

مطالعه ارتباط بین شاخص‌های اقلیمی جهانی در مقیاس‌های زمانی مختلف

ابوالفضل نیستانی^{*۱}

^۱ استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶)

چکیده

در این تحقیق ارتباط احتمالی بین تعدادی از شاخص‌های مهم اقلیمی با استفاده از چندین روش آماری مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با بررسی سری‌های زمانی و استفاده از روش تحلیل طیفی، محتوای طیفی داده‌ها و شدت آنها در بسامدهای مختلف به دست آمد. سپس روش همبستگی بین سیگنال‌ها برای بررسی میزان ارتباط خطی آنها در لگ‌های زمانی مختلف استفاده شد. در نهایت با به‌کارگیری روش همخوانی موجک، میزان همبستگی شاخص‌ها در بسامدها و زمان‌های مختلف تحلیل شد. علاوه بر این، با استفاده از نقشه‌های پراکنش، ارتباط احتمالی داده‌ها بررسی شد. شاخص‌های انتخابی شامل تعداد لکه‌های خورشیدی (SN)، شاخص نوسان جنوبی (SOI)، نوسان شبه‌دوسالانه (QBO)، نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان مدیترانه (MO) می‌باشند که مقادیر ماهانه آنها در دوره آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس تحلیل‌های انجام شده شواهدی مبنی بر تأثیر چرخه ۱۱ ساله لکه‌های خورشیدی بر سیگنال SOI یافت شد. نتایج نشان می‌دهد، که اگر سیگنال SN به مثابه علت و سیگنال SOI به مثابه معلول در نظر گرفته شود، مقدار کمینه مولفه ۱۱ ساله در سیگنال SOI در حدود ۳ سال بعد از مقدار بیشینه همین مولفه در سیگنال SN رخ می‌دهد. روش همبستگی تأخیری و نمودار پراکنش نیز مؤید افزایش رابطه خطی این لکه‌ها با شاخص SOI در لگ زمانی ۳۳ تا ۳۶ ماه است. بیشترین همبستگی در لگ زمانی صفر در ارتباط با سیگنال‌های NAO و MO وجود دارد، که با توجه به تحلیل همخوانی موجک، به دلیل نوسان هم‌فاز مشترک دهه‌ای بین این دو سیگنال است. به علاوه نوسان‌های مشترک با فاز سازگار در مقاطعی از زمان در مقیاس بین‌سالی بین سیگنال‌ها مشاهده شد. نمودارهای پراکنش نیز جزئیات بیشتری از ارتباط احتمالی بین داده‌ها را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های اقلیمی، تغییرپذیری، همبستگی، طیف توان، همخوانی موجک

۱ مقدمه

مشاهدات نشان می‌دهند که عوامل اقلیمی داخلی مانند شاخص‌های اقلیمی و همچنین عامل خارجی چرخه ۱۱ ساله فعالیت خورشیدی بر سامانه اقلیم و تغییرپذیری کمیت‌های هواشناختی تأثیر قابل توجهی دارند (قاسمی و خلیلی، ۲۰۰۸؛ گری و همکاران، ۲۰۱۰؛ علیزاده چوپری و همکاران، ۲۰۱۸؛ اندروز و همکاران، ۲۰۱۹؛ ملاشریفی و همکاران، ۱۳۹۸؛ نیستانی و همکاران، ۲۰۲۲). از آنجایی که این سیگنال‌های داخلی و خارجی می‌توانند بر تغییرپذیری کمیت‌های هواشناختی مانند دما، فشار و بارش در مناطق مختلف کره زمین تأثیرگذار باشند، بررسی ارتباط بین هر جفت از آنها پیش از بررسی تأثیر آنها بر متغیرهای جوی بسیار حائز اهمیت است (لوکیانووا و الکسیو، ۲۰۰۴؛ کورودا و همکاران، ۲۰۲۲).

روش‌های مختلفی برای شناسایی ارتباط بین سیگنال مرتبط با شاخص‌های اقلیمی و مدهای غالب موجود در آنها می‌توانند به کار روند. این روش‌ها در گستره‌ی روش همبستگی ساده تا روش‌های کارآمدتر و پیچیده‌تر طبقه‌بندی می‌شوند. بعضی از این روش‌های جدید بر پایه تحلیل طیفی پایه‌گذاری شده‌اند و با ظهور این روش‌ها در سال‌های اخیر این امکان فراهم شده تا سیگنال‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف به عناصر سازنده تجزیه شوند و در نتیجه نوسان‌های مشترک یا رفتار چرخه‌ای قابل توجه در مقیاس‌های خاصی آشکار شود. یکی از این روش‌ها، روش تجزیه موجک است (تورنسی و کمپو، ۱۹۹۸؛ تمدن و همکاران، ۲۰۱۷؛ داس و همکاران، ۲۰۲۰). توسط این روش، سیگنال‌های وابسته به زمان می‌توانند به فضای زمان-بسامد انتقال پیدا کنند و از این رو مدهای غالب تغییرپذیری و شدت آنها در زمان قابل ردیابی است. همچنین به واسطه مزایای تبدیل‌های موجک (WT)، روش‌هایی مانند تحلیل موجک متقابل (CWT) و همخوانی موجک (WTC) برای آزمایش ارتباط بین دو سیگنال در مقیاس‌های زمانی

مختلف توسعه یافته‌اند (گرینستد و همکاران، ۲۰۰۴؛ تن و همکاران، ۲۰۱۶؛ داس و همکاران، ۲۰۲۰).

نوسان‌های اقلیمی گوناگونی در مقیاس‌های جهانی و محلی تعریف شده‌اند که تعدادی از تأثیرگذارترین آنها در ادامه معرفی شده‌اند. تعداد لکه‌های خورشیدی (SN) یکی از شاخص‌های خارجی است که غالباً مانند جانشین برای فعالیت خورشید به کار می‌رود (موری و همکاران، ۲۰۰۶؛ مارس و همکاران، ۲۰۲۱). این شاخص دارای یک چرخه غالب با میانگین ۱۱ ساله است که چرخه خورشیدی نامیده می‌شود (میاکی و همکاران، ۲۰۱۳). اثر تغییرات SN بر روی شدت تابش کلی خورشید (TSI) آشکار شده و همچنین همبستگی مثبتی مشاهده شده است (شو و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین تغییرات TSI به مثابه عامل محرک سامانه اقلیم می‌تواند باعث تغییراتی در مولفه‌های دیگر این سامانه شود. از اینرو مطالعات متعددی برای تعیین شدت تأثیر فعالیت خورشید بر تغییرپذیری کمیت‌های هواشناسی و کل سامانه اقلیم انجام شده است (کودرا و کورودا، ۲۰۰۲؛ گری و همکاران، ۲۰۱۰؛ لی‌موال و همکاران، ۲۰۱۹؛ مارس و همکاران، ۲۰۲۱).

شاخص نوسان جنوبی (SOI)، نوسان شبه-دوسالانه (QBO) و نوسان اطلس شمالی (NAO)، شاخص‌هایی هستند که به‌طور متداول برای بررسی تأثیر آنها بر اقلیم مناطق مجاور آنها و همچنین مکان‌های دوردست به کار می‌روند. شاخص SOI تأثیر پدیده نوسان جنوبی النینو را نشان می‌دهد و مطالعات نشان می‌دهند که این پدیده نقش مهمی در اقلیم نیمکره جنوبی و شمالی دارد (لی و لو، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیزاده چوپری و همکاران، ۲۰۱۸؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۱). انتقال پایین‌سوی جت‌های شرق‌وزان و غرب‌وزان مداری، نوسان شبه‌دوسالانه نامیده می‌شود و نشانگر مد غالب تغییرپذیری بین‌سالی در پوش سپهر مناطق استوایی است. درحالی که QBO یک پدیده استوایی در جو میانی است، اما آن بر

بین این شاخص‌ها از نوع رابطه علی و معلولی نباشد و این ارتباط ناشی از پدیده‌ای دیگر باشد که در مقیاس زمانی خاصی بر هر جفت از سیگنال‌ها تاثیر مشترک می‌گذارد. همچنین آشکارسازی توان هر یک از مقیاس‌های سازنده سیگنال‌های اقلیمی که در جهت کمی‌سازی میزان اثر آنها کاربرد فراوان دارد از اهداف دیگر این پژوهش است.

۲ داده و روش تحقیق

۲-۱ داده‌ها

در این تحقیق از داده‌های میانگین ماهانه شاخص‌های اقلیمی تعداد لکه‌های خورشیدی (SN)، شاخص نوسان جنوبی (SOI)، نوسان اطلس شمالی (NAO)، نوسان شبه‌دوساله (QBO) و نوسان مدیترانه (MO) طی دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۲۱ استفاده شده است. شاخص میانگین ماهانه SN از مرکز داده جهانی برای تولید، نگهداری و بخش تعداد لکه‌های خورشیدی بین‌المللی استخراج شده-اند (<https://wwwbis.sidc.be/silso/datafiles#total>).

مقادیر ماهانه شاخص‌های SOI، QBO و NAO از آرشیوهای مرکز پیش‌بینی اقلیمی NOAA مورد استفاده گرفته‌اند

قرار (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>).

