

دوفصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره ۷، شماره ۲ و ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۰

ص ۱۵۸ تا ۱۸۶

"مسئله واگرایی" در برآورد دما بر اساس حلقه‌های درختی (مطالعه موردی: رویشگاه‌های کوهستانی ارس شمال استان کرمان)

قاسم عزیزی؛ استاد اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

محمد مهدی آبادیجو راوری*؛ دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

مصطفی کریمی؛ استادیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲

چکیده

آنومالی‌های اقلیمی مانند گرمایش جهانی در دهه‌های اخیر باعث بروز "مسئله واگرایی" در سری حلقه‌های درختی برخی نواحی شده است که توانایی این پروکسی برای بازسازی اقلیمی را دچار چالش‌هایی نظیر بیش-برآوردی دمای بازسازی شده می‌کند. در این پژوهش مقایسه داده‌های ایستگاهی (ایستگاه‌های زرنند، کرمان و داده‌های CRU TS4.01) با گاه‌شناسی حلقه‌های رشد سالانه گونه ارس رویشگاه تنگل راور، در ارتفاعات شمالی استان کرمان، نشان داد که به دلیل افزایش دما همراه با کاهش نسبی بارش در چند دهه اخیر به خصوص از سال ۱۹۹۶ میلادی به بعد، داده‌های دما با گاه‌شناسی پهنای حلقه‌ها دچار واگرایی شده‌اند و در مقیاس زمانی طولانی، دمای بازسازی شده همخوانی مورد انتظار با برآوردهای جهانی را نشان نمی‌دهد. در پژوهش حاضر از دو روش برای رفع این مشکل استفاده گردید: در روش اول دمای بهینه (۱۷/۵-۱۷) درجه سلسیوس) و آستانه‌های دمایی محدود کننده رشد درختان تعیین و سپس دماهای بالاتر و پایین‌تر از آن به ترتیب برای بازسازی دما در دوره دارای واگرایی و دوره بدون واگرایی استفاده شدند. در روش دوم از رگرسیون سه متغیره بین داده‌های دما، پهنای حلقه‌ها و بارش استفاده شد. بارش در دوره مشابه ۱۹۰۱-۱۹۹۵ بازسازی و تا انتهای گاه‌شناسی به عنوان متغیر سوم برای بازسازی دما به کار گرفته شد. نتایج نشان داد استفاده از رگرسیون سه متغیره با وجود برآورد داده‌های هموارتر نسبت به داده‌های واقعی، در کل نتایج بهتری را نسبت به تقطیع داده‌ها براساس آستانه دما به دست می‌دهد. با این حال روند افزایش و کاهش دمای بازسازی شده در هر دو روش در مقیاس طولانی مدت نتایج مشابهی دارد.

کلید واژه‌ها: اقلیم‌شناسی درختی، بازسازی دما، حلقه‌های رویشی، درختان ارس، گرمایش جهانی.

مقدمه

بررسی اثر گرمایش جهانی بر اکوسیستم‌های جنگلی یکی از موضوعات مورد توجه در مطالعات تغییر اقلیم است. مطالعات سنتی دندروکلیماتولوژی به طور کلی رابطه مستقیمی بین رشد شعاعی درختان و عوامل محدودکننده اقلیمی را ارائه می‌کنند اما با این وجود پژوهش‌های جدیدتر به‌خصوص در عرض‌های جغرافیایی بالا و مناطق مرتفع نیم‌کره شمالی نشان داده‌اند که حساسیت رشد درختان به عوامل اصلی اقلیمی تحت تاثیر پدیده گرمایش زمین تغییر کرده است (جیکوبی - آریگو ۱۹۹۵). بازسازی آب و هوا بر اساس حلقه‌های درختی، اساس اصلی برای ارزیابی تغییرات اقلیمی در چند قرن تا هزاره گذشته است و اکثر عموم بازسازی‌ها گرمایش بی‌سابقه را در چند دهه اخیر نشان می‌دهند (آریگو و همکاران ۲۰۰۶، اسپر و همکاران ۲۰۰۲). این بازسازی‌ها بر این فرض استوار است که رابطه بین آب و هوا و رشد درختان در طول زمان خطی و پایدار است - که "اصل یکنواختی" نامیده می‌شود - اما بر اثر تغییرات اقلیمی دهه‌های اخیر با تغییر حساسیت درختان در برخی مناطق این اصل دچار چالش شده که می‌تواند بازسازی‌های اقلیمی با استفاده از منابع ارزشمند حلقه‌های درختی را با مشکلی جدی روبه‌رو سازد. در اثر این رویداد به‌ویژه در عرض‌های جغرافیایی بالا و ارتفاعات، درجه حرارت، سریع‌تر از پروکسی حلقه‌های درختی افزایش می‌یابد، به طوری که مدل تهیه شده از این گونه پروکسی‌ها گرمایش اخیر در قرن بیستم را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. این موضوع که توسط دی‌آریگو و همکاران (۲۰۰۸) "مسئله واگرایی"^۱ نامیده شده است سوالات مهم و اساسی در رابطه با قابلیت حلقه‌های درختی برای بازسازی اقلیمی مطرح می‌کند. مسئله واگرایی، به عنوان یک آنومالی در زمینه اقلیم‌شناسی درختی شناخته می‌شود. این مسئله اختلاف بین دماهای ثبت‌شده و دماهای بازسازی‌شده با استفاده از تراکم چوب موخر^۲ یا در بعضی موارد پهنای سالانه حلقه‌ها در جنگل‌های عرض‌های بالای شمالی است. در حالی که داده‌های ثبت‌شده دماسنج‌ها روند قابل توجهی از گرم شدن اواخر قرن بیستم را نشان می‌دهد، بسیاری از گاه‌شناسی‌های به دست آمده از سایت‌های ذکر شده، تغییر مشابه در پهنای حلقه‌ها را نشان نمی‌دهد. بنابراین روندهای دمایی که تنها از حلقه‌های درختی استخراج می‌شود از دهه ۱۹۵۰ تاکنون گرم شدن قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. از این‌رو روندهای دمایی که از داده‌های ثبت شده و حلقه‌های درختی به دست می‌آیند، نسبت به هم دچار "واگرایی" خواهند بود. بازسازی دمای گذشته در گاه‌شناسی‌های دارای واگرایی، سبب بیش‌برآوردی دمای بازسازی‌شده گذشته می‌شود.

واگرایی یا مشکل تغییر در پاسخ حلقه‌های درختی به تغییرات آب‌وهوایی اخیر، برای اولین بار در آلاسکا توسط توبس^۳ و جیکوبی^۴ و داریگو^۵ مشخص شد. بریفا^۶ در ۱۹۹۸ گزارش داد که این مشکل در عرض‌های جغرافیایی بالا شیوع بیشتری داشته و برای جلوگیری از بیش‌برآوردی دمای گذشته باید این مسئله را در نظر گرفت. از آن جا که توزیع وسیع جغرافیایی، مقیاس زمانی مناسب و ذخیره اطلاعات فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی

1 - divergence problem

2 - latewood

3 - Taubes

4 - Jacoby

5 - d'Arrigo

6 - Briffa'

محیط باعث شده تا گاهشناسی درختی ابزاری مهم برای بازسازی گذشته خصوصا اقلیم باشد، مسئله واگرایی این سوال را ایجاد می‌کند که قابلیت اطمینان به پروکسی حلقه‌های درختی در دوره قبل از ثبت داده‌های دما، چقدر است؟ پروکسی حلقه‌های درختی اساسا با سایر پروکسی‌ها برای دوره ۱۶۰۰-۱۹۵۰ مطابقت دارند. قبل از حدود ۱۶۰۰ میلادی، عدم اطمینان از بازسازی‌های اقلیمی خصوصا دما، به دلیل کمبود نسبی درختان در دسترس و توزیع جغرافیایی محدود آنها افزایش می‌یابد. در دهه‌ای اخیر این عدم قطعیت بیشتر شده و عملا بحث بازسازی دما را با مشکل مواجه می‌کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این واگرایی ناشی از فعالیت‌های انسانی بوده و بنابراین محدود به گذشته‌ی نزدیک است. با این حال استفاده از چنین گاهشناسی‌هایی باعث پیش‌برآوردی دمای گذشته و احتمالا کم برآوردی دمای چند دهه اخیر می‌شود. می‌توان گفت در مطالعات اقلیم‌شناسی درختی، پی بردن به وجود مسئله واگرایی در منطقه مورد مطالعه، سبب جلوگیری از مواردی نظیر بروز خطا در بازسازی‌ها، سردرگمی ناشی از تفاوت نتایج مورد انتظار و نتایج به دست آمده و تحلیل نادرست در مورد رویدادهای اقلیمی، خصوصا تغییر اقلیم می‌شود. بنابراین در مطالعات اقلیم‌شناسی درختی لازم است قبل از انجام بازسازی و تحلیل‌های اقلیمی، اطمینان حاصل کرد که سری‌های زمانی و گاه‌شناسی‌های درختی، با داده‌های اقلیمی، به خصوص دما، دارای واگرایی نیستند و یا اینکه قبل از انجام بازسازی و تحلیل‌های اقلیمی راه‌حل‌هایی برای رفع اثرات واگرایی اتخاذ گردند. دلایل و توضیحات مسئله واگرایی هنوز به‌طور کامل شناخته شده نیست. اما به احتمال زیاد، به دلیل تأثیر برخی از متغیرهای اقلیمی بر جنگل‌های نیمکره شمالی در دوره ۱۹۵۰ به بعد می‌باشد. داریگو این فرضیه را مطرح می‌کند که "فراتر از سطح یک آستانه خاص از درجه حرارت، درختان ممکن است از نظر فیزیولوژیکی بیشتر تحت فشار قرار بگیرند، به‌ویژه اگر تنش رطوبتی در همان زمان افزایش یابد." نشانه‌هایی از چنین استرسی در تصاویر ماهواره‌ای جنگل‌های شمالی به‌صورت لکه‌های قهوه‌ای شده بین پهنه‌های وسیع جنگلی مشخص است. سایر توضیحات در مورد مسئله واگرایی به این شرح است: ۱- پاسخ به گرم شدن سریع اخیر جهانی ممکن است به تعویق بیفتد یا غیر خطی باشد. ۲- واگرایی ممکن است پاسخی به تغییرات در سایر متغیرهای محیطی که حلقه‌های درختی به آنها وابسته‌اند، مانند تأخیر در ذوب برف یا تغییرات فصلی، باشد. ۳- نرخ رشد می‌تواند بیشتر به حداکثر یا حداقل دمای سالانه بستگی داشته باشد، به‌خصوص در مناطقی که رشد محدود به دما است (مانند عرض‌های جغرافیایی یا ارتفاعات بالا). ۴- احتمال کم نور شدن کره زمین در اثر افزایش آتروسل‌های اتمسفر. در سال ۲۰۱۲ برینن^۷ و همکاران پیشنهاد کردند که مشکل واگرایی تا حد زیادی ساخته نمونه‌برداری از درختان بزرگ زنده است، بدین معنی که تغییرات در رشد شعاعی درخت با توجه به افزایش سن، می‌تواند مسبب بروز واگرایی باشد. مطالعات صورت گرفته در زمینه "مسئله واگرایی" نسبت به سایر زمینه‌های مطالعاتی حلقه‌های درختی چندان زیاد نیست، با این وجود برای حل و روشن شدن این مسئله، پژوهش‌های ارزشمندی صورت گرفته است. داریگو و همکاران (۲۰۰۶) در بازسازی اصلاح‌شده دمای نیمکره شمالی با استفاده از گاه‌شناسی‌های قبلی اوراسیا و آمریکای شمالی به وجود واگرایی بین گاه‌شناسی‌ها و داده‌های دمای ایستگاهی اشاره کردند. همچنین آنچوکیتایس و همکاران (۲۰۱۶) در بازسازی دمای تابستانه نیم‌کره شمالی برای ۱۰۰۰ سال گذشته، به وجود

مسئله واگرایی در برخی گاه‌شناسی‌های نواحی شمالی اشاره کردند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز گاه‌شناسی‌های به دست آمده از کوه‌های تیان‌شان در شمال شرق چین را دارای واگرایی دما-پهنای حلقه‌ها دانستند. در این زمینه ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی صنوبر شرینگ به عنوان گونه غالب در کوه‌های تیان‌شان به این نتیجه رسیدند که پهنای حلقه‌های این گونه دارای همبستگی مثبت با بارش و همبستگی منفی با دما بوده و رشد شعاعی این گونه در ارتفاعات پایین‌تر به عوامل آب‌وهوایی حساس‌تر است و این حساسیت، افزایش چشمگیری را پس از تغییرات ناگهانی دما و رطوبت در دهه‌های اخیر نشان می‌دهد. ایشان استدلال کردند این تغییر حساسیت حلقه‌های نسبت به اقلیم به دلیل گرمایش اخیر و تنش رطوبتی ایجاد شده رخ داده است. ویلمکینگ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از کروئولوژی‌های بانک اطلاعات حلقه‌های درختی^۸ (TRDB) برای عرض ۶۸ درجه شمالی در آلاسکا مسئله واگرایی را نشان دادند و با بررسی نمونه به نمونه بیش از ۵۷۰ درخت پی بردند که ۱۷ درصد درختان این ناحیه نسبت به اثر واگرایی واکنش نشان نداده‌اند و با استفاده از آنها و ساخت یک گاه‌شماری منطقه‌ای جدید توانستند بازسازی اقلیمی بدون واگرایی را انجام دهند. همچنین نتایج نشان داد که ۸۳ درصد درختان بررسی شده به اصل یکنواختی در اقلیم‌شناسی درختی پایبند نبوده‌اند، بنابراین ایشان با توجه به این درصد بالا پیشنهاد می‌کنند که مسئله واگرایی بایستی در عوض ناهنجاری، یک هنجار در نظر گرفته شود و برای بازسازی اقلیمی از روش‌های حذف اثر واگرایی در کنار پروکسی‌های مقایسه‌ای استفاده گردد. فنگ و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی گونه صنوبر فاکسون برای پنج سایت جنگلی در کوه‌های غربی کینلینگ و فلات شمال شرقی تبت نشان دادند که پهنای حلقه درختان (TRW) صنوبر به طور قابل توجهی با روند مثبت تحت تأثیر تغییرات دما قرار گرفته است، در حالی که همبستگی بارندگی منفی بوده است. در حالی که کروئولوژی حداکثر تراکم چوب متاخر^۹ (MXD) این درختان هیچ روند صعودی نشان نمی‌دهد. به نظر ایشان واکنش متفاوت بین TRW و MXD ممکن است ناشی از تغییرات فصلی روند گرمایش باشد و سری TRW این گاه‌شناسی‌ها برای بازسازی اقلیمی مناسب است. در مطالعات صورت گرفته در ایران نیز پورطهماسی و همکاران (۱۳۸۸) دریافتند که در دوره ۱۹۵۵-۲۰۰۴ میلادی بر خلاف دوره‌های ۵۰ ساله پیشین، بین گاه‌شناسی‌های بدست آمده از درختان اوری و ارس در چهارباغ گلستان همبستگی معنی‌داری وجود ندارد و یکی از دلایل این امر را اثرگذاری گرمایش سال‌های اخیر دانستند. اشنايدر و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های حلقه‌های درختی در شمال اسکادیناوی دوره‌ای از واگرایی در اوایل قرن بیستم به دلیل افزایش زیاد دمای تابستانه بین سال‌های ۱۹۰۵-۱۹۱۹ و همچنین واگرایی دهه‌های پایانی این قرن را آشکار کردند. ایشان پیشنهاد می‌کنند چنین رفتاری پروکسی حلقه‌های درختی را از حالت خطی خارج کرده و مدل اقلیم-رویش ارائه شده در این حالت باید با روش‌های قوی‌تر و مطمئن‌تری کالبره شود. پلیزاری^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی رشد درختان و درختچه‌های گونه‌های مختلف ارس از زیست بوم‌های قطبی، آلیپی و مدیترانه‌ای در سراسر اروپا نشان دادند که ارس‌های مدیترانه‌ای بیش‌تر از نواحی آلیپی و قطبی از دهه ۱۹۸۰ به بعد دچار آشفتگی در واکنش به تغییرات دما شده‌اند و این موضوع را به دلیل افزایش تنش آبی می‌دانند. لی و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی گونه‌ای از نراد در جنوب تبت، افزایش دمای زمستان به‌خصوص پیش از فصل رویش را عاملی برای کاهش حساسیت رشد

