انتخاب روش بهینه درون‌یابی به منظور مدل‌سازی پیوسته میدان جابجایی پوسته زمین با اندازه‌گیری‌های GNSS در فلات ایران

چکیده:

این پژوهش با هدف مقایسهٔ روش‌های درون‌یابی مکانی برای مدل‌سازی پیوسته میدان سرعت پوستهٔ زمین در فلات ایران و بررسی اثر پراکندگی ایستگاه‌ها بر دقت پیش‌بینی انجام شده است. عملکرد چهار روش کریجینگ (Kriging)، اسپلاین (Spline)، وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) و تابع پایهٔ شعاعی (RBF) با داده‌های ۱۰۴ ایستگاه GNSS مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ بررسی شد. برای درنظرگرفتن ناهمگنی زمین‌ساختی، تحلیل‌های منطقه‌ای در پنج مجموعهٔ مکانی و سه سناریوی آموزش–آزمون ۱۰/۹۰، ۲۰/۸۰ و ۳۰/۷۰ انجام گرفت. شاخص‌های MAE، RMSE و MBE برای سنجش خطا و اریبی به‌کار رفتند. افزون بر ارزیابی‌های اولیه، برای سنجش حساسیت نتایج به آرایش ایستگاه‌ها، ۷۰ تقسیم تکرارشوندهٔ مکانی با کنارگذاشتن بلوک‌های جغرافیایی اجرا و عدم‌قطعیت مقایسه‌ها با بوت‌استرپ بلوکی برآورد شد. در سناریوی ۲۰/۸۰، RMSE تجمیع‌شده بر مبنای وزن یکسان هر ایستگاه برای کریجینگ و IDW به‌ترتیب ۷/۹۶۷ و ۷/۸۳۵ میلی‌متر برسال به دست آمد. نزدیک‌بودن این مقادیر و دربرگرفتن صفر در فاصلهٔ اطمینان اختلاف MAE دو روش نشان می‌دهد که برتری آماری قطعی یکی بر دیگری از این داده‌ها استنباط نمی‌شود. نقشه‌ها تفاوت‌هایی از نظر همواری و الگوی مکانی نشان می‌دهند، اما بدون مقایسهٔ کمی با هندسهٔ گسل و مدل معنادار، انطباق بصری با گسل‌ها اثبات‌کنندهٔ برتری فیزیکی هیچ روش نیست. سرعت‌ها در دستگاه ECEF گزارش شده‌اند و برای تفسیر مؤلفه‌های محلی به ENU تبدیل شده‌اند. با توجه به دوره زمانی داده‌ها، نتایج حاضر معطوف به ارزیابی روش‌شناختی برای همان دوره هستند و به معنی پایش کنونی گسل‌ها تلقی نمی شوند.

واژه‌های کلیدی: سامانه ماهواره ای ناوبری جهانی(GNSS)، کریجینگ، اسپلاین، میدان جابجایی

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۱ – مقدمه

پوسته زمین به عنوان لایه بیرونی سیاره، همواره تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی و ژئودینامیکی دچار جابجایی‌ها و تغییرشکل‌های پیوسته[1] است. این جابجایی‌ها که ناشی از فرآیندهایی مانند حرکت صفحات زمین‌ساختی، فعالیت‌های لرزه ای و تغییرات فشار در گوشته، نقش تعیین کننده‌ای در ارزیابی مخاطرات طبیعی مانند زمین لرزه‌ها[2]، فرونشست‌ها[3] و فعالیت‌های آتشفشانی ایفا

[1] Continues deformation
[2] Earthquake
[3] Subsidence

می‌کنند. در این راستا، مدل سازی دقیق میدان جابجایی پوسته زمین[1] به عنوان ابزاری کلیدی در درک رفتار دینامیکی زمین و پیش‌بینی رویدادهای ژئوفیزیکی مورد توجه قرار گرفته است (ملکشاهیان و روفیان نائینی، ۲۰۱۸؛ جمور و همکاران، ۲۰۱۱). سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی[2] (GNSS) با فراهم آوردن داده‌های مکانی با دقت میلیمتری، انقلابی در اندازه‌گیری میدانی جابجایی‌های پوسته ایجاد کرده‌اند. ایران در کمربند زلزله خیز آلپ–هیمالیا قرار گرفته و یکی از فعال‌ترین مناطق زمین ساختی جهان محسوب می‌شود. برخورد صفحه عربستان با صفحه اوراسیا، این منطقه را به آزمایشگاهی طبیعی برای مطالعه فرآیندهای کوهزایی، گسلش[3] و لرزه‌خیزی تبدیل کرده است. با وجود این اهمیت، فقدان یک مدل سرعت یکپارچه و با قدرت تفکیک مکانی مناسب که مبتنی بر داده‌های دقیق و به‌روز باشد همواره به عنوان یک خلأ پژوهشی احساس می‌شده است. مدل‌سازی دقیق میدان جابجایی پوسته زمین از اهمیت بالایی در تحلیل فرآیندهای زمین ساختی، شناسایی نواحی فعال تکتونیکی و ارزیابی خطرات ناشی از گسل‌ها برخوردار است (آرموده اردلان و همکاران، ۱۳۹۰؛ آرموده اردلان و روفیان نائینی، ۱۳۸۸). از آنجا که توزیع مکانی ایستگاه‌های GNSS به‌طور معمول گسسته است، تولید میدان‌های پیوسته و دقیق برای برآورد جابجایی و سرعت پوسته زمین ضروری است؛ به ویژه در مناطقی که دارای گسل‌های فعال و پیچیده هستند. در این زمینه، روش‌های درون‌یابی[4] مکانی با استفاده از داده‌های GNSS به عنوان ابزاری کارآمد در تولید میدان‌های پیوسته جابجایی مطرح شده‌اند (مقتصدآذر و گرافارند، ۲۰۰۹؛ غفاری رزین و وثوقی، ۱۳۹۵).

