نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴
Vol.13, No.3, Autumn 2025
۱ -۱۷
مقاله پژوهشی

تحلیل همبستگی کانونی بخار آب قابل بارش و پارامترهای هواشناسی (مطالعه موردی: ایالت کالیفرنیا، تابستان ۲۰۲۱)

فاطمه خرم دل[۱]، یزدان عامریان[۲*]

۱- کارشناس‌ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین‌طوسی
۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین‌طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

چکیده

در حوزه علوم زمین، درک و مدل‌سازی شبکه پیچیده وابستگی‌ها بین متغیرهای مختلف، از جمله توزیع‌های آماری و روابط بین مقادیر ژئوفیزیکی، برای مجموعه گسترده‌ای از کاربردها ضروری است. ارزیابی هم‌زمان تأثیر ترکیبی از چندین متغیر مستقل بر چندین متغیر وابسته هدف مورد توجه در اغلب تحقیقات است. تحلیل همبستگی کانونی به‌عنوان یک ابزار ارزشمند امکان سنجش تأثیر هم‌زمان چندین متغیر مستقل بر چندین متغیر وابسته را فراهم کرده است و تحلیل دقیق‌تر و معتبرتری ارائه می‌دهد. بخار آب قابل بارش (*PWV*) از جمله پارامترهای اساسی در حوزه تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی هواشناسی است. این پارامتر، تغییرات مکانی و زمانی قابل توجهی داشته و امروزه با استفاده از مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی (*GPS*) قابل برآورد است. در این مطالعه از تکنیک آماری تحلیل همبستگی کانونی برای بررسی رابطه پیچیده بین *PWV* به‌دست‌آمده از مشاهدات *GPS* و پنج پارامتر هواشناسی (دما، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، دمای سطح خاک و سرعت باد) استخراج شده از مدل *ERA-5* استفاده گردید. منطقه مورد مطالعه در امریکای شمالی واقع شده و شامل ۲۵ ایستگاه *GPS* پراکنده می‌باشد. مقادیر *PWV* برای یک هفته در تابستان با استفاده از داده‌های *GPS* برآورد گردید. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهند که ضریب همبستگی کانونی بین *PWV* و پارامترهای هواشناسی به‌دست‌آمده از مدل *ERA-5*، برابر ۸۸ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی قوی و مثبت این دو گروه متغیر با یکدیگر بوده و تغییرات در یکی از آن‌ها موجب تغییرات در دیگری می‌شود.

کلیدواژه‌ها : تحلیل همبستگی کانونی، بخار آب قایل بارش، سیستم تعیین موقعیت جهانی، پارامترهای هواشناسی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد غربی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین‌طوسی.
تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۰

Email: amerian@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

۱- مقدمه

بخار آب جو یک عامل کلیدی در تنظیم آب و هوای زمین می‌باشد و نقش مهمی در چرخه آب و تعادل انرژی ایفا می‌کند که محرکه اصلی تغییرات آب و هوایی می‌باشد [۱]. بخار آب قابل بارش[1] *(PWV)* به کل محتوای بخار آب یک ستون عمودی در واحد سطح در جو اشاره دارد و به طور قابل توجهی بر تکامل آب و هوای تروپوسفر و پایداری جو تأثیر می‌گذارد [۲]. بنابراین، درک تغییرات بخار آب برای تکامل آب و هوا و پیش‌بینی آب و هوا از اهمیت حیاتی برخوردار است. تکنیک‌های مختلفی برای به‌دست‌آوردن محتوای *PWV* در چند دهه گذشته توسعه یافته است. یک تکنیک قابل اعتماد و عملیاتی، بازیابی *PWV* از مشاهدات ایستگاه‌های زمینی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی[2] *(GNSS)* است [۳, ۴]. از مشاهدات *GNSS* می‌توان تأخیرهای انتشار سیگنال در جو و *PWV* را بازیابی نمود. *PWV* مستخرج از مشاهدات *GNSS* به طور گسترده در برنامه‌های هواشناسی، به ویژه در نظارت و پیش‌بینی شرایط آب‌وهوایی مورد استفاده قرار گرفته است [۵، ۶ و ۷]. به استثنای متغییر دما که به طور گسترده در مقالات ذکر شده است، تغییرات آب و هوا به طور طبیعی می‌تواند بر متغیرهای مرتبط مانند رطوبت نسبی[3] و دمای نقطه شبنم[4] نیز تأثیر بگذارد. این پارامترها تحت تأثیر گرمای محسوس و نهان اتمسفر و بخار آب قرار می‌گیرند [۸]. دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، بارش و دمای نقطه شبنم به‌عنوان مؤلفه‌های آب‌وهوایی بحرانی در مطالعات آب و هوایی شناسایی می‌شوند [۹, ۱۰]. تغییرات در یکی از این عناصر می‌تواند سایر عناصر را نیز تغییر دهد [۱۱]. به‌عنوان مثال، افزایش دمای هوای جهانی احتمالاً غلظت بخار آب را افزایش می‌دهد زیرا توده‌های هوای گرم‌تر دارای فشار بخار اشباع بالاتری هستند [۱۲].

شناخت و مدل‌سازی ساختار وابستگی بین پارامترهای هواشناسی، برای طیف گسترده‌ای از کاربردها در علوم زمین الزامی است. روش‌های تجزیه‌وتحلیل آماری چندمتغیره ابزاری قابل‌اعتماد و مؤثری برای به‌دست آوردن اطلاعات آماری هواشناسی با ارزش، از طریق حجم زیادی از داده‌ها در نظر گرفته می‌شوند. روش‌های آماری مختلفی برای تحلیل همبستگی بخار آب قابل بارش و پارامترهای هواشناسی استفاده شده است. اوتارولا و همکاران (۲۰۱۹) جهت تصمیم‌گیری در خصوص نصب و بهره‌برداری تلسکوپ‌های رادیویی به بررسی آماری بخار آب قابل بارش، دما و باد در مکان‌های مناسب برای نجوم با طول موج میلی‌متر و زیر میلی‌متر در شمال شیلی پرداختند [۱۳]. رئیس‌پور (۲۰۲۰) به بررسی ارتباط مقدار بخار آب قابل بارش با شش پارامتر هواشناسی از قبیل دما، فشار، رطوبت نسبی، درصد ابرناکی، بارش و سرعت باد از طریق ضریب همبستگی پیرسون در گستره‌ی جغرافیایی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره مبنا پرداخت [۱۴]. شیونگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی ارتباط شاخص پوشش گیاهی با تفاضل نرمال شده[5] *(NDVI)* با بارش، دما، مدت زمان آفتابی بودن و *PWV* از طریق ضریب همبستگی پیرسون پرداختند [۱۵]. ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) جهت تحلیل همبستگی بین بارش و *PWV* بر روی چین بر اساس مشاهدات زمینی *GPS* در طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۵ پرداختند که میانگین ضریب همبستگی در تمام ایستگاه‌ها تقریباً ۰٫۷۳ بود [۱۶]. سرانو و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از روش تجزیه‌وتحلیل هارمونیک به بررسی ارتباط بین افزایش *PWV* و وقوع حوادث بارش شدید در مناطق مختلف شمال غرب استوایی آمریکای جنوبی پرداختند و نشان دادند که ارتباط میان اوج *PWV* و بارش بیشترین

[1] *Precipitable Water Vapor*
[2] *Global Navigation Satellite System*
[3] *Relative Humidit : RH*
[4] *Dew Point Temperatures*
[5] *Normalized Difference Vegetation Index*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

وضوح را در سواحل دارد و در ایستگاه‌های دیگر به دلیل عوامل دینامیک محلی، کمتر مشهود است [۱۷]. ژو و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی رابطه بین PWV حاصل از GPS و بارش برآورد شده از ماموریت اندازه‌گیری باراش مناطق گرمسیری[1] $(TRMM)$ با رزولوشن زمانی ماهانه از طریق تحلیل همبستگی و تحلیل موج‌های متقاطع پرداختند که بیشتر ایستگاه‌ها ضریب همبستگی متقاطع بالاتر از ۰/۷ داشتند [۱۸].

۲- تئوری روش

در این بخش، در ابتدا به برآورد PWV می‌پردازیم و سپس روش‌های آماری مورد استفاده برای تحلیل داده‌ها و برآورد بخار آب قابل بارش معرفی می‌شوند. این روش‌ها شامل تحلیل همبستگی اسپیرمن، تحلیل همبستگی کانونی و تحلیل ساختاری کانونی هستند که به‌منظور بررسی روابط پیچیده بین متغیرهای جوی و پارامترهای هواشناسی به کار می‌روند.