8 - Tree Ring Data Bank

9 - maximum latewood density

10 - Pellizzari

این گونه نسبت به دما دانسته‌اند. شن و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی صنوبر کراسیفولیا^{۱۱} و کاج چینی^{۱۲} در حاشیه جنوبی صحرای تنگر^{۱۳}، پی بردند که تنش آبی در این منطقه کنترل کننده اصلی رشد شعاعی درختان هر دو گونه است و تغییر واکنش حلقه‌ها در برابر تغییرات دما از طریق تنش آبی، بروز می‌کند، ایشان بیان می‌کنند که درختان واقع در خاک عمیق‌تر با ذخیره آبی بیشتر به میزان کمتری به تغییرات دما واکنش نشان داده‌اند. به طور کلی، واگرایی دمایی در گاهشناسی درختی اولین بار در نمونه‌های عرض‌های بالا دیده شده و تحقیقات دیگر نیز در عرض‌های پایین‌تر مانند مناطقی از تبت و تیان‌شان این رویداد را نشان می‌دهند. این مسئله تا کنون به‌طور خاص در رویشگاه‌های ایران مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین این پژوهش برای اولین بار در رویشگاهی در ایران به مسئله واگرایی می‌پردازد. پژوهش حاضر سعی بر این دارد وقوع "مسئله واگرایی" در عرض‌های جغرافیایی پایین و یک منطقه نیمه خشک با استفاده از حلقه‌های رشد گونه ارس در شمال استان کرمان را بررسی و راه حلی برای بازسازی دما با توجه به گاهشناسی‌های دارای این مسئله ارائه دهد.

منطقه و روش مطالعه

گونه ارس در استان کرمان پراکنش وسیعی در نقاط مرتفع دارد ولی در همه جا به صورت توده ظاهر نمی‌شود و به صورت تک درخت و پراکنده در بسیاری از نقاط رویش دارد. از این مناطق می‌توان به راور و لکرکوه در حاشیه لوت، کوه طرنگ، کوه کوشک، سیاه کوه، ده‌سر، بین ارتفاعات کل کوهی و گوغر در بالای توده جنگلی بادام و بنه، در خانه سرخ سیرجان و سرچشمه به‌صورت تک درخت و همچنین ارتفاعات شرق رفسنجان اشاره کرد. ارس جدا از مناطق یاد شده در چند منطقه دیگر استان نیز تراکم بیش‌تری پیدا کرده است. از جمله این مناطق می‌توان دره دلفارد به سمت گردنه ساردویی، ارتفاعات کوه سفید و ارتفاعات مشرف به منطقه حفاظت شده خیر^{۱۴} در شهرستان بافت، ارتفاعات کوه‌مار و منطقه هنزا^{۱۵} در کوه‌باز رابر بافت و همچنین سریشه جیرفت، ارتفاعات گردنه امام علی بین جیرفت و راین و ارتفاعات جبال بارز را نام برد. در منطقه اخیر ارس با تراکم خوب و به نسبت خالص ظاهر شده و بهترین رویشگاه ارس را در استان کرمان تشکیل داده است (علی‌احمد کروری، ۱۳۹۰، ص ۱۴۴). منطقه مورد مطالعه این پژوهش از رویشگاه‌های کمتر شناخته‌شده به نام تنگل راور، واقع در ارتفاعات شمالی استان کرمان است. این توده کوهستانی در بین سه شهر راور، زرنده و کوه‌بان قرار گرفته است. تنگل در بین مردم استان کرمان به دره‌های واقع شده بین ارتفاعات بلند که امکان اسکان موقت و دسترسی به مراتع کوهستانی را فراهم می‌کنند، گفته می‌شود. تنگل راور از یک رودخانه اصلی تشکیل شده است که با طی مسیر در توده کوهستانی به دشت راور می‌رسد. پوشش گیاهی این منطقه شامل مراتع پوشیده از انواع گون، درمنه و دیگر بوته‌های چند ساله

11 - *Populus crassifolia*

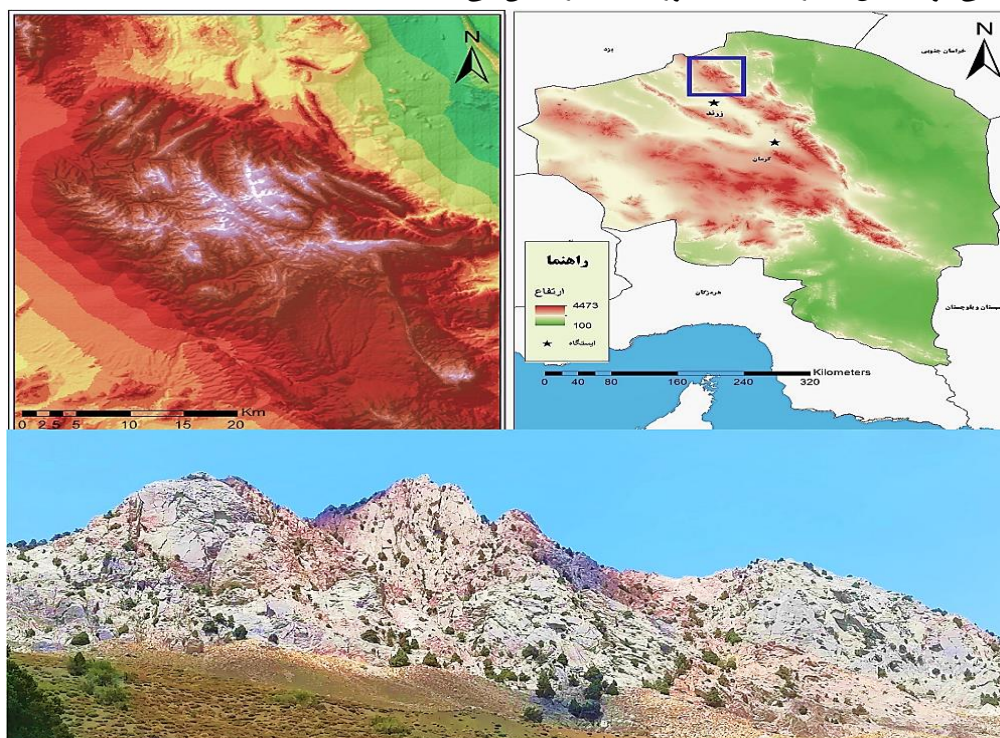
12 - *Pinus bungeana*

13 - Tengger

14 - Khabr

15 - Henza

است گونه ارس^{۱۶} در قسمت شمالی و شمال شرقی این ارتفاعات گسترش یافته است. درختان ارس منطقه مورد مطالعه عموماً بر روی دامنه‌های با شیب بالا و مناطق صخره‌ای نزدیک به خط‌الراس ارتفاعات گسترش یافته‌اند (مرتفع‌ترین درخت ارس در رویشگاه با استفاده از تصاویر هوایی در ارتفاع ۳۵۰۶ متری از سطح دریا شناسایی شد)، تعدادی از درختان در ارتفاعات پایین‌تر نیز رشد کرده‌اند که بیش‌تر به صورت تک درخت و نه توده‌های جنگلی، دیده می‌شوند شکل شماره ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه و تصویری از رویشگاه کوه‌گاو

نمونه برداری از درختان منطقه به صورت انتخابی انجام گرفت و بیش از ۲۰۰ نمونه از ۹۶ درخت به وسیله مته رویش‌سنج^{۱۷} مخصوص چوب سخت با طول ۴۰ سانتی‌متر از درختان دارای تنه مناسب و بدون بریدگی در شاخه‌ها و تنه، در ارتفاع برابر سینه برداشت شد. پس از تثبیت و خشک کردن نمونه‌ها بر روی پایه نگه‌دارنده، سطح آنها صیقل داده شده و برای شمارش و اندازه‌گیری پهنای حلقه‌ها آماده گشت. شمارش و اندازه‌گیری به وسیله میز LINTAB و نرم‌افزار TSAPWin در آزمایشگاه آناتومی چوب گروه مهندسی و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران از سمت چوب به مغز با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انجام گرفت. هر دو سری بدست آمده از نمونه‌های یک درخت جهت آشکار شدن کیفیت نمونه‌ها به وسیله نرم‌افزار TSAPWin با یکدیگر تطابق زمانی داده شدند. برای سنجش تطابق زمانی از آماره‌های GLK^{18} یا ضرایب درصد تطابق واریانس‌ها استفاده شد (که معیاری کلی از شباهت بین

16 - Juniperus polycarpus

17 - Increment Borer

18 - Gleichlaufigkeit

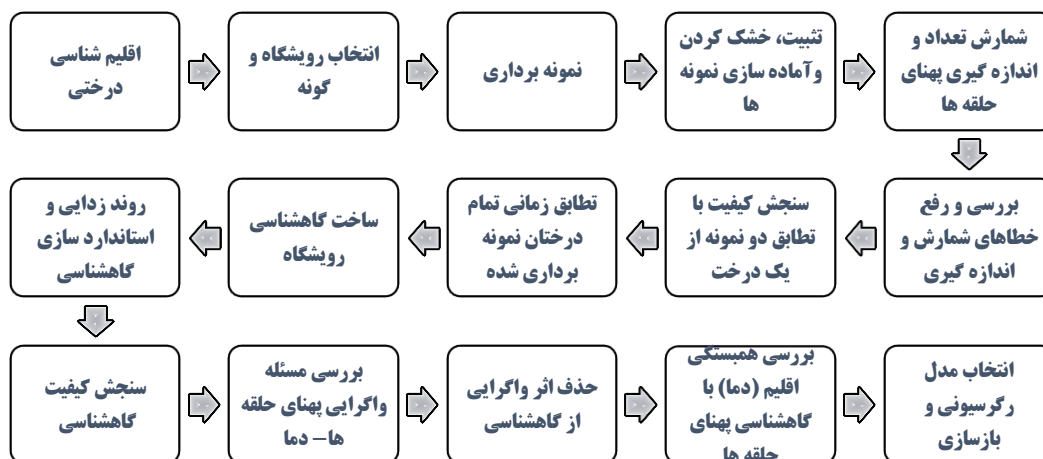
دو گاه‌شناسی اندازه‌گیری شده است و هرچه مقدار آن به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده تطابق بیشتر دو نمونه خواهد بود و به طور کلی با توجه به گونه درختی، مقادیر ۶۰ یا ۷۰ GLK برای تطابق قابل قبول در نظر گرفته می‌شوند). همچنین از GSL^{19} بیانگر سطح معناداری GLK، CDI^{20} یا شاخص تطابق زمانی (شاخصی از دو گاه‌شناسی تطبیق داده شده با یکدیگر، این شاخص از مقادیر GLK و آماره‌ی t-value برای تعیین کیفیت سری حاصل از گاه‌شماری‌ها به دست می‌آید) و درصد CC^{21} یا تشابه همبستگی استاندارد بین دو نمونه نیز در این تحقیق استفاده شد. پس از سنجش کیفیت نمونه‌ها، گاه‌شناسی متوسط رویشگاه با استفاده از تمام نمونه‌ها در نرم افزار TSAP ساخته شد و تطابق زمانی آن‌ها با استفاده از آماره‌های GLK و Tv مورد سنجش قرار گرفت. طبق استاندارد و ضوابط نرم‌افزار TSAPWin مقادیر قابل قبول از آماره‌های GLK و Tv برای قرارگیری هر درخت در گاه‌شناسی ساخته شده، به ترتیب GLK بالای ۶۰ با ضریب اطمینان ۹۹ درصد (***) و TV بالای ۳ است. گاه‌شناسی ساخته شده در نرم افزار ARSTAN با میانگین‌گیری از منحنی‌های رویشی با روش BiweightRobust روندزدایی گردید و سپس با استفاده از روش منحنی‌نمایی منفی 22 استانداردسازی شد. کیفیت گاه‌شناسی ساخته شده با استفاده از آماره‌های میانگین همبستگی بین همه درختان هر رویشگاه (Rbt)، درصد سیگنال تجمعی (EPS)، نسبت سیگنال به خطا یا ناهنجاری (SNR)، میانگین حساسیت حلقه‌ها (MS) و خود همبستگی بین حلقه‌ها (AC1) سنجیده شد. شاخص EPS برای آزمایش اطمینان گاه‌شناسی و قابل استفاده بودن یا نبودن آن در آنالیزهای اقلیم‌شناسی درختی اهمیت زیادی دارد. زیرا این شاخص ضمن برآورد کفایت تعداد درختان در گاه‌شناسی ایجاد شده، دوره زمانی قابل اطمینان برای انجام بازسازی اقلیمی هر گاه‌شناسی را مشخص می‌کند. در خروجی نرم‌افزار ARSTAN این دوره زمانی قابل اطمینان با نشان دادن اولین سال با EPS بالای ۰.۸۵ قابل مشاهده است. فلوچارت زیر مراحل انجام این تحقیق را به صورت خلاصه نشان می‌دهد.