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که انتخاب روش درون‌یابی مناسب تأثیر زیادی بر دقت نتایج و توان بازنمایی ویژگی‌های زمین‌شناسی مانند گسل‌ها دارد (چلز و دلفینر، ۲۰۱۲). انتخاب روش‌های مناسب درون‌یابی می‌تواند خطای مدل‌سازی را کاهش داده و ساختار دقیق‌تری از میدان جابجایی پوسته تولید کند. علاوه بر آن، پژوهش‌های مختلف بر ضرورت به‌کارگیری روش‌های زمین آماری و مدل‌های پیچیده‌تر برای برآورد دقیق‌تر میدان جابجایی تأکید کرده‌اند (یلماز، ۲۰۱۳؛ ظریفی و همکاران، ۲۰۱۳؛ کریس، ۲۰۱۵). در سالیان اخیر تلاش‌های گسترده‌ای برای تعیین میدان سرعت پوستهٔ زمین با استفاده از ایستگاه‌های مبنای شبکه‌های ژئودزی انجام گرفته است. بسیاری از این تحقیقات نشان داده‌اند که بررسی تغییرات جابجایی ایستگاه‌های GNSS می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد حرکت گسل‌ها و رفتار آنها در طول زمان ارائه دهد. واتسون و همکاران (۲۰۲٤) با هدف استخراج میدان سرعت پوسته، از تلفیق داده‌های GNSS و تصاویر ماهواره‌ای استفاده کردند. خروجی پژوهش آنها یک میدان سرعت برداری با تفکیک مکانی بالا بود که علاوه بر حرکات تکتونیکی، پدیده‌هایی مانند فرونشست زمین ناشی از برداشت آب زیرزمینی را نیز آشکار می‌ساخت. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد ادغام چند منبع داده می‌تواند محدودیت‌های مکانی GNSS را جبران کند. شن و همکاران (۲۰۲۱) برای تخمین میدان نرخ کرنش[5]، یک روش ریاضی مبتنی بر توسعهٔ میدان سرعت به صورت ترکیب خطی از توابع پایه[6] ارائه کردند. در این روش، میدان سرعت به صورت مجموعه‌ای از توابع هموار[7] تعریف می‌شود که ضرایب آنها با استفاده از داده‌های GNSS تعیین می‌گردد. یکی از مزیت‌های این روش امکان برآورد عدم قطعیت در نتایج است. این ویژگی باعث شد نتایج این پژوهش در تحلیل خطر لرزه‌ای و شناسایی نواحی تمرکز استرس کاربرد گسترده‌ای پیدا کند. بیان و همکاران (۲۰۲۰) برای مدل‌سازی میدان سرعت پوسته زمین در چین از روش درون‌یابی مبتنی بر تابع گرین[8] استفاده کردند. در این روش رفتار پوسته زمین به صورت محیط الاستیک در نظر گرفته شده و هر ایستگاه GNSS به عنوان یک منبع نیرو مدل می‌شود. این روش توانست ساختارهای فعال زمین‌ساختی چین مانند کمربند برخوردی تبت را با

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

[1] Crustal displacement field
[2] Global Navigation Satellite System
[3] Fault
[4] Interpolation
[5] Strain rate
[6] Basic functions
[7] Smooth functions
[8] Green's function

