱/۶ مشاهده نمی‌شود. همچنان نوفه F و G قابل رؤیت هستند.

با انجام تحلیل حساسیت روی داده‌های بازگشت‌پذیری رادار بوشهر مشاهده شد که افزایش tr_1 از ۳ تا ۸ تأثیر معناداری بر فیلتر مرحله اول ندارد؛ لذا برای جداسازی اثر پارامترها و جلوگیری از حذف کاذب سلول‌های کم‌انعکاس، tr_1 برابر با ۸ به‌عنوان مقدار ثابت و محافظه‌کارانه انتخاب شد و بررسی عملکرد از طریق tr_2 انجام گرفت.

۳-۳. اعمال فیلتر تست فشردگی

شکل ۵ حذف نوفه‌های زمینی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار داپلر هواشناسی بوشهر برای tr_1 برابر با ۸ و tr_2 با آستانه‌های ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵ و ۱/۶ برای ساعت ۰۴ UTC روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف که مربوط به tr_2 برابر با ۱/۱ است، بخشی از نوفه‌های A، B، C، D، E و H حذف شده‌اند.

در شکل ۵-ب که مربوط به tr_2 برابر با ۱/۲ است، بخش بیشتری از نوفه‌های A، B، C و H حذف شده‌اند. در خصوص نوفه‌های D و E کل نوفه‌ها از بین رفته و هیچ اثری از آنها قابل مشاهده نمی‌باشد. همچنین قابل توجه است که



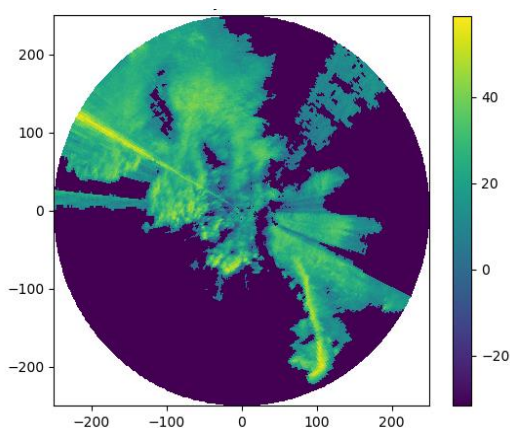
شکل ۵. حذف نوفه‌های زمینی داده‌های بازگشت‌پذیری برای tr_1 برابر با ۸ و tr_2 (الف) ۱/۱، (ب) ۱/۲، (پ) ۱/۳، (ت) ۱/۴، (ث) ۱/۵ و (ج) ۱/۶ در ساعت ۰۴ UTC روز ۷ مارس ۲۰۱۷ در رادار هواشناسی بوشهر.

مارس ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. از مقایسه شکل ۶-ب و شکل ۷-الف تفاوت قابل توجهی در حذف نوفه G مشاهده نمی‌شود ولی با تغییر آستانه از ۲/۵ به ۲/۶ بخش قابل توجهی از نوفه G حذف شده است اما در این آستانه نیز Cell از بین رفته است.

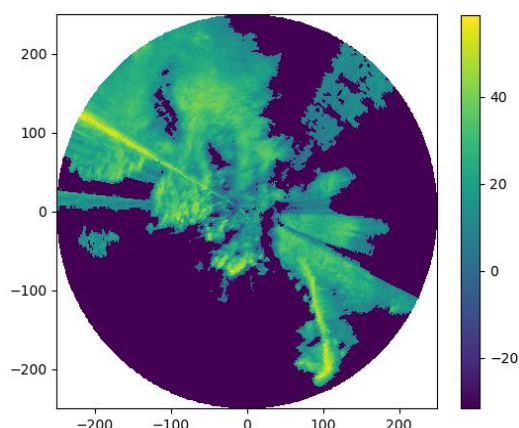
مقایسه حذف نوفه‌ها با تغییر tr_2 نشان می‌دهد که با افزایش مقدار tr_2 می‌توان نوفه‌های بیشتری را حذف کرد اما در کنار حذف نوفه‌ها ممکن است سلول‌های همرفتی نیز حذف شوند.