19 - Significance for the Glk

20 - Cross Date Index

21 - Cross correlation

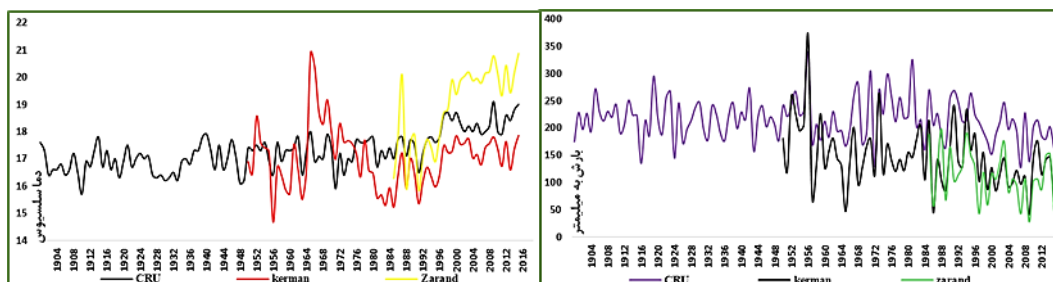
22 - Negative Exponential Curve



شکل ۲: فلوجارت مراحل انجام تحقیق

جهت بررسی ارتباط و همبستگی عوامل اقلیمی با شاخص پهنای حلقه‌ها و انجام بازسازی‌ها، از داده‌های اقلیمی دو ایستگاه سینوپتیک کرمان و زرند استفاده شد، به دلیل کوتاه بودن دوره آماری ایستگاه زرند و دور بودن نسبی ایستگاه کرمان از منطقه مورد مطالعه، جهت مقایسه بهتر، به جز داده‌های این دو ایستگاه از داده‌های اقلیمی سری زمانی CRU TS4.01 با دوره آماری (۱۹۰۱-۲۰۱۶) برای ایران نیز استفاده شد. واحد تحقیقات آب‌وهوایی ۲۳ در سال ۱۹۷۲ در دانشگاه West Anglia انگلستان تأسیس شد. این واحد تحقیقاتی، اطلاعات اقلیمی مختلف مانند بارش و دما را از درون‌یابی اطلاعات ۴۰۰۰ ایستگاه زمینی به‌دست می‌آورد و برای کل زمین ارائه می‌دهد. در حال حاضر، سری CRU TS4.01 آخرین و پرکاربردترین نسخه از داده‌های ارائه شده این مرکز در بازه زمانی (۱۹۰۱-۲۰۱۶) با تفکیک مکانی ۰/۵ در ۰/۵ درجه و تفکیک ماهانه برای کل زمین است. آزمون این داده‌ها نشان داد که ارتباطی مناسب و مقادیری نزدیک به میانگین داده‌های ایستگاهی ثبت شده در منطقه دارند (همبستگی ۰/۷۲ با سطح معنی‌داری ۰/۹۹ دما). بنا بر گزارش هریس^{۲۴} و همکاران (۲۰۲۰) با وجود این که شاید نتوان از سری‌های زمانی بازسازی شده داده‌ها به صورت دقیق در مواردی همچون بررسی تغییر اقلیم استفاده کرد، اما پوشش مناسب برای مناطقی که در طول زمان اطلاعاتی ندارند به‌وسیله روش‌های ریاضی و آماری دقیق و استفاده از درون‌یابی تطبیقی با نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها، داده‌های مناسبی را خصوصاً برای قرن گذشته در اختیار محققان قرار می‌دهد. در این داده‌ها، بازسازی مناطق بدون اطلاعات در طول زمان، به‌وسیله دورن‌یابی نقطه‌ای-شبکه‌ای با استفاده از نزدیکترین ایستگاه‌ها و شبکه‌های ۰/۵ درجه آن‌ها، به شبکه فاقد ایستگاه انجام شده و این دورن‌یابی‌ها با توجه به دوره دارای داده شبکه مذکور صحت‌سنجی، بازبینی و اصلاح می‌شود (هریس و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین هر شبکه در داده‌های CRU دارای سطح پشتیبانی (وجود یا عدم وجود) داده از شبکه‌های مجاور خود است. این امر به محقق اجازه می‌دهد که از میزان صحت داده‌ها برای منطقه مورد مطالعه خود آگاه شود. به طور میانگین، فاصله بین دو ایستگاه که واریانس قابل قبولی برای شبکه‌بندی بین آن‌ها به‌دست می‌دهد، ۱۲۰۰ کیلومتر برای داده‌های دما و ۴۵۰ کیلومتر برای بارش است (هریس و همکاران ۲۰۲۰). با توجه به ارزیابی و نقشه ارائه شده توسط هریس

و همکاران (۲۰۲۰) از کل سیاره زمین، داده‌های مربوط به ایران از دهه ۱۹۱۰ تا ۱۹۵۰ با استفاده از شبکه‌های همجوار دارای ۷۵ درصد پشتیبانی شبکه‌ای در هر دهه بوده است و این موضوع، واریانس قابل قبولی از این داده‌ها ارائه می‌دهد. نمودارهای شکل ۲، روندهای بارش و دمای این داده‌ها را برای ایران در مقایسه با دو ایستگاه زرنند و کرمان نشان می‌دهد.



شکل ۳: راست: نمودار مجموع بارش سالانه ایستگاه‌های زرنند و کرمان به همراه داده‌های CRU (مقادیر به میلی‌متر) چپ: نمودار میانگین دمای سالانه ایستگاه‌های زرنند و کرمان به همراه داده‌های CRU (مقادیر به سانتی‌گراد)

شکل ۲، همخوانی بین داده‌های دما و بارش ایستگاهی و داده‌های CRU TS4.01 را نشان می‌دهد، در این نمودارها مشخص است که روند بارش منطقه در دهه‌های اخیر تقریباً از دهه ۹۰ میلادی به بعد کاهش یافته و روند دما نیز از همین سال‌ها تا زمان حاضر افزایش را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت تقریباً در ۳۰ دهه اخیر میلادی، منطقه مورد مطالعه از گرمایش سریع جهانی متأثر گشته است. این افزایش دما همزمان با کاهش بارندگی‌ها بوده و تنش رطوبتی را در منطقه بالا برده است. از این رو انتظار می‌رود که ناهنجاری‌های مشخص مانند واگرایی در روند رشد حلقه‌های درختی دیده شود. برای اطمینان از صحت بازسازی‌ها، واسنجی^{۲۵} مدل رگرسیونی بازسازی دما برای کل دوره آماری، همچنین به صورت دوره‌های ۲۰ ساله همپوشان بین داده‌های اقلیمی و پهنای حلقه‌ها انجام شد. ارزیابی^{۲۶} مدل رگرسیونی نیز با استفاده از رگرسیون مجدد بین داده‌های بازسازی شده و داده‌های واقعی انجام گرفت. همچنین ضریب همبستگی (R)، ضریب تشخیص (R^2)، آماره کاهش خطا (RE)، ضریب کارایی (CE) و آزمون علامت (ST) برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. جهت برطرف کردن مسئله واگرایی چندین روش پیشنهاد شده است (دآریگو و جیکوبی ۱۹۹۵، بریفا ۱۹۹۸، واگانوف^{۲۷} و همکاران ۱۹۹۹، باربر^{۲۸} و همکاران ۲۰۰۰). اولین روش برای رفع مسئله واگرایی، جستجوی دوره‌های زمانی ماهانه، چند ماهه یا فصلی با همبستگی مثبت بین پارامترهای دمای میانگین، کمینه و بیشینه با پهنای حلقه‌ها و استفاده از داده‌های آن دوره به جای متوسط سالانه و نادیده گرفتن دوره واگرایی برای بازسازی است. یکی از متداول‌ترین راه‌ها، واسنجی مدل رگرسیونی در دوره‌های با همبستگی مثبت و استفاده از آن برای بازسازی کل دوره بدون در نظر

25 - Calibration

26 - Verification

27 - Vaganov

28 - Barber

گرفتن واگرایی است. روش دیگر، جداسازی دقیق زمان روی دادن واگرایی و تقسیم داده‌های دمای ثبت‌شده به قبل و بعد از واگرایی، تهیه مدل رگرسیون برای هر یک از دوره‌ها و استفاده هر مدل برای همان دوره است. راه پیشنهاد شده دیگر توسط داریگو، اسپر و دیگران (۲۰۰۳)، استفاده از روندزایی و استانداردسازی به شیوه منحنی-های رشد منطقه‌ای یا RCS است. در این روش روندزایی، ممکن است منحنی دارای واگرایی نسبت به منحنی-های منطقه‌ای بدون واگرایی اصلاح شده و بتوان با اطمینان بیشتری برای بازسازی دما از آن استفاده کرد. همچنین داریگو و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که استفاده از RCS نتایج بهتری برای بازسازی نسبت به گاه‌شناسی‌های STD یا استاندارد به دست می‌دهد. روش دیگر استفاده از رگرسیون‌های چند متغیره به جای رگرسیون خطی دو متغیره است، در این روش پارامترهایی نظیر بارش یا تفاضل مقادیر آستانه‌های دمایی از میانگین، که موجب تغییر در همبستگی دما-پهنای حلقه می‌شوند، می‌توانند به عنوان پارامتر دوم در نظر گرفته شوند. با توجه به راه‌های توضیح داده شده، در این پژوهش از دو روش برای بازسازی دمای سالیانه استفاده شد. در روش اول، ابتدا آستانه دمایی (با توجه به داده‌های دمای CRU) تعیین و سپس با تقطیع سال‌ها، از داده‌های بالاتر از آستانه برای ساخت رابطه رگرسیونی دوره واگرایی با همبستگی معکوس و از داده‌های پایین‌تر از آستانه برای ساخت رابطه رگرسیونی دوره پیش از واگرایی با همبستگی مستقیم استفاده شد. در روش دوم، از رگرسیون چند متغیره بین داده‌های دما، پهنای حلقه‌ها و بارش دوره آماری ۱۹۰۱-۱۹۹۵ استفاده شد. داده‌های بارش بر اساس رابطه رگرسیونی خطی در دوره مشابه ۱۹۰۱-۱۹۹۵ بازسازی شدند، بارش بازسازی‌شده تا انتهای گاه‌شناسی برای بازسازی چندمتغیره استفاده شد. در این حالت، واکنش‌های معکوس بارش-دما بر روی رشد حلقه‌ها تا حدودی خنثی می‌شوند.

یافته‌های تحقیق

شمارش و اندازه‌گیری پهنای حلقه‌های هر درخت نشان داد بیشترین تعداد حلقه‌های شمارش‌شده در رویشگاه، ۶۸۰ حلقه یا در واقع ۶۸۰ سال مربوط به درخت شماره ۸۸ و کمترین دوره اندازه‌گیری‌شده نیز ۶۳ سال (درخت شماره ۹) است. میانگین سن برای تمام درختان ۲۱۸ سال بوده و ارتفاع پایه برای مرتفع‌ترین درخت اندازه‌گیری شده از سطح دریا در رویشگاه برابر با ۳۱۸۵ متر (درخت شماره ۸۶) و کم‌ترین آن ۲۰۰۷ متر (درخت شماره ۶۳) است و اختلاف ارتفاعی در حدود ۱۱۸۰ متر بین درختان نمونه‌برداری‌شده مشاهده می‌شود. جدول شماره ۱ که در پیوست ارائه شده، نتایج شمارش حلقه‌ها و آماره‌های سنجش کیفیت حلقه‌ها را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که آماره GLK برای ۴۰ درخت بین ۶۰ تا ۶۹، برای ۴۳ درخت بین ۷۰ تا ۷۹ و برای ۱۳ درخت ۸۰ و بالاتر است. آماره GLK رابطه معکوسی با تعداد حلقه‌های شمارش شده یا به عبارتی طول گاه‌شماری به دست آمده و سن درخت دارد. این آماره برای درختان مسن در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد. آماره GLK برای ۸۵ درخت در سطح ۹۹.۹۹ درصد معنی‌دار (GLS) بوده و برای ۱۱ درخت، معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد را نشان می‌دهد. بررسی آماره CC نشان می‌دهد، از بین تمامی نمونه‌ها، تعداد ۲۴ درخت زیر ۵۰ درصد و ۷۲ درخت بالای ۵۰ درصد تشابه بین دو مغزه برداشت‌شده دارند. بنابراین ۷۵ درصد درختان تشابه خوبی بین دو نمونه خود داشتند. آماره CDI نیز برای ۴۸ درخت زیر ۵۰ و برای ۴۸ درخت نیز مقادیر بالای ۵۰ را نشان می‌دهد و هیچکدام از درختان زیر ۱۰ یا حد قابل قبول در نرم افزار TSAP قرار نگرفتند.

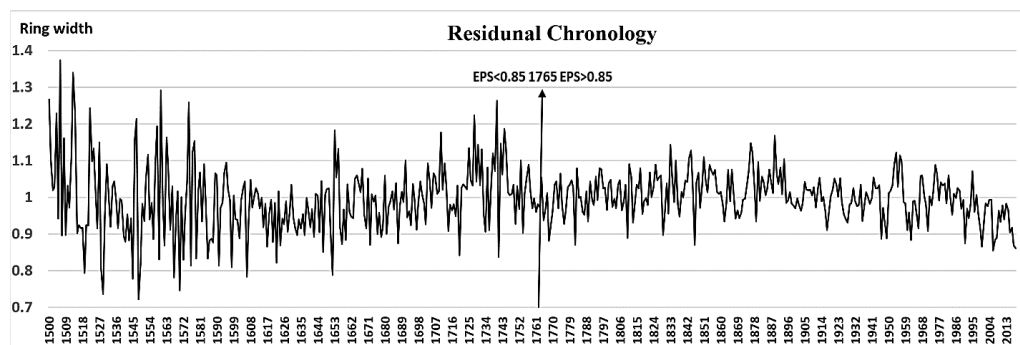
مقادیر آماره Tv نیز به جز ۶ درخت برای مابقی درختان ارقام بالاتر از ۳ یا حد قابل قبول در نرم افزار را نشان می دهد. در مجموع اکثریت درختان ارسی که از آن ها نمونه برداری انجام شد، در شرایط قابل قبول و خوبی از نظر تشابه دو نمونه قرار دارند. گاه شناسی متوسط رویشگاه در نرم افزار TSAPWin ساخته شد و تطابق زمانی آن نیز با استفاده از آماره های GLK و Tv مورد سنجش قرار گرفت (به دلیل زیاد بودن تعداد نمونه ها و حجیم شدن جدول ماتریس همبستگی سری های زمانی پس از تطابق از آوردن این جدول خودداری شده است). از بین ۹۶ درخت استفاه شده در ساخت گاه شماری متوسط، تنها چند مورد مقادیر کمتر از این میزان را داشتند که از گاه شماری نهایی حذف شدند. روندزدایی و استانداردسازی گاه شناسی ساخته شده در نرم افزار ARSTAN نشان داد گاه شناسی RESIDUNAL همبستگی خوبی با داده های دما دارد و این گاه شناسی برای بازسازی انتخاب شد. جدول شماره ۲ (پیوست)، مشخصات و کیفیت گاه شناسی ساخته شده را نشان می دهد.