۲-۱- برآورد بخار آب قابل بارش

جهت انجام تحلیل همبستگی کانونی نیاز به داشتن مقدار PWV در ایستگاه مورد نظر می‌باشد. روش‌های سنتی برای برآورد PWV، از جمله رادیوسوندها و رادیومترها، گران بوده و دارای پوشش مکانی و زمانی محدود هستند. اما با استفاده از ایستگاه‌های دائمی GPS که قادر به تخمین بخار آب در لایه تروپوسفر به طور مداوم و تقریباً بدون هزینه هستند، می‌توان به برآورد PWV دست یافت [۱۹]. مدل ساستامینن یکی از پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در محاسبه تأخیر تروپوسفری می‌باشد. این مدل برگرفته از قانون گازها بوده و مدلی استاندارد است [۲۰]. جهت محاسبه تأخیر خشک تروپوسفری در راستای زنیت، رابطه (۱) ارائه شده است [۲۱].

رابطه(۱)

$$ZHD = \frac{0.002277 \times P_s}{1 - 0.00266 \times cos(2\varphi) - 0.00000028 \times h}$$

در رابطه (۱)، P_s فشار سطحی در ایستگاه برحسب میلی‌بار، φ عرض جغرافیایی ایستگاه و h ارتفاع ایستگاه از سطح دریا برحسب کیلومتر می‌باشد. سپس با تفاضل تأخیر خشک تروپوسفر (ZHD) از تأخیر کلی تروپوسفری (ZTD) مقدار تأخیر تر تروپسفری مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد:

رابطه(۲) $$ZWD = ZTD - ZHD$$

محاسبه بخار آب قابل بارش به‌صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

رابطه(۳) $$PWV = \Pi \times \mathrm{ZWD}$$

در رابطه (۳)، Π به‌صورت رابطه(۴) بیان می‌شود:

رابطه(۴) $$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w \times R \times \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2\right)}$$

ضریب تبدیل Π، کمیتی بدون واحد است که با توجه به منطقه و عرض جغرافیایی، فصل و آب‌وهوای منطقه مورد مطالعه، تغییر می‌کند و دامنه تغییرات آن بین ۰/۱۲ تا ۰/۱۸ متغیر است. با استفاده از ضریب تبدیل Π، تأخیر تر تروپوسفر به بخار آب قابل بارش، برحسب میلی‌متر، تبدیل می‌شود.

مقادیر پارامترها در رابطه (۴) به شرح ذیل است:

$$R = 0.4613 J.g^{-1}.K^{-1}$$
$$k_2 = 22.1 \pm 2.2 K.hpa^{-1}$$
$$k_3 = (3.739 \pm 0.12) \times 10^5 K^2.hpa^{-1}$$

ρ_w چگالی آب، R ثابت گاز جهانی، k_2 و k_3 ثابت‌های فیزکی تجربی هستند. تاثیرگذارترین و مهم‌ترین مولفه در رابطه (۴) میانگین وزن‌دار دمای اتمسفر[2] بر حسب کلوین است. T_m میانگین وزنی دما با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه می‌شود. یکی از روش‌های پیشنهادی، روش انتگرال‌گیری عددی است که به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا، ممکن است مناسب نباشد. روش دیگری که توسط بیویس پیشنهاد شده است، با توجه به دمای سطحی منطقه، میانگین وزنی دما را محاسبه می‌کند. این روش از پیچیدگی کمتری

[1] *Tropical Rainfall Measuring Mission*

[2] *Weighted Mean Temperature*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

برخوردار است. بر اساس دقت مورد نظر و داده‌های در دسترس، یکی از روش‌های محاسبه میانگین وزنی دما انتخاب می‌گردد. در این پژوهش، از رابطه ارائه شده توسط بیویس در سال ۱۹۹۲ استفاده شده است که تابعی از دمای سطحی منطقه است. رابطه (۵)، این تابع را بیان می‌کند [۳].

رابطه(۵) $T_m = 85.63 + 0.668T_s$

T_s دمای سطحی بر حسب کلوین در مکان ایستگاه می‌باشد و می‌توان از منابع معتبری مانند داده‌های باز تحلیل شده *ERA-5* با دقت مکانی حدود ۳۰ کیلومتر، برای دستیابی به این داده‌ها استفاده کرد.

۲-۲-روش‌های آماری مورد استفاده

روش‌های آماری بیشماری جهت شناسایی روابط میان متغیرها و ارزیابی تأثیرات متقابل آن‌ها وجود دارد که با توجه به هدف مورد نظر می‌توان از برخی از آن‌ها استفاده کرد. در این بخش به معرفی سه مورد از آن‌ها می‌پردازیم. این روش‌ها به ما امکان می‌دهند تا الگوهای پیچیده‌تر را شناسایی کنیم و بینش عمیق‌تری از داده‌های جوی به دست آوریم.

۲-۲-۱-ضریب همبستگی اسپیرمن

ضریب همبستگی اسپیرمن یک اندازه‌گیری غیرپارامتری از همبستگی بین دو متغیر است که از معادلات یکنواخت استفاده می‌کند تا همبستگی دو متغیر آماری را ارزیابی کند. مقدار مطلق ضریب همبستگی اسپیرمن ۱ است زمانی که دو متغیر به‌صورت کاملاً یکنواخت همبستگی دارند، با فرض اینکه مقادیر تکراری در داده‌ها وجود ندارد. ضریب همبستگی اسپیرمن جهت همبستگی بین متغیر X (متغیر مستقل) و Y (متغیر وابسته) را نشان می‌دهد. با فرض اینکه مقدار X افزایش یابد و مقدار Y تمایل به افزایش داشته باشد، ضریب همبستگی اسپیرمن مثبت است. اگر مقدار X افزایش یابد و مقدار Y تمایل به کاهش داشته باشد، ضریب همبستگی اسپیرمن منفی است. ضریب همبستگی اسپیرمن صفر نشان‌دهنده عدم وجود تمایل برای افزایش مقدار Y با افزایش مقدار X است. همان‌طور که مقادیر X و Y به هم نزدیکتر می‌شوند، ضریب همبستگی اسپیرمن به مقدار مطلقی بیشتر افزایش می‌یابد. زمانی که X و Y به‌صورت کاملاً یکنواخت همبسته باشند، مقدار مطلق ضریب همبستگی اسپیرمن ۱ است [۲۲]. از مزایای این روش می‌توان به این اشاره داشت که این روش برای داده‌هایی که دارای توزیع نرمال نیستند یا متغیرهای آن رتبه‌ای هستند، مناسب است. همچنین، ضریب اسپیرمن می‌تواند همبستگی بین متغیرهای غیرخطی را بهتر از روش پیرسون نشان دهد. از معایب این روش می‌توان به این اشاره کرد که اگرچه اسپیرمن نسبت به پیرسون در تحلیل روابط غیرخطی بهتر عمل می‌کند، اما همچنان تنها همبستگی بین دو متغیر را بررسی می‌کند و قادر به تحلیل ارتباط چندین متغیر به صورت همزمان نیست.

۲-۲-۲-تحلیل همبستگی کانونی

تحلیل همبستگی کانونی یک روش توصیفی است که به دنبال به‌دست‌آوردن معیارهای ارتباط بین دو مجموعه از مشاهدات چندمتغیره است [۲۳]. *CCA* به طور گسترده در تجزیه‌وتحلیل عملی استفاده می‌شود. برای توصیف همبستگی بین دو گروه متغیر، ضریب همبستگی اسپیرمن دارای یک عیب است که فقط همبستگی بین یک متغیر X و یک متغیر Y را در نظر می‌گیرد و همبستگی بین متغیرها درون گروه‌های متغیر X و Y را در نظر نمی‌گیرد. بین دو گروه متغیر، ضریب‌های همبستگی بسیاری وجود دارد که باعث می‌شود مسئله به طور کلی پیچیده و دشوار به نظر بیاید. *CCA* یک روش تجزیه‌وتحلیل چندمتغیره برای مطالعه همبستگی بین دو گروه متغیر است (رابطه(۶)) که از ایده تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ابعاد و استخراج مؤلفه‌های اصلی از دو گروه متغیر استفاده می‌کند و همچنین بیشینه‌کردن همبستگی بین مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از دو گروه متغیر هنگامی که مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از همان گروه با یکدیگر مرتبط نیستند. *CCA* از همبستگی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از دو گروه متغیـر بـرای توصیف همبستگی خطی دو گروه بـه‌عنـوان یـک کـل استفاده می‌کند. اصل *CCA* به شرح زیر است:

دو گروه متغیر مستقل و وابسته وجود دارند:

رابطه(۶)
$$\begin{cases} X = (x_1.\cdots.x_p)' \\ Y = (y_1.\cdots.y_q)' \end{cases}$$

ماتریس کوواریانس متغیرهای X و Y به‌صورت زیر است:

رابطه(۷)
$$\sum = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{bmatrix}$$

در رابطـه(۷)، $\Sigma_{11} = cov(X)$ یـک مـاتریس $p \times p$ ، $\Sigma_{22} = cov(Y)$ یـــک مـــاتریس $q \times q$ و $\Sigma_{12} = cov(X.Y)$ یک ماتریس $p \times q$ می‌باشند.

