

Annual Soil Temperature Analysis in Iran Using Singular Spectrum

ALI-AKBAR SABZIPARVAR^{1*}, FATEME KHOSHHAL JAHROMI¹, RAHIM MAHMOUDVAND²

1. Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2. Department of Statistics, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(Received: July. 16, 2020- Revised: Aug. 27, 2020- Accepted: Sep. 12, 2020)

ABSTRACT

Soil temperature (ST) variation can affect the earth energy balance. Moreover, the awareness of the soil thermal regime and its thermal fluctuations can prevent possible damages to agriculture and can increase crop productivity. In this study, using the singular spectrum analysis (SSA), trends and oscillation components, as well as the degree of the coincidence of the soil temperature (ST), air temperature (AT) and precipitation time series were investigated in three thermal regime classes namely: Mesic, Thermic and, Hyper thermic, in 28 high quality weather sites during 1993-2017. The results showed that the highest and lowest rates of ST increases have occurred in the Mesic and the Thermic thermal regime, respectively. The precipitation fluctuations were in the opposite phase with the ST fluctuations. The dominant return periods in the annual series were 2.3 and 11-12 years that could be related to quasi-biennial oscillation (QBO) variations, and 11-year cycles of sunspots. By the implementation of the coincidence which exists between the short and long term oscillations of ST and AT time series, one can generate and reconstruct ST data gaps based on AT.

Keywords: SSA, Oscillatory Components, QBO, 11-12 Year Solar Cycle.

تحلیل دمای سالانه خاک در گستره ایران با استفاده از روش مجموعه‌ی مقادیر تکین

علی اکبر سبزی‌پور^{*}، فاطمه خوشحال جهرمی^۱، رحیم محمودوند^۲

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲. گروه آمار، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۲۲)

چکیده

آگاهی از رژیم حرارتی خاک و نوسانات آن علاوه بر تاثیر بر توازن انرژی تابشی کره زمین، از خسارات احتمالی در بخش کشاورزی جلوگیری کرده و می‌تواند موجب افزایش بازدهی محصولات شود. در این مطالعه با بکارگیری روش تحلیل مجموعه‌ی مقادیر تکین (SSA)، روندها و مولفه‌های نوسانی و همچنین میزان انطباق مولفه‌های متناظر سری‌های زمانی دمای خاک (ST) و سری‌های زمانی دمای هوا و بارش در ۲۸ ایستگاه هواشناسی کشور در سه کلاس حرارتی مزیک، ترمیک و هایپرترمیک، در ایران در طی سال‌های ۱۹۹۳-۲۰۱۷ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین نرخ افزایش ST در رژیم حرارتی مزیک و کمترین نرخ افزایش ST سطحی در رژیم حرارتی ترمیک واقع شده است. نوسانات بارش در فاز معکوس نسبت به نوسانات ST قرار دارند. دوره‌های بازگشت غالب در سری‌های سالانه ۲/۳ و ۱۱-۱۲ ساله بودند که می‌تواند مرتبط با تغییرات دو سالانه QBO و جریانات مداری و همینطور چرخه‌های ۱۱ ساله لکه‌های خورشیدی باشند. با استفاده از انطباق‌های کوتاه و طولانی مدت مشخص شده بین روند و مولفه‌های نوسانی سری زمانی دمای خاک و دمای هوا، می‌توان به تولید و بازسازی تغییرات دمای خاک بر مبنای دمای هوا پرداخت.

واژه‌های کلیدی: مجموعه‌ی مقادیر تکین، مولفه‌های نوسانی، QBO، چرخه خورشیدی ۱۱-۱۲ ساله.

مقدمه

دمای خاک (ST) در پاسخ به تغییرات انرژی تابشی و حرارتی و نیز تبادل گرمای نهان که از طریق سطح اتفاق می‌افتد، تغییر می‌کند (Zhang et al., 2001). مطالعه تغییرات ST در لایه‌های مختلف در فهم فرآیندهای سطح و محیط‌زیست منطقه‌ای و شرایط اقلیمی مفید است (Hu and Feng, 2003) بطوری‌که درجه حرارت خاک بر رشد و بهره‌وری محصولات کشاورزی (Hu and Buyanovsky, 2003) تاثیر زیادی دارد؛ علاوه بر این بر سلامت ریشه، تبدیلات نیتروژن و کربن در خاک، سرعت تبخیر و تعرق، بیماری‌های گیاهی، هیدرولوژی خاک و زمستان‌گذرانی پاتوژن‌ها اثر می‌گذارد (Webb et al., 2017).

دمای خاک به اندازه‌ی دیگر متغیرهای اقلیمی آنالیز نشده است چرا که داده‌ها، هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی به صورت گسترده در دسترس نیستند (Araghi et al., 2019). این در-حالیست که گاهی اوقات رشد بخش هوایی گیاه، وابستگی نزدیکتری به درجه حرارت خاک نسبت به درجه حرارت هوا دارد. اخیراً گزارش‌های زیادی از تغییرات درجه حرارت خاک در ارتباط با تغییر اقلیم در بخش‌های مختلف دنیا وجود داشته است (Chudinova et al., 2006)، در ایران پژوهش‌های انجام شده‌ی