جدول ۲. نتایج گاه شناسی رویشگاه تنگل راور: میانگین همبستگی (Rbt)، درصد سیگنال تجمعی (EPS)، نسبت سیگنال به خطا (SNR)، میانگین حساسیت (MS) و خود همبستگی (AC(1))

تعداد درختان	سال آغاز	سال پایان	طول گاه شناسی	EPS	سال قابل اطمینان	طول دوره	Rbt	SNR	MS	AC1
۹۶	۲۰۱۷	۱۳۳۸	۶۸۰	۰/۸۶	۱۷۶۵	۲۵۲	۰/۲۵	۲۱/۰۷	۰/۱۴	۰/۵۸

با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول شماره ۲، آماره EPS برای گاه شناسی منطقه بالای ۰.۸۵ است و به ترتیب امکان بازسازی اقلیمی قابل اطمینان برای ۲۵۲ سال را به دست می دهد. البته این بدان معنی نیست که نمی توان از مابقی سال های شمارش شده در گاه شماری استفاده کرد. بنابراین در این پژوهش از آنجا که هدف اصلی بازسازی و مقایسه و تحلیل اقلیمی نبوده است، برای آشکار شدن بهتر اثر واگرایی پهنای حلقه-دما بر روی بازسازی ها، بازسازی در تمام طول ۶۸۰ سال گاه شناسی متوسط انجام گرفته است. آماره Rbt برای گاه شناسی ساخته شده، مقدار نسبتا قابل قبولی را نشان می دهد. میانگین حساسیت یا MS برابر با ۱.۴ است، میزان قابل قبول این آماره همانطور که ذکر شد بیش از ۰.۱ و کمتر از ۰.۳ و بهترین مقدار آن ۰.۲ است. آماره SNR نیز در حد قابل قبولی قرار دارد. خود همبستگی گاه شناسی ها نیز حدودا بین ۵۰ تا ۶۰ درصد است. نمودار شکل شماره ۳، گاه شناسی باقی مانده ساخته شده از درختان ارس رویشگاه تنگل راور را نشان می دهد. پس از اطمینان از کیفیت نمونه های برداشت شده و ساخت گاه شناسی متوسط منطقه، برای بررسی ارتباط و همبستگی بین پهنای حلقه های درختان ارس مورد مطالعه و دمای ثبت شده در منطقه، ابتدا داده های اقلیمی دو ایستگاه زرنند و کرمان به همراه داده های CRU در دوره های سالیانه، فصلی و ماهانه مورد بررسی قرار گرفتند. جدول شماره ۳، نتایج همبستگی داده های دما با پهنای حلقه ها را در تمام طول دوره آماری نشان می دهد. نخستین استنباط از نتایج جدول شماره ۳، این است که دمای هوا حتی در ماه های زمستان یا ابتدای فصل رویش، رابطه منفی با رشد حلقه های درختان ارس در منطقه مورد مطالعه دارد. همبستگی پارامتر دمای سالانه و پهنای حلقه های رویشی برای داده های CRU و ایستگاه زرنند همبستگی منفی بالای ۶۰ درصد و بالاتر و برای ایستگاه کرمان بیش از ۴۰ درصد همبستگی منفی

نشان می‌دهد. برای دوره‌های ماه به ماه، فصلی و فصول رویش نیز نتایج با مقادیر مختلف همبستگی منفی را نشان می‌دهد.

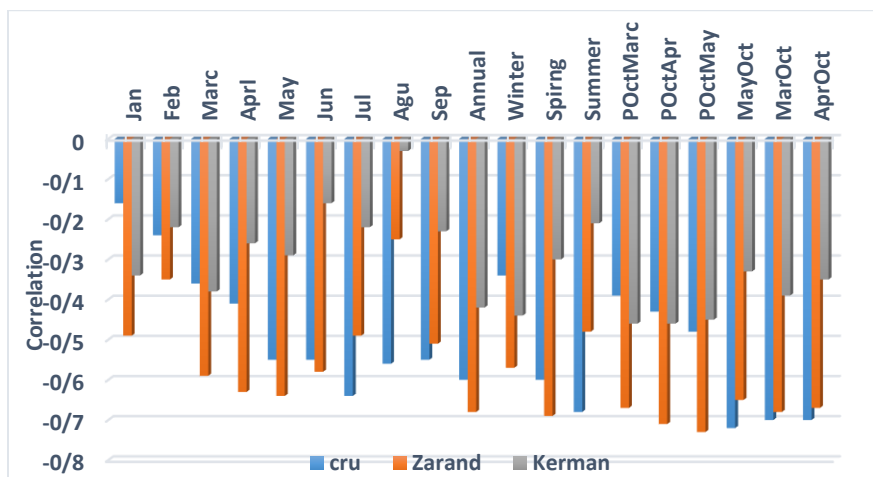


شکل ۴: گاهشناسی باقی‌مانده (Residual) منطقه تنگل راور با استفاده از نمونه‌های ۹۶ درخت، EPS: ۰.۸۶+ با دوره اطمینان ۲۵۲ سال

با توجه به جدول شماره ۳، نمودار شکل شماره ۵، که داده‌های این جدول را به نمایش می‌گذارد می‌توان استنباط کرد دمای هوا در تمام طول سال همبستگی منفی با رشد درختان ارس منطقه دارد و به صورت کلی این فاکتور عاملی محدود کننده است، اما این موضوع با اکثر پژوهش‌های انجام شده در این باره همخوانی ندارد. بنابراین بروز اشکالی در روندهای دما-پهنای حلقه به دست آمده از این رویشگاه آشکار می‌شود. برای درک بهتر این مشکل، یک بازسازی با استفاده از همبستگی‌های منفی به دست آمده انجام شد.

جدول ۳: ضرایب همبستگی پیرسون بین دمای میانگین ایستگاه‌های کرمان و زرندهای داده‌های CRU با گاهشناسی متوسط منطقه مورد مطالعه (** معنی دار در سطح ۹۹ درصد)

ماه-فصل-دوره	CRU	زرنده	کرمان
زانویه	-0.16	-.49**	-.34*
فوریه	-.24**	-0.35	-0.22
مارس	-.36**	-.59**	-.38**
آوریل	-.41**	-.63**	-0.26
می	-.55**	-.64**	-.29*
ژوئن	-.55**	-.58**	-0.16
جولای	-.64**	-.49**	-0.22
آگوست	-.56**	-0.25	-0.03
سپتامبر	-.55**	-.51**	-0.23
سالانه	-.60**	-.68**	-.42**
زمستان	-.34**	-.57**	-.44**
بهار	-.60**	-.69**	-.30*
تابستان	-.68**	-.48**	-0.21
اکتبر تا مارس	-.39**	-.67**	-.46**
اکتبر سال قبل تا آوریل	-.43**	-.71**	-.46**
اکتبر سال قبل تا می	-.48**	-.73**	-.45**
می تا اکتبر	-.72**	-.65**	-.33*
مارس تا اکتبر	-.70**	-.68**	-.39**
آوریل تا اکتبر	-.70**	-.67**	-.35*



شکل ۵: نمودار ضرایب همبستگی پیرسون بین دمای میانگین ایستگاه‌های کرمان و زرنند و داده‌های CRU با گاهشناسی متوسط منطقه در حالت دارای واگرایی، مورد مطالعه (** معنی دار در سطح ۹۹ درصد)

مشاهده می‌شود نتایج همبستگی داده‌های ایستگاهی دما و گاهشناسی متوسط منطقه، غالباً رابطه منفی را نشان می‌دهد، یک مورد بازسازی دما بر اساس این روابط منفی با دمای سالیانه ایستگاه زرنند انجام شد. معادله خط رگرسیون برای بازسازی دمای سالیانه گاهشناسی متوسط با استفاده از داده‌های ایستگاه زرنند که نمودار آن در شکل شماره ۵، نشان داده شده به این صورت است:

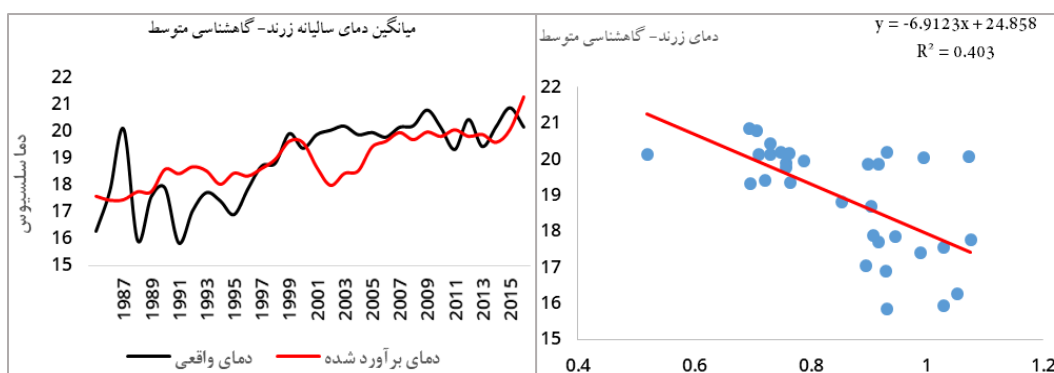
$$y = -6.9123x + 24.858 \quad (\text{معادله ۱})$$

که در آن y دمای برآورد شده و x پهنای حلقه‌های رویشی در سال مورد نظر است. با توجه به مقادیر بالای همبستگی (R) و ضریب تشخیص (R^2) بین داده‌های اقلیمی و گاهشناسی پهنای حلقه‌ها و همچنین خطای استاندارد کم، برای هر سه دوره و انسجی و همچنین ضریب کاهش خطا و ضریب کارکرد مثبت (بالای صفر) برای هر سه دوره، می‌توان گفت مدل رگرسیونی توان خوبی برای بازسازی دمای سالانه گاهشناسی متوسط دارد. ارزیابی داده‌های بازسازی شده نیز آماره‌های قابل قبول برای همه آماره‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۴: آماره‌های اعتبارسنجی مدل رگرسیونی خطی (در حالت دارای واگرایی) بین گاهشناسی متوسط و دمای سالانه ایستگاه زرنند

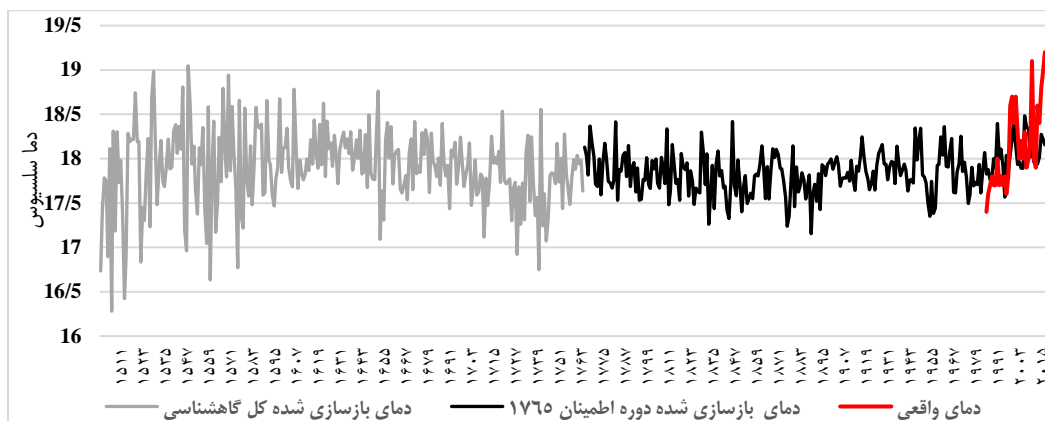
Estimate vs Real Data Verification 2017-1986	Calibration 2007-1986	Calibration 2017-1997	Regression Model Calibration 2017-1986	
-0.63**	-0.55**	-0.58**	-0.68**	Multiple R
0.40	0.30	0.33	0.46	R Square
0.38	0.29	0.31	0.44	Adjusted R
1.16	0.49	0.25	0.10	Standard Error
0.44	0.32	0.37	*	Re
0.43	0.33	0.36	*	CE
0.43	*	*	*	ST

نمودار شکل ۵، نشان می‌دهد داده‌ها در مدل رگرسیونی پراکنشی همسو و در مواردی با خط معادله فاصله دارند. همچنین نمودار دمای واقعی و دمای برآورد شده روند مشابهی را نشان می‌دهند. دمای برآورد شده حالتی هموارتر نسبت به دمای واقعی نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان گفت مدل رگرسیونی ارائه شده، توان خوبی برای بازسازی دمای سالیانه گاهشناسی متوسط منطقه یا کل درختان را دارد. نمودار دمای بازسازی شده گاهشناسی متوسط بر اساس روابط فوق در شکل ۷ ارائه آورده شده است. در نگاه اول و با توجه به آماره‌های بالای سنجش کیفیت مدل، برآورد دما قابل قبول خواهد بود اما با توجه دقیق و مقایسه دمای برآورد شده با نمودار گاهشناسی متوسط، به دلیل منفی بودن رابطه، نمودار دما تابعی معکوس از گاهشناسی خواهد بود، بنابراین استفاده از رابطه منفی برای بازسازی دما در دوره طولانی مدت، منجر به برآورد بی‌معنی در دوره‌های کاهش شدید پهنای حلقه‌ها شد. نمودارهای شکل شماره ۸، این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد.

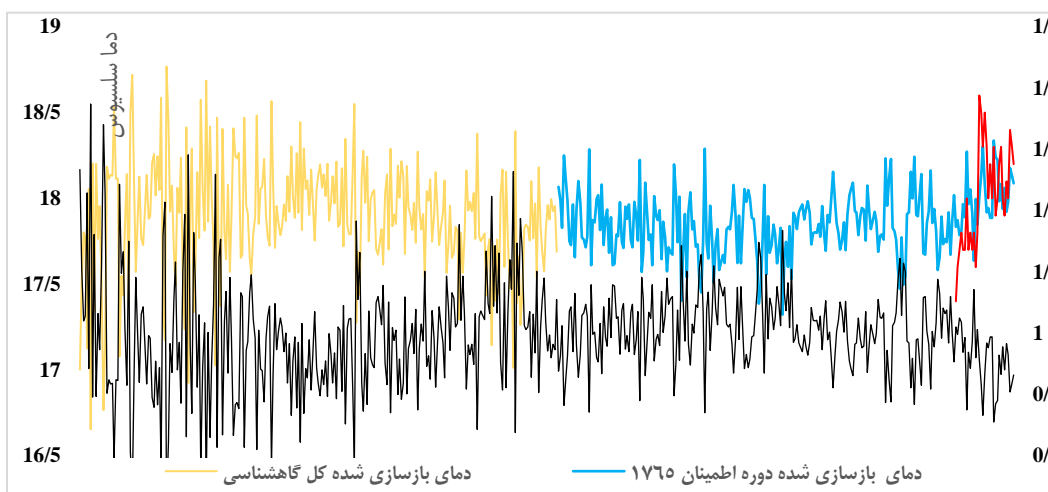


شکل ۶: معادله خط رگرسیونی متوسط و دمای سالیانه ایستگاه زرنند (راست)، دمای واقعی ایستگاه زرنند و دمای برآورد شده گاهشناسی (چپ)

شکل شماره ۸، مشکل ایجاد شده در استفاده از رابطه منفی برای بازسازی دما را به خوبی نشان می‌دهد. با توجه به سایر مطالعات انجام شده در مورد درختان ارس، این منفی بودن در اکثر دوره‌های زمانی موثر بر رشد درخت، مورد انتظار نیست. چنانچه علی‌پور فرد (۱۳۹۴) در مورد ارس‌های زاگرس در الیگودرز ارتباط دمای ژانویه تا مارس و میانگین دمای سالیانه، زمستان و بهار را بر روی رشد درختان ارس دارای رابطه مثبت ارزیابی کرده است. همچنین پورطهماسی و همکاران (۱۳۸۸) ارتباط دما و پهنای حلقه‌های درختان ارس چهارباغ گرگان را در ماه‌های پیش از فصل رشد مثبت ارزیابی کرده‌اند. اسپر و همکاران (۲۰۰۱) نیز ارتباط دمای سالانه و پهنای حلقه‌های ارس در قراقرم پاکستان و تیان‌شان قرقیزستان را مثبت دانستند.