شکل ۶ حذف نوفه‌های زمینی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار داپلر هواشناسی بوشهر برای tr_1 برابر با ۸ و tr_2 با آستانه‌های ۱/۸ و ۱/۹ برای ساعت ۰۴ UTC روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است با افزایش tr_2 از ۱/۸ به ۱/۹ که یک سلول همرفتی می‌باشد، کاملاً حذف شده است.

شکل ۷ حذف نوفه‌های زمینی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار داپلر هواشناسی بوشهر برای tr_1 برابر با ۸ و tr_2 با آستانه‌های ۲/۵ و ۲/۶ برای ساعت ۰۴ UTC روز ۱۹

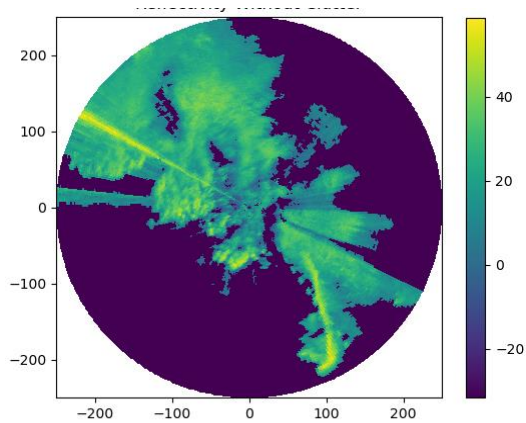


(ب)

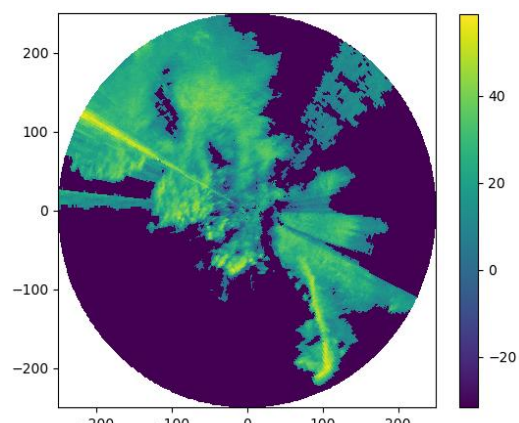


(الف)

شکل ۶. حذف نوفه‌های زمینی داده‌های بازگشت‌پذیری برای tr_1 برابر با ۸ و tr_2 (الف) ۱/۸ و (ب) ۱/۹ در ساعت ۰۴ UTC روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ در رادار هواشناسی بوشهر.



(ب)



(الف)

شکل ۷. حذف نوفه‌های زمینی داده‌های بازگشت‌پذیری برای tr_1 برابر با ۸ و tr_2 (الف) ۲/۵ و (ب) ۲/۶ در ساعت ۰۴ UTC روز ۱۹ مارس ۲۰۱۷ در رادار هواشناسی بوشهر.

۴. نتیجه گیری

عملکرد یک الگوریتم ساده و سریع برای حذف نوفه‌های زمینی و اکوهای غیرعادی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار داپلر هواشناسی بوشهر در تاریخ ۱۹ مارس ۲۰۱۷ ساعت ۰۴ UTC در شرایط آسمان بارانی و پدیده خط تندوزه مورد بررسی قرار گرفت. جهت انجام الگوریتم فوق و تعیین مناسب‌ترین آستانه، دو آستانه tr_1 بین ۳ تا ۸ و tr_2 بین ۱/۱ تا ۲/۶ بررسی شدند.

مزایای اصلی این روش، پیاده‌سازی آسان آن (هم برای داده‌های قطبی و هم برای داده‌های دکارتی) است که می‌توان آن را پس از هر روش دیگری برای حذف نوفه‌ها اعمال کرد.

بررسی‌ها نشان داد که الگوریتم حاضر توانایی قابل توجهی در حذف نوفه‌های زمینی و اکوهای غیرعادی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار بوشهر را دارد.