بر اساس روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، همبستگی بـین دو مجموعه متغیر (X و Y) می‌تواند به همبسـتگی بـین دو متغیر کانونی (U و V) تبدیل شود. بـرای شناسـایی متغیرهای کانونی U و V، ضـریب $a = (a_1.\cdots.a_p)'$ و $b = (b_1.\cdots.b_q)'$ باید پیدا شود، کـه در روابـط (۸) و (۹) نشان داده شده است. واریانس و کوواریـانس U و V مطابق رابطه(۱۰) محاسـبه مـی‌شـود. همچنـین نحـوه محاسبه ضرایب همبسـتگی U و V بـرای $i = 1.\cdots.s$، کـه $s = min(p.q)$ اسـت، در رابطـه(۱۱) نشـان داده شده است.

در تحلیـل همبسـتگی کـانونی، چـالش اصـلی یـافتن بردارهای ضـرایب a و b اسـت بـه‌گونـه‌ای کـه ضـریب همبسـتگی بـین دو گـروه متغیـر X و Y بـا توجـه بـه مـاتریس‌هـای کوواریـانس داده شـده Σ بیشـینه شـود. ازآنجاکه ضریب همبستگی بین متغیرهای کـانونی U و V با ضرب ایـن متغیرهـا در یـک ثابـت دلخـواه تغییـر نمی‌کند، برای جلوگیری از نتایج تکراری و غیرضروری، بردارهای ضرایب a و b به‌صـورت رابطـه(۱۲) نرمـالیزه می‌شوند.

رابطه(۸)
$$U_i = a_i'X = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{ip}x_p$$

رابطه(۹)
$$V_i = b_i'Y = b_{i1}y_1 + b_{i2}y_2 + \cdots + b_{iq}y_q$$

رابطه(۱۰)
$$\begin{cases} var(U_i) = a_i'var(X_i)a_i = a_i'\Sigma_{11}a_i \\ var(V_i) = b_i'var(Y_i)b_i = b_i'\Sigma_{22}b_i \\ var(U_i.V_i) = a_i'var(X_i.Y_i)b_i = a_i'\Sigma_{12}b_i \end{cases}$$

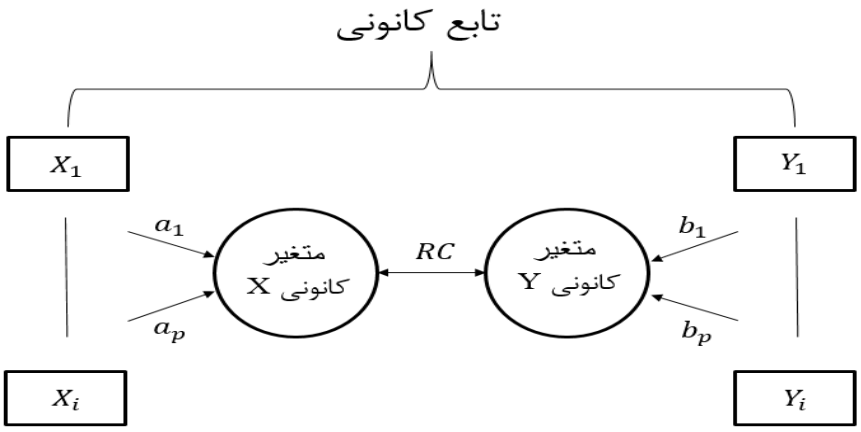
رابطه(۱۱)
$$corr(U.V) = \frac{a_i'\Sigma_{12}b_i}{\sqrt{a_i'\Sigma_{11}a_i}\sqrt{b_i'\Sigma_{22}b_i}}$$

رابطه(۱۲)
$$\begin{cases} var(U) = a_i'\Sigma_{11}a_i = 1 \\ var(V) = b_i'\Sigma_{22}b_i = 1 \end{cases}$$

از مزایای این روش می‌توان بـه ایـن اشـاره داشـت کـه تحلیل همبستگی کانونی امکان بررسی همزمان چندین متغیر مستقل و وابسـته را فـراهم مـی‌کنـد. ایـن روش برخلاف پیرسون و اسپیرمن، می‌تواند همبسـتگی کلـی بین دو مجموعه از متغیرها را منعکس کنـد. از ایـن رو، *CCA* برای داده‌هایی که دارای ابعـاد بـالایی هسـتند و نیاز به تحلیل چند متغیره دارنـد، مناسـب‌تـر اسـت. از معایب این روش می‌توان به پیچیدگی محاسباتی بیشتر این روش نسبت بـه روش‌هـای قبلـی و نیـاز بـه حجـم بیشتری از داده‌ها اشاره کرد. همچنـین، تفسـیر نتـایج *CCA*نسبت به روش‌های تک‌متغیره پیچیده‌تـر اسـت و ممکن است نیاز به ابزارهای تخصصی آماری برای انجام تحلیل داشته باشد. شـکل (۱) روابـط بـین متغیرهـا و متغیرهای کانونی در این روش را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]



شکل۱: روابط بین متغیرها و متغیرهای کانونی در روش تحلیل همبستگی کانونی

۲-۲-۳-تحلیل ساختاری کانونی

تحلیل ساختاری کانونی یکی از روش‌های تحلیلی برای تفسیر نتایج حاصل از تحلیل همبستگی کانونی است. در این روش، با داشتن بارگذاری کانونی و بارگذاری متقاطع، همبستگی ساختاری بین متغیرها را می‌توان اندازه‌گیری کرد. از این روش برای اندازه‌گیری همبستگی و جهت متغیرهای اصلی (X و Y) و متغیر کانونی (U_i,V_i) استفاده می‌شود. بارگذاری کانونی یک نشانگر است که همبستگی بین متغیرهای اصلی و متغیرهای کانونی خود را نشان می‌دهد. هرچه مقدار مطلق بارگذاری کانونی بیشتر باشد، متغیر کانونی بیشتر متغیر اصلی خود را تفسیر می‌کند. بارگذاری متقاطع نیز شاخص همبستگی متغیر اصلی با یک متغیر کانونی دیگر است. تفسیر دقیق‌تر روابط بین متغیرها، نمایش جامع‌تر همبستگی‌ها ، کمک به تصمیم‌گیری در تفسیر مدل‌ها و کاربرد در داده‌های چند متغیره از مزایای این روش می‌باشد و مانند روش تحلیل همبستگی کانونی از معایب این روش می‌توان به پیچیدگی محاسباتی نسبت به روش‌های قبلی و نیاز به حجم بیشتری از داده‌ها اشاره کرد.

۳- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

به‌منظور بررسی اهداف این پژوهش، منطقه لس‌آنجلس در کشور آمریکا به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب گردید. دلایل این انتخاب از جنبه‌های مختلف قابل بررسی هستند؛ به‌عنوان مثال، شرایط آب‌وهوایی در این منطقه به دلیل نزدیکی به نواحی ساحلی معمولاً معتدل است، مناطق کوهستانی نیز در این منطقه یافت می‌شوند و همچنین غنی بودن این منطقه از منابع داده مختلف در دسترس از مهم‌ترین دلایل این انتخاب به شمار می‌آیند. جهت پیاده‌سازی و ارزیابی این پژوهش از مشاهدات ایستگاه‌های *GPS* و مدل جهانی مرکز پیش‌بینی وضع هوا[1] *(ECMWF)* استفاده شده است.