دقت بالا مدل‌سازی کند. مزیت این روش نسبت به درون‌یابی‌های صرفاً آماری، در نظر گرفتن خواص فیزیکی پوسته زمین است. شیرزائی (۲۰۲۳) چارچوب فیلتر کالمن [1] را برای مدل سازی میدان جابجایی سه بعدی ارائه کردند. در این روش داده‌های سری زمانی GNSS و InSAR [2] به عنوان مشاهدات ورودی وارد یک مدل دینامیکی می‌شوند. فیلتر کالمن امکان به‌روزرسانی تدریجی میدان جابجایی را با ورود داده‌های جدید فراهم می‌کند. الگوریتم فیلتر کالمن با کمینه کردن خطای پیش‌بینی، میدان جابجایی را در هر گام زمانی تخمین می‌زند. نتیجه این روش استخراج میدان جابجایی سه‌بعدی با دقت میلی‌متری است که برای مطالعه تغییرشکل‌های پس لرزه‌ای و فرونشست تدریجی بسیار مناسب است. محرابی و همکاران (۲۰۱۹) برای استخراج میدان جابجایی سه بعدی از داده‌های InSAR و روش پایدارسازی تیخونوف [3] استفاده کردند. در این روش مسئله معکوس استخراج جابجایی به صورت دستگاه معادلات خطی تعریف شده که به دلیل نویز داده‌ها، ناپایدار است. برای حل این مشکل، جمله توازن به تابع هدف [4] اضافه می‌شود تا پاسخ هموار و پایدار به دست آید. همچنین از روش LS-VCE [5] برای تعیین وزن بهینه داده‌ها استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد ترکیب داده‌های GNSS و InSAR باعث افزایش دقت مؤلفه قائم جابجایی می‌شود.

در بسیاری از مطالعات پیشین، تنها از یک یا دو روش درون‌یابی برای مدل‌سازی میدان جابجایی استفاده شده و مقایسه جامع و نظام‌مند بین روش‌های مختلف، به ویژه در مناطقی با ساختار زمین‌ساختی پیچیده کم است. در این راستا، انجام پژوهش‌های دقیق برای مقایسه و ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی از جهت دقت، قابلیت بازنمایی ساختارهای زمین‌شناسی و حساسیت به شرایط خاص منطقه‌ای ضروری است. این تحقیق به ویژه در مناطق با فعالیت‌های لرزه‌ای و گسل‌های پنهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نتایج آن می‌تواند به شبیه‌سازی دقیق‌تری از تغییرات پوسته زمین و پیش‌بینی بهتر خطرات زمین‌لرزه‌ای منجر شود. علاوه بر این، با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌های ژئودزی و استفاده از داده‌های GNSS در ترکیب با مدل‌های درون‌یابی، هنوز درک دقیقی از چگونگی تأثیر تفاوت‌های درون‌یابی بر دقت مدل‌های تغییرشکل پوسته در مقیاس‌های مختلف وجود ندارد.

هدف اصلی این تحقیق، مطالعه و ارزیابی کاربردی-تحلیلی روش‌های درون‌یابی تابع پایه شعاعی (RBF) [6] در کنار مدل‌های کریجینگ [7]، مدل اسپلاین [8] و درون‌یابی معکوس وزنی فاصله (IDW) [9] جهت محاسبه میدان جابجایی پوسته زمین با استفاده از اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های GNSS در فلات ایران و در نهایت انتخاب بهینه‌ترین مدل است. جهت دستیابی به این هدف، مشاهدات ۱۰۴ ایستگاه GNSS در فلات ایران مابین سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۰ پردازش شده و میدان‌های سرعت حاصل، در مدل‌های درون‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین با در نظر گرفتن سناریوهای مختلفی از تعداد مشاهدات ورودی به مدل و نیز مقایسه شاخص‌های آماری مختلف در ایستگاه‌های آزمون، دقیق‌ترین مدل درون‌یابی برای محاسبه میدان جابجایی پوسته در فلات ایران حاصل شده است.

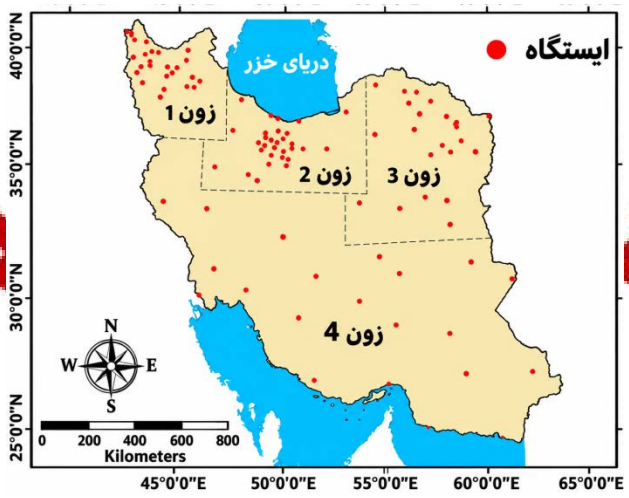
۲- داده‌ها، منطقه مطالعاتی، پیش پردازش‌ها

[1] Kalman filter
[2] Interferometric synthetic-aperture radar
[3] Tikhonov regularization method
[4] Objective function
[5] Least-square variance component estimation
[6] Radial Basis Function Interpolation
[7] Kriging
[8] Spline
[9] Inverse distance weighting