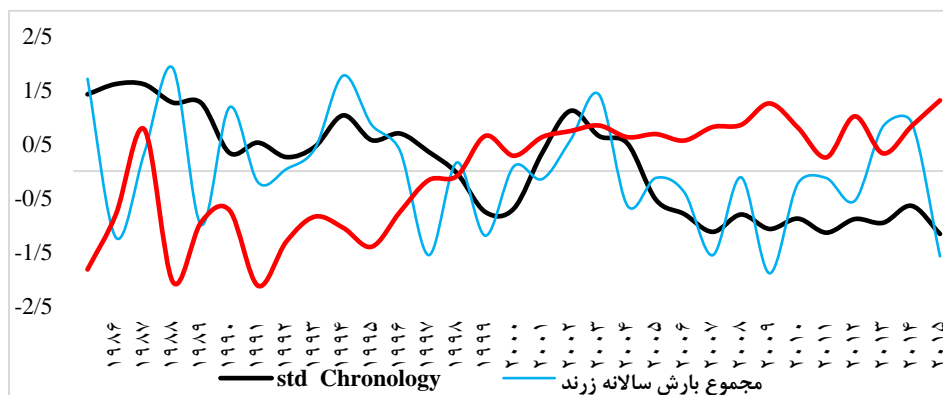
شکل ۷: نمودار دمای سالیانه بازسازی شده گاه‌شناسی متوسط منطقه با استفاده از ایستگاه زرنند با رابطه معکوس متوسط در حالت دارای واگرایی (EPS: ۱۷۶۵)



شکل ۸: دمای واقعی و بازسازی شده گاه‌شناسی متوسط در حالت دارای واگرایی با استفاده از ایستگاه زرنند (معکوس بودن دمای برآورد شده نسبت به نوسانات گاه‌شناسی)

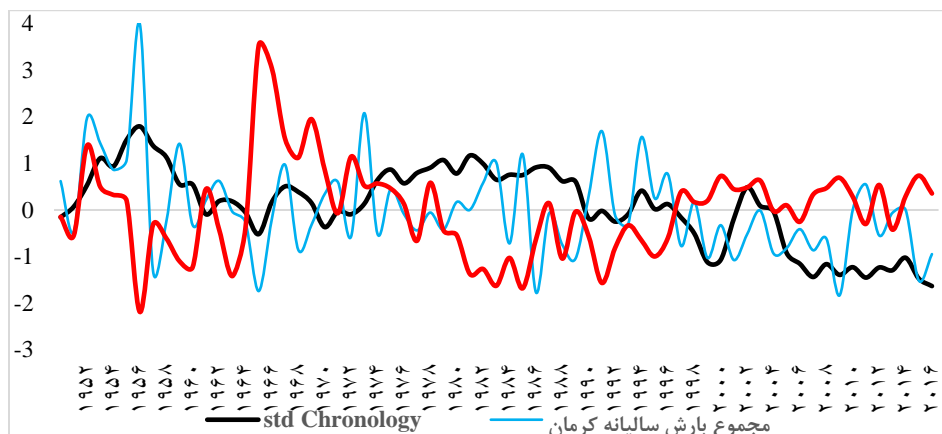
بازسازی دما با استفاده از روابط همبستگی منفی بین دما و حلقه‌های رشد، برای دوره‌های طولانی مدت سبب بروز یک مسئله اساسی می‌شود. گرچه دمای بازسازی شده با دماهای ثبت شده ایستگاهی در دهه‌های اخیر همبستگی خوبی دارد (نمودار شکل‌های ۷ و ۸)، اما در مقیاس زمانی طولانی‌تر، دمای بازسازی شده همخوانی مورد انتظار با برآوردهای جهانی را نشان نمی‌دهد. به عنوان مثال، در دوره‌های سرد مربوط به عصر یخبندان کوچک، دمای برآورد شده بالا و در دوره‌های گرم‌تر مورد انتظار مانند ۱۷۴۰، دمای برآورد شده پایین است. از آنجا که بازسازی با استفاده از معادله رگرسیون خطی با همبستگی منفی انجام گرفت، بروز این مسئله مورد انتظار است، یعنی در

واقع با استفاده از همبستگی منفی، دمای برآورد شده تابع معکوس سری حلقه‌های درختی است. این مسئله در برآورد دمای چند دهه اخیر مشکلی را نشان نمی‌دهد اما در طولانی مدت با سایر بازسازی‌های دما از نقاط مختلف همخوانی ندارد. علت این امر را بایستی در پدیده‌ای به نام واگرایی گاه‌شناسی حلقه‌ها-روندهای اقلیمی جستجو کرد. در ادامه برای بررسی مسئله واگرایی، نمودار گاه‌شناسی متوسط منطقه با داده‌های دما مقایسه شدند. به دلیل همبستگی مثبت پهنای حلقه‌ها با بارش، داده‌های سالانه بارش نیز در نمودارهای دمای سالانه گنجانده شدند. برای اینکه امکان رسم نمودار و مقایسه سری‌ها با هم به راحتی میسر شود، تمام سری‌ها با استفاده از شاخص Z نرمال و بی بعد شدند. به دلیل کوتاه بودن دوره آماری ایستگاه زرنند، نتیجه‌گیری در مورد رخداد واگرایی در شاخص پهنای حلقه‌های سالانه و دمای این ایستگاه در دهه‌های اخیر دشوار است. نمودار دما و بارش زرنند در شکل شماره ۹، روند افزایشی دما و کاهش بارش را برای این ایستگاه نشان می‌دهد. رابطه مثبت بارش با پهنای حلقه‌ها که در نمودار شکل ۹ مشخص بوده و نقش تعیین‌کننده بارش را در رشد حلقه‌ها نشان می‌دهد. ترسالی سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۵ و ۲۰۰۲-۲۰۰۳-۲۰۰۴ رخ داده در منطقه، باعث زیاد شدن پهنای حلقه‌ها در این دو دوره شده است. در غیر این صورت انتظار می‌رفت تلاقی نمودار شاخص دما و پهنای حلقه‌ها به جای سال ۱۹۹۸ در ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی رخ دهد. اثر خنثی‌کننده بارش، تشخیص واگرایی تا سال ۲۰۰۵ در داده‌های زرنند را دشوار می‌کند. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که واگرایی بین دمای ایستگاه زرنند و پهنای حلقه‌ها، به صورت خفیف در دو دهه گذشته رخ داده و علت این امر افزایش تنش رطوبتی به دلیل هم زمانی افزایش دما و کاهش بارش بوده است.



شکل ۹: نمودار استاندارد شده بارش و میانگین دمای سالانه ایستگاه زرنند به همراه گاه‌شناسی متوسط منطقه

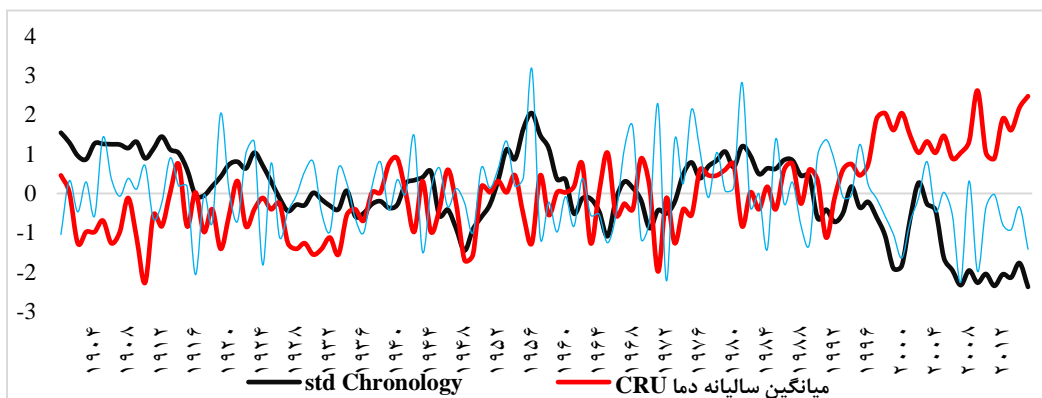
نمودار شکل شماره ۱۰، شاخص‌های استاندارد شده دما، بارش ایستگاه کرمان و پهنای حلقه‌ها را نشان می‌دهد. همانند ایستگاه زرنند، دمای ایستگاه کرمان از دهه ۸۰ میلادی به بعد روند افزایشی داشته که همزمان با افت مختصر بارش بوده است. از دهه ۶۰ تا ۸۰ میلادی دمای کرمان روند کاهشی را نشان می‌دهد، در سال‌های دهه ۸۰ با توجه به عدم افزایش قابل توجه بارش، می‌توان کم شدن تنش آبی بر اثر کاهش دما و تبخیر را مسبب افزایش پهنای حلقه‌ها دانست.



شکل ۱۰: نمودارهای استاندارد شده بارش و میانگین دمای سالیانه ایستگاه کرمان به همراه گاهشناسی متوسط منطقه

در دهه ۶۰ میلادی افت رشد به دلیل کاهش در بارش‌ها مشخص است و در دهه ۵۰ میلادی نیز افزایش بارش‌ها باعث بروز یک پیک در رشد حلقه‌ها شده است. از دهه ۹۰ میلادی به بعد که مورد بحث است، دو دوره افزایش رشد بر اثر افزایش بارش‌ها در ۱۹۹۵-۱۹۹۴ و ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۲ دیده می‌شود. افزایش فاصله بین نمودار دما و پهنای حلقه‌ها از سال ۲۰۰۴ به بعد مشخص است و در صورت خطی بودن روند کاهش بارش انتظار می‌رفت این فاصله از اوایل دهه ۹۰ میلادی بروز کند. در دهه اخیر با وجود دو دوره افزایش بارش سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ در هر دو ایستگاه مورد مطالعه، حلقه‌ها پاسخ مثبتی در رشد نشان نداده‌اند. بررسی داده‌های ایستگاه کرمان در دوره طولانی‌تر نسبت به زرنند، مشخص کرد با وجود منفی بودن کلی رابطه دما و پهنای حلقه‌ها، این رابطه در تمام سال‌ها به دلیل تأثیر بارش، صدق نمی‌کند. در سال‌های گرمی که افزایش بارش داشته‌اند (مانند ۱۹۵۲) رشد حلقه‌ها (با یک سال تأخیر در بعضی موارد) مثبت بوده، در سال‌های خیلی گرم با کاهش بارش (۱۹۶۵-۱۹۶۹) رشد حلقه‌ها منفی شده است، و در سال‌های سرد با کاهش بارش (۱۹۷۱-۱۹۷۲ و ۱۹۸۸-۱۹۸۹ و ۱۹۵۱) رشد حلقه‌ها گرایش ضعیف به سوی منفی شدن داشته است و در نهایت در بعضی سال‌های سردتر (مانند ۱۹۶۰ و ۱۹۹۱) با وجود افزایش بارش نیز رشد حلقه‌ها گرایش منفی نشان داده است. این مسئله نشان می‌دهد که رابطه دما و پهنای حلقه‌ها در منطقه مورد مطالعه همواره منفی نیست و بسته به میزان بارش و احتمالاً وجود آستانه‌ای در دما، رابطه مثبت می‌شود. پیدا کردن آستانه دمایی با استفاده از داده‌های ایستگاه زرنند به دلیل کوتاه بودن دوره آماری و ایستگاه کرمان به دلیل انحراف معیار بالا در دوره‌هایی مانند ۱۹۶۰ میسر نشد. به همین دلیل از داده‌های طولانی مدت CRU TS4.01 استفاده گردید. بررسی نمودار داده‌های CRU نشان می‌دهد که بارش و دمای این داده‌ها ارتباط بهتر و قوی‌تری با شاخص پهنای حلقه‌ها نسبت به داده‌های ایستگاهی منطقه مورد مطالعه دارند. واگرایی دما و پهنای حلقه‌ها در میانگین سالیانه دما داده‌های CRU از ۱۹۹۶ به بعد و تحت تأثیر همزمان کاهش بارش مشخص است. در دمای کمینه و بیشینه CRU نیز واگرایی از ۱۹۹۶ به بعد به طور مشخص دیده می‌شود. با توجه به آنچه گفته شد، واگرایی دما و پهنای حلقه‌ها در رویشگاه مورد مطالعه رخ داده است و مسئله بازسازی طولانی مدت دما را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین برای بررسی رابطه دما و پهنای حلقه‌های رشد در دوره‌های زمانی

مختلف، همبستگی دمای CRU و گاه‌شناسی‌ها در دو دوره ۱۹۰۱-۲۰۱۶ و ۱۹۰۱-۱۹۹۵ انجام شد. حذف دوره ۱۹۹۶-۲۰۱۶ که واگرایی در آن رخ داده، سبب بروز تغییرات قابل توجهی در نتایج همبستگی گشت.



