

توزیع زمانی و مکانی پدیده رعدوبرق در ایران با استفاده از داده‌های سنجنده ثبت رعدوبرق (LIS)

علی محمد خورشید دوست - استاداقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

علی اکبر رسولی - استاد، اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مجتبی فخاری واحد^۱ - دانشجوی دکتری، اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۶

چکیده

صاعقه یا آذرخش یکی از مهم‌ترین پدیده‌های همراه با توفان‌های تندری است که سالانه جان بیش از دو هزار نفر را در جهان می‌گیرد. فعالیت‌های رعدوبرقی تا حدی به فعالیت‌های همرفتی محلی بستگی دارند از این رو در مقیاس‌های زمانی و مکانی خیلی متغیر هستند. از طرفی داده‌های رعدوبرق در ایستگاه‌های زمینی ثبت نمی‌شوند و محاسبه دقیق فراوانی و پراکنش فعالیت‌های رعدوبرقی با داده‌های سینوپتیک امکان‌پذیر نیست. از این رو در این پژوهش برای تعیین توزیع زمانی و مکانی رعدوبرق‌ها بر روی ایران از داده‌های سنجنده LIS ماهواره TRMM در دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۳ استفاده شده است. ابتدا فراوانی ماهانه و ساعتی توزیع داده‌ها محاسبه و با استفاده از تابع تراکم کرنل در نرم‌افزار GIS مناطق دارای بیشینه تراکم رعدوبرق‌ها برای مقیاس‌های سالانه و ماهانه محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ماه‌های می و آوریل دارای بیشترین و ماه‌های ژانویه و سپتامبر دارای کمترین فراوانی رعدوبرق‌ها هستند. همچنین بیشینه فراوانی رعدوبرق‌ها بین ساعات ۱۲:۳۰ تا ۲۰:۳۰ و کمینه فراوانی آن بین ساعات ۳:۳۰ تا ۹:۳۰ رخ می‌دهد. تابع تراکم کرنل هم نشان داده که بیشینه تراکم داده‌های سالانه رعدوبرق در شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان قرار دارد. دامنه‌های غربی رشته‌کوه‌های زاگرس، البرز مرکزی، کوه‌های جنوب کرمان، ناهمواری‌های جنوب سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از استان‌های خراسان رضوی و خراسان جنوبی دارای فراوانی بیشتر رعدوبرقی هستند. مناطق مرکزی و عموماً هموار داخلی نیز دارای کمترین فراوانی پدیده رعدوبرق در ایران هستند.

کلیدواژه‌ها: رعدوبرق، LIS، اقلیم‌شناسی، توفان تندری، ایران.

۱. مقدمه

صاعقه یا آذرخش یک تخلیه الکتریکی شدید و بسیار سریع است. این پدیده یکی از مهم‌ترین پدیده‌های همراه با توفان‌های تندری است که سالانه جان ۲۰۰۰ نفر را در سرتاسر جهان می‌گیرد (کلینیک و برینگر^۱، ۲۰۰۷: ۱۱۶۳). رخداد رعدوبرق وابسته به شرایط میکرو فیزیکی در لایه فاز اختلاط ابر است. تجربیات آزمایشگاهی و آزمایش‌های عددی پیشنهاد می‌کنند که چنین ابرهایی شامل یخ‌های کوچک، دانه‌های برف بزرگ و آب فوق سرد در لایه فاز اختلاط هستند (کوداما^۲ و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۲۲۶). ابرهایی که در ارتباط با سازوکارهای همرفتی در محیط اتمسفری در اندازه‌های متنوع توسعه پیدا می‌کنند، نشان‌دهنده وجود نوعی ناپایداری جوی هستند (رسولی، ۱۳۹۰: ۴۱) و ممکن است دارای گسترش عمقی قابل توجهی در تروپوسفر باشند (رسولی، ۱۹۹۶: ۱۷). از طرفی انتظار می‌رود که فراوانی رعدوبرق‌ها وابسته به شدت حرکت عمودی هوا باشد که کاملاً با ارتفاع توفان (ابر) ارتباط دارد (یوشیو^۳ و همکاران، ۲۰۱۲: ۲). بنابراین ارتفاع سقف ابر باید تا دمای کمتر از ۱۵- تا ۲۰- درجه سلسیوس باشد (موریتا^۴ و همکاران، ۲۰۰۶: ۱۰۹). چراکه این تراز دمایی اندکی بالاتر از لایه فاز اختلاط قرار گرفته است (پترسون^۵ و همکاران، ۲۰۰۵: ۱). نزدیکی به منابع آبی و کوه‌های مرطوب نیز باعث افزایش فعالیت‌های رعدوبرقی می‌شود (هودانیش و ولین^۶، ۲۰۱۲: ۷)، زیرا ارتفاعات باعث صعود اجباری توده‌هوا و تشدید ناپایداری سامانه‌های همرفتی می‌شوند (کلینیک و برینگر، ۲۰۰۷: ۱۱۶۴). در واقع فعالیت‌های رعدوبرقی در مقیاس‌های زمانی و مکانی خیلی متغیر هستند و تا حدی به فعالیت‌های همرفتی محلی بستگی دارند (کیویی^۷ و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۰۶۹). از طرفی در ایستگاه‌های سینوپتیک فراوانی این پدیده ثبت نمی‌شود و رخداد آن بافاصله سه ساعت و به صورت کد ثبت می‌شود که در آن ساعات همراه با رعدوبرق مشخص است. از این رو محاسبه دقیق فراوانی و پراکنش فعالیت‌های رعدوبرقی با این داده‌ها امکان‌پذیر نیست (کیریستین^۸ و همکاران، ۲۰۰۳: ۲). به همین دلیل در بعضی از کشورها شبکه تشخیص رعدوبرق زمینی نصب شده است (کیویی و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۰۶۹)، اما در ایران چنین شبکه‌ای وجود ندارد. در کشورهایی مانند ایران که دارای ایستگاه‌های زمینی تشخیص رعدوبرق نیستند، استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای برای تعیین فراوانی و پراکنش این پدیده می‌تواند مفید باشد. ماهواره‌ها توسط

1 Kilinc & Beringer

2 Kodama

3 Ushio

4 Morita

5 Petersen

6 Hodanish & Wolyn

7 QIE

8 Christian

سنجنده‌های مخصوص می‌توانند فعالیت‌های رعدوبرقی را در یک مقیاس بزرگ و با دقت نسبتاً بالایی اندازه‌گیری کنند (کیوی و همکاران، ۲۰۰۳، ۱۰۶۹). از جمله این سنجنده‌ها، سنجنده تصویربرداری رعدوبرق (LIS^۱) است. تاکنون پژوهش‌های متعددی در مورد رعدوبرق، اقلیم‌شناسی رعدوبرق و توفان‌های رعدوبرقی انجام گرفته است که در زیر به نمونه‌هایی از آن‌ها اشاره می‌شود. پترسون^۲ و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM^۳ به مطالعه تغییرات فصلی توفان‌های همرفتی بر روی برزیل می‌پردازند. کریستین و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از داده‌های OTD^۴ فراوانی و پراکنش رعدوبرق در سطح جهان را نمایش دادند. آن‌ها با استفاده از این داده‌ها نقشه اقلیم‌شناسی رعدوبرق را تهیه کردند و با استفاده از آن پراکنش جغرافیایی و فصلی رعدوبرق را در جهان تشریح نمودند. کیوی و همکاران (۲۰۰۳) فعالیت‌های رعدوبرقی جهان و تغییرات منطقه‌ای آن را با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای تشریح کردند. آن‌ها با استفاده از اطلاعات ۵ ساله سنجنده‌های LIS و OTD فعالیت‌های رعدوبرقی را در مقیاس نسبتاً کوچک، برای مشخص کردن اختلافات منطقه‌ای فعالیت‌های رعدوبرقی انجام دادند. کیلینک و برینگر (۲۰۰۷) به بررسی توزیع زمانی و مکانی رعدوبرق و رابطه آن با نوع پوشش گیاهی، ارتفاع و نقاط شروع آتش‌سوزی در منطقه شمالی استرالیا پرداخته‌اند. لیو و زیپسر^۵ (۲۰۰۸) با استفاده از مشاهدات ۹ ساله ماهواره TRMM به بررسی چرخه‌های روزانه بارندگی، ابر و رعدوبرق در نواحی حاره‌ای پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که چرخه روزانه در روی خشکی شامل یک بیشینه سامانه‌های بارشی و رعدوبرقی در اواخر بعدازظهر است. آلبرت^۶ و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از نتایج ۱۳ ساله (۲۰۱۰-۱۹۹۸) حسگر LIS ماهواره TRMM به بررسی خصوصیات رعدوبرق (تعداد رویدادها و گروه‌ها، درخشندگی کل و منطقه رخداد و غیره) منطقه حاره پرداخته‌اند و با استفاده از داده‌های ۱۳ ساله نقشه اقلیم‌شناسی رعدوبرق را در این منطقه مشخص کردند. هودانیش و وولین (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های ۱۷ ساله شبکه تشخیص رعدوبرق ملی آمریکا به بررسی اقلیم‌شناسی رعدوبرق در ایالت کلرادو پرداخته‌اند و تراکم رعدوبرق‌ها را در نقاط شبکه‌ای ۰/۰۱ عرض جغرافیایی در ۰/۰۱ طول جغرافیایی محاسبه نمودند. بچلر^۷ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از ابرهای همرفتی عمیق به بررسی کارآمدی حسگر تصویری رعدوبرق (LIS) پرداختند. آن‌ها این پژوهش را برای همه ماه‌های جولای و اوت از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ انجام دادند و در پایان پراکنش جغرافیایی رعدوبرق‌های همراه با