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

ایران بر روی کمربند فعال برخورد صفحه عربی–اوراسیا[1] قرار گرفته و یکی از فعال‌ترین مناطق زمین‌ساختی جهان محسوب می‌شود. برخورد این دو صفحه، این منطقه را به آزمایشگاهی طبیعی برای مطالعه فرآیندهای کوهزایی، گسلش و لرزه‌خیزی تبدیل کرده است. به دلیل ناهمگنی رفتار تکتونیکی و تغییرشکل پوسته، نرخ جابجایی و تجمع استرین در نقاط مختلف یکسان نیست (کردی، ۱۳۸۷؛ روفیان نائینی و آزموده اردلان، ۱۳۸٦). منطقه مورد بررسی شامل زون‌های مختلف است که از نظر رفتار تکتونیکی و تغییرشکل پوسته تفاوت معنی‌دار دارند. به همین دلیل، منطقه مورد بررسی به پنج زون ژئودینامیکی مجزا تقسیم شده است. انتخاب این زون‌ها بر اساس سه معیار اصلی انجام شده است: (۱) فعالیت زمین‌ساختی متفاوت[2] در هر منطقه، (۲) تراکم[3] و کیفیت ایستگاه‌های GNSS موجود، و (۳) نمایندگی الگوهای کلی تغییرشکل در کشور. این زون‌بندی نه یک ساده‌سازی صرف، بلکه یک ضرورت فیزیکی است؛ زیرا میدان جابجایی پوسته در مقیاس‌های وسیع رفتاری همگن نداشته و تفکیک زون‌ها با رفتار تقریبا مشابه، امکان مدل‌سازی دقیق‌تری را فراهم می‌آورد. پنج زون در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارت‌اند از :زون ۱ (شمال‌غرب)، زون ۲ (البرز مرکزی)، زون ۳ (شمال‌شرق)، زون ٤ (نیمه‌جنوبی) و زون ٥ (کل کشور – مجموعه تمام ایستگاه‌ها) (شکل ۱).

مقاله در نوبت انتشار
نشریه ... مشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



شکل ۱. نمایش چگونگی توزیع ایستگاه‌های GNSS در فلات ایران به همراه زون‌بندی ایستگاه‌ها

۲-۱- داده‌های GNSS

در این پژوهش، مجموعه داده‌های مورد استفاده شامل اندازه‌گیری‌های ۱۰٤ ایستگاه شبکه GNSS در ایران است که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ جمع‌آوری و پردازش شده‌اند. پردازش مشاهدات خام با استفاده از نرم‌افزار برنیز نسخه ۵.۲ انجام شده و طی آن، برای هر ایستگاه، مختصات روزانه در طول بازه زمانی مورد مطالعه محاسبه و به صورت سری زمانی ذخیره شدند. این سری‌های زمانی شامل مولفه‌های X,Y,Z در دستگاه زمین مرکز[4] هستند. برای تخمین سرعت‌ها[5] با برازش یک مدل خطی به سری زمانی مختصات، سرعت هر ایستگاه در سه جهت برآورده می‌شود. این سه مؤلفه، ورودی اصلی روش‌های درون‌یابی را تشکیل می‌دهند.

۲-۲- دستگاه مختصات و چارچوب مرجع

---

[1] Arabic-Eurasian plate
[2] Different tectonic activity
[3] Density
[4] Earth-fixed
[5] Velocity Estimation

سرعت ایستگاه‌ها با مؤلفه‌های Vx، Vy و Vz در دستگاه کارتزین زمین‌مرکزِ ثابت بر زمین (ECEF) ارائه شده است. درون‌یابی‌های مبنای این پژوهش روی مؤلفه‌های ECEF انجام شده‌اند. برای گزارش مؤلفه‌های محلیِ شرق، شمال و قائم، بردار سرعت هر ایستگاه با ماتریس دوران مبتنی بر طول و عرض ژئودتیکی همان ایستگاه به دستگاه ENU تبدیل شده است؛ رابطهٔ مورد استفاده عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که ϕ و λ به‌ترتیب عرض و طول ژئودتیکی‌اند. این تبدیل جهت مؤلفه‌ها را مشخص می‌کند، اما حذف حرکت صلب صفحه یا تعیین مرجع زمین‌ساختیِ سرعت را به‌خودی‌خود انجام نمی‌دهد. در این بازتحلیل حرکت صلب صفحه از سرعت‌ها کسر نشده است؛ بنابراین از انتساب مستقیم Vx و Vy به شرق و شمال و از استنتاج حرکت نسبی نسبت به صفحهٔ اوراسیا بدون تعیین چارچوب مرجع خودداری شده است. اعتبار تفسیرها به بازهٔ ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ محدود می‌شود. محاسبهٔ مؤلفه‌های محلی به صورت:

$$V_E = -\sin(\lambda)V_X + \cos(\lambda)V_Y \quad (۲)$$

$$V_N = -\sin(\varphi)\cos(\lambda)V_X - \sin(\varphi)\sin(\lambda)V_Y + \cos(\varphi)V_Z \quad (۳)$$

$$V_U = \cos(\varphi)\cos(\lambda)V_X + \cos(\varphi)\sin(\lambda)V_Y + \sin(\varphi)V_Z \quad (٤)$$

انجام می‌شود. در این روابط ϕ و λ به‌ترتیب عرض و طول ژئودتیکیِ همان ایستگاه‌اند؛ به همین دلیل از یک ماتریس دوران واحد برای همهٔ ایستگاه‌ها استفاده نمی‌شود. این دوران طول بردار را ثابت نگه می‌دارد، اما مؤلفه‌های آن را بر حسب راستاهای محلی بیان می‌کند. برای محاسبهٔ سرعت زمین‌ساختی نسبت به صفحه‌ای مشخص، افزون بر تبدیل مختصات، باید سرعت حرکت صلب همان صفحه با مدل دوران مستند و چارچوب مرجع معلوم حذف شود. چون این اطلاعات برای مشاهدات اولیه گزارش نشده‌اند، تنها تبدیل هندسیِ مؤلفه‌ها در این تحقیق قابل تأیید است.