داده‌های ماهانه نوسان مدیترانه (MO) نیز از مرکز تحقیقات اقلیمی دانشگاه انگلیای شرقی گرفته شده‌اند (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/moi/>) که به صورت اختلاف فشارِ نرمال شده بین الجزایر (36.4°N, 3.1°E) و قاهره (30.1°N, 31.4°E) تعریف می‌شود.

۲-۲ روش تحقیق

پس از استخراج داده‌ها از منابع مربوطه و میانگین‌گیری ماهانه از آنها برای تشکیل سیگنال‌های اقلیمی، برای مقایسه راحت‌تر آنها از روش نرمال‌سازی کمینه-بیشینه، (Min-Max Normalization) استفاده شده است. رابطه

روی وردسپهر استوایی، جنب استوایی و مناطق دور از استوا هم از طریق ساز و کارهای مختلف تاثیرگذار است (لیس و گلر، ۲۰۱۲؛ سان و همکاران، ۲۰۱۷). در مناطق جنب استوایی، QBO بر روی پیچک‌های وردسپهری هم تاثیر می‌گذارد (اینو و همکاران، ۲۰۱۱).

شاخص NAO الگوی غالب چرخش‌های جوی در عرض‌های جغرافیایی میانه در نیمکره شمالی است (هورل و وان‌لون، ۱۹۹۷) که می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر اقلیم حوضه اطلس شمالی و مناطق مجاور مخصوصاً در فصل زمستان داشته باشد (وایستی-سرانو و لویز-مورنو، ۲۰۰۸؛ گومارا و همکاران، ۲۰۱۴). در مطالعات قبلی شواهدی مبنی بر تاثیر خورشید بر روی NAO وجود دارد (لوکیانووا و الکسیو، ۲۰۰۴؛ کورودا و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر شاخص‌های جهانی بعضی شاخص‌های منطقه‌ای مانند شاخص نوسان مدیترانه (MO) (کنته و همکاران، ۱۹۸۹؛ پلوتیکوف و همکاران، ۱۹۹۶)، می‌تواند برای آزمایش تاثیر احتمالی آنها بر تغییرپذیری متغیرهای هواشناختی در مناطق مجاور مورد استفاده قرار گیرند. شاخص MO یکی از الگوهای جوی است که می‌تواند متغیرهای هواشناختی مانند دما و بارش را در نزدیکی حوضه مدیترانه تحت تاثیر قرار دهد (مارتین-واید و لویز-بوستینز، ۲۰۰۶؛ کریادو-الدینوا و سوتو-ناوارو، ۲۰۲۰).

هدف اصلی از پژوهش حاضر یافتن رابطه احتمالی بین هر جفت از شاخص‌های اقلیمی اشاره شده با استفاده از روش‌های آماری تحلیل همبستگی تاخیری (لگ‌دار زمانی)، نمودارهای پراکنش، تحلیل طیفی و همخوانی موجک است. با توجه به اینکه سیگنال‌های مرتبط با این شاخص‌ها به‌طور مجزا می‌توانند بر تغییرپذیری متغیرهای جوی در نقاط مختلف کره زمین و در مقیاس‌های زمانی مختلف تاثیرگذار باشند، بنابراین یافتن ارتباط احتمالی بین خود آنها نیز می‌تواند در این زمینه بسیار حائز اهمیت باشد. البته بایستی به این مساله توجه کرد که ممکن است رابطه

علاوهم اینکه ضریب همبستگی به طور گسترده در تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی این ضریب به دلیل ماهیت کلی آن قادر به نمایش همبستگی‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف سازنده سیگنال به طور موضعی نیست و بایستی در این حالت ابتدا سیگنال اصلی را با استفاده از پالایه‌های رقمی به مولفه‌های بسامدی سازنده تجزیه کرد و سپس ضریب همبستگی را برای هر مولفه بسامدی به طور مجزا محاسبه کرد (نیستانی، ۱۴۰۱).

روش دیگری که در این تحقیق برای محاسبه همبستگی‌ها به طور موضعی در زمان‌های مختلف و بسامدهای مختلف به کار می‌رود، روش همخوانی موجک (WTC) است (تورنسی و وبستر، ۱۹۹۹؛ ادیسون، ۲۰۱۷). برآورد گر همخوانی موجک مربع شده به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$WCH_{g,h}^2(a,b) = \frac{|(T_g^*(a,b)T_h(a,b))|^2}{(|T_g(a,b)|^2)(|T_h(a,b)|^2)} \quad (5)$$

که در اینجا 'g' و 'h' دو سیگنال نمونه هستند که می‌خواهیم رابطه بین آنها را پیدا کنیم و '*' نشانگر مزدوج مختلط تبدیل موجک (WT) است که برای یکی از دو سیگنال در صورت کسر استفاده می‌شود. نماد () نشان دهنده عملگر هموارسازی محلی هم در زمان و هم در مقیاس موجک است که بر روی مولفه‌های سازنده تبدیل اعمال می‌شود. در رابطه (۵)، $T(a,b)$ تبدیل موجک پیوسته (CWT) را برای هر سیگنال نشان می‌دهد که به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود (کروسمن و مورلت، ۲۰۰۵؛ ادیسون، ۲۰۱۷):

$$T_x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\Psi_{a,b}^*(t)dt \quad (6)$$

که 'a'، پارامتر اتساع و 'b' پارامتر انتقال نامیده می‌شود. معادله (۶) هم شامل خود سیگنال $x(t)$ است و هم مزدوج مختلط موجک مادر اتساع یافته و انتقال یافته است که به صورت $\Psi((t-b)/a)$ بیان می‌شود. در این مطالعه موجک مختلط مورلت (Morlet) به عنوان موجک مادر

نرمال‌سازی داده‌ها بر اساس روش Min-Max به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$x_{scaled} = \frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \quad (1)$$

که در این رابطه x_{min} کمترین مقدار و x_{max} بیشترین مقدار سیگنال طی دوره آماری مورد مطالعه است و مقادیر x از سری زمانی به مقادیر x_{scaled} تبدیل می‌شوند. این روش یک تبدیل خطی بر روی داده‌های اولیه است و روابط بین مقادیر داده اصلی را حفظ می‌کند. همچنین همه مقادیر بین مقدار ۰ و ۱ مقیاس می‌شوند (مانیکاندان و همکاران، ۲۰۱۳).

پس از نرمال‌سازی داده‌ها، ضریب همبستگی پیرسون در تاخیرهای (لگ‌های) زمانی مختلف بین هر جفت از این سیگنال‌ها محاسبه شده است. ضریب همبستگی (r) روشی است که مشخص می‌کند تا چه اندازه دو متغیر در زمان یا مکان با هم تغییر می‌کنند و می‌تواند وجود رابطه (خطی) قوی یا ضعیف را بین سیگنال‌ها در تاخیر زمانی صفر یا تاخیرهای زمانی دیگر نشان دهد (تامسون و امری، ۲۰۱۴). رابطه ضریب همبستگی پیرسون در تاخیر صفر به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$r = \frac{C_{xy}}{S_x S_y} \quad (2)$$

که در این رابطه S_x و S_y به ترتیب نشان دهنده وردایی‌های دو سیگنال x و y هستند و C_{xy} هم‌وردایی این دو سیگنال است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$C_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3)$$

مقدار ضریب r با توجه به اینکه توسط انحراف معیارهای داده‌ها نرمال‌سازی شده، همواره بین -۱ تا +۱ قرار می‌گیرد. اگر یکی از سیگنال‌ها نسبت به سیگنال دیگر در حوزه زمان به اندازه τ انتقال داده شود، ضریب همبستگی با تاخیر زمانی قابل محاسبه خواهد بود که در این صورت هم‌وردایی به صورت رابطه (۴) قابل محاسبه خواهد بود:

$$C_{xy}(\tau) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (4)$$

که در اینجا $\tau = k\Delta t$ ($k = 0, \dots, M$) نشان دهنده زمان تاخیر برای نمونه‌برداری $k\Delta t$ ام است.

حاکمی از وجود رابطه بین دو سیگنال در فاز مخالف است. پیکان‌های با زاویه 90° و 270° (به ترتیب: قائم به سمت بالا و قائم به سمت پایین) نشانگر وضعیت‌های غیرهم‌فاز هستند که به این معناست که دو پدیده رابطه‌ی پیچیده‌تری دارند (ولاسکو و مندوزا، ۲۰۰۸).

علاوه بر روش‌های توصیف شده در بالا، از روش تحلیل طیف توان (PSD) در حوزه بسامد برای مقایسه محتوای توان طیفی شاخص‌های اقلیمی استفاده شده است. همچنین نمودارهای پراکنش برای درک بهتر ارتباط بین هر جفت از سیگنال‌ها به کار گرفته شده است تا بدین طریق اطلاعات کامل‌تری در مورد رفتار مشترک داده‌ها در صورت وجود، به دست آید.