1 Lightning Imaging Sensor (LIS)

2 Petersen

3 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

4 Optical Transient Detector

5 Liu & Zipser

6 Albrecht

7 Buechler

ابراهیم همرفتی در ماه‌های جولای و اوت بین عرض‌های ۳۰ درجه شمالی و جنوبی را مشخص کردند. سیسیل^۱ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های رعدوبرق ثبت‌شده از فضا توسط سنجنده‌های^۲ OTD (مه ۱۹۹۵ تا مارس ۲۰۰۰) و LIS (۲۰۱۰-۱۹۹۸) به تهیه داده‌های شبکه‌بندی شده اقلیم‌شناسی رعدوبرق در مقیاس‌های زمانی و مکانی پرداخته‌اند و سپس به توصیف پراکنش زمانی و مکانی آنها پرداخته‌اند. مورالز^۳ و همکاران (۲۰۱۴) به توصیف و تحلیل داده‌های ۸ ساله رعدوبرق اندازه‌گیری شده توسط شبکه زمینی^۴ STARNET در آمریکای جنوبی پرداخته‌اند و اقلیم‌شناسی رعدوبرق در این منطقه را با استفاده از این داده‌ها در سال‌های مختلف نشان دادند. پژوهش‌های انجام‌شده در ایران عموماً مربوط به روزهای همراه با توفان تندی است که با استفاده از کدهای مربوط به توفان تندی در ساعات مختلف انجام‌شده‌اند. جلالی و همکاران (۱۳۸۵) تغییرات زمانی توفان‌های تندی و بارش‌های ناشی از آن را در محدوده شهر اهر در دوره ۱۳۸۰-۱۳۶۵ (۱۶ سال) بررسی کردند. آن‌ها توفان‌های تندی را با استفاده از کدهای سینوپتیک ۹۹-۹۱ دست آوردند. بررسی آن‌ها نشان داد که تحلیل آماری بارش‌های ثبت‌شده این واقعه را نشان می‌دهد که اغلب بارش‌های مذکور در فصل‌های بهار و تابستان و طی ساعات بعدازظهر و اوایل شب رخ می‌دهند. رسولی و همکاران (۱۳۸۶) توزیع زمانی بارش‌های رعدوبرقی منطقه شمال غرب ایران در دوره ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۲ را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از کدهای هواشناسی، فراوانی توفان‌های تندی در این منطقه را به دست آوردند و تغییرات زمانی آن را در مقیاس روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه نمودند. اغلب بارش‌های مذکور در فصل‌های بهار و تابستان و طی ساعات بعدازظهر و اوایل شب رخ می‌دهند. عسگری و محبی (۱۳۸۹) به مطالعه آماری-همدید توفان‌های تندی در دوره ۲۰۰۶-۲۰۰۱ در استان خوزستان پرداختند. آن‌ها توفان تندی را با استفاده از کدهای هوای حاضر ۱۷ و ۹۰ تا ۹۹ مشخص کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع فراوانی توفان تندی در ایستگاه‌های همیدی استان دقیقاً مشابه یکدیگر نبوده و از ایستگاهی به ایستگاهی دیگر فرق می‌کند. بختیاری (۱۳۹۰) تحلیل آماری و همدید توفان‌های تندی در استان فارس را بررسی کرده است. او با استفاده از داده‌های ۸ ایستگاه که دارای آمار طولانی بودند، فراوانی وقوع توفان‌های تندی را به صورت ماهانه و سالانه برای دوره ۲۰۰۶-۱۹۹۶ تهیه و تجزیه و تحلیل نمود. نتایج او نشان می‌دهد که بیشترین تعداد توفان‌های تندی در ساعات‌های ۱۲ و ۱۵ به وقت گرینویچ یعنی در بعدازظهر و اوایل شب رخ می‌دهند. بیشترین روزهای همراه با توفان تندی به ترتیب در ماه‌های مارس، اوت و آوریل اتفاق می‌افتد. خالصی (۱۳۹۳) در پژوهشی با استفاده از کدهای دیده‌بانی ۴۶ ایستگاه سینوپتیک به واکاوی

1 Cecil

2 Optical Transient Detector (OTD)

3 Morales

4 Sferics Timing And Ranging NETwork

زمانی توفان‌های تندری ایران می‌پردازد و نتیجه می‌گیرد که بیشترین فراوانی رخداد کدهای ۱۷ و ۲۹ مربوط به خردادماه ساعت ۰۰:۳۰ محلی، کدهای ۹۵ و ۹۶ مربوط به اردیبهشت‌ماه ساعت ۱۵:۳۰ محلی، کدهای ۹۷ و ۹۹ مربوط به خردادماه ساعت ۰۳:۳۰ محلی و کد ۹۸ مربوط به مهرماه ساعت ۱۸:۳۰ محلی هست. قویدل رحیمی و همکاران (۱۳۹۴) نیز با استفاده از داده‌های ۲۵ ایستگاه سینوپتیک به بررسی روند تغییرات زمانی و توزیع مکانی روزهای همراه با توفان‌های تندری در ایران پرداختند و نتیجه می‌گیرند که بیشترین فراوانی رخداد این توفان‌ها در ماه‌های می، آوریل، ژوئن و اکتبر است و مناطق غربی و شمال غربی دارای فراوانی بیشتری هستند.

در ایران به دلیل عدم ثبت داده‌های رعدوبرق و در دسترس نبودن داده‌های مربوط به رعدوبرق، مطالعاتی در مورد پراکنش و فراوانی رعدوبرق‌ها صورت نگرفته است. پژوهش‌های انجام‌شده نیز عموماً مربوط به روزهای همراه با توفان تندری است که با کدهای مربوط به توفان تندری در ساعات مختلف انجام‌شده‌اند. از آنجاکه برای هر ایستگاه ثبت‌کننده تندر، روز رعدوبرقی روزی است که حداقل یک رعدوبرق مشاهده و ثبت شده باشد (هافینز و اوریل^۱، ۱۹۹۹: ۱۰۱۳)، بنابراین یک روز همراه با توفان تندری می‌تواند دارای یک رعدوبرق و یا صدها رعدوبرق باشد. از طرفی فاصله‌ای که رعد شنیده می‌شود بین ۸ تا ۲۰ کیلومتر از ایستگاه است (هاکلندر و دلدن^۲، ۲۰۰۳: ۲۷۳؛ هافینز و اوریل، ۱۹۹۹: ۱۰۱۳) و در مناطقی که ایستگاه وجود ندارد و یا فاصله ایستگاه‌ها بیشتر از ۲۰ کیلومتر است صدای رعد نیز شنیده نمی‌شود. از این رو با استفاده از این داده‌ها نمی‌توان به مطالعه پراکنش رعدوبرق‌ها پرداخت و در این پژوهش با استفاده از داده‌های سنجنده LIS پراکنش و تراکم ماهانه، سالانه و فراوانی چرخه‌های روزانه رعدوبرق‌ها مشخص شد.

۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه تمام مناطقی از ایران را شامل می‌شود که در محدوده دید سنجنده ثبت رعد و برق قرار دارد و بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۸ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵ دقیقه و ۶۳ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی قرار دارد (علائق طالقانی، ۱۳۹۲: ۲۰) و در حدفاصل دره‌های سند و پنجاب در شرق و رودهای دجله و فرات در غرب، دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب واقع شده است و ارتفاع متوسط آن ۱۲۰۰ متر از تراز دریا است (قاسمی دستگردی، ۱۳۹۱: ۲۱). سرزمین ایران به‌طور کلی کوهستانی و نیمه‌خشک است. پست‌ترین منطقه، ۲۸ متر از تراز دریا پایین‌تر است و در شمال ایران قرار دارد و بلندترین قله آن دماوند با ارتفاع ۵۶۷۱ متر از تراز دریا است

1 Huffines & Orville

2 Haklander & Van Delden

(علائمی طالقانی، ۱۳۹۲: ۲۰). وجود این تنوع در ناهمواری‌های زمین از نظر گسترش و ارتفاع، سبب شده است که ویژگی‌های آب و هوایی مناطق مختلف کشور متفاوت باشد.

۳. مواد و روش‌شناسی

۳.۱. داده‌ها

این پژوهش با استفاده از داده‌های رعدوبرق ثبت‌شده از فضا توسط سنجنده LIS و در دوره ژانویه ۱۹۹۸ تا دسامبر ۲۰۱۳ (۱۶ سال) انجام شده است که شامل زمان، مکان و درخشندگی رعدوبرق‌ها است. سنجنده تصویربرداری رعدوبرق (LIS) بر روی ماهواره TRMM^۱ نصب است. این سنجنده به همراه ماهواره TRMM در ۲۸ نوامبر ۱۹۹۷ به فضا پرتاب شد و در یک مدار نسبتاً دایره‌ای و با زاویه ۳۵ درجه و ارتفاع ۳۵۰ کیلومتر زمین را رصد می‌کند. سنجنده LIS یک تشخیص‌دهنده نوری است که تغییرات روشنایی ایجادشده به وسیله رعدوبرق در ابرها را در محدوده ۷۷۷/۶ نانومتر اندازه می‌گیرد (کوداما و همکاران، ۲۰۰۷، ۲۲۲۹) و قادر است رعدوبرق‌های توفان‌های با مقیاس ۳ تا ۶ کیلومتر را بر روی منطقه‌ای ۶۰۰*۶۰۰ کیلومتری مشاهده کند (کیویی و همکاران، ۲۰۰۳، ۱۰۶۹). بنابراین با استفاده از این داده‌ها می‌توان فراوانی پدیده رعدوبرق را برآورد کرد (یوشیو و همکاران، ۲۰۱۲، ۱). سنجنده LIS رعدوبرق‌های ابر به ابر، درون ابر و ابر به زمین را در طول روز و شب و با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌کند (کریستین و همکاران، ۲۰۰۰، ۱۰). ضریب کارآمدی سنجنده LIS در شب ۹۰٪ و در روز ۷۰٪ در وقت ظهر محلی است (رودلوسکی^۲، ۲۰۱۴، ۱). این سنجنده به‌طور متوسط در هر روز دو بار و در هر بار تقریباً ۹۰ ثانیه به‌صورت خیره (رزولوشن ۲ میلی‌ثانیه) هر نقطه از زمین که در میدان دید آن باشد را مشاهده می‌کند (رودلوسکی، ۲۰۱۴، ۱). میدان دید آن بین مدار ۳۸ درجه شمالی تا ۳۸ درجه جنوبی است (بنابراین این داده‌ها بخشی از شمال غرب ایران را پوشش نمی‌دهد) (سیسیل و همکاران، ۲۰۱۴، ۴۰۶). این زمان نمونه‌برداری کوتاه در زمان عبور ماهواره، استفاده از این داده‌ها را محدود می‌کند و برای محاسبه اقلیم‌شناسی رعدوبرق با دقت بالا به چندین سال نمونه‌برداری نیاز است (آلبرت و همکاران، ۲۰۱۱، ۱)، اما امروزه LIS در حدود ۱۶ سال داده‌های مربوط به رعدوبرق را جمع‌آوری نموده است که امکان محاسبه نقشه اقلیم‌شناسی رعدوبرق در قدرت تفکیک مکانی بالا (۲۵/۰ و ۱۰/۰ درجه) را فراهم کرده است (رودلوسکی، ۲۰۱۴، ۱؛ آلبرت و همکاران، ۲۰۱۱، ۲).

1 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

2 Rudlosky

۳.۲. تحلیل داده‌ها

این سنجنده در طی ۱۶ سال نمونه‌برداری در حدود ۱۱۲ هزار پدیده رعدوبرق در داخل مرزهای خاکی ایران به ثبت رسانده است. با آماده‌سازی و انتقال این داده‌ها به درون نرم‌افزار GIS و روی هم قرارگیری آن‌ها، تراکم این داده‌ها به قدری زیاد می‌شود که امکان تشخیص مناطق بیشینه و کمینه به‌خصوص در مقیاس سالانه غیرممکن می‌شود (شکل ۱). بنابراین در نخستین مرحله از تحلیل داده‌ها باید مشخص شود که داده‌ها به‌صورت تصادفی پراکنده شده‌اند یا دارای روند فضایی خاصی هستند (اگر برخی مکان‌ها برای رخداد رعدوبرق مستعدتر باشند). برخی تابع‌های پردازش جغرافیایی^۱ در نرم‌افزار GIS بر روی داده‌ها اعمال شد تا مقادیر آماری محاسبه و مکان‌های دارای طبقه‌های رعدوبرق معنی‌دار مشخص شود. این محاسبات بر اساس فاصله اقلیدسی بین نقاط (رعدوبرق‌ها) و مفهوم فضایی آن روش وزن دهی بر اساس معکوس فاصله محاسبه می‌شود. شاخص‌های دیگری نیز پراکنش فضایی داده‌ها را محاسبه می‌کنند که شامل شاخص نزدیک‌ترین همسایه (NNI^۲)، شاخص موران محلی آنسلین^۳ و تابع تراکم کرنل^۴ هستند (رسولی، ۱۳۸۴، ۲۷۴). که در این پژوهش از شاخص تابع تراکم کرنل استفاده شده است.

برای تعمیم مکان جغرافیایی یک پدیده (وقوع رعدوبرق) به کل منطقه برآوردگر درونیایی تراکم کرنل معرفی شد. در واقع تابع تراکم کرنل در نرم‌افزار GIS تراکم عوارض در همسایگی آن عارضه را محاسبه می‌کند و می‌تواند برای عوارض نقطه‌ای (رعدوبرق) و خطی مورد استفاده قرار گیرد. بیشترین ارزش در محل قرارگیری نقاط است و با دور شدن ارزش کم می‌شود و تا شعاع جستجو به صفر کاهش می‌یابد. تراکم در هر سلول رستر خروجی به‌وسیله اضافه کردن تمام کرنل‌های سطحی که در مرکز سلول بر هم منطبق هستند، محاسبه می‌شود. افزایش شعاع جستجو مقدار تراکم را به مقداری زیادی تغییر نخواهد داد. این شاخص از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{f}_d(x) = \frac{hv}{nd} \sum_{i=1}^n K_0\left(\frac{x-x_i}{d}\right)$$

که در آن K_0 تابع کرنل، d پهنای باند (شعاع جستجو)، n اندازه نمونه x_i و h عامل هموار کردن خطوط و v عامل مقیاس عمودی است. برای اطلاعات بیشتر به منبع مربوط مراجعه شود (شیپلی^۵ و همکاران، ۲۰۰۰، ۱۲۴).