۳-۲- پراکندگی مکانی ایستگاه‌ها

پراکندگی ایستگاه‌های GNSS در زون‌های مختلف یکسان نبوده و این ناهمگونی، چالش مهمی در مدل‌سازی میدان جابجایی پوسته محسوب می‌شود. در زون‌های ۱ و ۲ (شمال‌غرب و البرز مرکزی)، تراکم ایستگاه‌ها نسبتاً مناسب بوده و ساختار مکانی همگن‌تری دارند. زون ۳ (شمال‌شرق) با تراکم متوسط و الگوی نسبتاً منظم، شرایط متفاوتی را ارائه می‌دهد. در مقابل، زون ٤ (نیمه‌جنوبی) با پراکندگی نامنظم‌تر و فاصله‌های بیشتر بین ایستگاه‌ها، نشان‌دهنده شرایطی با پیچیدگی مکانی بالاتر است. زون ۵ نیز شامل تمامی ۱۰٤ ایستگاه در سطح کل کشور بوده و دیدگاه جامعی از تغییرات میدان سرعت در مقیاس سراسری ارائه می‌دهد.

٤-۲- محدودیت‌های داده

مطالعه حاضر با محدودیت‌های ذاتی زیر مواجه است که می‌بایست در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرند:

- بازه زمانی محدود داده‌ها: داده‌های مورد استفاده صرفاً به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ محدود می‌شوند. این بازه زمانی نسبتاً کوتاه (۳ سال) و قدیمی، امکان بررسی تغییرات بلندمدت پوسته یا رویدادهای پس از این دوره (مانند زلزله‌های بزرگ اخیر) را فراهم نمی‌سازد. بنابراین، نتایج این مطالعه صرفاً برای این بازه زمانی معتبر بوده و تعمیم آن به دوره‌های جدیدتر یا شرایط پوسته‌ای تغییر یافته، نیازمند داده‌های به‌روز است.

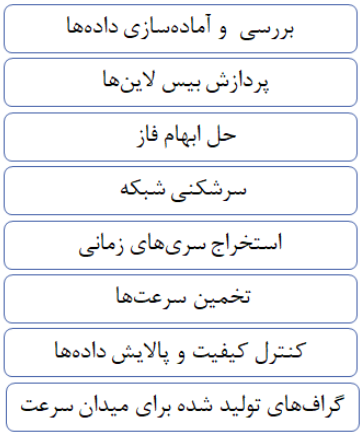
مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

- تعداد و پراکندگی ایستگاه‌ها: اگرچه ۱۰۴ ایستگاه، حجم مناسبی از داده‌ها را فراهم می‌آورد، اما در برخی زون‌ها (به ویژه زون ٤) تراکم ایستگاه‌ها پایین بوده و ممکن است دقت درون‌یابی در مناطق فاقد پوشش ایستگاهی کاهش یابد.

۳ـ روش‌شناسی

۳ـ۱ـ پیش‌پردازش مشاهدات GNSS

به منظور تولید میدان سرعت با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های دائمی GNSS، پردازش مشاهدات با بهره‌گیری از نرم‌افزار برنیز[1] انجام شده است (داچ و همکاران، ۲۰۱۵). مراحل پردازش مشاهدات در نرم‌افزار برنیز، در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل۲. مراحل مختلف پردازش داده‌های خام در نرم‌افزار برنیز و استخراج میدان سرعت