۳ بررسی نتایج

۳-۱ سیگنال‌ها و محتوای طیفی

سری‌های زمانی ماهانه نرمال‌شده در ارتباط با تغییرات هر کدام از شاخص‌های اقلیمی انتخابی برای دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۲۱ در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. همچنین میانگین متحرک ۱۲ ماهه از شاخص‌ها نیز برای ردیابی تغییرات سالانه اضافه شده‌اند. همانطور که در سیگنال ماهانه می‌توان مشاهده کرد، نوسان‌های بیشتر در شاخص‌های NAO و MO نشان دهنده مولفه‌های بسامد بالای قوی‌تر است، که این مولفه‌ها متناظر با دوره تناوب‌های کوچک‌تر هستند. نوسان در سیگنال SN شامل نوسان‌های بسامد پایین قوی است، که مولفه‌های بسامد بالاتر و دامنه کمتر بر روی آن سوار شده‌اند. به نظر می‌رسد که، نوسان‌های بسامد متوسط در گستره تغییرات بین‌سالی برای شاخص‌های SOI و QBO غالب هستند. برای شاخص SOI، نمودار گویای آن است که، هم مولفه‌های بسامد بالا و هم مولفه‌های بسامد پایین به‌طور موثری در سیگنال ماهانه حضور دارند.

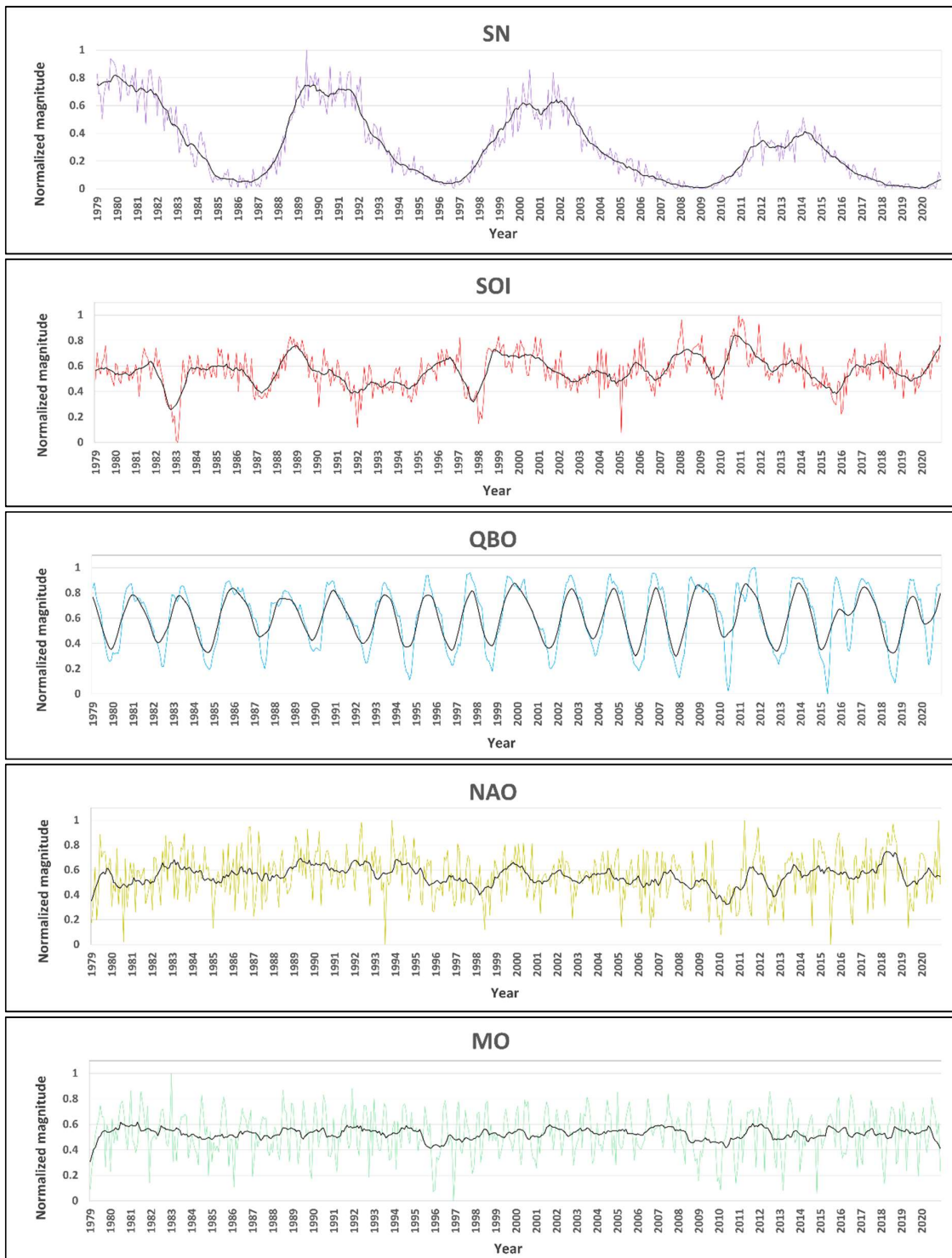
به کار رفته است، زیرا این موجک توازن خوبی را بین موضعی‌سازی زمانی و بسامدی برقرار می‌کند (تورنسی و کومپو، ۱۹۹۸؛ گرینستد و همکاران، ۲۰۰۴). این موجک مادر به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود (ماران و کوردس، ۲۰۰۴):

$$\Psi(t) = \frac{1}{\pi^4} e^{i2\pi f_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (7)$$

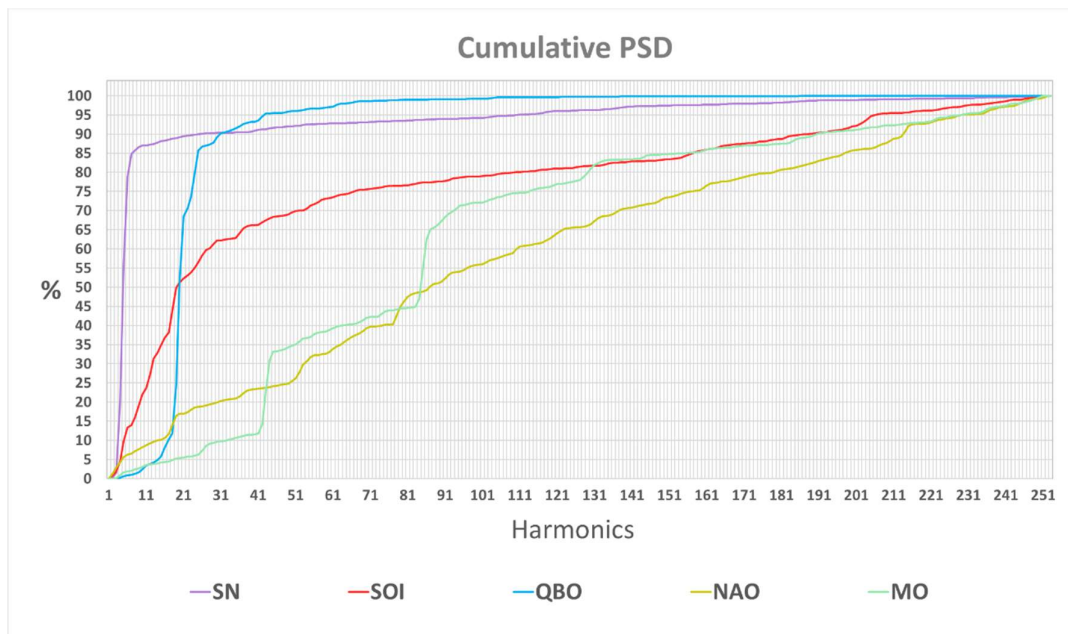
این موجک به‌وضوح یک موج سینوسی مختلط با یک پوش گاوسی می‌باشد و f_0 بسامد مرکزی موجک مادر است.

روش همخوانی موجک می‌تواند برای آشکارسازی نوسان‌های مشترک موضعی شده در زمان در سیگنال‌های غیرمانا (مانند سری‌های زمانی اقلیمی) مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر، این روش میزانی که آنها با هم تغییر می‌کنند را نشان می‌دهد (دنگ و همکاران، ۲۰۱۲). این روش یک رویکرد پیشرفته است که به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه رابطه فاز بین دو سیگنال در فضای زمان-بسامد به کار می‌رود (تورنسی و کمپو، ۱۹۹۸؛ گرینستد و همکاران، ۲۰۰۴). به‌طور کلی مقادیر همخوانی موجک (WTC) بین صفر و یک متغیر هستند. مقدار صفر به وضعیتی که هیچ همبستگی بین دو سیگنال وجود ندارد، متناسب می‌شود و مقدار یک نشان‌دهنده ارتباطی کامل بین دو سیگنال است. روش مونت کارلو برای تخمین اهمیت آماری مقادیر در نقشه WTC به کار می‌رود. جزئیات بیشتر در مورد برآورد همخوانی موجک در گرینستد و همکاران (۲۰۰۴) تشریح شده است.

غالباً مجموعه‌ای از پیکان‌ها به مناطق با همخوانی بالا در نقشه‌های WTC اضافه می‌شود. این پیکان‌ها نشان دهنده ارتباط فاز بین دو سیگنال هستند: پیکان‌های با زاویه 0° (افقی به سمت راست) نشان دهنده یک رابطه هم‌فاز هستند که به این معناست که دو پدیده تقریباً به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند. پیکان‌های با زاویه 180° (افقی به سمت چپ)



شکل ۱. سیگنال مرتبط با شاخص‌های نرمال‌شده‌ی اقلیمی برای دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۲۱. همچنین میانگین‌های متحرک ۱۲ ماهه برای هر شاخص با خط‌های مشکی ممتد نشان داده شده‌اند.