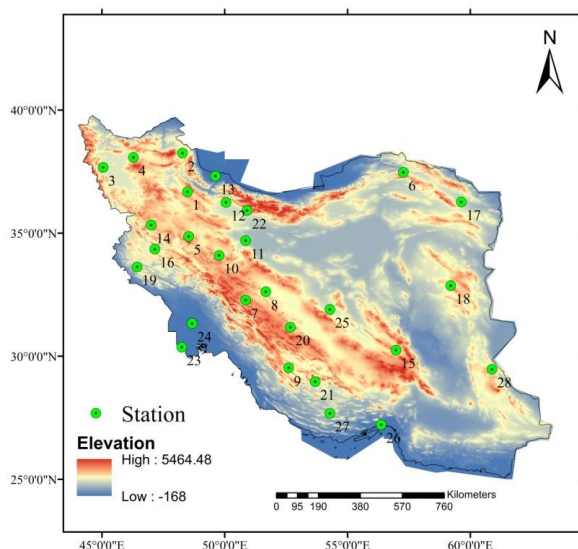
مرتبط با ST اکثراً در مورد بررسی روند ST (Mohammadi and Forouzanfard, 2016؛ Araghi et al., 2017)، پیش‌بینی ST (Sabziparvar et al., 2014) و یا بصورت محدود در رابطه با شبیه‌سازی ST برای آینده (Araghi et al., 2019) بوده است.

در برخی مناطق روندهای خطی، هرچند بالا و از نظر آماری معنی دار باشند، همراه کننده اند و به علت نقاط اهرم (بعنوان مثال، مقادیر کم یا زیاد در شروع و یا انتهای سری زمانی) به‌وجود می‌آیند، درحالی‌که سری‌های زمانی در واقع هیچ رفتار کاهشی یا افزایشی طولانی مدتی از خود نشان نمی‌دهند. بنابراین شناخت افت و خیزهای طولانی و کوتاه مدت سری‌های زمانی ST در لایه ۰ تا ۱۰۰ سانتی متری، به ما اجازه می‌دهد تا تغییرات در لایه فعال که به‌عنوان مؤثرترین رویکرد جهت انعکاس دقیق درجه تغییر اقلیم، تلقی می‌شود را ارزیابی کنیم (Yang et al., 2010). یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که برای آشکارسازی رفتار دوره‌ای عناصر اقلیمی استفاده شده، تحلیل طیفی در حوزه بسامد می‌باشد؛ طیف یک سری زمانی نشان‌دهنده بسامد موجود در آن سری زمانی است و تحلیل طیفی روشی برای شناسایی این بسامدها است (Daneshmand and Mahmoudi, 2017).

در ادبیات اقلیم شناسی و هواشناسی ایران در سال‌های

ترمیک، مزیک، فریجید، کرایک و پرجلیک طبقه بندی کردند. طبقه بندی ایستگاه‌های مورد بررسی بر طبق رژیم حرارتی خاک در جدول (۱) ارائه شده‌اند. این رژیم‌های حرارتی در مدیریت خاک، بخصوص برای انتخاب گیاهان سازگار مفید هستند (Mehdizade *et al.*, 2018).

داده‌های گمشده در سری‌های زمانی درجه حرارت خاک با استفاده از روش تحلیل مجموعه‌ی مقادیر تکین چند متغیره (Hssani and Mahmoudvand, 2013) برآورد شدند. شایان ذکر است که آزمون کیفیت داده برای همه متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک توسط IRIMO انجام می‌شود؛ این آزمون‌ها شامل تست همگنی و تصادفی بودن و همچنین تعیین و اصلاح نقاط پرت می‌باشد (Araghi *et al.*, 2017). جهت بررسی سالانه روندها و دوره‌های تناوبی، سری‌های ۱۲ ماهه ST در اعماق اشاره شده در بالا، AT و بارش برای هر سه کلاس حرارتی ایجاد شدند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

روش کار

تحلیل مجموعه مقادیر تکین (SSA) یک روش ناپارامتری پرکاربرد است که برای تعیین رفتار غیر خطی سیستم‌های پیچیده استفاده می‌شود (Golyandina *et al.*, 2001). این روش به مدل پارامتری و شرایط مانایی نیاز نداشته و از این رو مستقل از مدل است. هدف اصلی آن تجزیه سری زمانی اصلی به مجموعه‌ی ای کوچک از اجزای تفسیر پذیر مانند روند، مؤلفه‌ی نوسانی و نوفه می‌باشد؛ از این رو به صورت گسترده‌ای در مطالعات اقلیمی، هواشناسی و زمین شناسی استفاده شده است (Wu *et al.*, 2010). تحلیل مجموعه‌ی مقادیر تکین شامل دو مرحله‌ی تجزیه و بازسازی می‌باشد که این دو گام مجزا از یکدیگر و در جهت تفکیک اجزای سری زمانی صورت می‌گیرد.

اخیر، از روش تحلیل طیفی جهت آشکارسازی چرخه‌های آشکار و نهان موجود در سری‌های زمانی نظیر بارش و دمای هوا (AT) استفاده شده است (Asakereh, 2012; Balyani *et al.*, 2012). ولی پژوهشی که دوره‌های تناوبی سری‌های زمانی ST، که نقش مهمی در برنامه ریزی‌های بهینه محیطی دارند، را نشان دهد، انجام نشده است. در سایر سرزمین‌ها نیز مطالعات کمی در رابطه با تحلیل دوره‌های تناوبی ST در دسترس می‌باشد (Chudinova *et al.*, 2006).