فرایند پردازش در این نرم‌افزار شامل مراحل متعددی از جمله بررسی و آماده‌سازی داده‌ها، پردازش بیس‌لاین‌ها، حل ابهام فاز (Ambiguity Resolution)، سرشکنی شبکه، استخراج سری‌های زمانی، تخمین سرعت‌ها و در نهایت کنترل کیفیت و پالایش داده‌ها است. این مراحل به‌ویژه «حل ابهام فاز» و «کنترل کیفیت»، نقش حیاتی در حذف خطاهای سیستماتیک (مانند خطاهای چندمسیری و نویزهای گیرنده) ایفا می‌کنند و دقت مختصات روزانه را به سطح میلی‌متری می‌رسانند. برای هر ایستگاه، مختصات روزانه در طول بازه زمانی مورد مطالعه محاسبه و به صورت سری زمانی ذخیره می‌شوند. این سری‌های زمانی شامل مولفه‌های X,Y,Z در دستگاه زمین مرکز[2] هستند. برای تخمین سرعت‌ها[3] با برازش یک مدل خطی به سری زمانی مختصات، سرعت هر ایستگاه در سه جهت برآورد می‌شود. با وجود کنترل کیفیت در پردازش GNSS، عدم‌قطعیت سرعت‌های برآوردشده ممکن است تحت تاثیر نویز مشاهدات، تغییرات کوتاه‌مدت و پراکندگی ایستگاه‌ها باشد. در مدل‌های زمین آماری، پارامتر ناگت (Nugget Effect) واریانس در مقیاس‌های بسیار کوتاه و بخش ناپیوستهٔ واریوگرام در مبدأ را نشان می‌دهد؛ این مؤلفه ممکن است علاوه بر خطای اندازه‌گیری، تغییرپذیری زیرمقیاس یا فرایندهای مکانی حل‌نشده را نیز دربرگیرد. ازاین‌رو، ناگت را نمی‌توان با واریانس خطای مشاهدهٔ GNSS یکسان دانست و وجود آن تضمین نمی‌کند که میدان برآوردشده عاری از نویز است. در کریجینگ، بخش مربوط به خطای اندازه‌گیری را می‌توان جداگانه از ناگت و با واریانس هر ایستگاه در قطر ماتریس کوواریانس اعمال کرد؛ این تمایز در تفسیر عدم‌قطعیت مدل اهمیت دارد.

مقاله در انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

[1] Bernese software
[2] Earth-fixed
[3] Velocity Estimation

داده‌های این مطالعه برای تمام ۱۰۴ ایستگاه انحراف معیار مؤلفه‌های سرعت را در اختیار می‌گذارد. این مقادیر در واحد متر بر سال گزارش شده‌اند و در بازتحلیل پس از تبدیل واحد، مربّع آن‌ها به‌عنوان واریانس خطای ایستگاه‌ی به قطر ماتریس کوواریانس کریجینگ افزوده شده است. برای تبدیل تقریبی عدم‌قطعیت به ENU، از:

$$\sum_{ENU} = \mathbf{R}(\varphi,\lambda)\sum_{ECEF} \mathbf{R}^T(\varphi,\lambda) \quad (۵)$$

استفاده شد و با توجه به نبود کوواریانس متقابل مؤلفه‌ها، $\sum_{ECEF}$ قطری فرض گردید؛ این فرض یک تقریب است و جایگزین کوواریانس کامل سرعت‌ها نیست. نتایج به‌عنوان بررسی روش‌شناختیِ داده‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ تفسیر می‌شوند و دلالتی بر پایش فعلی گسل‌های فعال ندارند. میان عدم‌قطعیت و همبستگی فضایی نیز تفاوت روش‌شناختی وجود دارد: انحراف معیار بزرگ یک ایستگاه نشان‌دهندهٔ برآورد کم‌دقت‌ترِ سرعت در آن نقطه است، درحالی‌که برد همبستگی و ناگت ویژگی‌های مدل تغییرپذیری مکانی را توصیف می‌کنند. اگر سری زمانی اصلی دارای نویز رنگی، تغییر فصلی یا جابه‌جایی ناگهانی ناشی از عملیات ایستگاه یا رخداد لرزه‌ای بوده باشد، انحراف معیار حاصل از مدل خطی ساده لزوماً عدم‌قطعیت کامل سرعت نیست.

مقاله در نوبت انتشار

۳ـ۲ـ درون‌یابی داده‌ها

در این پژوهش، چهار روش متداول درون‌یابی انتخاب و پیاده‌سازی شده‌اند که هر یک بر اساس مبانی نظری متفاوتی عمل می‌کنند.

نشریه علمی پژوهشی

ـ مدل کریجینگ

یکی از تکنیک‌های بسیار مناسب و پیشرفته برای تحلیل فضایی[۱] و توزیع منطقه‌ای داده‌های مکانی استفاده از روش کریجینگ می‌باشد. کریجینگ یک روش درون‌یابی بهینه[۲] است که متغیرهای استفاده شده در آن تصادفی بوده و از تابع هندسی مشخصی تبعیت نمی‌کنند. این روش در دهه شصت میلادی توسط مهندس فرانسوی جرج ماترون مورد استفاده قرار گرفت (ماترون و همکاران، ۱۹۷۱). درون‌یابی کریجنگ از دو مرحله تشکیل شده است: مرحله اول ساختن تابع رگرسیون[۳] با استفاده از داده‌های ورودی و مرحله دوم پردازش‌های آماری[۴] جهت تعیین بایاس‌ها. این دو مرحله بصورت رابطه زیر نمایش داده می‌شوند:

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

$$Y(x) = f(x) + Z(x) \quad (۶)$$

در رابطه (۶) f(x) تابع رگرسیون و Z(x) پردازش‌های آماری با در نظر گرفتن میانگین صفر و واریانس σ^2 و نیز ماتریس همبستگی[۵] Ψ می‌باشند. در حالت کلی برای مدل کریجینگ می‌توان نوشت (لی و هیپ، ۲۰۰۸):

$$f(x) = \sum^{p} \alpha_i b_i(x) \quad (۷)$$

در رابطه (۷) $b_i(x)$ توابع پایه و $\alpha = (\alpha_1,\ldots,\alpha_p)$ نشان‌دهنده ضرایب مدل هستند که می‌بایستی برآورد شوند. برای انتخاب مدل واریوگرام مناسب در روش کریجینگ، سه مدل نظری کروی، نمایی و گوسی بر روی واریوگرام تجربی برازش داده می‌شوند. کیفیت برازش این مدل‌ها با استفاده از معیار اطلاعات آکاییک (AIC) مقایسه می‌گردد. مدلی با کمترین مقدار AIC، به عنوان

---

[1] Spatial Analysis
[2] Optimal Interpolation Method
[3] Regression Function
[4] Statistical Process
[5] Correlation Matrix

مدل برتر انتخاب گردید؛ زیرا این معیار هم برازش مدل و هم تعداد پارامترهای آن را به طور همزمان در نظر می‌گیرد. فرمول محاسبه AIC در این پژوهش به صورت زیر است:

$$AIC = n\ln\left(\frac{SSR}{n}\right) + 2k + n\ln(2\pi) + n \quad (۸)$$

که در آن n تعداد نمونه‌ها، SSR مجموع مربعات باقیمانده‌های برازش و k تعداد پارامترهای آزاد مدل می‌باشد.

ـ مدل اسپلاین

درون‌یابی اسپلاین یکی از روش‌های مؤثر و پرکاربرد در آنالیز عددی و مدل‌سازی ریاضی است که به منظور تقریب توابع[1] و تخمین مقادیر در نقاط میانی بر اساس داده‌های گسسته[2] به کار می‌رود. در این روش، به جای استفاده از یک چندجمله‌ای منفرد و سراسری برای کل دامنه، تابع مورد نظر به صورت تکه‌ای تعریف می‌شود (راست بود، ۱۴۰۲). در هر زیربازه میان دو نقطه متوالی از داده‌ها، یک چند جمله‌ای با درجه پایین (معمولاً درجه سه) برازش می‌شود. این چند جمله‌ای‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که در نقاط موسوم به گره نه تنها خود تابع، بلکه مشتقات مرتبه اول و دوم آن نیز پیوسته باشند. این ویژگی موجب می‌شود منحنی برازش یافته ضمن عبور دقیق از تمام نقاط، نوسانات غیرضروری نداشته و همواری قابل قبولی ارائه دهد. برای این منظور در هر زیر بازه $[x_i, x_{i+1}]$ درون‌یاب تکه‌ای S در شرایط زیر صدق کند (کویواس و همکاران، ۲۰۲۴):

$$s(x) = s_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (۹)$$

که در آن a_i، b_i، c_i و d_i ضرایبی هستند که بایستی تعیین شوند. از آنجایی که برای n + 1 نقطه داده شده، n قطعه وجود دارد، در مجموع ۴n ضریب وجود دارد.

ـ مدل معکوس وزنی فاصله

درون‌یابی وزندهی معکوس فاصله (IDW) یکی از روش‌های ساده و پرکاربرد در علوم مختلف است که برای تخمین مقادیر نامعلوم در یک سطح براساس مقادیر معلوم نقاط نمونه[3] اطراف بکار گرفته می‌شود. اساس این روش بر این اصل استوار است که تأثیر نقاط نمونه نزدیک‌تر بر مقدار تخمینی یک نقطه مجهول، بیشتر از نقاط دورتر است. به عبارت دیگر، وزن هر نقطه نمونه در محاسبه مقدار نقطه مجهول، با عکس فاصله‌اش تا آن نقطه متناسب است (بن موشه، ۲۰۲۵). رابطه ریاضی مدل IDW به صورت زیر است (ونگ، ۲۰۱۷):

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{n} w_i z_i \Big/ \sum = \frac{w_1}{\sum w_i} z_1 + \frac{w_2}{\sum w_i} z_2 + \ldots + \frac{w_i}{\sum w_i} z_i \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، Z_i مقدار مشاهداتی و W_i وزن مقادیر می‌باشد. این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط فقط فاصله را مد نظر قرار می‌دهد.