شکل ۲. تابع طیف توان تجمعی (CSP) مرتبط با شاخص‌های نرمال‌شده اقلیمی برای دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۲۱. برای داده‌های ماهانه در این دوره (۵۱۲ داده: شروع از ژانویه ۱۹۷۹ و پایان تا آگوست ۲۰۲۱)، ۲۵۶ هارمونیک وجود دارد که هارمونیک اول نشان‌دهنده چرخه‌ای به طول ۵۱۲ ماه و هارمونیک ۲۵۶ نشان‌دهنده چرخه‌ای با طول ۲ ماه می‌باشد.

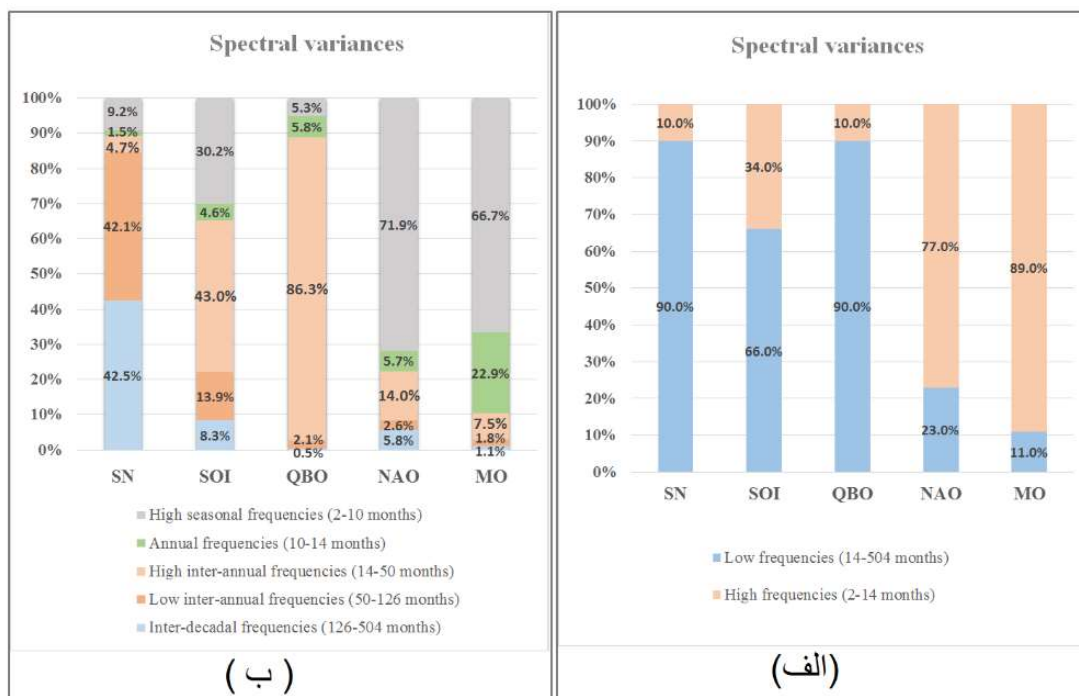
تغییر شیب شدید در هارمونیک چهارم برای سیگنال SN نشان دهنده چرخه ۱۱ ساله لکه‌های خورشیدی است که به‌وضوح بخش زیادی از واریانس این سیگنال را شامل می‌شود. همچنین تغییر شیب ناگهانی هم‌زمان در یک هارمونیک خاص برای دو سیگنال، می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط احتمالی بین آنها در آن مولفه باشد.

شکل ۳ اطلاعات واریانسی هر سیگنال را در نوارهای بسامدی مختلف (بر اساس منحنی‌های رسم شده در شکل ۲) نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، مولفه‌های شامل به دو دسته کم بسامد و پربسامد تقسیم شده‌اند که پربسامد در اینجا نشان دهنده تغییرپذیری‌های کمتر از ۱۴ ماه است. بخش غالب نوسان‌های سیگنال NAO و MO در هارمونیک‌های بالا توزیع شده است (به ترتیب: ۷۷ و ۸۹ درصد). حدود ۹۰٪ تغییرپذیری سیگنال SN و QBO در هارمونیک‌های پایین روی داده است و برای سیگنال SOI، تغییرات در بسامدهای

به‌منظور کمی‌سازی شدت نوسان‌ها در هر نوار بسامدی خاص (یا هر هارمونیک) از روش تحلیل طیفی استفاده شده است. نتایج در شکل ۲ برای همه شاخص‌ها به صورت طیف توان تجمعی (CSP) نمایش داده شده است. در این شکل میزان توان هر مولفه با بسامد مشخص (یا همان هارمونیک) بر حسب درصد از واریانس (توان) کلی سیگنال نمایش داده شده است. ارتباط منحنی CSP به منحنی چگالی طیف توان (PSD) به‌طور مشابه با روشی است، که تابع توزیع احتمال (CPF) به تابع چگالی احتمال (PDF) در آمار مرتبط می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات شیب در منحنی مربوط به هر کدام از سیگنال‌ها نشانگر مولفه‌های تناوبی یا شبه‌تناوبی موجود در داده‌ها است و تغییر شیب بیشتر، مولفه قوی‌تر را در آن هارمونیک خاص نشان می‌دهد. شیب یکنواخت نشان دهنده مولفه‌های تصادفی غالب و شیب تقریباً برابر با صفر حاکی از عدم وجود مولفه قابل توجه در آن هارمونیک خاص است. به‌طور نمونه،

برای مشخص کردن شدت تغییرپذیری سیگنال‌ها ناشی از پدیده‌های با مقیاس‌های زمانی مختلف بسیار کمک کننده است.

پایین نسبت به بسامدهای بالا تقریباً ۲ برابر است. جزئیات بیشتر از توان مولفه‌های سازنده سیگنال‌ها در شکل ۳-ب نمایش داده شده است. تجزیه واریانس داده‌ها به این شکل



شکل ۳. شدت تغییرپذیری سیگنال‌ها در نوارهای بسامدی مختلف نسبت به واریانس کلی آنها (%): (الف) تقسیم به دو مولفه پُرسامد بالا و کم بسامد، (ب) تقسیم به مولفه‌های گوناگون فصلی، سالانه، بین‌ساله و بین‌دهه‌ای.

قوی با همدیگر ندارند و یا اینکه مولفه‌های بسامدی اصلی سازنده آنها اختلاف فاز تقریباً ۹۰ درجه با یکدیگر دارند (این حالت نشانه‌ای از همبستگی قوی در یک لگ زمانی خاص است). در لگ‌های زمانی دیگر، همبستگی بین سیگنال SN و SOI مقدار قابل توجهی دارد (در لگ زمانی ۳۳ تا ۳۶ ماه، رابطه معکوس، ضریب همبستگی: $-0.4 \sim -$). به عبارتی با فاصله زمانی ۲/۵ تا ۳ سال، احتمالاً مولفه ۱۱ ساله SN بر مولفه ۱۱ ساله SOI اثر معکوس دارد. ضریب همبستگی بین سیگنال SN و دیگر شاخص‌ها در لگ‌های زمانی دیگر نسبت به لگ صفر تغییرات زیادی ندارد و تنها به دلیل حضور مولفه‌های تناوبی یا شبه‌تناوبی موجود در هر کدام از سیگنال‌ها، نوسان ضریب همبستگی مشاهده

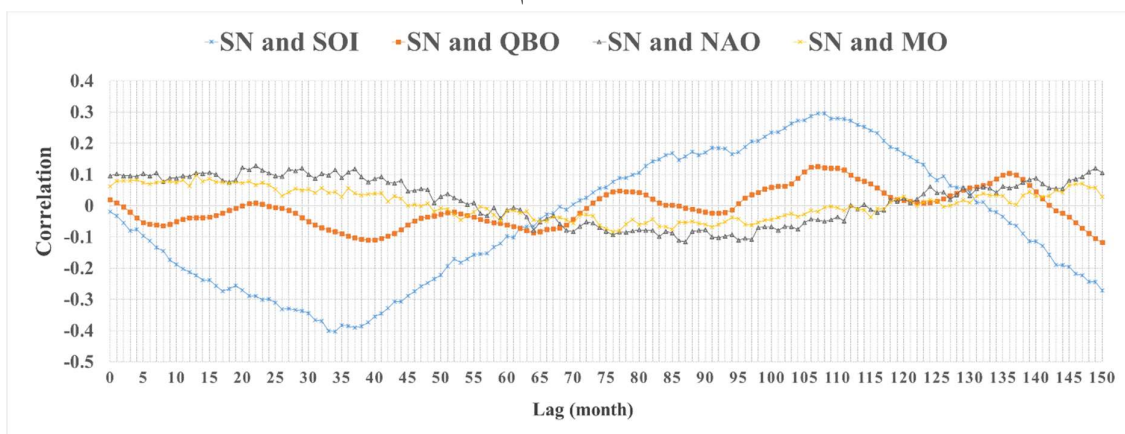
۲-۳ تحلیل همبستگی

نتایج تحلیل همبستگی تاخیری (لگ‌دار) بین سیگنال SN و دیگر سیگنال‌های اقلیمی در شکل ۴ و بین باقی سیگنال‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از توان سیگنال SN در بسامدهای پایین قرار می‌گیرد، بنابراین برای محاسبه ضریب همبستگی تاخیری، لگ‌های زمانی طولانی‌تری در نظر گرفته شده است (حداکثر تا لگ زمانی ۱۵۰ ماه). در لگ زمانی صفر، ضریب همبستگی بالا بین سیگنال SN و دیگر شاخص‌ها مشاهده نمی‌شود و بیشترین ضریب همبستگی به میزان ۰/۱ بین سیگنال SN و NAO وجود دارد. بنابراین می‌توان اینگونه استنباط کرد که این سیگنال‌ها احتمالاً رابطه خطی