دمای خاک به فاکتورهای محیطی مختلفی از جمله عمق برف، پوشش گیاهی، بافت و رطوبت خاک، تجمع مواد آلی، انجماد و ذوب و فرآیندهای هیدرولوژیکی وابسته است، با وجود این که رابطه بین ST و AT به علت تاثیر پارامترهای اقلیمی مختلف دیگر بسیار پیچیده است؛ با این حال پژوهش‌های زیادی به این نتیجه رسیده‌اند که ST و AT از یکدیگر تبعیت می‌کنند (Araghi *et al.*, 2017). هدف از این مطالعه تعیین مؤلفه‌های نوسانی و روند در سری‌های زمانی ST و AT در ۲۸ ایستگاه سینوپتیک به صورت کلاس‌های حرارتی در ایران است؛ علاوه بر این روی سری‌های زمانی بارش با طول دوره متناظر نیز تحلیل‌های ذکر شده انجام شد تا در نهایت مؤلفه‌های هم رفتار با مؤلفه‌های ST شناسایی شوند. در این مطالعه، روش تحلیل مجموعه‌ی مقادیر تکین جهت تعیین روندها و نوسانات در سری‌های زمانی ST به کار گرفته شد. شایان ذکر است که این روش، با روش تحلیل طیفی فرق دارد. در واقع روش تحلیل مجموعه‌ی مقادیر تکین بر مبنای جبر ماتریسی و آمار چند متغیره کار می‌کند در حالی که روش تحلیل طیفی چنین نیست.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران در جنوب غرب آسیا بین ۲۵-۴۰ درجه عرض شمالی و ۶۳-۴۴ درجه طول شرقی واقع شده است که ناحیه‌ای با مساحت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود و به طور کلی با اقلیم خشک و نیمه خشک توصیف می‌گردد (Araghi *et al.*, 2016). در این مطالعه داده‌های میانگین ماهانه ST در پنج عمق (۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متری)، میانگین ماهانه دمای هوا (در ارتفاع ۲ متری) و میانگین ماهانه بارش مربوط به ۲۸ ایستگاه سینوپتیک از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO) گرفته شد. ویژگی‌های توپوگرافی این ایستگاه‌ها در شکل (۱) آورده شده‌اند.

(Lal and Shukla, 2004) بر اساس میانگین سالانه دمای خاک در عمق ۵۰ سانتی متری و نیز اختلاف میانگین دمای خاک در تابستان و زمستان، ST را به ۶ کلاس با نام‌های هایپرترمیک،

است و $K = N - L + 1$ می‌باشد.

$$H = [X_1, X_2, \dots, X_K] = \begin{pmatrix} y_1 & \dots & y_K \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_L & \dots & y_N \end{pmatrix} \quad (\text{رابطه ۱})$$

این ماتریس یک ماتریس هنکل است؛ به این معنی که عناصر روی قطرهای فرعی آن برابر هستند. این ویژگی باعث می‌شود که یک ارتباط یک به یکی بین سری اصلی و ماتریس مسیر برقرار شود.

برای توضیح بیشتر، یک سری زمانی با N مشاهده y_1, y_2, \dots, y_N را در نظر بگیرید:

مرحله اول: تجزیه

گام اول: در این مرحله بایستی ماتریس مسیر تشکیل شود. بدین منظور، باید سری زمانی اصلی با نگاهی به سری چند بعدی انتقال داده شود که در نهایت ماتریس مسیر مطابق رابطه ۱ تشکیل می‌شود. در این ماتریس L طول پنجره و $1 < L < N$

جدول ۱- رژیم حرارتی ایستگاه‌های مورد مطالعه

شناسه کلاس	شناسه ایستگاه	نام ایستگاه	رژیم حرارتی خاک	شناسه کلاس	شناسه ایستگاه	نام ایستگاه	رژیم حرارتی خاک
۱	۱	زنجان	مزیک	۲	۱۵	کرمان	ترمیک
۱	۲	اردبیل	مزیک	۲	۱۶	کرمانشاه	ترمیک
۱	۳	ارومیه	مزیک	۲	۱۷	مشهد	ترمیک
۲	۴	تبریز	ترمیک	۲	۱۸	بیرجند	ترمیک
۲	۵	همدان	ترمیک	۲	۱۹	ایلام	ترمیک
۲	۶	بجنورد	ترمیک	۲	۲۰	آباده	ترمیک
۲	۷	شهرکرد	ترمیک	۲	۲۱	فسا	ترمیک
۲	۸	اصفهان	ترمیک	۲	۲۲	کرج	ترمیک
۲	۹	شیراز	ترمیک	۳	۲۳	آبادان	هایپرترمیک
۲	۱۰	اراک	ترمیک	۳	۲۴	اهواز	هایپرترمیک
۲	۱۱	قم	ترمیک	۳	۲۵	یزد	هایپرترمیک
۲	۱۲	قزوین	ترمیک	۳	۲۶	بندرعباس	هایپرترمیک
۲	۱۳	رشت	ترمیک	۳	۲۷	لار	هایپرترمیک
۲	۱۴	سندج	ترمیک	۳	۲۸	زاهدان	هایپرترمیک

(2002) مراجعه نمایید.

آنچه بدان اشاره شد را SSA پایه می‌نامند؛ عیب این روش آن است که هیچ برآوردی از سطح معنی‌داری آماری مؤلفه‌های استخراج شده ارائه نمی‌دهد با این حال جهت آشکار کردن مؤلفه‌های روند سری‌های زمانی واقعی خیلی مناسب بوده و با موفقیت در رابطه با سری‌های زمانی نامانا بکارگرفته شده است (Golyandina et al., 2001)، علاوه بر این، پژوهش Chudinova et al., (2006) بروی ST روسیه نشان داد که نتایج SSA پایه با روش SSA-MTM^۲ و MC-SSA^۱ تفاوت قابل توجهی ندارند. با این اوصاف در این پژوهش جهت بدست آوردن سطح معنی‌داری آماری هر یک از مؤلفه‌های استخراج شده از روش MC-SSA بهره گرفته شد (Allen and Smith, 1996). در اکثر سری‌های زمانی سالانه $L=150$ و سری‌های فصلی $L=38$ بهترین مقدار طول پنجره برای تعیین مولفه‌های نوسانی و روند سری‌های زمانی بود. Hassani et al., (2011) نیز به این نتیجه رسیدند که با انتخاب میانه تعداد داده‌ها برای مقدار L ، روش SSA جواب بهینه می‌دهد. جهت قابل مقایسه شدن مولفه‌های ST و سایر پارامترها،

گام دوم تجزیه مقدار تکین (SDV): ماتریس مسیر بر اساس مقادیر ویژه تجزیه می‌شود. بر این اساس ماتریس H به L مؤلفه افراز می‌شود. هر کدام از این L زیر ماتریس نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$H_i = U_i U_i' H, \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (\text{رابطه ۲})$$

که بردارهای L بعدی U_i ، همان بردارهای ویژه ماتریس مربع HH هستند.