تغییر در آستانه tr_1 بین ۳ تا ۸ تفاوت قابل توجهی در حذف نوفه‌های زمینی ایجاد نکرده‌اند. از آنجایی که tr_1 صرفاً اختلاف محلی بازگشت‌پذیری را می‌سنجد. اگر میدان بازگشت‌پذیری منطقه مورد مطالعه (رادار بوشهر در کنار دریا) ناهمگنی کافی داشته باشد، افزایش tr_1 از ۳ به ۸ تعداد همسایه‌های «ضعیف‌تر از مرکز» را چندان تغییر نمی‌دهد؛ بنابراین فیلتر پیوستگی مکانی تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

به عبارت دیگر، وقتی بافت محلی واضح است tr_1 پس از یک حد، اشباع می‌شود (گابلا و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین در حذف نوفه‌های زمینی در رادار بوشهر می‌توان از هر یک از آستانه‌های ۳ تا ۸ tr_1 استفاده کرد. مقادیر tr_2 تفاوت قابل توجهی در حذف نوفه‌های زمینی با یکدیگر دارند. نکته مهم در انتخاب tr_2 مناسب در حفظ سلول‌های همرفتی است. بنابراین با بررسی‌های انجام شده برای tr_2 از ۱/۱ تا ۲/۶، آستانه ۱/۸ با حذف بیشترین نوفه‌های زمینی و اکوهای غیرعادی در داده‌های بازگشت‌پذیری رادار و همچنین حفظ سلول‌های همرفتی، مناسب‌ترین آستانه است. نتیجه به دست آمده با نتایج تحقیق گابلا و نوتارپیتر (۲۰۰۲) هماهنگی کامل دارد.

در مجموع میزان کارایی الگوریتم حاضر وابسته به مقادیر دو آستانه tr_1 و tr_2 دارد که به صورت تجربی برای هر ناحیه و رادار تعیین می‌شود که این نتیجه با نتایج مقاله صفر و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی کامل دارد.

مراجع

صفر، م.؛ احمدی گیوی، ف. و گلستانی، ی. (۱۳۹۵). کنترل کیفی داده‌های رادار هواشناسی با استفاده از ساختار افقی و قائم برگشت پذیری. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۰، ۱۲۰-۱۳۱.

Addabbo, P., Han, S., Biondi, F., Giunta, G., & Orlando, D. (2021). Adaptive Radar Detection in the Presence of Multiple Alternative Hypotheses Using Kullback-Leibler Information Criterion-Part II: Applications. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 69, 3742-3754.

Boothe, R.R. (1969). The Weibull distribution applied to the ground clutter backscatter coefficient, Tech. Rep. No. RE-69-15, U.S. Army Missile Command, Redstone Arsenal, AL.

Bebbington, D., Rae, S., Bech, J., Codina, B., & Picanyol, M. (2007). Modeling of weather radar echoes from anomalous propagation using a hybrid parabolic equation method and NWP model data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 391-398.

Bech, J., Gjertsen, U., & Haase, G. (2007). Modeling weather radar beam propagation and topographical blockage at northern high

latitudes. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc*, 133, 1191-1204.

Czerkawski, M., Ilioudis, C., Clemente, C., Michie, C., Andonovic, L. & Tachtatzis, C. (2021). Interference Motion Removal for Doppler Radar Vital Sign Detection Using Variational Encoder-Decoder Neural Network. *2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21)*.

Geotis S.G., & Silver, W.M. (1976). An evaluation of techniques for automatic ground-echo rejection. *Preprints. 17th Conf. Radar Meteorology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc*, 448-452.

Germann, U., & Joss, J. (2001). Variograms of radar reflectivity to describe the spatial continuity of alpine precipitation. *J. Appl. Meteor*, 40, 1042-1059.

Gabella, M., & Notarpietro, R. (2002). Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain. *Proceedings of ERAD*, 305-311.