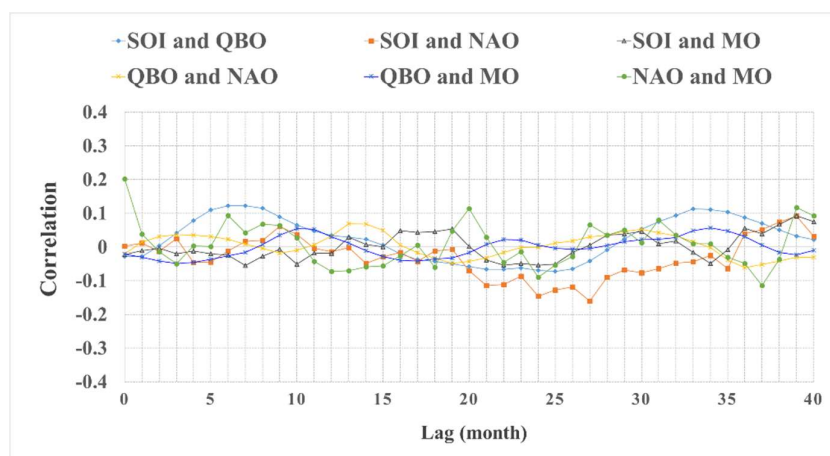
می‌شود.

سیگنال NAO و MO بزرگ‌تر است که ارتباط بیشتری را بین این دو سیگنال در زمان یکسان (لگ صفر) نشان می‌دهد. این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد، زیرا این دو شاخص در مناطق جغرافیایی نزدیک به هم محاسبه شده‌اند و ممکن است ساز و کار یکسانی بر هر دوی آنها به‌طور هم‌زمان در یک مقیاس خاص موثر باشد.

با توجه به اینکه تغییرپذیری‌های غالب در همه شاخص‌ها به استثنای SN در دوره‌های زمانی کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد، لگ زمانی برای محاسبه ضریب همبستگی بین آنها کوچک‌تر انتخاب شده است (حداکثر ۴۰ ماه). ضریب همبستگی بین شاخص‌ها در شکل ۵ در همه لگ‌های زمانی کوچک است، ولی مقدار آن در لگ زمانی صفر بین



شکل ۴. همبستگی لگ‌دار (تاخیری) بین هر جفت از سیگنال‌های اقلیمی و لکه‌های خورشیدی.



شکل ۵. همبستگی لگ‌دار (تاخیری) بین هر جفت از سیگنال‌های اقلیمی به استثنای SN.

شاخص‌های اقلیمی دیگر داشته باشد یا خیر، و همچنین بررسی ارتباط بین دیگر شاخص‌های اقلیمی هم مورد توجه قرار گرفته است. اگر در این حالت دو سیگنال اقلیمی چرخه‌های مشترک داشته باشند، این مساله ضرورتاً دلالت

۳-۳ تحلیل همخوانی موجک

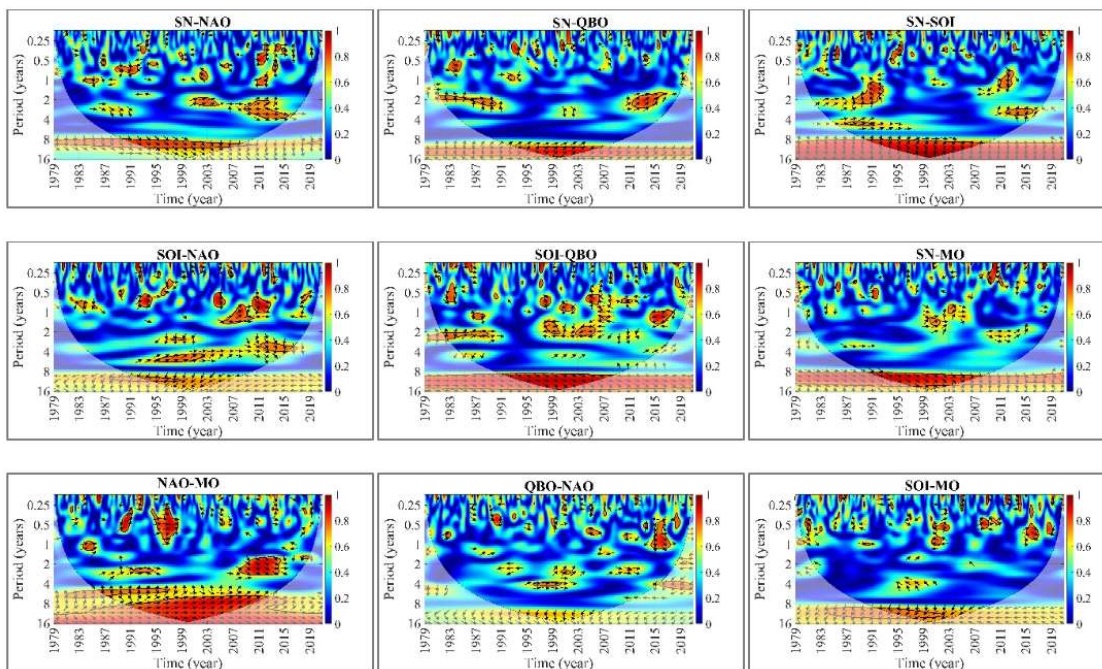
هدف در این بخش استفاده از تحلیل موجک برای بررسی این مساله است که آیا چرخه ۱۱ ساله لکه‌های خورشیدی (که با سیگنال SN نمایش داده شد) می‌تواند اثری بر

صورت گیرد. همچنین جهت بردارها، فاز بین نوسان‌ها را در هر نوار بسامدی مشخص می‌کند. بردارهایی که کاملاً به سمت راست جهت‌دهی شده‌اند، هم‌فاز بودن نوسان‌ها و بردارهای جهت‌دهی شده به سمت چپ نشانگر نوسان‌های با فاز مخالف برای یک مولفه خاص در هر دو سیگنال است. فقط در زمانی که مقدار همبستگی بزرگ‌تر از $0/6$ است، بردارهای فاز ترسیم شده‌اند.

در این شکل همخوانی بسیار بالا با فاز سازگار (همه بردارها در یک جهت) بین سیگنال‌های SN و SOI در نوار بسامدی متناظر با دوره تناوب ۹ تا ۱۲ سال مشاهده می‌شود. به وضوح منطقه با همبستگی بالا فقط از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۷ در داخل مخروط نفوذ قرار گرفته است. به علاوه اختلاف فاز بین دو سیگنال بر طبق جهت پیکان‌ها در این نوار بسامدی تقریباً ۹۰ درجه است. این به این معناست که مولفه با دوره تناوب تقریباً ۱۱ ساله از سیگنال SOI به اندازه ۹۰ درجه یا یک چهارم دوره تناوب جلوتر از همان مولفه در

بر رابطه علیت بین آنها نمی‌کند. علاوه بر این، حتی اگر ضریب همبستگی کلی مقدار کوچکی داشته باشد، این امکان وجود دارد که رابطه غیرخطی قوی بین داده‌ها وجود داشته باشد. بنابراین برای تحقیق بیشتر در مورد رابطه‌ی بین هر جفت از سیگنال‌های اقلیمی در بسامدهای مختلف، روش WTC استفاده شده است.

روش WTC، بزرگی همبستگی بین مولفه‌های متناظر دو سیگنال و تغییرات این همبستگی نسبت به زمان را نشان می‌دهد. شکل ۶ ارتباط بین سیگنال‌ها در زمان‌های مختلف و بسامدهای (دوره تناوب‌های) مختلف بر اساس این تحلیل را نشان می‌دهد. مناطق قرمز رنگ در داخل نقشه که توسط خط مشکی ممتد احاطه شده‌اند، مناطق با همبستگی بالا و سطح معنی‌داری ۵٪ را نشان می‌دهند. علاوه بر این ناحیه سایه زده شده در خارج از مخروط نفوذ (COI) نشان‌دهنده مناطقی است که تحت نفوذ اثرات لبه هستند (به دلیل طول محدود داده‌ها) و تحلیل برای این مناطق باید با احتیاط



شکل ۶. نقشه همخوانی موجک بین هر جفت از شاخص‌های اقلیمی.