مرحله دوم: بازسازی

گام اول گروه‌بندی: حال ماتریس H که به L زیر ماتریس افراز شده است، در ساده‌ترین حالت، به دو گروه سیگنال (شامل r زیر ماتریس) و نوفه (شامل $L-r$ زیر ماتریس) تقسیم می‌شود.

گام دوم میانگین‌گیری قطری: هدف میانگین‌گیری قطری تبدیل یک ماتریس به فرم یک ماتریس هنکل است که متعاقباً می‌تواند به یک سری زمانی تبدیل شود. با اعمال رویه هنکل سازی بروی تمامی مؤلفه‌های ماتریس گروه سیگنال، هر ماتریس ابتدائی از گام گروه‌بندی به یک سری مؤلفه اصلی جدید با طول N تبدیل می‌شود. برای جزئیات بیشتر این روش به (Ghil et al.,

۱. Monte Carlo

۲. Multitaper method

را به خود اختصاص دادند. روندهای استخراج شده از سری‌های ST و AT در ۳ کلاس حرارتی در شکل (۲) آورده شده‌اند.

جدول ۲- روند و مولفه‌های نوسانی سری زمانی سالانه دمای هوا، واریانس توضیح داده شده مرتبط و مولفه اصلی متناظر

شناسه کلاس	مولفه نوسانی (سال)	واریانس (%)	PCs
۱	روند**	۷۰/۱	۱
۱	۲/۳**	۱۶/۶۴	۳,۴
۱	۱۲/۵*	۸/۵۶	۹
۲	روند**	۶۸/۲	۱
۲	۲/۳*	۱۵/۱	۵,۶
۲	۱۱/۵*	۱۰/۳	۷
۳	روند**	۷۰/۵	۱
۳	۲/۳*	۱۱/۶	۳,۴
۳	۳/۸*	۹/۲	۹
۳	۱۱/۱*	۷/۳	۵,۶

مولفه‌هایی که در سطح ۰/۰۵ معنی دار بودند با ** و موارد معنی دار در سطح ۰/۱۰ با * نشان داده شده‌اند

تمامی آنها بین ۱- و ۱+ استاندارد گردیدند. بعد از استخراج مولفه های سالانه، جهت تعیین میزان همبستگی هر یک با مولفه‌ی متناظر ST از روش همبستگی اسپیرمن بهره گرفته شد؛ این کار در تاخیرهای^۱ مختلف انجام شد. مقایسه روند خطی سری‌های زمانی با روند استخراج شده (از روش SSA) با استفاده از آزمون پیش سفیدکننده TFPW در آزمون من کندال (Yue at al., 2002) صورت گرفت.

نتایج و بحث

مقایسه مولفه‌ها در سری‌های زمانی سالانه دمای خاک با پارامترهای دمای هوا و بارش

روندها و مولفه‌های استخراج شده از سری‌های زمانی سالانه ST و AT در جدول‌های (۲ و ۳) آورده شده‌اند. در این جدول‌ها، PCs مولفه (های) اصلی است؛ در تمامی موارد، روندهای استخراج شده، اولین مولفه اصلی بودند که بیشترین درصد از واریانس کل

جدول ۳- روند و مولفه‌های نوسانی سری زمانی سالانه دمای خاک، واریانس توضیح داده شده مرتبط و مولفه اصلی متناظر

شناسه کلاس	عمق (cm)	نوسان (سال)	واریانس (%)	PCs	شناسه کلاس	عمق (cm)	نوسان (سال)	واریانس (%)	PCs
۱	۵	روند**	۶۷/۱۲	۱	۲	۲۰	۲/۴**	۱۱/۵	۴,۵
۱	۵	۲/۳*	۲۱/۱۳	۳,۴	۲	۲۰	۱۱*	۱۰/۴	۳,۶
۱	۵	۳/۹**	۷/۶۱	۸	۲	۵۰	روند**	۷۱/۴	۱
۱	۵	۱۰/۲	۶/۱	۱۱	۲	۵۰	۲/۶*	۱۱	۳,۴
۱	۱۰	روند**	۷۱/۶	۱	۲	۵۰	۱۱/۸*	۸/۱	۵,۶
۱	۱۰	۲/۳*	۱۴/۱	۳,۴	۲	۱۰۰	روند**	۷۲/۹	۱
۱	۱۰	۳/۹	۷/۲	۱۰	۲	۱۰۰	۲/۳*	۱۰/۵	۳,۴
۱	۱۰	۱۲**	۶	۹,۱۴	۲	۱۰۰	۱۰/۸*	۸/۲	۵,۶
۱	۲۰	روند**	۷۰/۰۴	۱	۳	۵	روند**	۶۷/۴	۱
۱	۲۰	۲/۳*	۱۹	۳,۴	۳	۵	۲/۳*	۱۳/۴۹	۷,۸
۱	۲۰	۴/۲	۵/۷۲	۹,۱۰	۳	۵	۳/۶**	۵/۶۱	۶,۹
۱	۲۰	۱۱/۸**	۷/۲	۷	۳	۵	۱۲	۴/۸	۱۳,۱۴
۱	۵۰	روند**	۷۴/۱	۱	۳	۱۰	روند**	۷۱/۳	۱
۱	۵۰	۲/۳*	۱۳/۳	۳,۴	۳	۱۰	۲/۱**	۹/۶	۵,۶
۱	۵۰	۴/۱**	۶/۱۲	۸,۹	۳	۱۰	۳/۸**	۷/۲	۷
۱	۱۰۰	روند**	۷۵/۲	۱	۳	۱۰	۱۱**	۶/۴	۳,۴
۱	۱۰۰	۲/۳*	۱۰/۶۶	۳,۴	۳	۲۰	روند**	۷۰/۸	۱
۱	۱۰۰	۳/۸**	۹/۵۲	۸,۹	۳	۲۰	۲	۴/۸	۸,۹
۲	۵	روند**	۷۱	۱	۳	۲۰	۳/۸**	۱۶/۹	۳,۴
۲	۵	۲/۴**	۱۱/۷	۳,۴	۳	۵۰	روند**	۷۳/۲	۱
۲	۵	۱۱	۵/۳۲	۱۰	۳	۵۰	۲/۴**	۸/۵	۲,۳
۲	۱۰	روند**	۷۰/۸	۱	۳	۵۰	۳/۳**	۶/۵	۴,۵
۲	۱۰	۲/۳*	۱۲/۳	۴,۵	۳	۱۰۰	روند**	۷۵/۱۵	۱
۲	۱۰	۱۱/۳**	۹/۸	۳,۸	۳	۱۰۰	۴/۹	۲/۴	۱۱
۲	۲۰	روند**	۷۱/۲	۱	۳	۲۰	روند**	۲/۴	۱۱