- Gekat, F., Meischner, P., Friedrich, K., Hagen, M., Koistinen, J., Michelson, D. B., & Huuskonen, A. (2004). The state of weather radar operations, networks and products: In: Weather radar. *Principles and advanced applications*, P. Meischner, (Ed.), 1–51.
- Germann, U., & Joss, J. (2004). Operational measurement of precipitation in mountainous terrain: In: Weather radar. *Principles and advanced applications*, P. Meischner, (Ed.), 52–77.
- Gao, X., Roy, S. & Zhang, L. (2023). Static Background Removal in Vehicular Radar: Filtering in Azimuth-Elevation-Doppler Domain. *IEEE Sensors Journal*, 99, 1-12.
- Harris, D., Foufoula-Georgiou, E., Droegemeier, K.K., & Levit, J.J. (2001). Multiscale statistical properties of a high-resolution precipitation forecast. *J. Hydrometeorology*, 2, 406-418.
- Hubbert, J. C., Bringi, V. N., & Brunkow, D. (2003). Studies of the polarimetric covariance matrix: Part I: Calibration methodology. *J. Atmos. Ocea. Tech*, 20(5), 696–706.
- Joss, J., & Lee, R. (1995). The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections. *J. Appl. Meteorol*, 34, 2612-2630.
- Joss, J., & Coauthors. (1998). Operational use of radar for precipitation measurements in Switzerland. *Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zurich*, 108 pp.
- Kerr, D.E. (1987). Propagation of short radio waves. *Peregrinus Ltd. London, UK*.
- Kamann, A., Held, P., Perras, F., Zaumseil, P., Brandmeier, T. & Schwarz, U. T. (2018). Automotive Radar Multipath Propagation in Uncertain Environments. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE.
- Linell, T. (1966). An experimental investigation of the amplitude distribution of radar terrain return, *6th Conf. of the Swedish National Committee on Scientific Radio*.
- Liu, L., Guan, R., Ma, F., Smith, J. & Yue, J. (2023). Radar-STDA: A High-Performance Spatial-Temporal Denoising Autoencoder for Interference Mitigation of FMCW Radars. *JOURNAL OF LATEX CLASS FILES*, 14, 1-11.
- Li, j., Youn, J., Wu, R., Overdevest, J. & Sun, S. (2024). Performance Evaluation and Analysis of Thresholding-based Interference Mitigation for Automotive Radar Systems. *2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Workshops (ICASSPW)*.
- Prophet, R., Martinez, J., Michel, J.-C. F., Ebelt, R., Weber, I. & Vossiek, M. (2019). Instantaneous Ghost Detection Identification in Automotive Scenarios. in *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. IEEE.
- Rinehart, R. (1997). RADAR for Meteorologists. *Rinehart Pub. AUSTELL, GA, U.S.A.*
- Steiner, M., & Smith, J. A. (2002). Use of threedimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitation echoes in radar data. *J. Atmos. Ocea. Tech*, 19, 673–686.
- Salek, M., Cheze, J.-L., Handwerker, J., Delobbe, L., & Uijlenhoet, R. (2004). Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation. *COST Action 717: Final Report, COST Office, Luxembourg*.
- Wallace, P.R. (1953). Interpretation of the fluctuating echoes from randomly distributed scatterres, part II, *Can. J. Phys*, 31, 995-1009.
- Wang, T., Xu, D., Hao, C., Addabbo, P. & Orlando, D. (2022). Clutter Edges Detection Algorithms for Structured Clutter Covariance Matrices. *IEEE Signal Processing Letters*, 29, 642–646.
- Xu, D., Addabbo, P., Hao, C., Liu, J., Orlando, L. & Farina, A. (2021). Adaptive strategies for clutter edge detection in radar. *Signal Processing*, 186, p. 108127.
- Yan, L., Addabbo, P., Hao, C., Orlando, D. & Farina, A. (2020). New ECCM Techniques Against Noise-like and/or Coherent Interferers. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56, 1172– 1188.
- Zheng, G., Zeng, Y. & Gao, L. (2016). The simulation method of statistical MIMO radar's clutter. *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1139-1141.
- Zhou, Y., Cao, R., Zhang, A., & Li, P. (2024). An Interference Mitigation Method for FMCW Radar Based on Time–Frequency Distribution and Dual-Domain Fusion Filtering. *Sensors*, 24(11), 3288. <https://doi.org/10.3390/s24113288>.