شکل ۱۱: نمودارهای استاندارد شده بارش و میانگین دمای سالیانه داده‌های CRU TS4.01 به همراه گاه‌شناسی متوسط منطقه

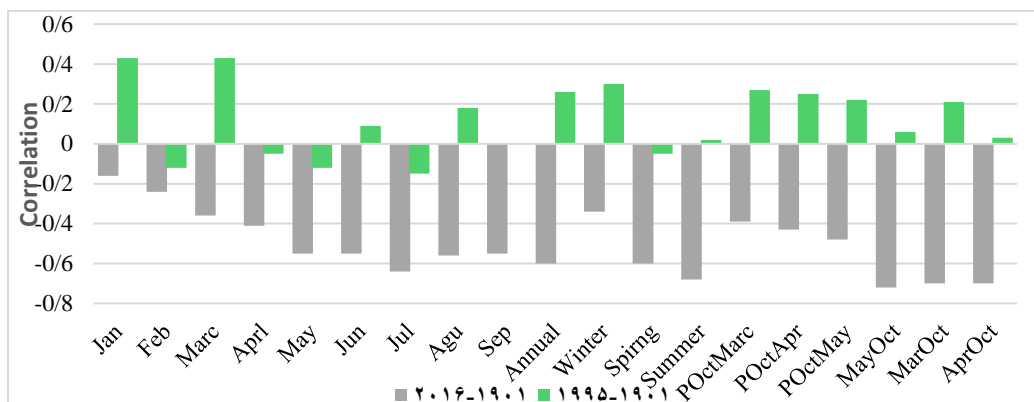
جدول ۵: نتایج همبستگی گاه‌شناسی متوسط و داده‌های دمای CRU TS40.1 برای ماه‌ها، فصل‌ها و دوره‌های مختلف

سال

1901-1995	1901-2016	فصل-دوره	1901-1995	1901-2016	ماه
0.3	-.34**	زمستان	.43**	-0.16	ژانویه
-0.05	-.60**	بهار	-0.12	-.24**	فوریه
0.02	-.68**	تابستان	.43**	-.36**	مارس
0.27	-.39**	اکتبر تا مارس	-0.05	-.41**	آوریل
0.25	-.43**	اکتبر سال قبل تا آوریل	-0.12	-.55**	می
0.22	-.48**	اکتبر سال قبل تا می	0.09	-.55**	ژوئن
0.06	-.72**	می تا اکتبر	-0.15	-.64**	ژولای
0.21	-.70**	مارس تا اکتبر	0.18	-.56**	آگوست
0.03	-.70**	آوریل تا اکتبر	0	-.55**	سپتامبر
			0.26	-.60**	سالانه

همانطور که جدول شماره ۵، نشان می‌دهد نتایج همبستگی داده‌های دما CRU در دوره آماری ۱۹۰۱-۲۰۱۶ که همانند ایستگاه‌های استان، همبستگی منفی در اکثر دوره‌ها را نشان می‌داد، اما با حذف دوره ۱۹۹۶-۲۰۱۶ از سری داده‌ها، نتایج همبستگی دچار تغییرات گسترده‌ای شد. اکثر دوره‌های زمانی در سال‌های ۱۹۰۱-۱۹۹۵ دارای همبستگی ضعیف و یا نزدیک به صفر شدند. این اتفاق در مورد ایستگاه کرمان نیز رخ داد، اما ایستگاه زرنند همچنان همبستگی منفی را نشان می‌داد. ضعیف شدن همبستگی‌ها به دلیل رخداد یک واگرایی معکوس ضعیف در رابطه دما-پهنای حلقه‌ها در ۱۹۰۱-۱۹۱۰ به دلیل ادامه روند افزایشی بارش اواخر قرن ۱۹ میلادی و آنومالی بارش در

۱۹۵۷-۱۹۵۴ است. حذف این دو دوره از داده‌های دما همبستگی بالاتری را در بین دما-پهنای حلقه‌ها نشان داد اما به دلیل برهم خوردن روند داده‌ها، از انجام این کار خودداری شد. در ادامه نمودار شکل ۱۲ نتایج همبستگی‌ها در دوره ۱۹۰۱-۱۹۹۵ را نشان می‌دهد.



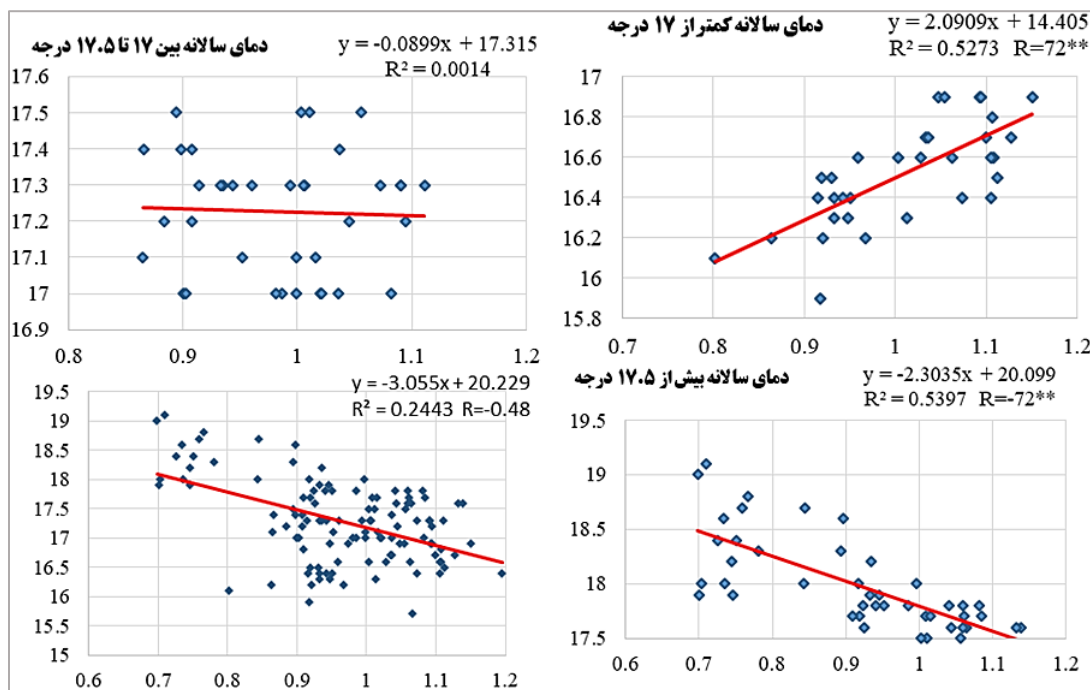
شکل ۱۲: نمودار ضریب همبستگی پیرسون بین دمای کمینه، بیشینه و میانگین داده‌های CRUTS4.01 با گاهشناسی متوسط منطقه مورد مطالعه (** معنی دار در سطح ۹۹ درصد)

نمودار شکل ۱۲، مشخص می‌کند که دمای ماه ژانویه دارای رابطه مثبت معنی‌دار در سطح ۹۹ درصد است. ماه فوریه ارتباط معنی‌داری را نشان نمی‌دهد و همبستگی این ماه منفی ضعیف است. ماه مارس که فصل رشد درختان در منطقه مورد مطالعه تقریباً از نیمه دوم آن شروع می‌شود، دارای بیشترین رابطه مثبت بین دمای هوا و پهنای حلقه‌ها است. در طول ماه‌های فصل رشد یعنی از آوریل تا سپتامبر همبستگی معنی‌داری مشاهده نمی‌شود. به تبع ماه‌های شرح داده شده، دمای سالانه و زمستان دارای همبستگی مثبت ضعیف، دمای بهار و تابستان دارای عدم همبستگی و دمای دوره‌های چند ماهه مربوط به ماه‌های سرد سال دارای رابطه مثبت ضعیف هستند. ارتباط مثبت دمای ماه مارس با پهنای حلقه‌ها به علت آغاز فعالیت کامبیومی و در شروع فصل رشد است. دمای بالاتر ماه مارس می‌تواند موجب شروع زودتر فصل رشد و در نتیجه حلقه‌ی پهن‌تر در سال مورد نظر شود. ماه‌های آوریل و می روابط منفی ضعیف با دما نشان می‌دهند که می‌تواند به دلیل رخ دادن تنش آبی برای درختان با بالا رفتن دمای هوا و افزایش تبخیر و تعرق باشد. اگرچه شروع فعالیت‌های کامبیومی درخت در آغاز فصل رویش وابسته به بالا رفتن میانگین دمای هوا است، اما در مناطق خشکی مانند رویشگاه تنگل راور، رطوبت عامل به مراتب مهم‌تر و اثرگذارتری بر روی رشد سالانه درخت است. بنابراین بالا رفتن میانگین دما، سبب افزایش تبخیر و تعرق درخت و کم شدن رطوبت خاک شده و تاثیر منفی خود را در بر روی رشد سالانه نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان گفت دمای هوا در منطقه مورد مطالعه در ماه‌های پیش از فصل رشد اثر مثبت و در ماه‌های فصل رشد، اثر منفی بر روی پهنای حلقه‌های رویشی دارد.

بازسازی دما

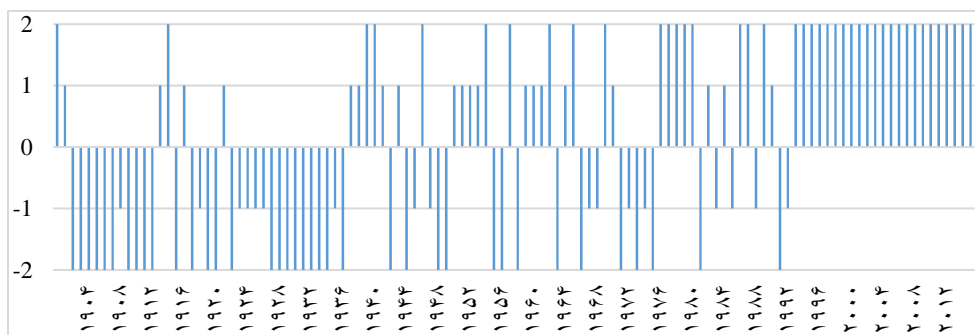
بررسی داده‌های طولانی مدت CRU در نمودار شکل شماره ۱۰ چند حالت واکنش حلقه‌ها به شرایط اقلیمی را نشان داد: کم شدن رشد با افزایش دما و کاهش بارش در سال‌های (۱۹۱۶-۱۹۱۷، ۱۹۴۰، ۱۹۶۵-۱۹۶۶، ۱۹۹۹-۲۰۰۰)، زیاد شدن رشد با افزایش دما و افزایش بارش در سال‌های (۱۹۰۱-۱۹۰۲، ۱۹۱۳-۱۹۱۴، ۱۹۵۰-۱۹۵۲، ۲۰۰۴-۲۰۰۲)، زیاد شدن رشد با کاهش دما و افزایش بارش در سال‌های (۱۹۱۹، ۱۹۲۲، ۱۹۵۶، ۱۹۸۱)، کم شدن رشد با کاهش دما و افزایش بارش در سال‌های (۱۹۰۲، ۱۹۱۰، ۱۹۲۸-۱۹۲۹، ۱۹۹۱)، کم شدن رشد با کاهش دما و کاهش بارش در سال‌های (۱۹۳۶، ۱۹۴۸-۱۹۵۰، ۱۹۸۳-۱۹۸۵، ۱۹۸۸) رخ داده است.

واکنش حلقه‌ها به پارامترهای اقلیمی نشان می‌دهد که بارش همواره رابطه مستقیم و دما در سه حالت رابطه مستقیم و در دو حالت رابطه معکوس با پهنای حلقه‌ها دارد. حالت ۱ با رابطه معکوس و حالت ۵ با رابطه مستقیم و با نقش یکسان بارش و همچنین حالت ۴ با رابطه‌ی کاهشی مستقیم بین دما و حلقه‌ها با وجود افزایش بارش، نشان می‌دهند یک آستانه دمایی خاص در تعیین وضعیت اقلیمی بهینه درختان ارس رویشگاه مورد مطالعه نقش دارد. همان طور که ذکر شد این آستانه دمایی از داده‌های کرمان و زرنند قابل استخراج نبود اما استفاده از داده‌های CRU تعیین این آستانه را تا حدودی ممکن کرد. برای تعیین آستانه‌های بالاتر و پایین‌تر از دمای بهینه برای رشد درختان ارس رویشگاه مورد مطالعه، از روابط همبستگی و رگرسیون خطی استفاده شد که در ابتدا همبستگی و رگرسیون کل داده‌ها در دوره ۱۱۶ ساله (۱۹۰۱ تا ۲۰۱۶) گرفته شد، نمودار شکل شماره ۱۲ این روابط را نشان می‌دهد. همان طور که در نمودار شکل شماره ۱۲ مشاهده می‌شود همبستگی کلی در دوره (۱۹۰۱ تا ۲۰۱۶) مقدار ۰.۴۸- با ضریب اطمینان ۰.۹۵ درصد را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، داده‌های دما از کم به زیاد مرتب شده و با توجه به همبستگی با پهنای حلقه‌ها با انجام خوشه‌بندی در ۳ دسته قرار گرفتند: داده‌های کمتر از ۱۷ درجه، بین ۱۷ تا ۱۷.۵ درجه، و بیشتر از ۱۷.۵ درجه. همچنین بررسی داده‌ها نشان داد که در مواردی (احتمالاً بسته به وضعیت بارش) شرایط بهینه تا حد پایین ۱۶.۵ درجه و تا حد بالا ۱۸ درجه گسترش پیدا می‌کند. روابط رگرسیونی برای هریک از این دوره‌ها نیز در شکل شماره ۱۳ نشان داده شده‌اند. نمودارهای شکل شماره ۱۳ نشان می‌دهد که در سال‌هایی با دمای بین ۱۷ تا ۱۷.۵ درجه و احتمالاً از ۱۶.۸ تا ۱۷.۸ درجه، ارتباط معنی‌داری بین پهنای حلقه‌ها و دما دیده نمی‌شود و می‌توان این محدوده دمایی را بدون در نظر گرفتن نقش بارش، دمای بهینه رشد در نظر گرفت. در دماهای پایین‌تر از ۱۷ یا احتمالاً ۱۶.۸ درجه ارتباط مستقیم و در دماهای بالاتر از ۱۷.۵ یا احتمالاً ۱۷.۸ درجه ارتباط معکوس بین رشد و دما دیده می‌شود. در بین سال‌های جدا شده بر اساس دما از سال ۱۹۹۴ به بعد، تمام سال‌ها در محدوده رابطه معکوس یا واگرایی قرار داشتند، از ۱۹۹۳ تا دهه ۳۰ میلادی توزیع سال‌ها به متناسب و از دهه ۳۰ میلادی به قبل توزیع در محدوده رابطه مستقیم قرار دارد. شکل شماره ۱۴ سال‌های با دمای بالاتر از آستانه (۲) بهینه (۱- تا ۱) و پایین‌تر از آستانه (۲-) را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان برای بازسازی دمای رویشگاه مورد مطالعه، از معادلات رگرسیونی بالا استفاده کرد، بدین صورت که برای سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۱۷ رابطه معکوس، و برای سال‌های ۱۹۳۶ به قبل رابطه مستقیم را به کار گرفت. از آن جا که هدف بازسازی دوره قبل از ۱۹۵۰ میلادی برابر با قدیمی‌ترین داده‌های ایستگاهی استان کرمان است، برای دوره ۱۹۹۳ تا ۱۹۳۶ نیز از رابطه مستقیم استفاده شد.