مولفه‌هایی که در سطح ۰/۰۵ معنی دار بودند با ** و موارد معنی دار در سطح ۰/۱۰ با * نشان داده شده‌اند.

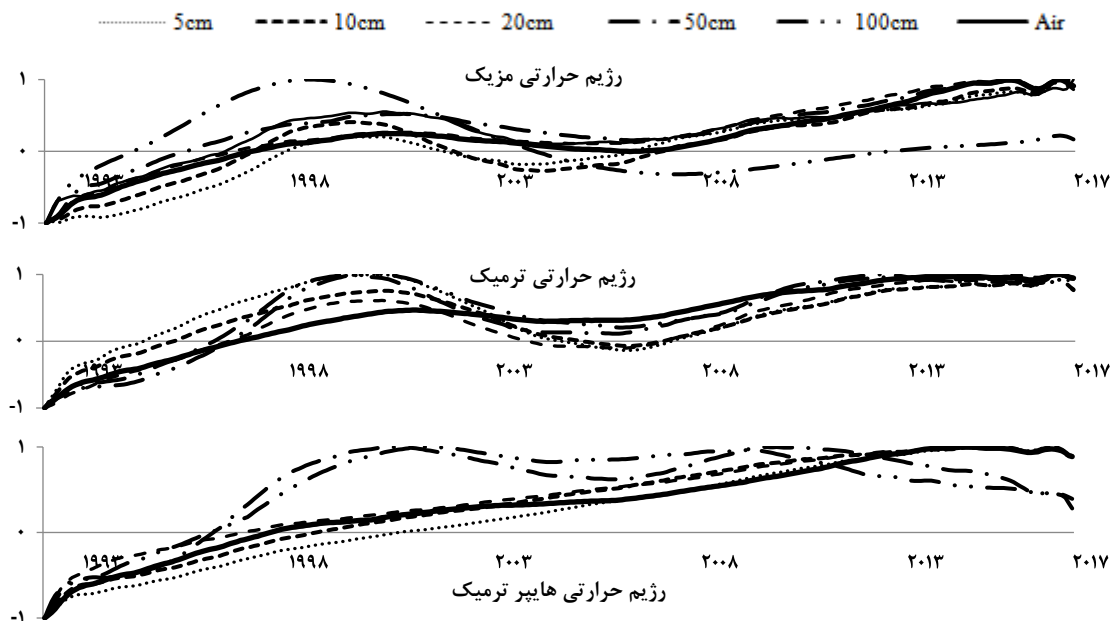
با توجه به شکل (۲)، یک دوره گرمایش (۲۰۰۱-۱۹۹۷) در سری‌های زمانی ST و AT کلاس مزیک رخ داده است که در

که قبلاً اشاره شد، ارتباط بین ST و AT بدلیل اثر فاکتورهای اقلیمی بسیار پیچیده است. مثلاً پوشش برف به عنوان عاملی برای تفاوت ST و AT نشان داده شده است (Bartlett et al., 2005). مطالعات دیگری نیز مبنی بر افزایش تفاوت ST و AT وجود دارد، مثل پژوهش Skinner and Majorowicz, (1999) که نشان دادند این تفاوت در طول قرن ۲۰ در ارتباط با کاربری اراضی در کانادا افزایش یافته است.

روندهای استخراج شده از سری‌های زمانی سالانه AT در رژیم مزیک، ترمیک و هایپرترمیک به ترتیب آهنگ تغییر ۰/۴۸، ۰/۶۰ و ۰/۶۰ درجه سلسیوس در دهه را نشان دادند. بیشترین (۰/۷۲) درجه سلسیوس در دهه) و کمترین (۰/۲۳) سلسیوس در دهه) روندهای دمای خاک به ترتیب در عمق ۱۰ و ۵۰ سانتی متری کلاس هایپرترمیک تعیین شدند. کمترین مقدار روند ST در عمق ۱۰ سانتی متری (۰/۲۴) سلسیوس در دهه) مربوط به کلاس مزیک بود. این نتایج با تغییرات سری‌های سالانه ST و AT بر اساس روند خطی استنتاج شده از روش من-کندال اصلاح شده (جزئیات در اینجا آورده نشده است)، مقایسه شد. به‌طور کلی نتایج حاصل از روش من-کندال مقادیر کمتری را نشان می‌دهند. هرچند این تفاوت زیاد نیست، این نتیجه ممکن است به‌دلیل نقاط اهرم باشد. قابل ذکر است که Chudinova et al., (2006) نیز عدم تطابقی از روند حاصل از روش خطی و روش تحلیل مجموعه‌ی مقادیر تکین گزارش کرده‌اند.