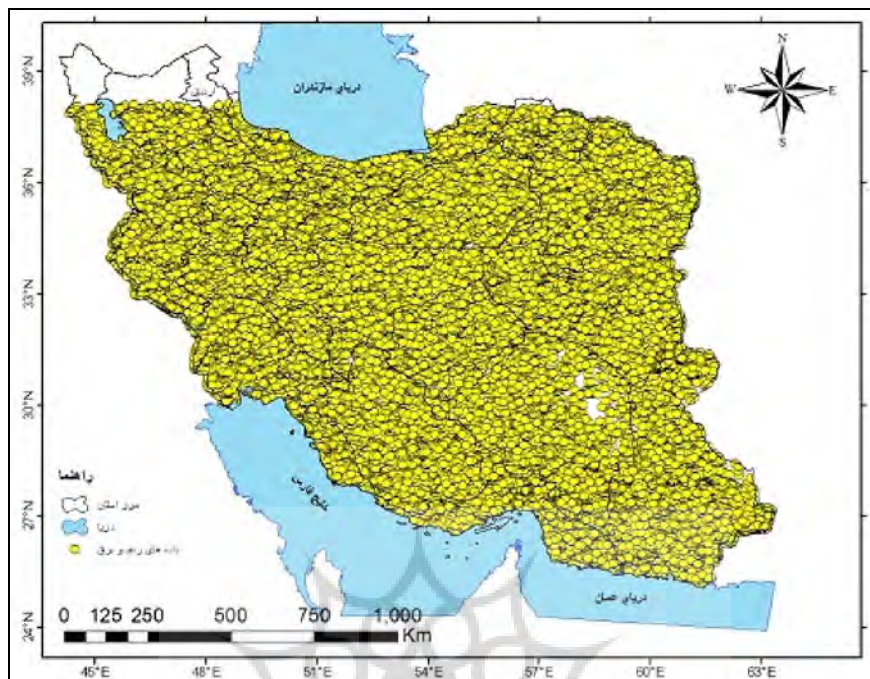
1 Geoprocessing

2 Nearest Neighbor Index

3 Anselin's Local Moran Index

4 Kernel Density functions

5 Shipley

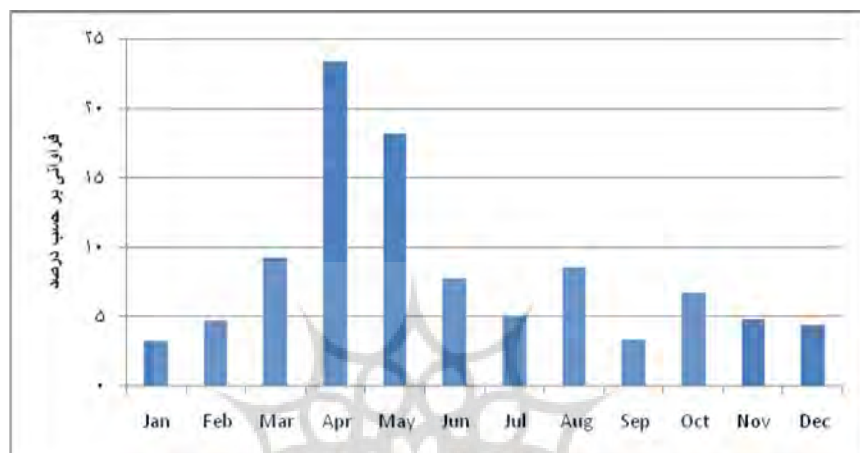


شکل ۱ پراکنش داده‌های رعدوبرق مورداستفاده در گستره ایران

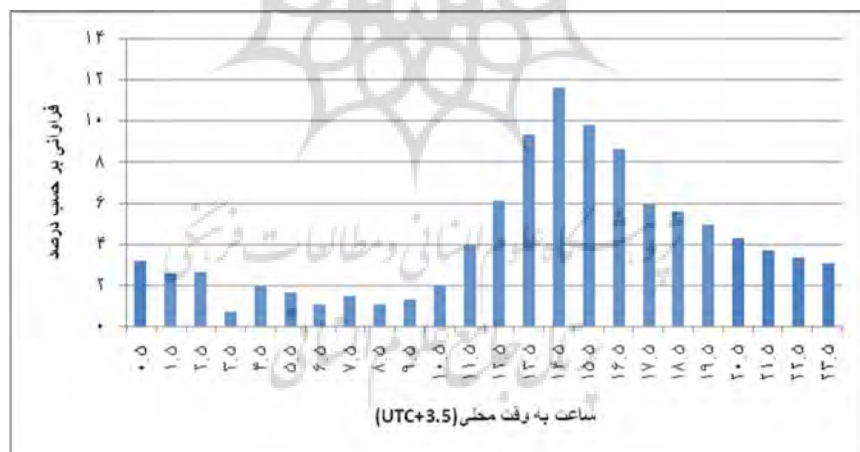
۴. بحث و نتایج

در نخستین گام فراوانی ماهانه و ساعتی رخداد رعدوبرق‌ها با استفاده از ۱۱۱۶۶۱ رعدوبرق ثبت شده توسط سنجنده LIS محاسبه شد. شکل ۲ فراوانی ماهانه رعدوبرق‌ها در داخل مرزهای خاکی ایران را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، فراوانی رعدوبرق‌های مشاهده شده برای همه ماه‌ها یکسان نیست و فعالیت‌های رعدوبرقی در برخی ماه‌ها بیشتر رخ می‌دهند. بیشینه فراوانی رعدوبرق‌ها در ایران در ماه‌های آوریل و می و کمینه آن در ماه‌های سپتامبر و ژانویه است. بیش از ۴۱ درصد رخداد رعدوبرق‌ها در ماه‌های آوریل و می و در حدود ۷ درصد رعدوبرق‌ها در ماه‌های سپتامبر و ژانویه رخ داده است. افزایش فعالیت‌های رعدوبرقی در ماه‌های آوریل و می اساساً به دلیل افزایش دریافت انرژی خورشید در طول این ماه‌ها به همراه الگوهای سینوپتیکی به هنگام است که شرایط را برای رشد سلول‌های همرفتی فراهم می‌کند. همچنین این داده‌ها نشان می‌دهند که فراوانی رعدوبرق‌ها در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز متفاوت است. این داده‌ها نشان می‌دهند که ساعت ۱۴:۳۰ دارای بیشترین فراوانی (۱۱/۶٪) رعدوبرق و ساعت ۳:۳۰ دارای کمترین فراوانی (۰/۷٪) رعدوبرق هستند. بیشینه فراوانی رخداد رعدوبرق‌ها در طول روز بین ساعات ۱۲:۳۰ تا ۲۰:۳۰ و کمینه رخداد آن بین ساعات ۳:۳۰ تا ۹:۳۰ به وقت محلی است. فراوانی رعدوبرق‌ها

بین ساعات ۱۲:۳۰ تا ۲۰:۳۰ بیش از ۶۶ درصد و فراوانی آن بین ساعات ۳:۳۰ تا ۹:۳۰ در حدود ۱۱ درصد است. فراوانی بالای رعد و برق ها در بعدازظهر همراه با اوج فعالیت های همرفتی محلی است که به دلیل گرم شدن سطح زمین بر اثر جذب تابش خورشیدی در طول روز صورت می گیرد و کمینه آن در ساعات صبح به این دلیل است که بازتابش زمینی باعث پایدارتر شدن جو می شود.



شکل ۲ فراوانی ماهانه رعدوبرق‌ها

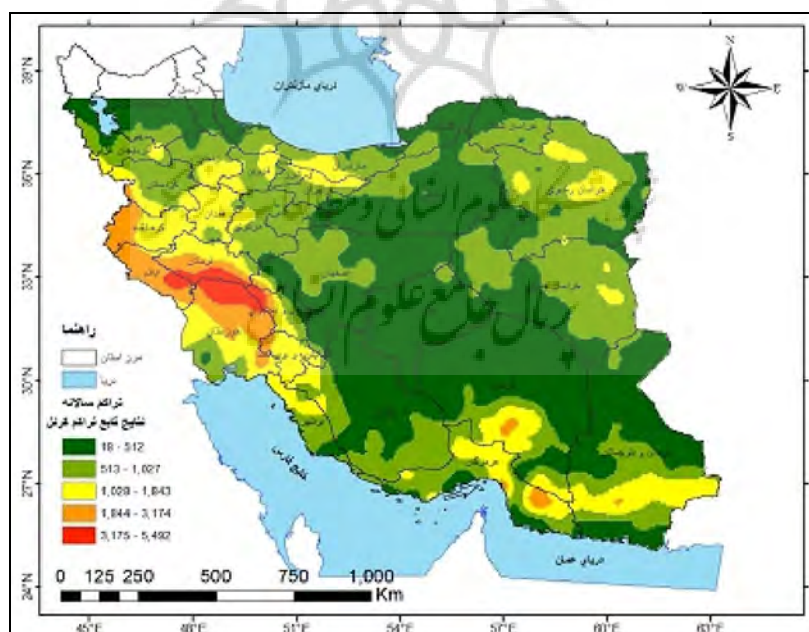


شکل ۳ فراوانی رخداد رعدوبرق در ساعات مختلف شبانه‌روز

۱. ۴. پراکنش سالانه

شکل ۴ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق سالانه در گستره ایران را نشان می دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می شود تراکم رعدوبرق‌های مشاهده شده در ایران برای همه مناطق برابر نیست و برخی