شکل ۱۳: معادله خط رگرسیون گاهشناسی استاندارد پهنای حلقه‌ها با دمای ۱۹۰۱-۲۰۱۶ داده‌های CRU به همراه آستانه‌های دمایی

همچنین می‌توان از روابط رگرسیونی ذکر شده در بحث بازسازی دما که موجب بروز خطا در طولانی مدت شدند، برای دوره ۱۹۹۴-۲۰۱۷ استفاده کرد. بنابراین با توجه مطالب گفته شده، دمای گاهشناسی متوسط منطقه با استفاده از داده‌های CRU در دو بخش بازسازی شد. برای بخش دارای واگرایی مدل ارائه شده با داده‌های واقعی ۱۹۹۴-۲۰۱۷ واسنجی و ارزیابی شد و برای بخش دارای رابطه مستقیم مدل رگرسیونی با داده‌های ۱۹۳۵-۱۹۰۱ واسنجی و ۱۹۷۰-۱۹۳۵ ارزیابی شد که نتایج آن در جدول شماره ۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: سال‌های بالاتر و پایین‌تر از آستانه دمایی رشد بهینه ارس در سال‌های ۱۹۰۱-۲۰۱۶ با استفاده داده‌های میانگین سالانه دما CRU TS4.01

نتایج واسنجی و ارزیابی مدل‌ها در جدول ۶ نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی برای دوره واگرایی توان بازسازی خوب و مدل ارائه شده برای دوره مستقیم توان متوسطی دارند. نمودار شکل ۴-۴۷ دمای واقعی و دمای بازسازی - شده با استفاده از دو مدل را نشان می‌دهد. در نهایت بازسازی میانگین سالیانه دما در ریشگاه تنگل راور با استفاده از داده‌های CRU و گاه‌شناسی متوسط منطقه انجام شد که نتیجه آن در شکل شماره ۱۵، آورده ارائه است. در روش دوم برای انجام بازسازی دمای گاه‌شناسی متوسط منطقه از یک رگرسیون ۳ متغیره بین دمای سالانه، بارش سالانه و پهنای حلقه‌ها استفاده شد. برای انجام این روش در ابتدا بین داده‌های بارش در دوره آماری ۱۹۰۱-۱۹۹۵ با پهنای حلقه‌ها یک مدل رگرسیون خطی تهیه شد تا داده‌های بارش تا انتهای گاه‌شناسی بازسازی شوند.

معادله ۲ مدل رگرسیونی برای بازسازی بارش) $y=151.29x+71.561$

در مدل بازسازی بارش، بارش داده‌های CRU با $R=52$ و $R^2=0.27$ در دوره‌های آماری ۱۹۰۱-۱۹۴۹ و ۱۹۵۰-۱۹۹۵ واسنجی و ارزیابی شد و نتایج مطلوبی را نشان داد. پس از بازسازی بارش تا انتهای گاه‌شناسی، از مدل رگرسیون خطی سه متغیره برای بازسازی دما به این شرح استفاده شد:

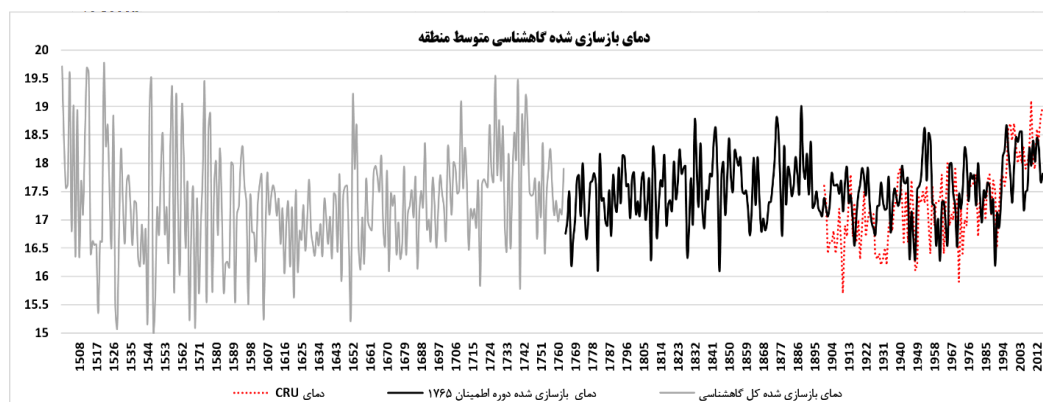
معادله ۳) $T=16.251+1.942TRW-0.00492P$

که در آن T دمای سالیانه، TRW شاخص پهنای حلقه‌ها و P بارش بازسازی شده است. این مدل رگرسیونی نیز در دو دوره ۱۹۰۱-۱۹۴۹ و ۱۹۵۰-۱۹۹۵ واسنجی و ارزیابی شد که نتایج آن در جدول شماره ۷، نشان داده شده است.

نتایج جدول ۷ و نمودار شکل ۱۶، نشان می‌دهند که مدل استفاده شده توان نسبتاً خوبی برای بازسازی دما در دوره آماری ۱۹۰۱-۱۹۹۵ داشته است. بنابراین با استفاده از همین مدل، دمای گاه‌شناسی متوسط منطقه بازسازی شد. بررسی نتایج و نمودارهای دو روش بازسازی دما در شکل شماره ۱۷، نشان می‌دهد استفاده از رگرسیون دو متغیره با وجود برآورد داده‌های هموارتر نسبت به داده‌های واقعی، در کل، نتایج بهتری را نسبت به تقطیع داده‌ها براساس آستانه دما نشان می‌دهد. با این حال روند کلی هر دو روش تقریباً نتایج یکسانی دارد. با این شرح از دمای بازسازی شده با رگرسیون ۳ متغیره برای بررسی تغییرات طولانی مدت دما استفاده شد. بنابراین با استفاده از روش رگرسیون سه متغیره دمای دیرینه ریشگاه ارس تنگل راور برای ۶۸۰ سال با دوره اطمینان بیش از ۲۵۰ سال بازسازی شد. نمودار شکل شماره ۱۸، تغییرات این دمای بازسازی شده را نسبت به میانگین ۱۱۶ ساله داده‌های CRU برای ایران نشان می‌دهد. دمای بازسازی شده گاه‌شناسی همانند داده‌های ایستگاهی افزایش قابل توجه دما در دهه‌های اخیر را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین دوره‌های افت دما از اوایل قرن بیستم میلادی پس از یک افزایش نسبی در اواخر قرن ۱۹ و یک کاهش قابل توجه در میانه این قرن را نشان می‌دهد.

جدول ۶: آماره‌های اعتبارسنجی مدل رگرسیون خطی بین گاه‌شناسی متوسط و دمای سالانه CRU

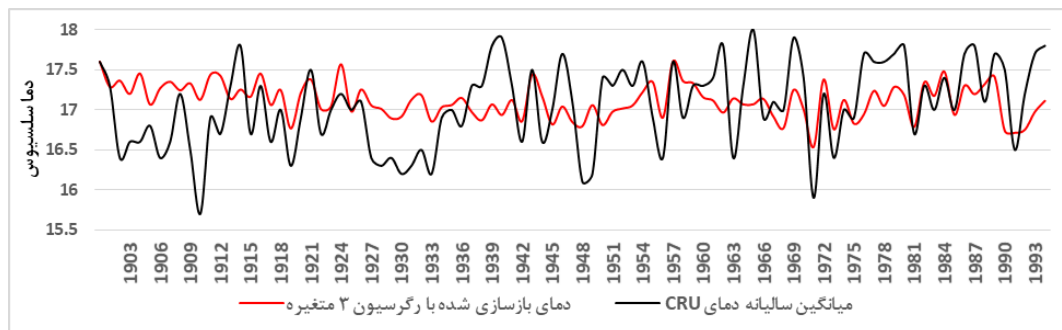
Estimated vs Real Data Verification 2017-1994	Calibration 2017-1994	Regression Model Calibration For Divergence period	
0.58**	0.49**	0.72**	Multiple R
0.32	0.24	0.53	R Square
0.29	0.20	0.49	Adjusted R
1.1	0.19	0.1	Standard Error
0.19	0.8	*	Re
0.10	0.5	*	CE
0.70	*	*	ST
Estimated vs Real Data Verification 1970-1935	Calibration 1935-1901	Regression Model Calibration For Direction period	
0.35*	0.39*	0.72**	Multiple R
0.12	0.15	0.52	R Square
0.11	0.11	0.48	Adjusted R
4.2	2.8	1.9	Standard Error
0.09	0.01	*	Re
0.01	0.03	*	CE
0.40	*	*	ST



شکل ۱۵: دمای سالیانه بازسازی شده گاه‌شناسی متوسط منطقه با استفاده از داده‌های CRU TS4.01 (EPS: ۱۷۶۵)

جدول ۷: آماره‌های اعتبارسنجی مدل رگرسیون خطی ۳ متغیره بین گاهشناسی متوسط و دمای سالانه CRU

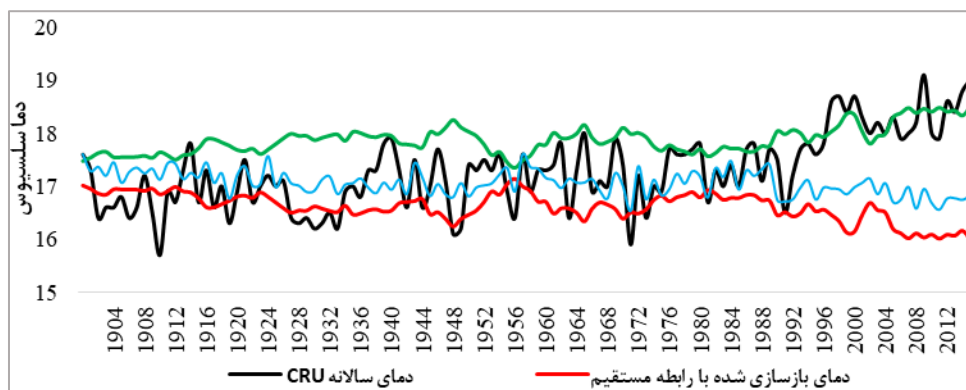
Estimate vs Real Data Verification 1901-1995	Calibration 2007-1986	Calibration 1901-1949	Regression Model Calibration 1901-1995	
.55**	.47**	0.44**	0.49**	Multiple R
0.30	0.22	0.19	0.24	R Square
0.27	0.20	0.18	0.22	Adjusted R
1.16	2.1	2.8	1.9	Standard Error
0.42	0.12	0.09	*	Re
0.44	0.1	0.08	*	CE
0.41	*	*	*	ST



شکل ۱۶: نمودار دمای سالانه بازسازی شده گاهشناسی متوسط منطقه و میانگین دمای سالانه CRU در دوره ۱۹۰۱-۱۹۹۵

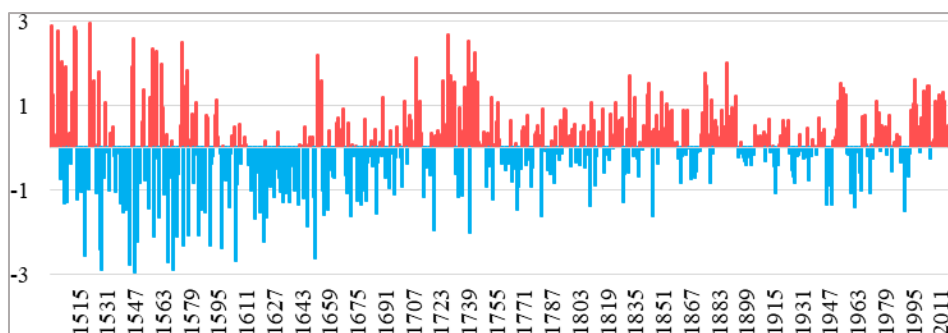
۱۹۹۵

کاهش محسوس دما در نیمه دوم قرن ۱۸ میلادی بعد از افزایش قابل توجه ابتدای این قرن و کاهش چشمگیر دما در طول بیش از دو قرن (قرون ۱۷ و ۱۶ میلادی) از دیگر مشخص‌های قابل توجه روند دمای بازسازی شده هستند. تقریباً از پیش از سال ۱۵۰۰ میلادی را به دلیل کم بودن تعداد نمونه در گاهشناسی و آشفتگی نمودار، نمی‌توان مورد قضاوت قرار داد.



شکل ۱۷: میانگین دمای سالانه CRU، دمای بازسازی شده با استفاده از مدل‌های رگرسیونی مستقیم و معکوس و ۳

متغیره



شکل ۱۸: تغییرات دمای بازسازی شده نسبت به میانگین ۱۹۰۱-۱۹۹۵

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی داده‌های دمای ایستگاهی با گاه‌شناسی به دست آمده از منطقه نشان داد که به دلیل افزایش دما همراه با کاهش نسبی بارش در چند دهه اخیر، داده‌های دما با گاه‌شناسی پهنای حلقه‌ها دچار مسئله واگرایی شده‌اند. این واگرایی برای منطقه مورد مطالعه به‌طور آشکار از سال ۱۹۹۶ میلادی آغاز شده و تا زمان نمونه برداری یعنی سال ۲۰۱۷ میلادی، در بیش از ۲ دهه اخیر ادامه داشته است. بنابراین برای بازسازی دما و مطالعه روابط اقلیم-رویش در منطقه مورد مطالعه لازم است که روابط پهنای حلقه‌ها با پارامترهای اقلیمی به دقت بررسی شود و کالیبراسیون لازم برای مدل‌ها انجام گیرد. رخداد واگرایی بنابر مطالعات و گزارش‌های متعدد، در جنگل‌های شمالی و یا در ارتفاعاتی نظیر تبت، از دهه ۱۹۵۰-۱۹۶۰ میلادی آغاز شده است، (جیکوبی، دی‌آریگو، ۱۹۹۵، بریفا ۱۹۹۸، اسپر ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴) و در تنها گزارش در مورد ایران نیز پورطهماسی و همکاران در رویشگاه‌های ارس گرگان به رویداد این مسئله از سال ۱۹۵۵ اشاره کرده‌اند. اختلاف زمانی رخداد "مسئله واگرایی" در منطقه مورد مطالعه با سایر مناطق در حدود ۴۰ سال است، این موضوع را می‌توان مرتبط با رخدادن دیرتر افزایش میانگین‌های دما در

منطقه مطالعه نسبت به عرض‌های جغرافیایی بالا و همچنین تاثیرپذیری بیشتر درختان ارس در منطقه کم بارشی مانند شمال استان کرمان از رطوبت دانست. به طوری که افزایش دمای هوا به تنهایی قادر به محدود کردن رشد شعاعی درختان ارس نبوده و ایجاد تنش رطوبتی برای این مهم لازم است که این تنش مشخصاً از سال ۱۹۹۶ به بعد با خشکسالی‌های پی در پی در منطه رخ داده است. بازسازی دما با گاه‌شناسی دارای مسئله واگرایی نتایج خوب و قابل قبولی برای ۲۰ سال اخیر به دست داد اما در دوره طولانی مدت دمای بازسازی شده همخوانی مورد انتظار با برآوردهای جهانی را نشان نمی‌دهد. به عنوان مثال، در دوره‌های سرد مربوط به عصر یخبندان کوچک دمای برآورد شده بالا و در دوره‌های گرم‌تر مورد انتظار مانند ۱۷۴۰، دمای برآورد شده پایین است. رخداد واگرایی با نتایج پورطهماسی و همکاران (۱۳۸۸) از درختان اوری و ارس در چهارباغ گلستان، داریگو و همکاران (۲۰۰۶) در بازسازی اصلاح شده دمای نیمکره شمالی با استفاده از گاه‌شناسی‌های قبلی اوراسیا و آمریکای شمالی، آنچوکیاتیس و همکاران (۲۰۱۶) در بازسازی دمای تابستانه نیم‌کره شمالی برای ۱۰۰۰ سال گذشته، ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) در گاه‌شناسی‌های به دست آمده از کوه‌های تیان‌شان در شمال شرق چین، ویلمکینگ و همکاران (۲۰۰۸) از کروئولوژی‌های بانک اطلاعات حلقه‌های درختی^{۲۹} (TRDB) برای عرض ۶۸ درجه شمالی در آلاسکا و فنگ و همکاران (۲۰۱۵) برای پنج سایت جنگلی در کوه‌های غربی کینلینگ و فلات شمال شرقی تبت همخوانی داشت. برای بازسازی دما با گاه‌شناسی دارای واگرایی در این پژوهش از دو روش تعیین آستانه دمایی (با توجه به داده‌های دمای CRU) تعیین و سپس با تقطیع سال‌ها، به کارگیری از داده‌های بالاتر از آستانه برای ساخت رابطه رگرسیونی دوره واگرایی با همبستگی معکوس و داده‌های پایین‌تر از آستانه برای ساخت رابطه رگرسیونی دوره پیش از واگرایی با همبستگی مستقیم، و در روش دوم از رگرسیون چند متغیره بین داده‌های دما، پهنای حلقه‌ها و بارش دوره آماری ۱۹۹۵-۱۹۰۱ استفاده شد. نتایج نشان دادند استفاده از رگرسیون دو متغیره با وجود برآورد داده‌های هموارتر نسبت به داده‌های واقعی، در کل نتایج بهتری را نسبت به تقطیع داده‌ها براساس آستانه دما نشان می‌دهد. با این حال روند کلی هر دو روش در بازه زمانی طولانی مدت تقریباً نتایج یکسانی دارد.