ارتباط با رژیم ترمیک از ۱۹۹۷ تا اواسط ۲۰۰۳ بوده است. علاوه بر این تطابق بین مولفه‌ی روند AT و ST دیده می‌شود که با افزایش عمق شیفت پیدا می‌کند. طبق نتایج Chudinova et al., (2006)، علت این افزایش دامنه نوسان با عمق می‌تواند دو دلیل عمده باشد: اول استاندارد کردن سری‌ها که باعث می‌شود میرایی با عمق حذف شود و دوم اینکه هر چه عمق بیشتر شود به علت کاهش افت و خیزها، روند با واریانس بیشتری توجیه می‌شود و از آنجا که دامنه نوسان معلول مقدار واریانس است بنابراین دامنه نوسان روندهای غیرخطی در عمق‌های پایین‌تر افزایش خواهد یافت. همچنین یک دوره سرمایش در کلاس ترمیک (۲۰۰۸-۲۰۰۵) دیده می‌شود که می‌تواند به علت قوی‌ترین الینو اتفاق افتاده (در سال ۲۰۰۵) در طی دوره مورد مطالعه باشد.

در کلاس هایپرترمیک، تمامی عمق‌ها به جز ۵۰ و ۱۰۰ سانتی متری یک روند افزایش تدریجی را نشان می‌دهند. Chudinova et al., و Mohammadi and Forouzanfar (2016) (2006) گزارش کردند که روند ST در عمق‌های مختلف از نظر شیب و شکل متفاوت هستند. در این کلاس حرارتی روند AT با عمق ۲۰ سانتی متری انطباق نزدیکی دارد، علاوه بر این شیفت با عمق به‌خوبی دیده نمی‌شود، البته مواردی که دامنه نوسان بیشتری دارند واریانس بزرگتری را نیز به خود اختصاص داده‌اند. Chudinova et al., (2006) نیز در دو مورد از پنج منطقه مورد مطالعه‌شان عدم وجود شیفت با عمق را گزارش کردند. همانطور



شکل ۲- روندهای استخراج شده از SSA در سری‌های سالانه دمای خاک در اعماق مختلف و دمای هوا

مولفه‌های ۲/۳، ۱۱-۱۲/۳ و ۴/۱-۳/۸ ساله، مولفه‌ی غالب بودند؛ البته در رژیم هایپرترمیک، مولفه‌ی ۴/۱-۳/۸ ساله شناسایی نشد.

طبق جدول‌های (۲ و ۳)، مولفه‌ی ۲/۳ و ۱۱-۱۲/۵ ساله، مولفه غالب در سری زمانی AT سالانه بودند. در رابطه با ST،

ی ST متناظر (بعنوان مثال مولفه ۳/۸ ساله ST در رژیم هایپرترمیک) را بازسازی کرد. برای شرایط مرزی فوق می توان تخمین زد:

$$T(x, t) = \bar{T}_0 + G_0 x + A_0 e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2D}}} \cos(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2D}}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

که \bar{T}_0 میانگین سالانه دمای هوا (°C)، T دمای خاک، A_0 دامنه نوسان دمای سطحی خاک یا دمای هوا در این برآورد (°C)، P دوره نوسان، $\omega = \frac{2\pi}{P}$ ، G_0 گرادیان دمایی (°C m⁻¹) که می تواند برای عمق های سطحی نادیده گرفته شود، x عمق خاک (m)، D پخشیدگی حرارتی (m² year⁻¹) و t زمان است. در این برآورد تغییر فاز آنالوگ توسط رابطه زیر تخمین زده می شود:

$$\Delta t = x \sqrt{\pi / PD} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این مثال برای مدل سازی مولفه ۳/۸ ساله ی ST در رژیم حرارتی هایپرترمیک، RMSE ۰/۴۵ درجه سلسیوس بدست آمد که نسبتاً برآورد خوبی است.

در جدول (۴)، بیشترین ضریب همبستگی اسپیرمن مرتبط با مولفه های معنی دار ST با AT و Prc ارائه شده اند. مولفه های نوسانی حدوداً ۲/۳ ساله در عمق های ۱۰ و ۵۰ سانتی متری رژیم های مزیک و ترمیک، قوی ترین همبستگی مثبت (۰/۹۸-۰/۹۴) را با مولفه های همسان استخراج شده از AT نشان دادند. همبستگی بین مولفه های ۱۱-۱۲ ساله ی ST و مولفه ی ۱۲/۵-۱۱ ساله AT در کلاس حرارتی ترمیک معنی دارتر بودند. رابطه معکوس ST و بارش در درجه اول به دلیل کاهش جذب انرژی خورشید در اثر پوشش ابری و افزایش آزاد سازی گرمای نهان بخاطر افزایش رطوبت سطحی می باشد (Portmann et al., 2009). (Alijani et al., 2016) طی مطالعه ی خود در رابطه با تحلیل طیفی بارش در ایران گزارش کردند که نوسانات ۲ تا ۳ ساله بیشترین حاکمیت را در بارش ایران دارند.