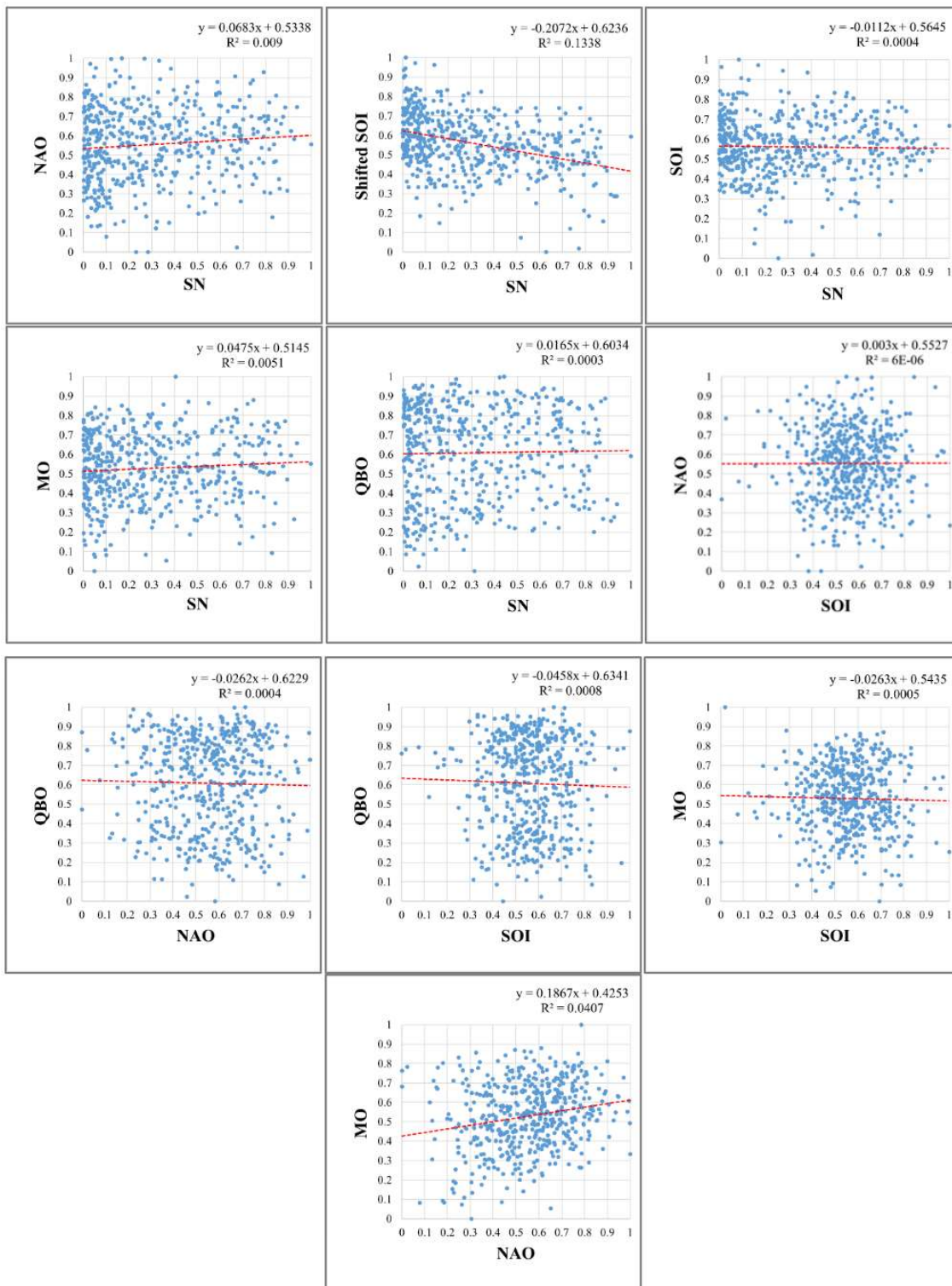
تناوب‌های بزرگ‌تر از ۶ سال به طور پیوسته و هم‌فاز نشان می‌دهند، اما از آنجایی که سیگنال MO توان قابل توجهی در این باند بسامدی ندارد (شکل ۳)، وجود همخوانی بالا در دوره تناوب‌های بزرگ، ضریب همبستگی کلی را بین این دو سیگنال (با در نظر گرفتن همه مولفه‌های سازنده) افزایش قابل توجهی نداده است (شکل ۵، لگk زمانی صفر، ضریب همبستگی ۰/۲). همچنین همخوانی‌های قابل توجهی به صورت هم‌فاز بین سیگنال NAO و MO در بسامدهای درون‌سالی و بین‌سالی اما به صورت ادواری وجود دارد که می‌تواند ناشی از یک پدیده ثابت اثرگذار بر هر دو آنها باشد (به طور نمونه: منطقه با همخوانی بالا بین سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵، به صورت هم‌فاز با دوره تناوب نوسان تقریباً ۲ تا ۳ سال).

۳-۴ نقشه‌های پراکنش

الگوی پراکنش داده‌های نرمال‌شده نسبت به هم در نقشه‌های پراکنش می‌تواند گویای نوعی از ارتباط بین شاخص‌ها با همدیگر باشد. در شکل ۷ نمودار پراکنش هر کدام از شاخص‌ها نسبت به شاخص دیگر ترسیم شده است. همچنین خط وایازش خطی (Linear Regression) گذرنده از داده‌ها نیز به نمایش درآمده است. با توجه به اینکه افزایش ضریب همبستگی (به شکل منفی) بین سیگنال SN و سیگنال SOI در لگk زمانی حدوداً ۳۵ اتفاق می‌افتد (شکل ۴)، نمودار پراکنش داده‌ها در لگk زمانی ۳۵ بین سیگنال SN و SOI نیز ترسیم شده است (Shifted SOI). در حالت عادی (بدون لگk زمانی)، داده‌های نرمال‌شده SN و SOI نسبت به هم پراکنش قابل توجهی دارند و شیب خط وایازش منفی و بسیار کوچک است. اما در زمانی که فعالیت خورشیدی در کمینه مقدار خود است ($SN < 0/1$) فشردگی نقاط نسبت به هم افزایش می‌یابد (یعنی رخداد بیشتر مقادیر شاخص SOI بین مقادیر ۰/۳ تا ۰/۸) و مواردی که شاخص SOI بیشترین مقادیر را دارد، تمایل به رخداد

سیگنال SN است. به عبارت دیگر اگر سیگنال SN به عنوان علت و سیگنال SOI به عنوان معلول در نظر گرفته شود، بیشینه نوسان ۱۱ ساله سیگنال SOI دارای تاخیر فاز ۲۷۰ درجه نسبت به بیشینه سیگنال SN است. از این رو کمترین مقدار مولفه ۱۱ ساله SOI تقریباً ۲/۵ تا ۳ سال بعد از بیشترین مقدار مولفه یکسان در سیگنال SN روی می‌دهد (سازگار با نتایج همبستگی تاخیری در بخش ۳-۲، بین لگk ۳۱ تا ۳۸). با این وجود همانطور که در بخش ۳-۱ بیان شد، فقط ۱۱٪ از واریانس سیگنال SOI به وسیله تغییرپذیری در این نوار بسامدی تاثیر می‌پذیرد. در نقشه WTC مناطق دیگری نیز به طور پراکنده مشاهده می‌شود که نواحی با همبستگی بالا و در سطح اهمیت ۵٪ در بسامدهای دیگر (باند بین‌سالی) را به نمایش می‌گذارد. برای مثال بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۱ ناحیه‌ای با همخوانی بالا و به صورت هم‌فاز با دوره تناوب ۴ تا ۵ سال قابل مشاهده است. با این وجود بایستی به این مساله اشاره کرد که مناطق با همبستگی بالا بین دو سیگنال ممکن است توان قابل ملاحظه‌ای در هر کدام از سیگنال‌ها در آن بسامد خاص نداشته باشند و در نتیجه اثر مثبت ناحیه با همخوانی بالا بر روی ضریب همبستگی کلی بین سیگنال‌های انتخاب شده کوچک خواهد بود. ناحیه پیوسته با همخوانی بالا با دوره تناوب دهه‌ای و نواحی پراکنده در دوره تناوب‌های بین‌سالی بین سیگنال SN و شاخص‌های دیگر (QBO، NAO و MO) هم مشاهده می‌شود که دارای فاز متفاوت نسبت به نقشه SN-SOI می‌باشند.

اثرات نوسان دهه‌ای از طریق مناطق با همبستگی بالا در دوره تناوب‌های بزرگ‌تر از ۹ سال بین سیگنال SOI با سیگنال‌های QBO، NAO و MO نیز در شکل ۶ قابل مشاهده است که بیشترین ارتباط در این نوار بین SOI و QBO وجود دارد. همچنین جهت بردارها اختلاف فاز بین مولفه یکسان در دو سیگنال را به نمایش می‌گذارد. اگرچه سیگنال‌های NAO و MO همبستگی بالایی را در دوره



شکل ۷. نقشه‌های پراکنش داده‌ها و نمودار خط رگرسیون خطی برای شاخص‌های مورد بررسی.