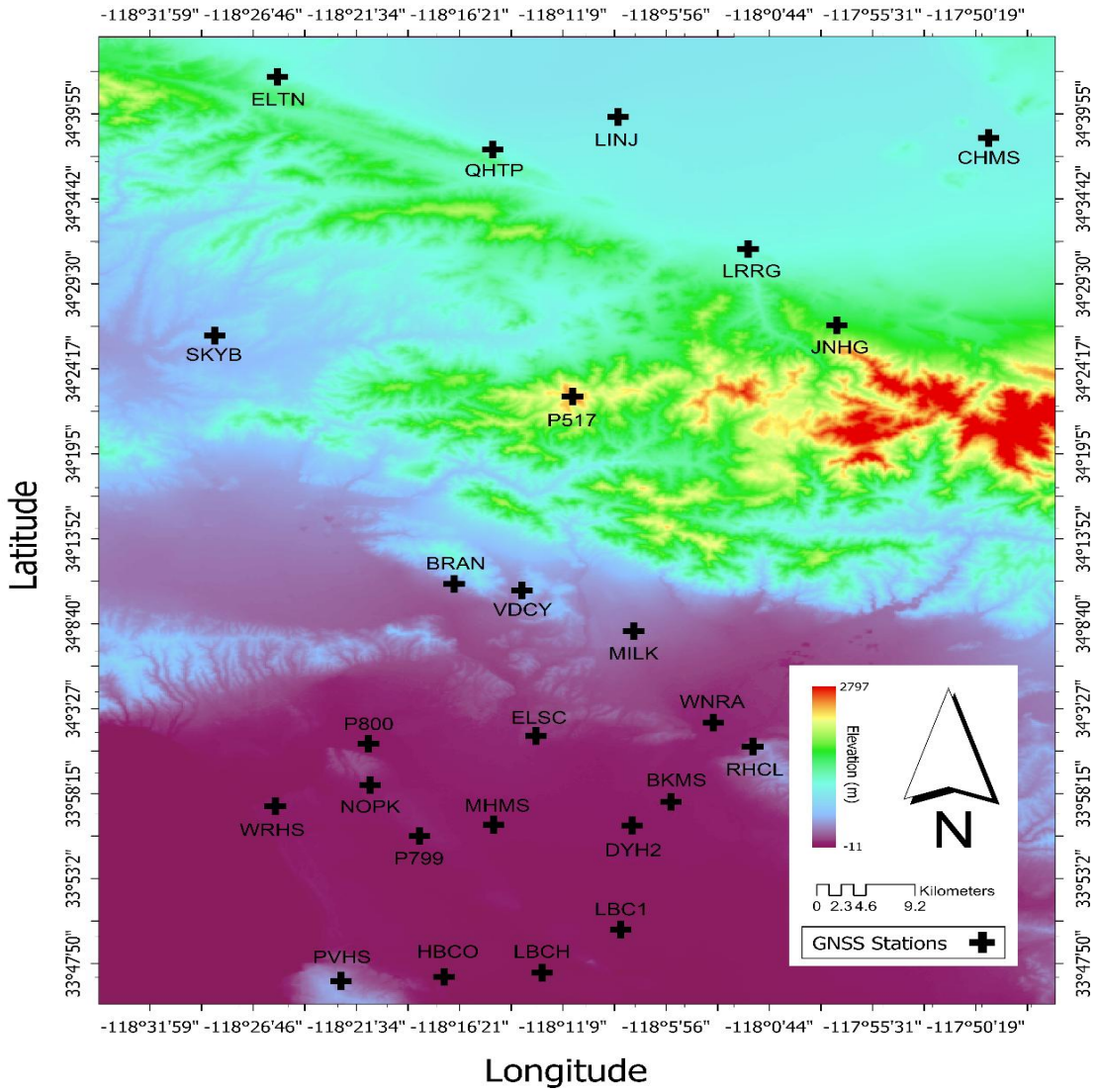
با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه علاوه بر سواحل، مناطق کوهستانی را هم در بر می‌گیرد، استفاده از شبکه ایستگاه‌های *GPS* متراکم در منطقه ضروری است. با هدف برآورد مقادیر بخار آب قابل بارش در این منطقه، ۲۵ ایستگاه با توزیع مناسب از شبکه *UNAVCO*، یک مؤسسه تحقیقاتی در زمینه علوم زمین، به‌عنوان ایستگاه‌های مرجع به کار گرفته شده‌اند. این ۲۵ ایستگاه در محدوده جغرافیایی ۳۳٫۷۵ درجه شمالی تا ۳۴٫۷۵ درجه شمالی و ۱۱۷٫۵ درجه شرقی تا

[1] *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

۱۱۸٫۵ درجه غربی واقع شده‌اند. موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های *GPS* در شکل (۲) نشان داده شده است. به‌منظور بررسی دقیق ارتباط بین *PWV* و پارامترهای هواشناسی، مطالعه در یک هفته تابستانی در بازه زمانی ۲۴ تا ۳۰ ژوئیه سال ۲۰۲۱ انجام شده است.

دومین مجموعه داده مورد استفاده از مدل هواشناسی *ECMWF* می‌باشد. داده‌های *ERA-5*، به‌عنوان آخرین مجموعه داده‌های باز تحلیل شده توسط *ECMWF* در اختیار کاربران قرار دارد. این مجموعه، پارامترهای جوی باز تحلیل شده را با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۲۵ درجه و قدرت تفکیک زمانی ۶ ساعته در اختیار کاربران قرار می‌دهد. جهت انجام این پژوهش پارامترهای هواشناسی مختلف نظیر دما، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، دمای خاک، مؤلفه ۱۰ متری باد از مجموعه داده‌های باز تحلیل شده *ERA-5* به سبب ارتباطی که با *PWV* دارند، انتخاب شدند. برای برآورد میانگین وزن‌دار دمای اتمسفر و *ZHD* با قدرت تفکیک زمانی ۱ ساعته در هر ایستگاه از پارامترهای فشار جو و دمای سطحی در ۳۷ لایه فشاری (۱۰۰۰ تا ۱ میلی‌بار) استفاده شد.



شکل۲: موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های *GPS*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

۳-۱-معرفی پارامترهای انتخاب شده

در این بخش، پارامترهای کلیدی که برای تحلیل انتخاب شده‌اند، معرفی می‌شوند. این پارامترها شامل دمای ۲ متری، رطوبت نسبی، دمای ۲ متری نقطه شبنم، دمای خاک سطح ۲ و مولفه ۱۰ متری باد هستند که تأثیر قابل توجهی بر تغییرات جوی و پدیده‌های اقلیمی دارند.

۳-۱-۱-دمای ۲ متری

دمای ۲ متری هوا، دمای اندازه‌گیری‌شده در ارتفاع ۲ متر سطح زمین، دریا یا آب‌های داخلی است که از انتقال بین پایین‌ترین سطح مدل و زمین به دست می‌آید. واحد این پارامتر کلوین است و با کم کردن ۲۷۳٫۱۵ به درجه سلسیوس تبدیل می‌شود [۲۴].

۳-۱-۲-رطوبت نسبی

پارامتر رطوبت نسبی، نشان دهنده فشار بخار آب به عنوان درصدی از رطوبت است که به ازای آن هوا اشباع می‌گردد (نقطه ای که بخار آب شروع به متراکم شدن به آب مایع یا رسوب به یخ می‌کند). برای دماهای بیش از ۰ درجه سانتیگراد (۲۷۳٫۱۵ کلوین) این مقدار برای اشباع روی آب محاسبه می‌شود. در دماهای کمتر از ۲۳- درجه سانتیگراد، این مقدار برای اشباع روی یخ محاسبه می‌شود [۲۴].

۳-۱-۳-دمای ۲ متری نقطه شبنم

دمای نقطه شبنم ۲ متری، دمایی است که در آن هوا باید تا ارتفاع ۲ متر سرد شود تا اشباع رخ دهد. این پارامتر همراه با دما و فشار برای محاسبه رطوبت نسبی استفاده می‌شود. دمای نقطه شبنم ۲ متری با استفاده از ترتیب میانی میان پایین‌ترین سطح مدل و سطح زمین، با در نظر گرفتن شرایط جوی محاسبه می‌شود. واحد این پارامتر کلوین است [۲۴].

۳-۱-۴-دمای خاک سطح ۲

دمای خاک سطح ۲ نشان‌دهنده دمای خاک در لایه دوم (۷ تا ۲۸ سانتی‌متر) از مدل چهارلایه‌ای *ECMWF* است. دمای خاک در وسط هر لایه تنظیم می‌شود و انتقال حرارت در مرزهای لایه‌ها محاسبه می‌شود. فرض می‌شود که هیچ انتقال حرارتی از پایین‌ترین لایه به بیرون نیست. دمای خاک در سراسر جهان، حتی روی اقیانوس تعریف شده است. مناطقی که دارای سطح آب هستند می‌توانند با در نظر گرفتن نقاط شبکه‌ای که مقدار ماسک زمین-دریا بیشتر از ۰٫۵ است، محدود شوند. واحد این پارامتر کلوین است [۲۴].

۳-۱-۵-مولفه ۱۰ متری باد

مولفه ۱۰ متری باد، سرعت افقی باد در ارتفاع ۱۰ متری به سمت شمال را نشان می‌دهد. سرعت افقی هوا در حال حرکت به سمت شمال، در ارتفاع ده متری از سطح زمین، بر حسب متر بر ثانیه است. مشاهدات محلی ممکن است به دلیل تأثیر پوشش گیاهی و ساختمان‌ها با مدل‌های پیش‌بینی متفاوت باشد [۲۴].

۴-پردازش‌ها و نتایج

در ادامه نتایج آورده شده است:

۴-۱-برآورد بخار آب قابل بارش

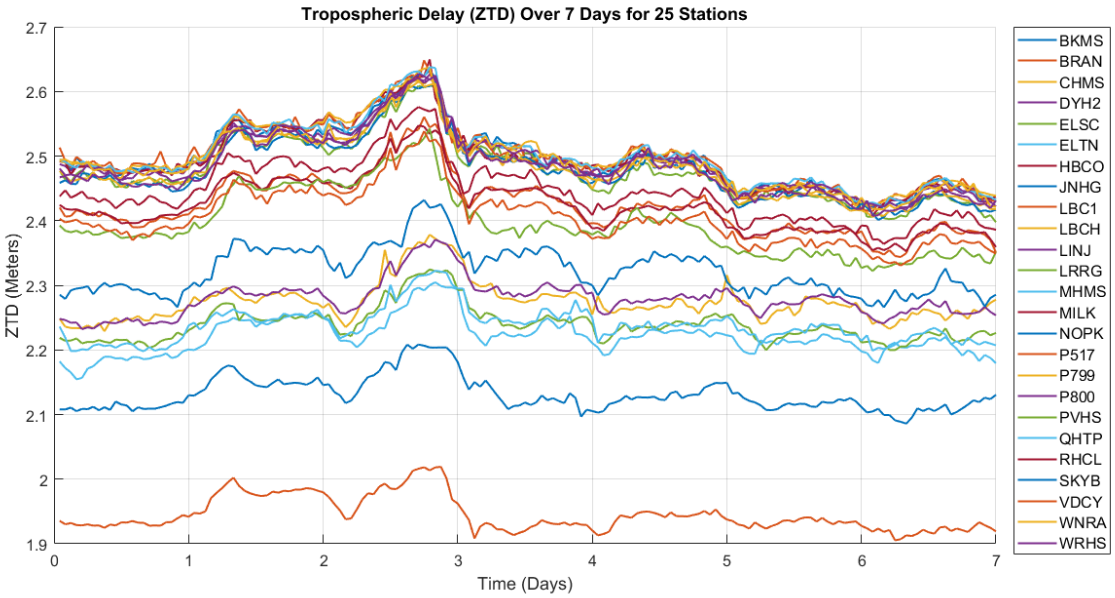
در نرم‌افزار برنیز مشاهدات ایستگاه‌های *GPS* با استفاده از روش *PPP* پردازش شده و مقادیر *ZTD* در هر ایستگاه با فاصله زمانی ۱ ساعت در روز برآورد شده است. جدول(۱) پارامترها و اطلاعات مورد استفاده جهت برآورد مقادیر *ZTD* را نشان می‌دهد. انتخاب نوع داده‌های کمکی، روند پردازش و انتخاب شاخص‌های پردازشی با نرم‌افزار برنیز همراستا با سایر مطالعات صورت گرفته در منطقه می‌باشد [۲۵]. شکل(۳) تأخیرهای به‌دست آمده از نرم‌افزار برنیز برای مدت یک هفته پردازش شده را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر *ZHD*، با توجه به عرض جغرافیایی و فشار جو در مکان ایستگاه‌ها با استفاده از مدل خشک ساستامونین محاسبه شده است (رابطه (۱)). سپس با تفاضل *ZHD* از *ZTD*، تأخیر تر تروپسفری برآورد شده و مقادیر *PWV* بر حسب میلی‌متر از رابطه (۳) محاسبه شده است. شکل(۴) مقادیر بخار آب قابل بارش محاسبه شده برای مدت یک هفته را نشان می‌دهد. در نهایت با استفاده از درون‌یابی اسپیلاین پارامترهای هواشناسی در هر ایستگاه با فاصله زمانی ۱ ساعت در روز برآورد شده است. سپس با توجه به هدف پژوهش باید ارتباط بین مجموعه‌های مورد نظرمان بررسی گردد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

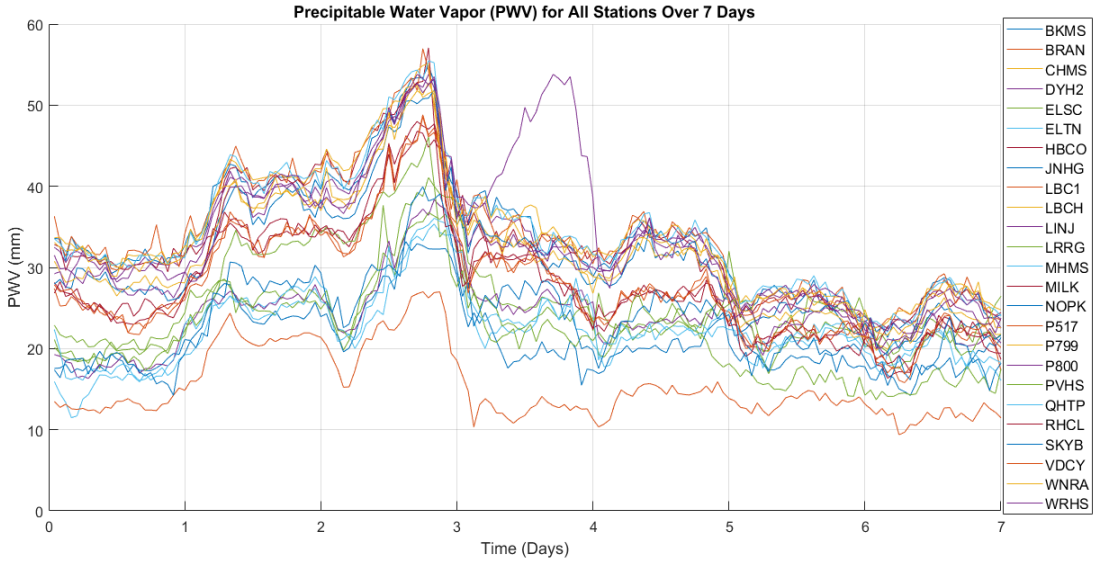
جدول۱: پارامترها و اطلاعات مورد استفاده جهت برآورد مقادیر *ZTD*

پارامتر	مدل / اطلاعات استفاده شده
مدار و ساعت ماهواره	مرکز تعیین مدار در اروپا *(CODE)*
بایاس‌های کد تفاضلی*(DCB)*	سرویس بین‌المللی *GNSS*
پارامترهای چرخش زمین	*CODE*
جبران فاز مرکز ماهواره	*PCV.I14*
جبران فاز مرکز گیرنده	*PCV.I14*
مدل یونوسفر	*Linear Ionospheric free combination*
Trop mapping function	*WET GMF*
تخمین گرادیان تروپوسفری	مدل *Chenher* (یک ساعت) با محدودیت مطلق و نسبی ۵ متر
وضوح زمانی تأخیر کلی تروپوسفر*(ZTD)*	۱ ساعت
سیستم *GNSS*	*GPS* و *GLONASS*
نوع مشاهده	فاز و کد
مدل جزر و مد پوسته	*FES2004*
Atmosphere tidal loading	*Ray-Ponte*
Cut-off angle	۳ درجه



شکل۳: تأخیرهای به‌دست آمده از نرم‌افزار برنیز برای مدت یک هفته

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]



شکل۴: مقادیر بخار آب قابل بارش محاسبه شده برای مدت یک هفته

۴-۲-تحلیل همبستگی اسپیرمن

تجزیه‌وتحلیل همبستگی اسپیرمن برای مطالعه رابطه همبستگی مکانی و زمانی بخار آب قابل بارش و پارامترهای هواشناسی انجام شد. در جدول (۲) نتایج نشان می دهد که هر کدام از پارامترهای هواشناسی به نحوی با موقعیت جغرافیایی و *PWV* ارتباط دارند که دمای نقطه شبنم دارای بیشترین همبستگی از بین ۵ پارامتر می‌باشد و سرعت باد دارای کمترین همبستگی است. همچنین جدول (۳) نتایج همبستگی اسپیرمن بین پارامترهای هواشناسی را نشان می‌دهد که پارامتر دما با دمای نقطه شبنم و سرعت باد ارتباط دارد و دمای نقطه شبنم علاوه بر دما با دمای سطح خاک نیز ارتباط دارد. همچنین جدول (۴) نتایج همبستگی اسپیرمن بین پارامترهای موقعیت، زمان و *PWV*های برآورد شده را نشان می‌دهد که نتایج بیانگر ارتباط پارامتر *PWV* با عرض جغرافیایی، ارتفاع و روز می‌باشد. هر چقدر هم ضریب همبستگی بین دو متغیر بالا باشد، تحلیل همبستگی اسپیرمن تنها می‌تواند همبستگی بین متغیرهای منفرد را منعکس کند، بنابراین برای انعکاس همبستگی کلی بین دو گروه متغییر، انجام *CCA* روی دو گروه متغیر ضروری است.

جدول۲: ضریب همبستگی اسپیرمن بین موقعیت، زمان و *PWV*های برآورد شده و پارامترهای هواشناسی

	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع	روز	ساعت	بخار آب قابل بارش
دما	۰٫۳۹۲	۰٫۱۴۶	۰٫۳۰۶	۰٫۱۸۰	۰٫۲۴۲	-۰٫۳۲۳
رطوبت نسبی	-۰٫۱۳۶	-۰٫۱۶۹	-۰٫۱۲۱	-۰٫۵۴۸	-۰٫۱۴۵	۰٫۳۵۳
دمای نقطه شبنم	-۰٫۷۰۰	-۰٫۲۶۳	-۰٫۶۶۱	-۰٫۱۳۹	-۰٫۰۱۳	۰٫۵۷۶
دمای سطح خاک	۰٫۶۲۷	۰٫۲۵۴	۰٫۴۲۱	۰٫۰۲۵	-۰٫۳۱۹	-۰٫۳۶۵
سرعت باد	۰٫۱۹۱	۰٫۰۹۹	۰٫۱۳۴	-۰٫۲۲۲	۰٫۰۸۸	-۰٫۱۲۱

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

جدول۳: ضریب همبستگی اسپیرمن بین پارامترهای هواشناسی

	دما	رطوبت نسبی	دمای نقطه شبنم	دمای سطح خاک	سرعت باد
دما	۱٫۰۰۰	-۰٫۳۳۶	-۰٫۵۰۹	۰٫۳۸۴	۰٫۶۲۷
رطوبت نسبی		۱٫۰۰۰	۰٫۱۷۸	-۰٫۱۰۴	۰٫۰۰۶
دمای نقطه شبنم			۱٫۰۰۰	-۰٫۶۲۷	-۰٫۳۷۵
دمای سطح خاک				۱٫۰۰۰	۰٫۴۳۴
سرعت باد					۱٫۰۰۰