با در نظر گرفتن یک چارچوب رسانی یک بعدی، با استفاده از مولفه های نوسانی استخراج شده از سری زمانی AT (بعنوان مثال مولفه ۳/۸ ساله در رژیم هایپرترمیک) می توان مولفه

جدول ۴- بیشترین ضریب همبستگی مولفه های نوسانی دمای خاک با دمای هوا و بارش بصورت سالانه در طول دوره ۱۹۹۳-۲۰۱۷

همبستگی (تاخیر)	بارش	نوسان (سال)				
		همبستگی (تاخیر)	دمای هوا	دمای خاک	عمق خاک (cm)	شناسه کلاس
۰/۵۵- (۱)	۲/۵	۰/۹۸	۲/۳	۲/۳	۵	۱
۰/۵۶-	۲/۵	۰/۹۸	۲/۳	۲/۳	۱۰	۱
-	-	۰/۶۷ (۱۰)	۱۲/۵	۱۲	۱۰	۱
۰/۵۵- (۱)	۲/۵	۰/۹۷	۲/۳	۲/۳	۲۰	۱
-	-	۰/۶۷ (۵)	۱۲/۵	۱۱/۸	۲۰	۱
۰/۵۷- (۱)	۲/۵	۰/۹۷	۲/۳	۲/۳	۵۰	۱
۰/۵۴- (۲)	۲/۵	۰/۹	۲/۳	۲/۳	۱۰۰	۱
۰/۴۰-	۲/۵	۰/۹۳	۲/۳	۲/۴	۵	۲
-	-	۰/۷۳ (۱)	۱۱/۵	۱۱	۵	۲
۰/۳۵-	۲/۵	۰/۹۵	۲/۳	۲/۳	۱۰	۲
-	-	۰/۹۸	۱۱/۵	۱۱/۳	۱۰	۲
۰/۳۳-	۲/۵	۰/۹۶	۲/۳	۲/۴	۲۰	۲
-	-	۰/۹۶	۱۱/۵	۱۱	۲۰	۲
۰/۳۷-	۲/۵	۰/۹۴	۲/۳	۲/۶	۵۰	۲
-	-	۰/۸	۱۱/۵	۱۱/۸	۵۰	۲
۰/۲۸- (۲)	۲/۵	۰/۹۶ (۲)	۲/۳	۲/۳	۱۰۰	۲
-	-	۰/۷۲	۱۱/۵	۱۰/۸	۱۰۰	۲
-	-	۰/۸۶	۲/۳	۲/۳	۵	۳
-	-	۰/۷۲	۳/۸	۳/۶	۵	۳
-	-	۰/۷۶	۳/۸	۳/۸	۱۰	۳
-	-	۰/۶۴	۲/۱	۲/۳	۱۰	۳
-	-	۰/۹۰	۳/۸	۳/۸	۲۰	۳
-	-	۰/۵۷	۳/۸	۳/۳	۵۰	۳

همه مقادیر همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی دار هستند. در مواردی که پارامتر متناظری وجود نداشته، خط تیره گذاشته شده است. مواردی با همبستگی بالا بصورت بولد نشان داده شده اند

نتیجه گیری

افزایشی روند دمای خاک (ST) را (در لایه ۵ تا ۲۰ سانتی متری) در طول دوره مورد مطالعه نشان دادند و تنها دمای هوا (AT) کلاس ۲، نرخ افزایش روند بیشتری نسبت به دمای خاک سطحی

به طور کلی در بررسی سالانه، کلاس ۱ با رژیم حرارتی مزیک، بیشترین گرمایش و کلاس ۲ با رژیم حرارتی ترمیک کمترین نرخ

آنجا که دامنه نوسان معلول مقدار واریانس است بنابراین دامنه نوسان روندهای غیرخطی در عمق‌های پایین‌تر افزایش خواهد یافت.