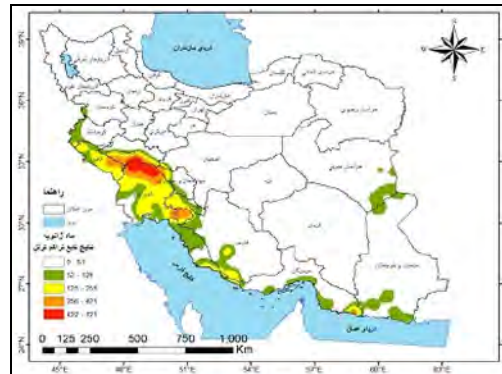
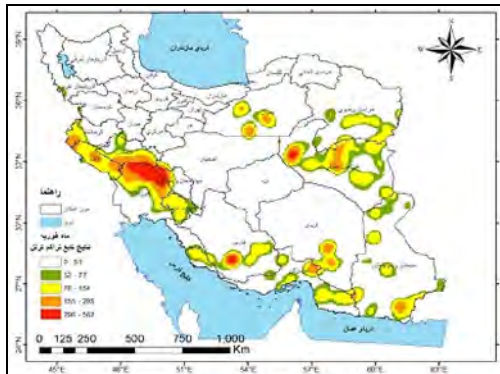
مناطق دارای تراکم کمتر و برخی مناطق دارای تراکم بیشتری هستند. در این شکل مناطق دارای بیشینه و کمینه رعدوبرق‌ها به خوبی مشخص است. دامنه‌های غربی رشته‌کوه‌های زاگرس، البرز مرکزی، کوه‌های جنوب کرمان، ناهمواری‌های جنوب سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از استان‌های خراسان رضوی و خراسان جنوبی دارای فراوانی بیشتر رعدوبرقی هستند. این مناطق عموماً بر ارتفاعات و دامنه ناهمواری‌ها قرار گرفته‌اند. اما بیشینه تراکم داده‌های سالانه رعدوبرق در شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان قرار دارد که در دامنه‌های رو به باد رشته‌کوه‌های زاگرس قرار گرفته است. مناطق مرکزی و عموماً هموار که شامل بخش‌های بزرگی از استان‌های سمنان، اصفهان، یزد، فارس، شمال کرمان و سیستان و بلوچستان دارای کمترین فراوانی پدیده رعدوبرق در ایران هستند. فراوانی بالای رعد و برق‌ها در مناطق مرتفع و ناهمواری‌ها می‌تواند به دلیل صعود اجباری و همرفت دامنه‌ای در این مناطق باشد و کمینه آن در مناطق مرکزی و شرقی ایران می‌تواند به دلیل قرار گرفتن در ناحیه پشت به بادهای باران آور و پایین بودن رطوبت در این مناطق باشد. این نتایج همخوانی زیادی با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک دارد. به طوری که ایستگاه‌های ماکو، صفی‌آباد دزفول، سهند، اهر، کوهرنگ و دزفول بیشترین فراوانی سالانه ساعات رعدوبرقی را داشته‌اند (اما به دلیل محدودیت دید سنجنده LIS بیشینه‌های منطبق بر ایستگاه‌های ماکو و سهند در این نقشه نمایان نیست). کمینه فراوانی ساعات رعدوبرقی نیز در مرکز و شرق ایران قرار دارد و ایستگاه‌های سیرجان، بم، اصفهان، یزد، زابل و کاشان دارای کمینه فراوانی ساعات رعدوبرقی بوده‌اند و منطبق با مناطق کمینه مشاهده‌شده توسط سنجنده LIS هستند.



شکل ۴ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق سالانه

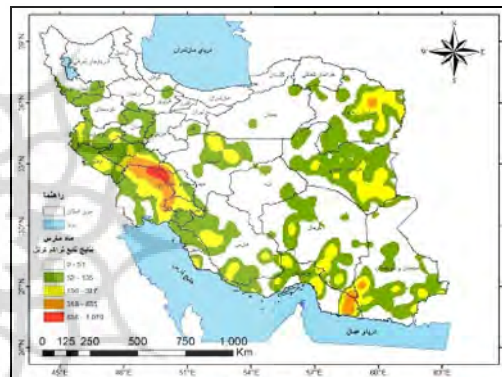
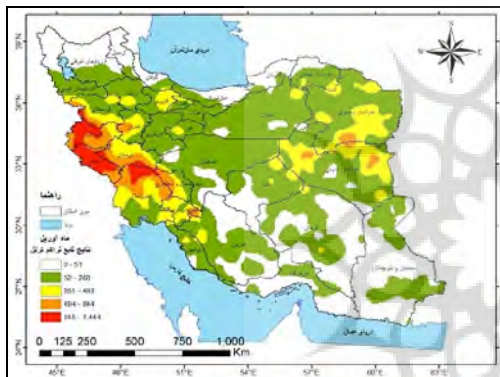
۲. ۴. پراکنش ماهانه

همان‌طور که فراوانی رعدوبرق‌ها در ماه‌های مختلف متفاوت است، انتظار می‌رود پراکنش و مراکز دارای بیشینه رخداد رعدوبرق‌ها نیز در ماه‌های مختلف متفاوت باشد. نتایج تابع تراکم کرنل برای ماه ژانویه (شکل ۵) نشان می‌دهد که مناطق جنوب، جنوب شرق و جنوب غرب ایران در این ماه دارای تراکم زیاد رعدوبرق هستند و در سایر مناطق پدیده رعدوبرق رخ نمی‌دهد و یا دارای فراوانی بسیار کمی است. مناطق دارای بیشینه رعدوبرق در این ماه در جنوب غرب ایران و شمال استان خوزستان قرار دارد که این بیشینه فراوانی با بیشینه فراوانی سالانه در ایران منطبق است. در این ماه گسترش فعالیت‌های رعدوبرقی و فراوانی آن در کمینه است چراکه کمترین فراوانی ماهانه نیز در این ماه رخ می‌دهد (شکل ۲). در ماه فوریه فعالیت‌های رعدوبرقی نسبت به ماه قبل از گسترش بیشتری برخوردار است و علاوه بر جنوب، جنوب غرب و جنوب شرق ایران، فعالیت‌های رعدوبرقی در استان‌های خراسان جنوبی و رضوی، سمنان و برخی مناطق استان سیستان و بلوچستان افزایش یافته است. در این ماه نیز بیشینه فراوانی رعدوبرق‌ها در شمال استان خوزستان قرار دارد. اما بخش‌هایی از استان شیراز و خراسان جنوبی نیز دارای تراکم بالای رعدوبرق‌ها هستند (شکل ۶). در ماه مارس فراوانی فعالیت‌های رعدوبرقی افزایش پیدا کرده و گسترش آن نیز بیشتر شده است. به‌طوری‌که در این ماه فعالیت‌های رعدوبرقی در عرض‌های بالاتر از ۳۶ درجه نیز مشاهده می‌شوند. مراکز بیشینه فعالیت‌های رعدوبرقی در این ماه در شمال شرق استان خوزستان قرار دارد و مراکز بیشینه با تراکم کمتر در شمال شرق و جنوب ایران قرار دارد (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده شد، بیشترین فراوانی ماهانه رعدوبرق‌ها در ماه آوریل قرار دارد. نتایج تابع تراکم کرنل نیز نشان می‌دهد که گسترش فعالیت‌های رعدوبرقی در ماه آوریل بیشینه است و تقریباً در تمام مناطق ایران فعالیت‌های رعدوبرقی رخ می‌دهد. وسعت مناطق دارای بیشینه رعدوبرق در این ماه افزایش قابل توجهی داشته است و علاوه بر شمال استان خوزستان، در استان ایلام و غرب استان کرمانشاه نیز مراکز بیشینه رعدوبرق مشاهده می‌شود (شکل ۸). در این ماه نیز فراوانی و گسترش فعالیت‌های رعدوبرقی زیاد است. مراکز بیشینه فعالیت‌های رعدوبرقی در این ماه در چندین منطقه قرار دارد. جنوب استان لرستان، خراسان رضوی، غرب استان کرمانشاه و شرق استان سیستان و بلوچستان از جمله مهم‌ترین مراکز دارای بیشینه رعدوبرق‌ها هستند. مراکز بیشینه در این ماه نسبت به ماه‌های قبل در عرض‌های بالاتری قرار گرفته‌اند (شکل ۹). اما پراکنش تراکم رعدوبرق‌ها و فعالیت‌های رعدوبرقی در ماه ژوئن متفاوت از ماه‌های دیگر است. در این ماه بیشینه تراکم رعدوبرق‌ها در جنوب غرب استان هرمزگان و جنوب استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. همچنین ناهمواری‌های البرز و دامنه‌های شرقی زاگرس دارای تراکم بیشتر رعدوبرق‌ها و فعالیت‌های رعدوبرقی هستند و در جنوب غرب ایران فعالیت‌های همرفتی دارای تراکم بسیار کمی هستند (شکل ۱۰).