جدول۴: ضریب همبستگی اسپیرمن بین موقعیت، زمان و *PWV*های برآورد شده

	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع	روز	ساعت	بخار آب قابل بارش
عرض جغرافیایی	۱٫۰۰۰	۰٫۲۰۹	۰٫۸۳۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	-۰٫۴۵۲
طول جغرافیایی		۱٫۰۰۰	۰٫۱۹۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	-۰٫۰۲۹
ارتفاع			۱٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	-۰٫۶۰۷
روز				۱٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	-۰٫۳۷۱
ساعت					۱٫۰۰۰	۰٫۰۵۷
بخار آب قابل بارش						۱٫۰۰۰

۴-۳-تحلیل همبستگی کانونی

در *CCA*، پنج جفت متغیر همبستگی کانونی *(U1,V1)*، *(U2,V2)*، *(U3,V3)*، *(U4,V4)* و *(U5,V5)* از دو گروه داده گروه‌های X و Y استخراج شد که در جدول (۵) نشان داده شده است. ضریب همبستگی کانونی جفت اول از متغیرهای همبستگی کانونی *(U1,V1)* برابر ۰٫۸۸۲ در سطح معنی‌داری ۰٫۰۵ و بزرگ‌تر از ضریب همبستگی کانونی جفت دوم می‌باشد، در حالی که ضریب همبستگی کانونی جفت دوم *(U2,V2)* بیشتر از ضریب همبستگی کانونی جفت سوم و به همین ترتیب تا جفت آخر که بدون سطح معنی‌داری است، می‌باشد. این بدان معنی است که ضریب همبستگی کانونی اول قابل‌اعتماد می‌باشد و به ترتیب جفت‌های دیگر از اعتماد کمتری برخوردار هستند؛ بنابراین، اولین جفت متغیرهای همبستگی کانونی *(U1,V1)* در تجزیه‌وتحلیل بعدی استفاده شد.

به‌علاوه، ضریب همبستگی کانونی برای اولین زوج متغیرهای همبستگی کانونی (۰٫۸۸۲) بیشتر از تمام ضرایب همبستگی حاصل از تحلیل همبستگی اسپیرمن بود، که نشان می‌دهد نتایج تحلیل کانونی می‌توانند رابطه بین همبستگی مکانی و زمانی *PWV* و پارامترهای هواشناسی را نسبت به تحلیل همبستگی اسپیرمن بهتر نمایش دهند. این بدان معناست که موقعیت جغرافیایی نه فقط بر یک پارامتر بلکه بر کل پارامترهای هواشناسی اثرگذار است. بنابراین، رابطه همبستگی بین سری زمانی و مکانی *PWV* و پارامترهای هواشناسی می‌تواند توسط اولین زوج متغیرهای کانونی *(U1,V1)* نمایش داده شود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

جدول۵: نتایج تجزیه‌وتحلیل همبستگی کانونی

	همبستگی کانونی						
	ضریب همبستگی	مقدار ویژه	آماره ویلکس	آماره F	تعداد درجه آزادی صورت جمله F	تعداد درجه آزادی مخرج جمله F	مقدار p-value
۱	۰٫۸۸۲	۳٫۵۱۹	۰٫۰۶۷	۵۳۸٫۳۳۳	۳۰٫۰۰۰	۱۶۷۵۸٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
۲	۰٫۷۳۸	۱٫۱۹۶	۰٫۳۰۴	۳۰۰٫۲۴۸	۲۰٫۰۰۰	۱۳۸۹۷٫۶۰۸	۰٫۰۰۰
۳	۰٫۴۶۳	۰٫۲۷۳	۰٫۶۶۷	۱۵۲٫۵۶۷	۱۲٫۰۰۰	۱۱۰۸۸٫۶۳۵	۰٫۰۰۰
۴	۰٫۳۲۸	۰٫۱۲۱	۰٫۸۵۰	۱۱۸٫۵۹۵	۶٫۰۰۰	۸۳۸۴٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
۵	۰٫۲۱۸	۰٫۰۵۰	۰٫۹۵۲				

رابطه(۱۳) ضرایب همبستگی کانونی استاندارد شده را به‌عنوان مدل همبستگی کانونی نشان می‌دهد.

رابطه(۱۳)
$$U_1 = -0.946lat - 0.296long + 0.337h - 0.230day + 0.135time + 0.256PWV$$
$$V_1 = -0.049T + 0.230R + 0.522D - 0.567stl + 0.238V$$

در رابطه (۱۳)، T بیانگر دما، R رطوبت نسبی، D دمای نقطه شبنم، stl دمای سطح خاک و V سرعت باد می‌باشند و با توجه به این رابطه، متغیر کانونی $U1$ مرتبط با عرض جغرافیایی با ضریب ۰٫۹۴۶- است. متغیر کانونی $V1$ مرتبط با دمای نقطه شبنم و دمای سطح خاک با ضریب های ۰٫۵۲۲ و ۰٫۵۶۷- است. این مدل همبستگی کانونی نشان می‌دهد که موقعیت جغرافیایی و زمان PWVهای برآورد شده تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای هواشناسی دارند. با توجه به نتایج مدل، این مطالعه مشخص کرد که زمان و موقعیت PWV با پارامترهای هواشناسی همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد.

۴-۴- تحلیل ساختاری کانونی

بارگذاری کانونی به ما نشان می‌دهد که هر متغیر چقدر در تعیین ساختار کلی داده‌ها مؤثر است. مقادیر نزدیک به ۱ و ۱- نشان‌دهنده تاثیر قوی و و مقادیر نزدیک به ۰ نشان‌دهنده تاثیر ضعیف هستند. بارگذاری متقاطع نشان‌دهنده ارتباط بین متغیرها در شرایط مختلف است و می‌تواند به ما کمک کند تا ببینیم چگونه این متغیرها بر یکدیگر تاثیر می‌گذارند.

بر اساس نتایج جدول (۶)، بارگذاری کانونی عرض جغرافیایی برابر ۰٫۸۷۰- و بارگذاری متقاطع آن برابر ۰٫۷۶۸- است. این مقادیر نشان‌دهنده تأثیر منفی قوی عرض جغرافیایی بر سایر متغیرها است؛ به این معنا که با افزایش عرض جغرافیایی، بسیاری از متغیرهای جوی ممکن است کاهش یابند.

بارگذاری کانونی طول جغرافیایی برابر ۰٫۴۳۶- و بارگذاری متقاطع آن برابر ۰٫۳۸۵- است. این مقادیر تأثیر منفی متوسطی دارند و تغییرات در طول جغرافیایی نیز می‌تواند بر سایر متغیرها تأثیر بگذارد، اما این تأثیر کمتر از عرض جغرافیایی است.

بارگذاری کانونی ارتفاع برابر ۰٫۵۹۶- و بارگذاری متقاطع آن برابر ۰٫۵۲۶- است که تأثیر منفی قابل توجهی دارند. این امر نشان‌دهنده این است که با افزایش ارتفاع، ممکن است برخی از متغیرها کاهش یابند.

بارگذاری کانونی روز برابر ۰٫۳۱۹- و بارگذاری متقاطع آن برابر ۰٫۲۸۲- است. این مقادیر تأثیر منفی ضعیفی

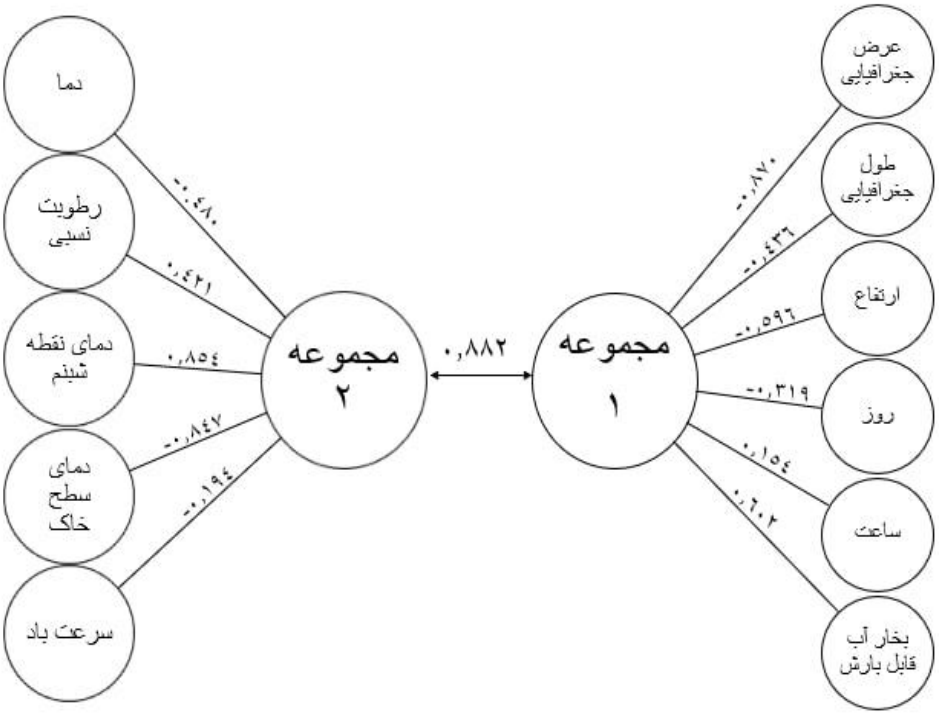
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