با توجه به اینکه برخلاف داده‌های دمای خاک، سری‌های طولانی مدت دمای هوا بیشتر در دسترس است، از طریق انطباق‌های کوتاه مدت و طولانی مدت مشخص شده بین روند و مولفه‌های نوسانی سری زمانی ST و AT، می‌توان به تولید و بازسازی تغییرات ST بر مبنای AT پرداخت. از آنجا که پارامترهای مختلفی بر ST و تغییرات ایجاد شده در آن موثرند، لزوم بررسی عواملی نظیر رطوبت خاک، جنس خاک، پوشش برفی، اینورژن‌های دمایی لایه سطحی و همین‌طور پدیده‌های بزرگ مقیاسی چون انسو و PDO، به منظور بهبود نتایج تحقیق ضروری به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که نتایج برداشت نقطه‌ای در ایستگاه‌ها قابل تعمیم به منطقه‌ی وسیعی نیست. علاوه بر این، بدلیل کوتاه بودن طول دوره آماری در دسترس ST در ایران، لازم است در سال‌های آتی با افزایش طول دوره آماری در دسترس این نتایج مورد بازبینی قرار گیرند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Alijani, B., Bayat, A., Doostkamian, M. and Balyani Y. (2016). Spectral analysis of time series for annual precipitations in Iran. *Geography and planning*, 20(57), 217- 236. (In Farsi)
- Allen, M. R. and Smith, L. A. (1996). Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of colored noise. *Journal of climate*, 9(12), 3373-3404.
- Araghi, A., Adamowski, J., Martinez, C. J. and Olesen, J. E. (2019). Projections of future soil temperature in northeast Iran. *Geoderma*, 349, 11-24.
- Araghi, A., Mousavi-Baygi, M. and Adamowski, J. (2016). Detection of trends in days with extreme temperatures in Iran from 1961 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(1-2), 213-225.
- Araghi, A., Mousavi-Baygi, M. and Adamowski, J. (2017). Detecting soil temperature trends in Northeast Iran from 1993 to 2016. *Soil and Tillage Research*, 174, 177-192.
- Asakereh, H. (2012). Principle component analysis of extreme of Zanjan city precipitation. *Geographical research*, 27 (2), 1-18. (In Farsi)
- Balyani, Y., Fazelnia, Gh. and Bayat, A. (2012). A study and prediction of annual temperature in Shiraz using ARIMA model. *Geographic space*, 12(38), 127-144. (In Farsi)
- Bartlett, M. G., Chapman, D. S. and Harris, R. N. (2005). Snow effect on North American ground temperatures, 1950–2002. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F3).
- Chudinova, S. M., Frauenfeld, O. W., Barry, R. G., Zhang, T. and Sorokovikov, V. A. (2006). Relationship between air and soil temperature trends and periodicities in the permafrost regions of Russia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F2).
- Daneshmand H. and Mahmoudi P. (2017). A spectral analysis of Iran's droughts. *Iranian Journal of Geophysics*, 10 (4), 28-47. (In Farsi)
- Ghil, M., Allen, M. R., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E., Robertson, A. W., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F. and Yiou, P. (2002). Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of geophysics*, 40(1), 3-1.
- Golyandina, N., Nekrutkin, V. and Zhigljavsky, A. A. (2001). Analysis of time series structure: SSA and related techniques. Chapman and Hall/CRC.
- Hassani, H., Mahmoudvand, R. and Zokaei, M. (2011). Separability and window length in singular spectrum analysis. *Comptes rendus mathématique*, 349(17-18), 987-990.
- Hu, Q. and Buyanovsky, G. (2003). Climate effects on corn yield in Missouri. *Journal of Applied Meteorology*, 42(11), 1626-1635.
- Hu, Q. and Feng, S. (2003). A daily soil temperature dataset and soil temperature climatology of the contiguous United States. *Journal of applied meteorology*, 42(8), 1139-1156.
- Lal, R. and Shukla, M. K. (2004). Principles of soil physics. Marcel Dekker, Inc, New York, p 682.
- Mohammadi, M. and Forouzanfar, M. (2016). Investigating the trend of soil temperature changes at different depths in some climatic regions of Iran.

نشان داد. مولفه‌های نوسانی غالب در سری سالانه ST، ۲/۶-۲/۱، ۱۱-۱۲/۳ و ۳/۸-۴/۱ ساله بود، در واقع چرخه‌های حدوداً ۲/۱ تا ۲/۶ ساله دمای خاک در هر سه کلاس حرارتی مورد مطالعه دارای بیشترین رخداد بازگشت‌پذیری می‌باشد که بیشتر دانشمندان این چرخه‌ها را به تغییرات دو سالانه (QBO) الگوی بزرگ مقیاس گردش عمومی جو و جریانات مداری نسبت داده‌اند. میزان همبستگی بین مولفه‌های ۱۱-۱۲/۳ ساله ST با مولفه‌های ۱۱-۱۲/۵ ساله AT در رژیم حرارتی ترمیک بیشتر از سایر کلاس‌های حرارتی بود، این نوسانات ۱۱-۱۲ ساله می‌تواند مرتبط با فعالیت ۱۱ ساله لکه‌های خورشیدی باشند؛ همچنین باتوجه به اینکه دوره‌های برگشت‌پذیری پدیده ENSO بین ۳ تا ۷ سال است، به نظر می‌رسد نوسانات ۳-۵ ساله سری‌های زمانی مورد بررسی، مرتبط با این پدیده پیوند از دور جهانی باشند. بین مولفه‌ی روند AT و ST تطابقی دیده می‌شود که با افزایش عمق شیفت پیدا می‌کند. علت این افزایش دامنه نوسان با عمق می‌تواند دو دلیل عمده باشد: اول استاندارد کردن سری‌ها که باعث می‌شود میرایی با عمق حذف شود و دوم اینکه هر چه عمق بیشتر شود به علت کاهش افت و خیزها، روند با واریانس بیشتری توجیه می‌شود و از

- Journal of climate research*, 25, 127-140. (In Farsi)
- Portmann, R. W., Solomon, S. and Hegerl, G. C. (2009). Spatial and seasonal patterns in climate change, temperatures, and precipitation across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(18), 7324-7329.
- Sabziparvar A.A., Siroos, N. and Bayat, H. (2014). Effect of using time-lag between maximum screen temperature and soil temperature in improving annual soil regression equations. *Water and Soil Conservation*, 21(3), 31-54. (In Farsi)
- Skinner, W. R. and Majorowicz, J. A. (1999). Regional climatic warming and associated twentieth century land-cover changes in north-western North America. *Climate Research*, 12(1), 39-52.
- Webb, J., Amon, B., Subedi, M. and Fullen, M. A. (2017). Temporal changes in soil temperature at Wolverhampton, UK and Hohe Warte, Vienna, Austria 1976–2010. *Weather*, 72(9), 260-265.
- Wu, C. L., Chau, K. W. and Fan, C. (2010). Prediction of rainfall time series using modular artificial neural networks coupled with data-preprocessing techniques. *Journal of Hydrology*, 389(1-2), 146-167.
- Yang, M., Nelson, F. E., Shiklomanov, N. I., Guo, D. and Wan, G. (2010). Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: A review of recent research. *Earth-Science Reviews*, 103(1-2), 31-44.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. and Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 16(9), 1807-1829.
- Zhang, T., Barry, R. G., Gilichinsky, D., Bykhovets, S. S., Sorokovikov, V. A. and Ye, J. (2001). An amplified signal of climatic change in soil temperatures during the last century at Irkutsk, Russia. *Climatic Change*, 49(1-2), 41-76.