مولفه‌های مشترک را به همراه اختلاف فاز احتمالی بین مولفه‌ها به طور موضعی نشان می‌دهد. همچنین نقشه‌های پراکنش می‌توانند توزیع داده‌ها و نوعی خاص از ارتباط احتمالی بین آنها را نشان دهند. علاوه بر این، تحلیل طیفی نیز مشخص‌کننده محتوای بسامدی داده‌ها است و توسط این روش می‌توان مولفه‌های تغییرپذیری مشترک در سیگنال‌ها و شدت آنها را آشکارسازی کرد. اما تغییرات زمانی مولفه‌ها با روش تحلیل طیفی می‌توان مشخص نمی‌شود. تحلیل طیفی توان تجمعی برای هر کدام از شاخص‌ها نشان داد که هر یک از آنها در گستره بسامدی خاصی توزیع توان بیشتری دارند و مناطق با شیب زیاد نشانگر مولفه‌های تناوبی اصلی در هر کدام از سیگنال‌های انتخاب شده است. همچنین بر اساس تحلیل همبستگی، ارتباط خطی قابل توجه (ضریب همبستگی بالا) فقط بین داده‌های SN با SOI در لگ زمانی ۳۳ تا ۳۶ ماه و همچنین ارتباط خطی کم بین داده‌های NAO و MO در لگ زمانی صفر آشکارسازی شد.

ارتباط با اهمیت آماری در سطح اطمینان آماری ۹۵٪ بین سیگنال‌های SN و SOI در مقیاس زمانی دهه‌ای و به طور پراکنده در مقیاس بین‌سالی در بعضی از دوره‌های زمانی مشاهده شد (به طور نمونه: دوره تناوب ۴ ساله و هم‌فاز بین سال‌های ۱۹۸۷-۱۹۹۲). همچنین همخوانی‌های با اهمیت آماری در مقیاس دهه‌ای بین سیگنال SN با سیگنال‌های NAO، MO و QBO اما با فاز متفاوت آشکارسازی شد. به واسطه وجود بخش کوچکی از واریانس سیگنال‌های QBO و MO در مقیاس دهه‌ای (بر اساس تحلیل طیفی توان تجمعی)، در این مقیاس فقط رابطه بین سیگنال SN با SOI و همچنین SN با NAO می‌تواند با اهمیت تلقی شود.

با استفاده از نقشه‌های همخوانی موجک، همبستگی‌های با اهمیت با وضعیت نسبتاً هم‌فاز در مقیاس‌های دهه‌ای (۸ تا ۱۶ سال) و تا حدودی بین‌سالی (۵ تا ۸ سال) بین سیگنال‌های NAO و MO مشاهده شد. با این وجود، بخش

بیشتر در SN کوچک‌تر وجود دارد. در لگ زمانی ۳۵، نقاط داده حول خط وایزش متمرکزتر می‌شوند و ارتباط خطی سیگنال SN و SOI افزایش می‌یابد (البته به شکل معکوس). همچنین در این حالت مشاهده می‌شود که مقادیر کمتر شاخص SOI با مقادیر زیادتر لکه‌های خورشیدی و مقادیر بیشتر شاخص SOI با مقادیر کمتر لکه‌های خورشیدی تطابق بیشتری دارد.

پراکنندگی بسیار زیاد در نمودارهای پراکنش بین داده‌های SN با سه شاخص NAO، MO و QBO مشاهده می‌شود که عدم ارتباط قابل توجه را بین داده‌های اصلی را نشان می‌دهد. همچنین الگوی غیرخطی خاصی نیز در شکل‌های مرتبط قابل آشکارسازی نیست. اگرچه پراکنندگی داده‌ها بین شاخص SOI با شاخص‌های NAO و MO قابل توجه است، اما همه‌ی رخدادهای $NAO > 0.9$ در زمانی روی داده است که $SOI > 0.3$ است. در مورد نمودار پراکنش بین شاخص QBO با SOI و QBO با NAO، الگو تقریباً شبه‌تصادفی است و تنها می‌توان به این مساله اشاره کرد که در مقادیر کم شاخص SOI و NAO، احتمال رخداد مقادیر بزرگ‌تر برای شاخص QBO بیشتر است. همچنین نمودار پراکنش بین NAO و MO گویای ارتباط خطی ضعیف و مثبت بین این دو شاخص است. در مقادیر بزرگ‌تر شاخص NAO (به طور نمونه: $NAO > 0.7$) احتمال رخداد مقادیر کوچک MO (به طور نمونه: $MO < 0.3$) کم‌تر می‌شود و پخش‌شدگی (گستره نوسان) داده‌های MO با افزایش شاخص NAO کاهش می‌یابد.

۴ بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارتباط بین تعدادی از شاخص‌های اقلیمی با استفاده از روش‌های آماری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی، روش همبستگی پیرسون برای بررسی میزان ارتباط خطی دو سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، روش همخوانی موجک همبستگی‌های

ارتباط احتمالی بین خود شاخص‌ها در گام نخست باید مورد توجه قرار گیرد. دلیل اهمیت این بررسی این است که شاخص‌های اقلیمی ممکن است نوسان‌های مشترکی را در مقیاس‌های خاصی (ناشی از پدیده‌ای خاص) نشان دهند که این نوسان‌ها می‌توانند اثر مشابهی را بر تغییرپذیری کمیت‌هایی مانند دما، بارش، سرعت باد و غیره داشته باشند. بنابراین تاثیر خالص و مجزای هر شاخص مستقل از شاخص‌های دیگر با حذف نوسان‌های احتمالی مشترک بر این کمیت‌ها می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

ملاشریفی، آ.، محب‌الحجه، ع.، و احمدی گیوی، ف.، ۱۳۹۸، مطالعه اثر نوسان اطلس شمالی بر رابطه بین مسیرهای توفان اطلس شمالی و مدیترانه با استفاده از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR و JRA-55: مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۲)، ۴۲۳-۴۴۰.

نیستانی، ا.، ۱۴۰۱، طراحی و کاربرد عملی پالایه‌های رقمی در پردازش سیگنال‌های هواشناسی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۲)، ۳۶۱-۳۸۰.

Addison, P. S., 2017, The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance. CRC press.

Alizadeh-Choobari, O., Adibi, P., and Irannejad, P., 2018, Impact of the El Niño–Southern Oscillation on the climate of Iran using ERA-Interim data: Clim. Dyn. 51, 2897–2911.

Andrews, M. B., Knight, J. R., Scaife, A. A., Lu, Y., Wu, T., Gray, L. J., and Schenzinger, V., 2019, Observed and simulated teleconnections between the stratospheric Quasi-Biennial Oscillation and Northern Hemisphere winter atmospheric circulation: Journal of Geophysical Research, 124, 1219-1232.

Conte, M., Giuffrida, A., Tedesco, S., 1989, The Mediterranean Oscillation: Impact on Precipitation and Hydrology in Italy: Conference on Climate and Water. Publications of the Academy of Finland: Helsinki.

کوچکی از واریانس این سیگنال‌ها در این مقیاس‌ها توزیع شده است (برای MO: ۳٪ و برای NAO: حدود ۸٪). مشخصه اصلی در نقشه WTC مربوط به SOI-QBO، ارتباط دهه‌ای با اهمیتی است که توان محدودی را در سیگنال QBO شامل می‌شود. تاثیر احتمالی NAO بر QBO و برعکس، تقریباً در همه گستره بسامدی بر طبق تحلیل WTC کم اهمیت است. بنابراین اثرات این دو شاخص بر کمیت‌های هواشناختی می‌توانند به طور کاملاً مستقل از هم در نظر گرفته شوند.

به‌طور کلی اگر سیگنال‌های اقلیمی توان قابل توجهی در یک نوار بسامدی مشخص داشته باشند، در این صورت بایستی به میزان همبستگی بالای آنها در این نوار در نقشه همخوانی موجهک توجه بیشتری داشت، زیرا در این حالت این همخوانی‌های موضعی تاثیر بیشتری بر روی ضریب همبستگی کلی (در لگk صفر یا غیرصفر) بین داده‌ها خواهند داشت.