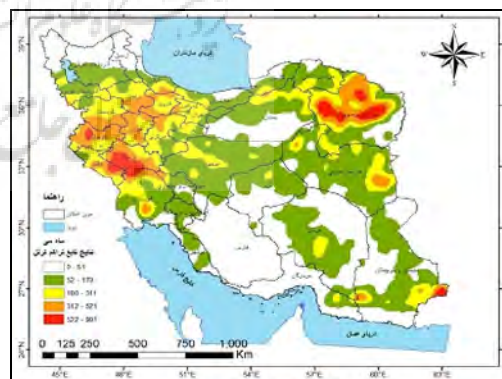
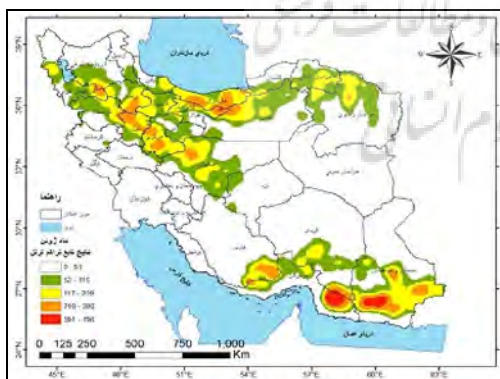
شکل ۶ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه فوریه

شکل ۵ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه ژانویه



شکل ۸ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه آوریل

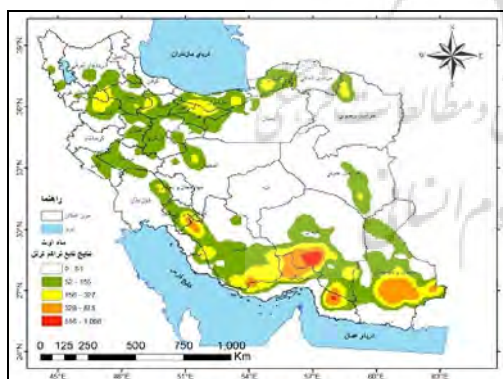
شکل ۷ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه مارس



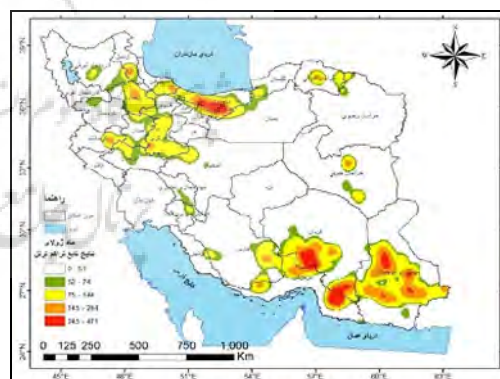
شکل ۱۰ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه ژوئن

شکل ۹ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه می

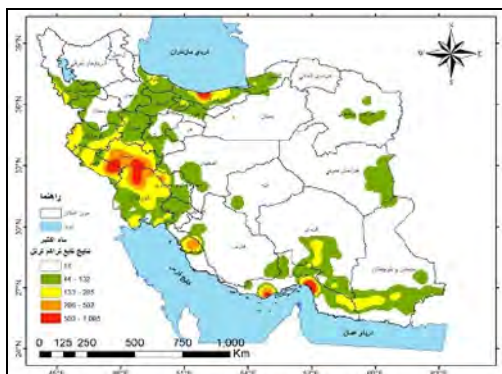
در ماه ژوئیه گسترش فعالیت‌های رعدوبرقی کاهش یافته است. مراکز دارای تراکم بالای رعدوبرق‌ها در این ماه در جنوب، جنوب شرق و شمال ایران قرار دارد. مراکز بیشینه جنوب و جنوب شرق ایران در دامنه‌های جنوبی کوه‌های بشاگرد، دامنه‌های جنوبی ناهمواری‌های جنوب کرمان و استان هرمزگان قرار دارد. مرکز بیشینه واقع در شمال ایران نیز بر ناهمواری‌های البرز مرکزی واقع شده است (شکل ۱۱). اما در ماه اوت فعالیت‌های رعدوبرقی در گستره بزرگ‌تری رخ می‌دهند. بیشینه تراکم رعدوبرق‌ها در این ماه در جنوب استان کرمان، شرق استان هرمزگان و مرکز استان سیستان و بلوچستان قرار دارد که منطبق بر مراکز بیشینه ماه اوت است (شکل ۱۲). ماه سپتامبر در کنار ماه ژانویه دارای کمترین فراوانی رعدوبرق‌ها است. گسترش فعالیت‌های رعدوبرقی در این ماه نیز کم است. مراکز عمده دارای فعالیت‌های رعدوبرقی در این ماه جنوب و جنوب شرق ایران است و به‌صورت پراکنده مناطقی از غرب و شمال ایران نیز فعالیت‌های رعدوبرقی وجود دارد. اما بیشینه تراکم رعدوبرق‌ها در این ماه در جنوب استان کرمان، جنوب استان سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از استان هرمزگان قرار دارد (شکل ۱۳). این مراکز بیشینه در ماه اکتبر تغییر می‌کند و در شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان قرار می‌گیرد. هرچند که مراکز دیگری در جنوب و شمال ایران نیز دارای بیشینه رعدوبرق هستند (شکل ۱۴). در ماه‌های نوامبر و دسامبر تراکم رعدوبرق‌ها در غرب، جنوب غرب و تا حدی در جنوب ایران بیشتر است و عمده فعالیت‌های رعدوبرقی در این مناطق رخ می‌دهند. بیشینه تراکم رعدوبرق‌ها در ماه نوامبر در شرق و شمال غرب استان خوزستان و در ماه دسامبر در شمال استان خوزستان قرار دارد (شکل ۱۵ و شکل ۱۶). پراکنش رعدوبرق‌ها در ماه‌های ژانویه، نوامبر و دسامبر (ماه‌های سرد سال) بسیار شبیه به هم است و تراکم رعدوبرق‌ها در این ماه‌ها در جنوب غرب ایران بیشینه است.