دارند و نشان‌دهنده این است کـه تغییـر در روز ممکـن است تأثیر کمی بر روی متغیرهای دیگر داشته باشد.
بارگذاری کانونی ساعت برابر ۰/۱۵۴ و بارگـذاری متقـاطع آن برابر ۰/۱۳۶ است. این مقادیر نشان‌دهنده تأثیر مثبـت اما ضعیفی هستند؛ به این معنـا کـه بـا افـزایش سـاعت، ممکن است برخی از متغیرها افزایش یابند.
بارگذاری کانونی بخـار آب قابـل بـارش برابـر ۰/۶۰۲ و بارگذاری متقاطع آن برابر ۰/۵۳۱ است که تأثیر مثبـت قوی دارد. این امر نشان‌دهنده ایـن اسـت کـه افـزایش بخـار آب قابـل بـارش بـه‌طـور قابـل تـوجهی بـر روی متغیرهای دیگر تأثیر مثبت دارد.
بارگذاری کانونی دما برابر ۰/۴۲۳- و بارگذاری متقـاطع آن برابر ۰/۴۸۰- است. این مقادیر تأثیر منفی متوسطی دارند و نشان‌دهنده این است که با افزایش دما، ممکـن است برخی از متغیرها کاهش یابند.
بارگذاری کانونی رطوبت نسـبی برابـر ۰/۳۷۲ و بارگـذاری متقاطع آن برابر ۰/۴۲۱ اسـت کـه تـأثیر مثبـت ضـعیفی دارند. این امر نشان‌دهنده این است کـه افـزایش رطوبـت نسبی ممکن است به افزایش برخی از متغیرها کمک کند.
بارگـذاری کـانونی دمـای نقطـه شـبنم برابـر ۰/۷۵۴ و بارگذاری متقـاطع آن برابـر ۰/۸۵۴ اسـت. ایـن مقـادیر نشان‌دهنده تأثیر مثبت قوی دمای نقطه شبنم بـر روی سایر متغیرها است.
بارگذاری کـانونی دمـای سـطح خـاک برابـر ۰/۷۴۸- و بارگذاری متقاطع آن برابر ۰/۸۴۷- است که تأثیر منفی قوی دارد. این امر نشان‌دهنده این است که بـا افـزایش دمای سطح خاک، برخی از متغیرها کاهش می‌یابند.
در نهایت، بارگذاری کانونی سرعت بـاد برابـر ۰/۱۷۱- و بارگذاری متقاطع آن برابر ۰/۱۹۴- است که تأثیر منفی ضعیفی دارند و نشان‌دهنده این اسـت کـه سـرعت بـاد تأثیر کمی بر روی سایر متغیرها دارد.
مقـادیر موجـود در جـدول (۶)، بـه صـورت بصـری در شکل(۵) نمایش داده شده است.

جدول۶: نتایج تحلیل ساختاری کانونی

	بارگذاری کانونی	بارگذاری متقاطع
عرض جغرافیایی	**-۰/۸۷۰**	-۰/۷۶۸
طول جغرافیایی	**-۰/۴۳۶**	-۰/۳۸۵
ارتفاع	**-۰/۵۹۶**	-۰/۵۲۶
روز	**-۰/۳۱۹**	-۰/۲۸۲
ساعت	**۰/۱۵۴**	۰/۱۳۶
بخار آب قابل بارش	**۰/۶۰۲**	۰/۵۳۱
	بارگذاری متقاطع	**بارگذاری کانونی**
دما	-۰/۴۲۳	**-۰/۴۸۰**
رطوبت نسبی	۰/۳۷۲	**۰/۴۲۱**
دمای نقطه شبنم	۰/۷۵۴	**۰/۸۵۴**
دمای سطح خاک	-۰/۷۴۸	**-۰/۸۴۷**
سرعت باد	-۰/۱۷۰	**-۰/۱۹۴**

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]



شکل۵: تحلیل ساختاری کانونی بین دو مجموعه داده

شکل(۵) به ما کمک می‌کند تا الگوها و ارتباطات بین متغیرها را بهتر درک کنیم. در مجموع، با توجه به عدد ضریب همبستگی کانونی (۰/۸۸۲)، تحلیل نشان می‌دهد که اثرگذاری دو مجموعه بر یکدیگر بسیار زیاد است. حتی در صورت وجود ارتباط ضعیف بین برخی زیرمجموعه‌ها، همچنان تأثیر کلی این دو مجموعه بر یکدیگر قابل توجه است.

۵-بحث و تحلیل نتایج

در این پژوهش، سه روش مختلف برای تحلیل همبستگی بین متغیرها استفاده شده است. ضریب همبستگی اسپیرمن، به دلیل عدم نیاز به فرض خطی بودن رابطه، برای داده‌های غیرنرمال یا متغیرهای رتبه‌ای مناسب است. نتایج به‌دست‌آمده از این روش نشان داد که متغیرهای مورد مطالعه در برخی ایستگاه‌ها همبستگی بالایی با یکدیگر دارند، که این می‌تواند ناشی از طبیعت غیرخطی روابط بین آن‌ها باشد. با این حال، این روش محدودیت‌هایی دارد، از جمله اینکه تنها همبستگی بین دو متغیر را به‌طور مستقل ارزیابی می‌کند و قادر به تحلیل همزمان چندین متغیر نیست. روش تحلیل همبستگی کانونی برای مطالعه مجموعه‌های پیچیده‌تر متغیرها بسیار مناسب است و به ما این امکان را می‌دهد که به‌جای بررسی روابط یک‌به‌یک، یک دید جامع‌تری از روابط بین چندین متغیر به دست آوریم. نتایج تحلیل کانونی نشان داد که برخی از متغیرها که در روش اسپیرمن همبستگی ضعیفی نشان داده بودند، در اینجا همبستگی قوی‌تری داشتند. این یافته‌ها بیانگر این است که روش‌های ساده‌تر مثل اسپیرمن همیشه قادر به تشخیص کامل الگوهای پیچیده در داده‌ها نیستند. تحلیل ساختاری کانونی به ما امکان می‌دهد که ساختارهای پنهان بین متغیرها را نیز شناسایی کنیم و نه تنها همبستگی بلکه وابستگی‌های علّی و تأثیرات پنهان بین متغیرها را در نظر بگیریم. نتایج به‌دست‌آمده از این روش، ساختارهای پیچیده‌تری را بین متغیرهای

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

جوی و پارامترهای مورد بررسی آشکار کرد که در سایر روش‌ها قابل شناسایی نبودند. این روش توانست ارتباطات عمیق‌تری را بین بخار آب قابل بارش و پارامترهای جوی در ایستگاه‌های مختلف نشان دهد که سایر روش‌های آماری قادر به نمایش دقیق آن‌ها نبودند. با مقایسه نتایج این سه روش، مشخص شد که روش اسپیرمن در مقایسه با تحلیل‌های کانونی نتایج ساده‌تری ارائه می‌دهد و بیشتر برای داده‌های غیرنرمال یا رتبه‌ای مناسب است. اما وقتی به تحلیل‌های پیچیده‌تر نیاز باشد، تحلیل همبستگی کانونی و تحلیل ساختاری کانونی به ما کمک می‌کنند تا بینشی جامع‌تر و عمیق‌تر نسبت به روابط بین متغیرها به دست آوریم. این امر به‌ویژه در مطالعات جوی و پارامترهای جغرافیایی با مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده اهمیت دارد.