بررسی ارتباط دما و پهنای حلقه‌های رشد در دوره‌های بدون مسئله واگرایی یعنی حدوداً از ۱۹۹۵ میلادی به قبل، نشان داد که دمای پیش از فصل رویش و به خصوص ماه مارس در ابتدای فصل رویش بر روی پهنای حلقه‌ها اثر مستقیم دارد. ارتباط مثبت دمای ماه مارس با پهنای حلقه‌ها به علت آغاز فعالیت کامبیومی و در شروع فصل رشد است. دمای بالاتر ماه مارس می‌تواند موجب شروع زودتر فصل رشد و در نتیجه حلقه‌ی پهن‌تر در سال مورد نظر شود. این نتایج با نتایج علی‌پورفرد و همکاران (۱۳۹۴) پورطهماسی و همکاران (۱۳۸۸) همخوانی دارد که هر دو دمای پیش از فصل رشد و اوایل فصل رشد را بر روی ارس دارای تاثیر مثبت دانسته‌اند. دمای بازسازی شده افزایش در حدود ۱.۵ درجه در گرمایش جهانی چند دهه اخیر را نشان می‌دهد. دوره کاهش ۰.۵ درجه‌ای در ۱۷۶۰-۱۸۲۰، سپس افزایش ۰.۵ تا ۱ درجه‌ای نسبت به میانگین از ۱۷۲۰ تا ۱۷۶۰ میلادی و بعد از آن دوره طولانی مدت افت دما از حدود ۱۷۰۰ تا ۱۵۲۰ میلادی با به اندازه ۱ تا ۱.۵ درجه را می‌توان واکنش درختان ارس منطقه به عصر یخبندان کوچک دانست. در این راستا تغییرات دمای تابستانه بازسازی شده نیمکره شمالی توسط آنچوکیاتیس و همکاران (۲۰۱۷) با دماهای پایین رخ داده در دوره‌های ۱۵۲۰-۱۶۰۰ میلادی، ۱۶۵۰-۱۷۰۰ میلادی ۱۷۶۰-۱۸۳۰ میلادی ۱۸۶۰-۱۸۸۰ میلادی در منطقه مورد مطالعه همخوانی دارد. شی ژانگ و همکاران (۲۰۰۹) دمای

تبت شرقی را برای ۲۵۰۰ سال بازسازی کردند که دوره‌های افت دمای ۱۶۵۰-۱۷۰۰ و ۱۷۷۰-۱۸۳۰ در داده‌های بازسازی شده ایشان با نتایج پژوهش حاضر همخوانی داشت. روش و نتایج پژوهش حاضر می‌تواند توسط دیگر محققان برای بررسی رخ دادن مسئله واگرایی بر روی گاه‌شناسی‌ها و اصلاح آن مورد استفاده قرار گیرد، کما اینکه اکثر محققان داخلی در انجام پژوهش‌های اقلیم‌شناسی درختی به این مسئله توجهی نشان نداده‌اند. بنابراین بررسی مسئله واگرایی می‌تواند به جلوگیری از ناهمخوانی و بروز تفاوت در نتایج مورد انتظار برای رویشگاه‌های مختلف کشور کمک کرده و اعتبار پژوهش‌ها و کارایی گاه‌شناسی‌های ساخته شده برای رویشگاه‌های مختلف ایران را بالا ببرد. همچنین نتایج این پژوهش می‌تواند در سطح بین‌المللی کمک به جبران فقدان اطلاعات در مورد مسئله واگرایی در عرض‌های پایین و مناطق نیمه‌خشک کند و همچنین به درک نحوه رویداد، میزان و تاثیر تغییرات اقلیمی، به خصوص گرمایش جهانی، نسبت به سایر مناطق زمین کمک کند.

منابع

- پورطهماسی، ک. پورسرتیپ، ل. براونینگ، ا. پارساپژوه، د. (۱۳۸۸). ارزیابی رویش شعاعی درختان ارس (*Juniperus polycarpus*) و اوری (*Queacus macranthera*) در دو دامنه شمال و جنوب البرز در منطقه چهار باغ گرگان، نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، دانشکده منابع طبیعی، دوره ۶۲، شماره ۲، صص ۱۵۹-۱۶۹.
- کروری، ع.ا.، خوشنویس، س. متینی‌زاده، م.، (۱۳۹۰). مطالعات جامع جنس ارس در ایران. نشر پونه چاپ اول.
- علی‌پورفرد، م. رائینی، م.، پورطهماسی، ک. (۱۳۹۴). مطالعه گاهشناسی درختی، بازسازی و روندیابی اقلیمی بخشی از رشته کوه‌های زاگرس میانی با اسفاده از حلقه‌های رویشی درخت ارس (مطالعه موردی: شهرستان الیگودرز). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- Briffa, K.R.; Jones, P.D.; Schweingruber, F.H.; Osborn, T.J. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature* 1998, 393, 450-455.
- Chen, K., Jiao, L., Liu, X., Qi, C., & Xue, R. (2021). Evaluation of the response stability of two dominant conifer species to climate change in the southern margin of the Tengger Desert. *Global Ecology and Conservation*, 25.
- D'Arrigo, R. D., Wilson, R., and Jacoby, G.: On the long-term context for late twentieth century warming, *J. Geophys. Res.*, 111, D03103, doi: 10.1029/2005JD006352, 2006.
- D'Arrigo, Rosanne; Wilson, Rob; Liepert, Beate; Cherubini, Paolo (2008). "On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes" . *Global and Planetary Change*. Elsevier. 60 (3-4): 289-305. Bibcode: 2008 GPC. 60.289D. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.03.004. Archived from the original on 2010-01-19.
- D'Arrigo, Rosanne; Wilson, Rob; Liepert, Beate; Cherubini, Paolo (2008). "On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes" . *Global and Planetary Change*. Elsevier. 60 (3-4): 289-305. Bibcode:2008GPC....60..289D. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.03.004. Archived from the original on 2010-01-19.
- Esper, J., Cook, E., and Schweingruber, F. H.: Low-frequency signals in long tree-ring chronologies
- Esper, J., Shiyatov, S. G., Mazepa, V. S., Wilson, R. J. S., Graybill, D. A., & Funkhouser, G. (2003). Temperature sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Climate dynamics*, 21(7-8), 699-706
- Fang, Ze .Xin., Brauning, A., Cao, Kun-Fang., 2015, Annual temperature reconstruction in the Central Hengduan Mountains, China, as deduced from tree rings, *Dendrochronologia*, v.26 ,P.97.106.for reconstructing past temperature variability, *Science*, 295, 2250-2253, 2002.
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7, 109 (2020).
- Jacoby G.C., D'Arrigo R.D., Davaajamts T. (1996). Mongolian tree rings and 20th century warming. *Science* 273:771-773. <http://dx.doi.org/10.1126/science.273.5276.771>.
- Jacoby G.C., Lovelius N., Shumilov O., Raspopov O., Kurbainov J., Frank D. (2000). Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of northern Siberia. *Quaternary Research* 53: 312-318. <http://dx.doi.org/10.1006/qres.2000.2130>.
- Jacoby, G.C.; D'Arrigo, R.D. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. *Glob. Biogeochem. Cycles* 1995, 9, 227-234.
- Jacoby, G.C.; D'Arrigo, R.D. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. *Glob. Biogeochem. Cycles* 1995, 9, 227-234.
- Li, J., Li, J., Li, T., & Au, T.F. (2019). Tree growth divergence from winter temperature in the Gongga Mountains, southeastern Tibetan Plateau. *Asian Geographer*, 37, 1 - 15.

- Pellizzari, E., Camarero, J.J., Gazol, A., Granda, E., Shetti, R., Wilmking, M., Moiseev, P.A., Pividori, M., & Carrer, M. (2017). Diverging shrub and tree growth from the Polar to the Mediterranean biomes across the European continent. *Global Change Biology*, 23, 3169–3180.
- Schneider, L., Esper, J., Timonen, M., & Büntgen, U. (2014). Detection and evaluation of an early divergence problem in northern Fennoscandian tree-ring data. *Oikos*, 123, 559-566.
- Speer, J. 1995. Tree-Ring from the upper timberline in the karakorum as climatic indicators from the last 1000 years. *Dendrochronologia* 13: 79-88.

جدول ۱: نتایج تطابق زمانی بین ۲ نمونه از هر درخت (GLK: ضرایب درصد تطابق واریانس ها، GSL: بیانگر سطح معناداری GLK، CC:

درصد یا میزان تشابه همبستگی استاندارد بین دو نمونه CDI: شاخص تطابق زمانی، TV: t-value)

شماره درخت	تعداد حلقه	ارتفاع از سطح دریا	GLK	GLS	CC	TV	CDI	شماره درخت	تعداد حلقه	ارتفاع از سطح دریا	GLK	GLS	CC	TV	CDI
1	186	2552	68	***	32	4.3	55	49	233	2811	78	***	84	21.4	154
2	209	2628	64	***	27	9.4	22	50	219	2820	62	***	83	21.8	35
3	75	2520	92	***	97	25.2	126	51	249	2820	63	***	27	3	13
4	93	2500	83	***	24	1.7	67	52	299	2850	79	***	92	40.3	167
5	281	2650	68	***	78	20.5	48	53	335	2901	69	***	52	10.1	15
6	262	2653	70	***	80	20.9	64	54	154	3050	67	***	69	10.7	23
7	278	2683	79	***	89	29.4	118	55	300	3065	74	***	69	14.3	89
8	239	2703	64	***	24	2.9	24	56	166	3060	79	***	86	19.6	93
9	63	2630	81	***	72	7	54	57	299	3067	69	***	85	17.9	55
10	71	2635	87	***	92	18.5	86	58	135	3070	71	***	64	7.8	23
11	187	2670	79	***	86	20.9	99	59	162	3080	64	***	79	16.4	25
12	223	3035	72	***	83	19.1	58	60	248	3065	78	***	90	33.1	143
13	166	3040	84	***	84	19.5	147	61	230	2007	81	***	26	3.6	20
14	220	3004	71	***	71	14.9	62	62	81	2222	72	***	66	7.8	65
15	240	3015	69	***	65	12	62	63	432	2097	60	***	36	7.6	27
16	223	2947	68	***	92	35.4	52	64	131	2030	67	***	54	7.2	27
17	128	2986	77	***	43	4.9	83	65	73	2361	68	**	24	1.6	17
18	164	2843	79	***	92	29.8	97	66	104	2061	68	***	32	2.8	27
19	191	2927	72	***	72	10.7	31	67	220	2065	60	**	23	3.5	21
20	167	2859	66	***	86	19.6	30	68	187	2667	72	***	61	10.3	49
21	170	2850	63	***	63	10.2	27	69	203	2670	75	***	52	7.2	52
22	247	2900	73	***	50	8.7	94	70	365	2553	67	***	53	10.4	24
23	273	2979	64	***	54	9.1	42	71	315	2552	60	**	38	7.1	15
24	157	2813	66	***	33	4.1	40	72	108	2625	72	***	76	8.2	48
25	44	2890	75	***	68	6	69	73	138	2817	70	**	56	4.5	13
26	184	2731	75	***	59	9	92	74	191	2598	74	***	90	26.6	102
27	177	2557	74	***	70	12.4	74	75	322	2598	65	**	19	5.8	14
28	69	2525	82	***	91	15.8	99	76	129	2610	69	***	39	14.5	28
29	129	3003	82	***	90	23.9	79	77	101	2630	70	***	46	24.6	41
30	132	2960	68	**	57	4.8	19	78	134	2625	73	***	67	7.3	52
31	148	3000	71	**	56	7.8	24	79	194	2599	79	***	80	18	130
32	130	2890	66	**	18	2	23	80	311	3100	73	***	76	19.9	37
33	235	2920	70	***	85	24.1	82	81	336	3150	73	***	90	13.5	93
34	96	2975	73	***	60	6.5	29	82	331	3155	77	***	88	32.5	110
35	152	2973	81	***	64	9.2	66	83	224	3160	74	***	94	40.8	135
36	454	2960	63	***	12	1.9	17	84	290	3170	66	**	29	9.2	16
37	142	2970	81	***	94	33	157	85	179	3180	70	***	65	29.9	39
38	185	2824	64	***	59	9.2	31	86	509	3185	63	**	20	6.9	19
39	159	2880	79	***	88	20.4	70	87	344	3145	68	***	41	15.5	26
40	126	2895	78	***	61	7.9	62	88	680	3120	63	**	21	11.5	16
41	152	2800	83	***	93	29.8	93	89	207	2803	70	***	66	30.5	39
42	91	2850	86	***	66	8.2	142	90	295	2875	64	***	67	15.4	37
43	176	2581	75	***	89	25.4	99	91	309	2897	69	***	71	22	35
44	92	2628	82	***	86	15.6	70	92	230	2940	73	***	82	19	55
45	199	2745	72	***	23	3	88	93	360	2968	68	***	61	19	31
46	429	2798	62	***	76	23.9	25	94	430	3010	67	***	54	17.5	29
47	470	2805	66	***	79	27.3	55	95	220	3079	77	***	84	28	90
48	217	2809	66	***	54	9	25	96	305	2667	70	***	20	12.5	17