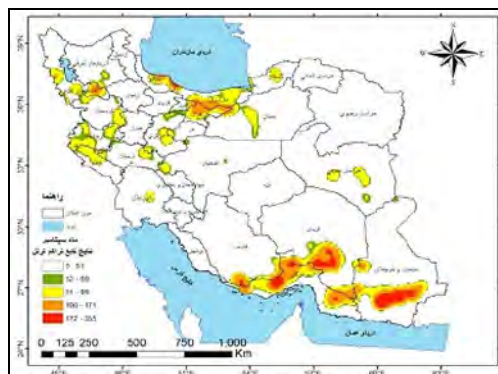
شکل ۱۲ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه اوت



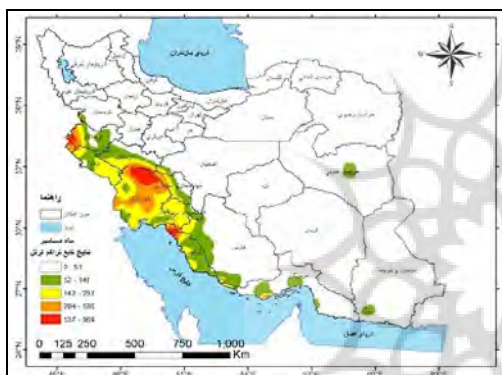
شکل ۱۱ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های رعدوبرق ماه ژوئیه



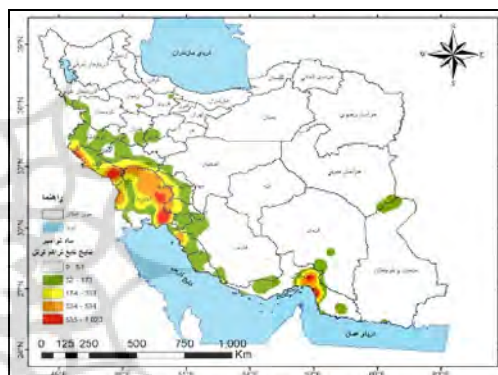
شکل ۱۴ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های
رعدوبرق ماه اکتبر



شکل ۱۳ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های
رعدوبرق ماه سپتامبر



شکل ۱۶ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های
رعدوبرق ماه دسامبر



شکل ۱۵ نتایج تابع تراکم کرنل برای داده‌های
رعدوبرق ماه نوامبر

۳. ۴. عوامل مؤثر در توزیع ماهانه و سالانه رعدوبرق‌ها

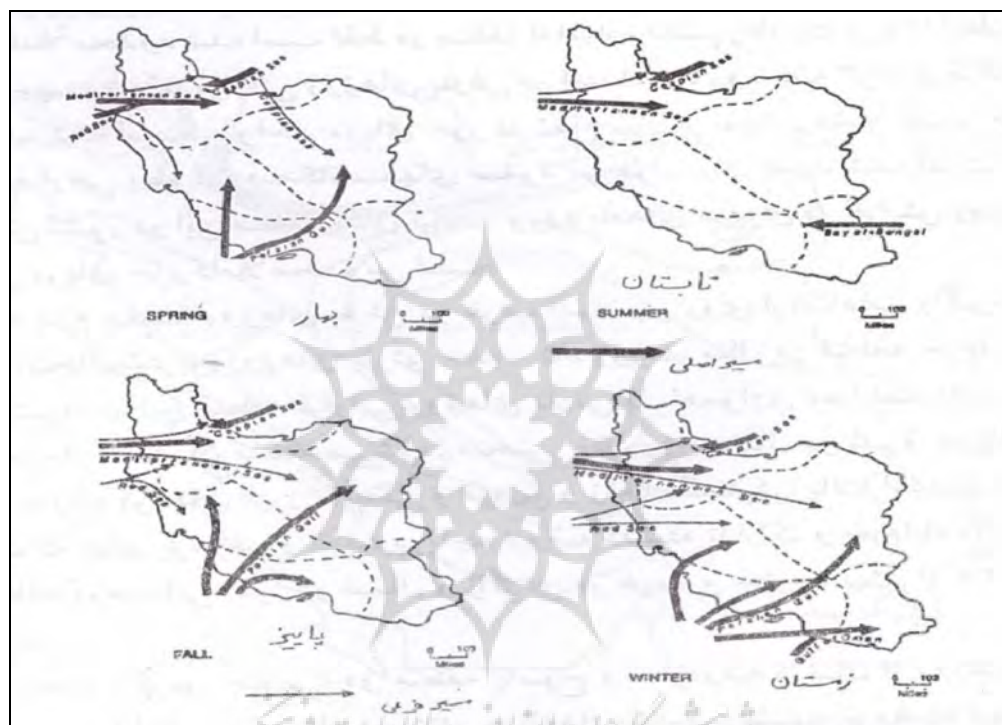
شکل ۱۷ مسیرهای ورود رطوبت در فصل‌های مختلف را نشان می‌دهد. این مسیرها را می‌توان نماینده مسیر ورود سامانه‌های بارشی در نظر گرفت. به نظر می‌رسد که مسیر و فراوانی ورود سامانه‌های بارشی نقشی تأثیرگذار بر فراوانی رعدوبرق‌ها دارند. به طوری که مناطقی دارای بیشینه رعدوبرق‌ها از مسیرهای اصلی ورود تبعیت می‌کند. در فصل‌های بهار، پاییز و زمستان (ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، اکتبر، نوامبر و دسامبر) نواحی شمال غربی تا جنوب غربی ایران که در مسیر اصلی ورود رطوبت به ایران هستند، دارای بیشترین فراوانی رعدوبرق‌ها هستند. در این ماه‌ها بیشینه فراوانی رعدوبرق‌ها در دامنه‌های غربی زاگرس مرکزی (جنوب غرب ایران) قرار دارد که با مسیرهای ورود سامانه‌های مرطوب سودانی که عمدتاً از جنوب غرب و جنوب وارد ایران می‌شوند (لشکری، ۱۳۸۱، ۱۳۳؛ مسعودیان و کاویانی، ۱۳۸۶، ۹۶) انطباق

دارد. در همین فصلها مناطق جنوب شرقی و شرقی ایران که در مسیر اصلی ورود رطوبت نیستند، دارای کمترین فراوانی رعدوبرقها هستند. در فصل گرم (ماههای ژوئن، جولای، اوت و سپتامبر) بیشینه فراوانی رعدوبرقها در شمال غرب ایران (به دلیل محدودیت دید سنجنده در این تصاویر مشخص نیست) و جنوب شرق ایران افزایش پیدا می کند که منطبق بر مسیرهای ورود مدیترانه و بنگال هستند و غرب و جنوب غرب ایران که در این فصل مسیر ورود رطوبت نیست، فراوانی رعدوبرقها نسبت به سایر فصول به شدت کاهش می یابد. از آنجاکه دمای پایین محدودکننده تشکیل رعدوبرق می شود، در فصل سرد سال و در نیمه شمالی ایران که دارای دماهایی پایین است، فراوانی رعدوبرقها کاهش پیدا می کند و هرچند با مسیر ورود رطوبت منطبق است اما فراوانی رعدوبرقها بیشینه نیست. از طرفی مشاهده شد که در مقیاس سالانه و ماهانه همواره بیشینه فراوانی رعدوبرقها بر یکی از ناهمواریهای مهم ایران (زاگرس، البرز، بینالود، بشاگرد و غیره) منطبق بوده است که نشانگر تأثیر ناهمواریها بر سامانه های بارشی است. این ناهمواریها باعث افزایش حرکات قائم و در نتیجه افزایش رعدوبرقها در دامنه های رو به بادهای باران آوری می شود.

۵. نتیجه گیری

مشاهدات سنجنده LIS حاکی از آن است که فراوانی رعدوبرقها در همه ماهها یکسان نیست و برخی ماهها دارای فراوانی بیشتر رعدوبرقها و برخی ماهها دارای فراوانی کمتری هستند. ۴۱ درصد رعدوبرقهای مشاهده شده در ماههای آوریل و می و ۷ درصد رعدوبرقها در ماههای ژانویه و سپتامبر رخ داده اند. فراوانی رعدوبرقها در ساعات مختلف نیز متفاوت است. ساعت ۱۴:۳۰ دارای بیشترین فراوانی (۱۱/۶٪) رعدوبرق و ساعت ۳:۳۰ کمترین فراوانی (۰/۷٪) رعدوبرق هستند. فراوانی رعدوبرقها بین ساعات ۱۲:۳۰ تا ۲۰:۳۰ بیش از ۶۶ درصد و فراوانی آن بین ساعات ۳:۳۰ تا ۹:۳۰ در حدود ۱۱ درصد است. پراکنش و تراکم سالانه داده ها نیز نشان داد که تمام مناطق دارای تراکم یکسان رعدوبرق نیستند و در برخی مناطق تراکم رعدوبرقها بیشتر است. دامنه های غربی رشته کوه های زاگرس، البرز مرکزی، کوه های جنوب کرمان، ناهمواری های جنوب سیستان و بلوچستان و بخش هایی از استان های خراسان رضوی و خراسان جنوبی دارای فراوانی بیشتر رعدوبرقی هستند. بیشینه تراکم رعدوبرقها در شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان قرار دارد. همان طور که فراوانی رعدوبرقها در ماه های مختلف متفاوت است، انتظار می رود پراکنش و مراکز دارای بیشینه رخداد رعدوبرقها نیز در ماه های مختلف متفاوت باشد. نتایج تابع تراکم کرنل نشان داد که در ماه های ژانویه، نوامبر و دسامبر پراکنش رعدوبرقها مشابه است و بیشینه تراکم رعدوبرقها در جنوب غرب ایران (شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان) قرار دارد. در ماه های، فوریه، مارس و اکتبر نیز بیشینه تراکم رعدوبرقها در جنوب غرب ایران قرار دارد اما پراکنش رعدوبرقها گسترده تر از سه ماه