اگرچه تحلیل‌های کانونی به عنوان روش بهینه انتخاب شدند اما این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی نیز هستند که باید در نظر گرفته شوند. اولاً، این روش نیاز به حجم نمونه بزرگ دارد و در صورت وجود حجم نمونه کوچک، نتایج ممکن است فاقد اعتبار کافی باشند. همچنین، فرض بر این است که داده‌ها باید توزیع نرمال داشته باشند؛ در غیر این صورت، نتایج به دست آمده ممکن است دچار تحریف شوند. پیچیدگی محاسباتی این روش نیز می‌تواند چالش‌برانگیز باشد و نیاز به نرم‌افزارهای خاص و دانش آماری پیشرفته دارد. از طرفی، تفسیر نتایج می‌تواند دشوار باشد، به‌خصوص زمانی که تعداد متغیرهای مورد بررسی زیاد باشد، که این امر ممکن است منجر به سردرگمی در تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌ها گردد. علاوه بر این، تحلیل‌های کانونی به داده‌های پرت حساس هستند و وجود چنین داده‌هایی می‌تواند تأثیر منفی بر نتایج بگذارد. در نهایت، این روش ممکن است نتواند روابط غیرخطی بین متغیرها را به درستی شناسایی کند. این محدودیت‌ها باید در نظر گرفته شوند تا نتایج به دست آمده به‌طور صحیح تفسیر و کاربردی شوند.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش آماری تحلیل همبستگی کانونی و تحلیل همبستگی اسپیرمن ارتباط بین موقعیت و زمان *PWV* با پارامترهای انتخابی هواشناسی مستخرج از *ERA-5* بررسی شد. *PWV*، دما، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، دمای سطح خاک و سرعت باد متغیرهای مهمی در مطالعات آب‌وهوایی و فرایندهای جوی هستند. این متغیرها باعث پدیده‌هایی مانند بارش، ابرزدایی، تشکیل گردوغبار هستند. همچنین این متغیرها به همراه متغیرهای دیگری مانند فشار هوا، جهت باد و ارتفاع تعامل دارند. نتایج تحلیل همبستگی اسپیرمن و *CCA* نشان داد که ضریب همبستگی کانونی حاصل از *CCA* بیشتر از ضرایب همبستگی حاصل از تحلیل همبستگی اسپیرمن بود. این نشان می‌دهد که *CCA* نسبت به تحلیل همبستگی اسپیرمن رابطه بین موقعیت و زمان *PWV* و پارامترهای هواشناسی را بهتر نشان دهد. بر اساس نتایج *CCA*، موقعیت و زمان *PWV* تأثیر معنی‌دار بر میزان پارامترهای هواشناسی دارد. همچنین با توجه به مقدار حاصل برای همبستگی بین موقعیت و زمان *PWV*های برآورد شده و پارامترهای هواشناسی نشان‌دهنده این است که این دو گروه متغیر با یکدیگر مرتبط هستند و همبستگی قوی و مثبت دارند که تغییرات در یکی از آن‌ها باعث تغییرات در دیگری می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که *PWV* به‌عنوان یک شاخص حساس و مهم در تعیین و پیش‌بینی وضعیت جوی و اقلیمی، همبستگی بالایی با پارامترهای مختلف هواشناسی و اقلیمی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که پارامترهایی مانند دما، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، دمای سطح خاک و سرعت باد به طور مستقیم و یا غیرمستقیم می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر رطوبت جو و بنابراین بر *PWV* داشته باشند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

مراجع

[1] J. Wang, L. Zhang, A. Dai et al., "A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements," Journal of Geophysical Research, vol. 112, 2007.

[2] M. King, Y. J. Kaufman, W. P. Menzel et al., "Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS)," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 30, pp. 2-27, 1992.

[3] M. Bevis, S. Businger, T. Herring et al., "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System," Journal of Geophysical Research, vol. 97, 1992.

[4] X. Li, G. Dick, C. Lu et al., "Multi-GNSS meteorology: Real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS observations," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, pp. 6385-6393, 2015.

[5] A. Calori, J. R. Santos, M. Blanco et al., "Ground-based GNSS network and integrated water vapor mapping during the development of severe storms at the Cuyo region (Argentina)," Atmospheric Research, vol. 176, 2016.

[6] W. Hao, M. Wei, G. Li et al., "Analysis of precipitable water vapor from GPS measurements in Chengdu region: Distribution and evolution characteristics in autumn," Advances in Space Research, vol. 52, pp. 656-667, 2013.

[7] X. Li, F. Zus, C. Lu et al., "Retrieving of atmospheric parameters from multi-GNSS in real-time: Validation with water vapor radiometer and numerical weather model," Journal of Geophysical Research Atmospheres, vol. 120, pp. 7189-7204, 2015.

[8] M. Lawrence, "The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 86, pp. 225-233 2005.

[9] V. Akpan, R. Osakwe, and S. Ekong, "A Hypothetical Database-Driven Web-Based Meteorological Weather Station with Dynamic Datalogger System," Journal of Information Engineering and Applications, vol. 1, 2016.

[10] A. Chawla, T. Bangera, C. Kolwalkar et al., "Bluetooth Based Weather Station," International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 28, pp. 98-101, 2015.

[11] R. Dailidė, R. Povilanskas, J. A. Mendez et al., "A new approach to local climate identification in the Baltic Sea's coastal area," Baltica, vol. 32, pp. 210-218, 2019.

[12] V. Iyakaremye, G. Zeng, A. Siebert et al., "Contribution of external forcings to the observed trend in surface temperature over Africa during 1901–2014 and its future projection from CMIP6 simulations," Atmospheric Research, vol. 254, pp. 105512, 2021.

[13] A. Otarola, C. Breuck, T. Travouillon et al., "Precipitable Water Vapor, Temperature, and Wind Statistics At Sites Suitable for mm and Submm Wavelength Astronomy in Northern Chile," Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 131, pp. 045001, 2019.

[14] K. Raispour, "Satellite Estimation of Precipitable Water Vapor (PWV) in Iran Atmosphere of Iran and the Analysis of its Spatial Correlation with Meteorological Variables," Iranian Journal of Soil and Water Research, vol. 51, no. 10, pp. 2543-2557, 2020.

[15] X. Si, F. Guo, Q. Zhao et al., "An Investigation of Extreme Weather Impact on Precipitable Water Vapor and Vegetation Growth—A Case Study in Zhejiang China," Remote Sensing, vol. 13,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

pp. 3576, 2021.

[16] Z. Zhang, Y. Lou, W. Zhang et al., "Correlation Analysis between Precipitation and Precipitable Water Vapor over China Based on 1999-2015 Ground-Based GPS Observations," Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 61, 2022.

[17] S. Serrano, T. Condom, L. Campozano et al., "Harmonic Analysis of the Relationship between GNSS Precipitable Water Vapor and Heavy Rainfall over the Northwest Equatorial Coast, Andes, and Amazon Regions," Atmosphere, vol. 13, pp. 1809, 2022.

[18] L. Zhou, L. Fan, W. Zhang et al., "Long-term Correlation Analysis between Monthly Precipitable Water Vapor and Precipitation using GPS data over China," Advances in Space Research, vol. 70, 2022.

[19] S. Egova, "Integrated water vapour comparison from GNSS and WRF model for Bulgaria in 2013.," Department of meteorology and geophysics, Sofia University Unpublished master's thesis. Bulgaria, 2015.

[20] V. Mendes, "Modeling the Neutral Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques," Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, 1998.

[21] J. Saastamoinen, "Contributions to the theory of atmospheric refraction," Bulletin Géodésique (1946-1975), vol. 105, no. 1, pp. 279-298, 1972.

[22] X. Yang, W. Wang, and Y. Zhou, "Composition analysis and identification model of ancient glass products based on Spearman correlation coefficient and BP neural network," Highlights in Science, Engineering and Technology, vol. 34, pp. 289-299, 2023.

[23] J. A. Ferres Brogin, J. Faber, and D. D. Bueno, "Enhanced use practices in SSVEP-based BCIs using an analytical approach of canonical correlation analysis," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 55, pp. 101644, 2020.

[24] URL4. "https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp."

[25] S. Haji-Aghajany, W. Rohm, T. Hadas et al., "Machine learning-based tropospheric delay prediction for real-time precise point positioning under extreme weather conditions," GPS Solutions, vol. 29, pp. 36, 2024.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.3, Autumn 2025

Research Paper

Canonical Correlation Analysis of Precipitable Water Vapor and meteorological Parameters (Case Study: California, Summer 2021)

Fatemeh Khorramdel [1], Yazdan Amerian [2*]

1- M.Sc. in Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Associte Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In the field of Earth sciences, understanding and modeling the complex network of dependencies among various variables, including these statistical distributions and relationships of the geophysical values, is crucial for a wide variety of applications. Assessing the combined effect of multiple independent variables on several dependent variables is often the focus of many studies. Canonical correlation analysis (CCA) is a valuable tool that enables the simultaneous measurement of the impact of multiple independent variables on multiple dependent variables, providing a more precise and reliable analysis. Precipitable Water Vapor (PWV) is a fundamental parameter in the field of climate change and weather forecasting. This parameter exhibits significant spatial and temporal variations and can be estimated using Global Positioning System (GPS) observations. In this study, canonical correlation analysis was used to examine the relationship between PWV obtained from GPS observations and five meteorological parameters (temperature, relative, dew point temperature, soil surface temperature and wind speed) derived from the ERA-5 model. The study area, located in North America, includes 25 GPS stations. PWV values were estimated using GPS data for a week in summer. The findings show an 88% canonical correlation coefficient between PWV and the meteorological parameters derived from the ERA-5 model, indicating a strong positive correlation where changes in one group of variables lead to changes in the other one.

Key words: *Canonical Correlation Analysis, Precipitable Water Vapor, Global Positioning System, Meteorological Parameters.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.3.1]

Correspondence Address *: No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel *: 021-88770218*
Email*: amerian@email.kntu.ac.ir*