به کارگیری نقشه‌های پراکنش داده‌ها برای پیدا کردن نوع ارتباط احتمالی بین شاخص‌ها نشان دهنده عدم ارتباط خطی قابل اهمیت برای بیشتر شاخص‌ها بود و صرفاً برای سیگنال SN و SOI پراکنش داده‌ها با انتقال زمانی سیگنال SOI نسبت به SN کمتر شد که این منجر به افزایش میزان ارتباط خطی (معکوس) بین این دو شاخص گردید. همچنین برای شاخص‌های NAO و MO خط وایزش از شیب مثبت بزرگ‌تری در لگk زمانی صفر نسبت به شاخص‌های دیگر برخوردار بود که بیشترین همبستگی را در این لگk زمانی از بین همه شاخص‌های انتخاب شده نشان داد. علاوه بر این الگوهای احتمالی دیگری نیز بین داده‌ها با استفاده از روش تحلیل نقشه‌های پراکنش، شناسایی گردید. از آنجایی که شناسایی و پیش‌بینی تغییرات در کمیت‌های هواشناختی ناشی از اثرات شاخص‌های اقلیمی در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، مخاطرات محیطی، انرژی‌های نو و محیط زیست بسیار حائز اهمیت است، یافتن

- Criado-Aldeanueva, F., and Soto-Navarro, J., 2020, Climatic indices over the Mediterranean Sea: A review: *Applied Sciences*, **10**(17), 5790.
- Grossmann, A., and Morlet, J., 2005, Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape: *SIAM J. Math. Anal.* **15**(4), 723–736.
- Das, J., Jha, S., and Goyal, M. K., 2020, On the relationship of climatic and monsoon teleconnections with monthly precipitation over meteorologically homogenous regions in India: Wavelet & global coherence approaches: *Atmospheric Research*, **238**.
- Deng, L. H., Qu, Z. Q., Wang, K. R., Li, X. B., 2012, Phase asynchrony between coronal index and sunspot numbers: *Adv. Space Res.*, **50**(10), 1425-1433.
- Ghasemi, A. R., and Khalili, D., 2008, The association between regional and global atmospheric patterns and winter precipitation in Iran: *Atmos. Res.*, **88**(2), 116-133.
- Gómara, I., Rodríguez-Fonseca, B., Zurita-Gotor, P., and Pinto, J. G., 2014, On the relation between explosive cyclones affecting Europe and the North Atlantic Oscillation: *Geophysical Research Letters*, **41**, 2182-2190.
- Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., et al., 2010, Solar influences on climate: *Rev. Geophys.*, **48**, RG4001.
- Grinsted, A., Moore, J. C., Jevrejeva, S., 2004, Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series: *Nonlin.Proc.Geoph.*, **11**, 561–566.
- Hurrell, J. W., and van Loon, H., 1997, Decadal Variations in Climate Associated with the North Atlantic Oscillation. In: Diaz H.F., Beniston M., Bradley R.S. (eds) *Climatic Change at High Elevation Sites*. Springer, Dordrecht.
- Inoue, M., Takahashi, M., and Naoe, H., 2011, Relationship between the stratospheric quasi-biennial oscillation and tropospheric circulation in northern autumn: *J. Geophys. Res.*, **116**.
- Le Mouél, J. L., Lopes, F., and Courtillot, V., 2019, A solar signature in many climate indices: *J. Geophys. Res.*, **124**(5), 2600–2619.
- Li, Y., Lau, N. -C., 2012, Impact of ENSO on the atmospheric variability over the North Atlantic in late winter—Role of transient eddies: *J. Clim.*, **25**(1), 320-342.
- Liess, S., and Geller, M. A., 2012. On the relationship between QBO and distribution of tropical deep convection: *J. Geophys. Res.*, **117**, D03108.
- Lukianova, R. and Alekseev, G. 2004, Long-term correlation between the NAO and the solar activity: *Sol. Phys.*, **224**, 445–454.
- Kodera, K., and Kuroda, Y., 2002, Dynamical response to the solar cycle: *J. Geophys. Res.*, **107**(D24).
- Kuroda, Y., Kodera, K., Yoshida, K., Yukimoto, S., and Gray, L., 2022, Influence of the solar cycle on the North Atlantic Oscillation: *Journal of geophysical Reserch-Atmosphere*, **127**(1).
- Manikandan, G., Sairam, N., Sharmili, S., and Venkatakrishnan, S., 2013, Achieving privacy in data mining using normalization: *Indian Journal of Science and Technology*, **6**(4), 4268-4272.
- Maraun, D., and Kurths, J., 2004, Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls: *Nonlin. Processes Geophys.*, **11**, 505–514.
- Mares, I., Dobrica, V., Mares, C., and Demetrescu, C., 2021, Assessing the solar variability signature in climate variables by information theory and wavelet coherence: *Sci. Rep.*, **11**, 11337.
- Martin-Vide, J., and Lopez-Bustins, J. A., 2006, The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula: *Int. J. Climatol.*, **26**, 1455–1475.
- Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T., 2013, Lengths of Schwabe cycles in the seventh and eighth centuries indicated by precise measurement of carbon-14 content in tree rings: *J. Geophys. Res.*, **118**, 7483.
- Moore, J.C., Grinsted, A., and Jevrejeva, S., 2006, Is there evidence for sunspot forcing of climate at multi-year and decadal periods?: *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17705.
- Neyestani, A., Karami, K., and Gholami, S., 2022, Exploring the possible linkage between the precipitation and temperature over Iran and their association with the large-scale circulations: Cumulative spectral power and wavelet coherence approaches: *Atmospheric Research*, **274**, 106187.
- Palutikof, J. P., Conte, M., Casimiro Mendes, J., Goodess, C. M., and Espirito, S. F., 1996, Climate and climate change. In *Mediterranean Desertification and Land Use*, Brandt CJ, Thornes JB (eds). John Wiley and Sons: London.
- Son, S., Lim, Y., Yoo, C., Hendon, H. H., and Kim, J., 2017, Stratospheric control of the Madden-Julian oscillation: *J. Climate*, **30**, 1909–1922.
- Tamaddun, K. A., Kalra, A., and Ahmad, S., 2017, Wavelet analyses of western US streamflow

- with ENSO and PDO: *J. Water Clim. Chang.*, **8**(1), 26-39.
- Tan, X. Z., Gan, T. Y., Shao, D. G., 2016. Wavelet analysis of precipitation extremes over Canadian ecoregions and teleconnections to large-scale climate anomalies: *J. Geophys. Res.*, **121**(24), 14469–14486.
- Thomson, R. E., and Emery, W. J., 2014, *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, 3rd Edition, Elsevier Science.
- Torrence, C., and Compo, G., 1998, A practical guide to wavelet analysis: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61-78.
- Torrence, C., and Webster, P. J., 1999, Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System: *J. Clim.*, **12**(8), 2679-2690.
- Velasco, V. M., and Mendoza, B., 2008, Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena: *Adv. Space Res.*, **42**(5), 866-878.
- Vicente-Serrano, S. M., and López-Moreno, J., 2008, Nonstationary influence of the North Atlantic oscillation on European precipitation: *J. Geophys. Res.*, **113**, D20120.
- Xu, J. C., Xie, J. L., Qu, Z. N., 2017, Phase relations between the Sunspot Numbers and Total Solar Irradiance: *Astrophys. J.*, **851**(2).
- Yang, Y. -M., Park, J., An, S. -I., Wang, B., and Luo, X., 2021, Mean sea surface temperature changes influence ENSO-related precipitation changes in the mid-latitudes: *Nat. Commun.*, **12**, 1495.
- Zhang, J., Tian, W., Wang, Z., Xie, F., Wang, F., 2015. The influence of ENSO on northern midlatitude ozone during the winter to spring transition: *J. Clim.*, **28**(12), 4774–4793.

Study of the interrelationship between global climate indices at different time scales

Abolfazl Neyestani ^{1*}

¹ Assistant Professor, Physics Department, Razi University, Kermanshah, Iran

(Received: 28 January 2023, Accepted: 05 April 2023)

Summary

In this research, the possible interrelationship between several global climatic indices has been investigated by employing four statistical methods. At the first step, the spectral content of the data and their intensities were obtained at different harmonics with using the spectral analysis. Then the correlation analysis was used to calculate the correlation coefficients between each pair of climatic signals, in order to check any linear relationship between them at different time lags. Finally, by exploiting the sophisticated wavelet coherence method, the correlation of indices was analyzed at different frequencies and times, and in addition, the linkage between the indices was examined from the scatter plots.

The selected indices include the number of sunspots (SN), Southern Oscillation Index (SOI), Quasi-Biennial Oscillation (QBO), North Atlantic Oscillation (NAO) and Mediterranean Oscillation (MO). The monthly values for these indices were used for the statistical period from 1979 to 2021.

Based on the analysis, evidences of the presence of 11-year cycle of sunspots in the SOI signal were found. The results show that if the SN signal is considered as the cause and the SOI signal as the effect, the minimum value of the 11-year component of the SOI signal occurs about 3 years after the maximum value of the same component in the SN signal.

The correlation method shows a weak linear relationship between other signals such as NAO, QBO, SOI and MO in all time lags, and the highest correlation in this case is between NAO and MO signals. However, a closer look at the wavelet coherence plots shows that these signals are strongly correlated at decadal and to some extent at inter-annual time scales.

The lagged correlation method and the scatter plots also confirm an increase in the linear relationship between sunspot cycle with the SOI index for the time lag of 33 to 36 months, and no significant linear relationship was generally observed among other indices. The highest correlation (about 0.2) at the time lag of zero is revealed to belong to the NAO and MO signals, which according to the wavelet coherence analysis, it is due to the decadal common in-phase oscillation between these two signals. Furthermore, common oscillations with consistent phase were found sporadically between each pair of selected signals in the inter-annual scales for some periods of time. The scatter plots also showed more details about the possible relationship between the data.

Our results show the potential of the spectral and wavelet coherence analysis (WTC) for identifying common or dominant frequency components of the important climatic signals, and they can be exploited as a complementary to the traditional lagged correlation analysis and other preliminary statistical analysis such as the analyzing the scatter plots.

Keywords: Climatic indices, variability, correlation, power spectra, wavelet coherence

*Corresponding author:

neyestani@razi.ac.ir