قبل است. در ماه‌های آوریل و می فراوانی فعالیت‌های رعدوبرقی بیشینه است و گسترش آن نیز بسیار بیشتر از ماه‌های دیگر است. در این ماه‌ها مناطق غربی، جنوب غربی و شمال شرقی ایران دارای بیشینه تراکم رعدوبرق‌ها هستند. در ماه‌های ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر نیز پراکنش فعالیت‌های رعدوبرقی متفاوت است، اما بیشینه تراکم آن در مناطق جنوبی استان کرمان، جنوب استان سیستان و بلوچستان و برخی نواحی استان هرمزگان قرار دارد.



شکل ۱۷ مسیر ورود رطوبت در فصل‌های مختلف در ایران (علیچانی، ۱۳۸۹، ۱۱۱)

بختیاری، ناصر؛ ۱۳۹۰. تحلیل آماری همدید توفان‌های تندری در استان فارس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه پیام نور مرکز اصفهان. اصفهان.

جلالی، اروج، رسولی، علی اکبر، ساری صراف، بهروز؛ ۱۳۸۵. توفان‌های تندری و بارش‌های ناشی از آن را در محدوده شهر اهر. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی. شماره ۲۴. صص ۱۸-۳۳.

خالصی، فریده؛ ۱۳۹۳. واکاوی زمانی توفان‌های تندی در ایران، آب و هواشناسی کاربردی. جلد ۱. شماره ۱. صص ۶۰-۴۷.

رسولی، علی اکبر؛ ۱۳۸۴. تحلیلی بر فناوری GIS. تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز.

رسولی، علی اکبر؛ ۱۳۹۰. مقدمه ای بر هواشناسی و اقلیم‌شناسی ماهواره ای. تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز.

رسولی، علی اکبر، بداق جمالی، جواد، جلالی، اروج؛ ۱۳۸۶. توزیع زمانی بارش های رعدوبرقی منطقه شمال غرب ایران، مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان، شماره ۱، پیاپی ۲۲، صص ۱۷۰-۱۵۵.

عسگری، احمد، محبی، فرشته؛ ۱۳۸۹. مطالعه آماری-همبندی توفان‌های تندی در استان خوزستان، چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، ۲۹ آذر تا ۱ دی، تهران، صص ۱۱۱-۱۱۹.

علائی طالقانی، محمود؛ ۱۳۹۲. ژئومرفولوژی ایران، تهران، انتشارات قومس.

علیجانی، بهلول؛ ۱۳۸۹. آب و هوای ایران، چاپ دهم، تهران، انتشارات پیام نور.

قاسمی دستگردی، احمدرضا؛ ۱۳۹۱. مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی پوشش ابری با تاکید بر روزهای بارش در ایران، پایان نامه دکتری، تبریز، دانشگاه تبریز.

قویدل رحیمی، یوسف، فرج زاده، منوچهر، باغبانان، پرستو؛ ۱۳۹۴. روند تغییرات زمانی توفان‌های تندی در ایران، برنامه ریزی و آمایش فضا، دوره ۱۹، شماره ۲، صص ۲۱۰-۱۸۵.

لشکری، حسن (۱۳۸۱). مسیریابی سامانه‌های کم فشار سودانی ورودی به ایران، مجله مدرس، دوره ۶، شماره ۲، صص ۱۵۶-۱۳۳.

مسعودیان، ابوالفضل و کاویانی، محمدرضا؛ ۱۳۸۶. اقلیم‌شناسی ایران، اصفهان، انتشارات دانشگاه اصفهان.

Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Petersen, W. A., Buechler, D. E., Bruning, E. C., Blakeslee, R. J., & Christian, H. J. (2011). The 13 years of TRMM lightning imaging sensor: From individual flash characteristics to decadal tendencies. XIV International Conference on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brazil.

Buechler, D. E., Koshak, W. J., Christian, H. J., & Goodman, S. J. (2014). Assessing the performance of the lightning imaging sensor (LIS) using deep convective clouds. *Atmospheric Research*, 135, 397-403.

Cecil, D. J., Buechler, D. E., & Blakeslee, R. J. (2014). Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. *Atmospheric Research*, 135, 404-414.

Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L., Buechler, D. E., Driscoll, K. T., ... & Stewart, M. F. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D1), 1-14.

- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Goodman, S. J., & Mach, D. M. (2000). Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the lightning imaging sensor (LIS). NASA/Marshall Space Flight Center, Alabama.
- Haklander, A. J., & Van Delden, A. (2003). Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmospheric Research*, 67, 273-299.
- Hodanish, S., & Wolyn, P. (2012, April). *Lightning climatology for the state of Colorado*. Paper presented at the 23rd International Lightning Detection Conference & 4th International Lightning Meteorology Conference, Broomfield, Colorado, USA.
- Huffines, G. R., & Orville, R. E. (1999). Lightning ground flash density and thunderstorm duration in the continental United States: 1989-96. *Journal of Applied Meteorology*, 38(7), 1013-1019.
- Kilinc, M., & Beringer, J. (2007). The spatial and temporal distribution of lightning strikes and their relationship with vegetation type, elevation, and fire scars in the Northern Territory. *Journal of Climate*, 20(7), 1161-1173.
- Kodama, Y. M., Okabe, H., Tomisaka, Y., Kotonno, K., Kondo, Y., & Kasuya, H. (2007). Lightning frequency and microphysical properties of precipitating clouds over the western North Pacific during winter as derived from TRMM multisensor observations. *Monthly Weather Review*, 135(6), 2226-2241.
- Liu, C., & Zipser, E. J. (2008). Diurnal cycles of precipitation, clouds, and lightning in the tropics from 9 years of TRMM observations. *Geophysical Research Letters*, 35(4), 311-326.
- Morales, C. A., Neves, J. R., Moimaz, E. A., & Camara, K. S. (2014). Series Timing and Ranging NETWORK- STARNET: 8 years of measurements in South America. *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, Norman, Oklahoma, U.S.A.
- Morita, J., Takayabu, Y. N., Shige, S., & Kodama, Y. (2006). Analysis of rainfall characteristics of the Madden-Julian oscillation using TRMM satellite data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 42(1), 107-126.
- Petersen, W. A., Christian, H. J., & Rutledge, S. A. (2005). TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning. *Geophysical Research Letters*, 32(14), 1-4.
- Petersen, W. A., Nesbitt, S. W., Blakeslee, R. J., Cifelli, R., Hein, P., & Rutledge, S. A. (2002). TRMM observations of intraseasonal variability in convective regimes over the Amazon. *Journal of Climate*, 15(11), 1278-1294.
- Qie, X., Zhou, Y., & Yuan, T. (2003). Global lightning activities and their regional differences observed from satellite. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(6), 1068-1077.
- Rasuoli, A. A. (1996). The temporal and spatial study of thunderstorm rainfall in the greater Sydney region (Unpublished doctoral dissertation). University of Wollongong, New South Wales, Australia.

- Rudlosky, S. D. (2014). Evaluating Ground-based lightning detection networks using TRMM/LIS observations, *23rd International Lightning Detection Conference & 5th International Lightning Meteorology Conference*, Tucson, Arizona, USA.
- Shiple, S. T., Graffman, I. A., & Ingram, J. K. (2000). GIS applications in climate and meteorology. In *Proc., ESRI International User Conference*. San Diego, California.
- Ushio, T., Yoshida, S., Sakurai, S., Kawasaki, Z. I., & Okamoto, K. I. On the relationship between radar reflectivity factor and thunderstorm flash rate.