ـ مدل تابع پایه شعاعی

[1] Functions approximation
[2] Discrete data
[3] Sample points

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

این روش به دلیل استقلال از شبکه‌بندی[1] و توانایی کار با داده‌های پراکنده، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در حل مسائل عددی و مهندسی معرفی شده است. در روش تابع پایع شعاعی، مقدار تابع در هر نقطه از دامنه به فاصله آن نقطه از نقاط داده وابسته بوده و جهت‌گیری فضایی نقشی در تعیین مقدار تابع ندارد (رایت و فورنبرگ، ۲۰۰۳). مدل RBF برخلاف مدل‌های دیگر، برای مسائل با ساختار پیچیده مناسب است. تابع درون‌یاب در این روش به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که از تمامی نقاط عبور کرده و ضرایب آن از طریق حل یک دستگاه معادلات خطی تعیین می‌شوند. از آنجا که تمامی نقاط به‌طور هم‌زمان در ساخت تابع مشارکت دارند، روش درون‌یابی تابع پایع شعاعی در دسته روش‌های سراسری[2] قرار می‌گیرد. در این روش رابطه ریاضی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Z = w_1\Phi_1 + w_2\Phi_2 + w_3\Phi_3 + \ldots \quad (11)$$

در رابطه فوق Φ_i مقدار مشاهداتی و w_i وزن مقادیر نمونه است. به منظور تکرارپذیری نتایج، پارامترهای دقیق پیاده‌سازی هر یک از چهار روش در جدول (۱) ارائه شده است. این پارامترها بر اساس ساختار فضایی داده‌ها و آزمون‌های تجربی تعیین شده‌اند. محاسبات و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این پژوهش بر روی یک سیستم کامپیوتری با مشخصات فنی استاندارد انجام پذیرفت که شامل پردازنده Intel Core i5-2430M با فرکانس پایه ۲.٤ گیگاهرتز، حافظه موقت به حجم ۸ گیگابایت از نوع DDR4 و سیستم‌عامل Windows 10 است.

جدول ۱. پارامترهای دقیق پیاده‌سازی روش‌های درون‌یابی مورد استفاده در پژوهش

نام روش	پارامترهای کلیدی	مقدار/تنظیمات	توضیحات	زمان اجرا (ثانیه)
Kriging	نوع کریجینگ	Ordinary Kriging	استفاده از میانگین محلی برای حذف روند	۱/۵۱
	مدل واریوگرام	Spherical / Gaussian / Exponential	انتخاب مدل بهینه بر اساس کمترین معیار AIC	
	Range	متغیر	تعیین شده از طریق برازش واریوگرام تجربی	
	Sill	متغیر	تعیین شده از طریق برازش واریوگرام تجربی	
IDW	توان وزن‌دهی	۱	مقادیر رایج برای تعادل بین هموارى و جزئیات	۱/۲۳
	تعداد همسایگان	۱۰–۱۵	بسته به سناریوی تراکم ایستگاه‌ها	
Spline	نوع اسپلاین	Regularized	تولید سطحی هموار و مشتقات مرتبه‌ی اول پیوسته	۱/۳۷
	تعداد همسایگان	۱۲	بسته به سناریوی تراکم ایستگاه‌ها	
	Weight	۰/۱	مقدار پیش‌فرض برای پایداری عددی	
RBF	نوع تابع پایه	Multiquadric	انتخاب بر اساس کمترین خطا در آزمون‌های اولیه	۱/۷۶
	تعداد همسایگان	۱۰–۱۵	بسته به سناریوی تراکم ایستگاه‌ها	
	Shape Factor	۱	مقدار پیش‌فرض برای توابع گوسی	

برای پیاده‌سازی مؤثر مدل کریجینگ، برازش توابع واریوگرام تجربی بر روی مدل‌های نظری استاندارد (شامل گوسی، نمایی و کروی) با استفاده از معیار کمترین مربعات و شاخص AIC [3] انجام شد تا بهترین مدل توصیف‌کننده ساختار فضایی داده‌ها انتخاب گردد. نتایج حاصل از برازش مدل‌ها در جدول (۲) گزارش شده است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که انتخاب مدل واریوگرام به‌طور قابل‌توجهی به مولفه‌ها (Vx, Vy, Vz و V_{res})، زون ژئودینامیکی و همچنین سناریوی آموزشی بستگی دارد. در مجموعه داده‌های زون ۵ و بخش‌هایی از زون ۱ و ٤، مدل‌های کروی و نمایی غالب هستند، در حالی که در مجموعه داده‌های زون ۲ و ۳، مدل گوسی به‌عنوان بهترین برازش انتخاب شده است. این تنوع در انتخاب مدل، بازتاب‌دهنده تفاوت در

[1] Mesh-free method
[2] Global
[3] Akaike Information Criterion

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

ماهیت فیزیکی و الگوهای همبستگی فضایی مؤلفه‌های مختلف سرعت است؛ به‌طوری که غالب بودن مدل گوسی در برخی سناریوها نشان‌دهنده وجود ساختار همبستگی نرم و پیوسته در مقیاس‌های کوتاه است، در حالی که حضور مدل‌های کروی و نمایی در سایر موارد، وجود نوسانات یا ساختارهای همبستگی متفاوت در مقیاس‌های بلندتر را القا می‌کند.

بررسی پارامترهای واریوگرام نیز حاکی از آن است که مقادیر Sill برای تمامی متغیرها در مقیاس بسیار کوچکی قرار دارند که نشان‌دهندهی نوسانات محدود حول میانگین در داده‌های سرعت است. از سوی دیگر، مقادیر Range با برد بلند اعداد بسیار بزرگی را نشان می‌دهند، که بیانگر پابرجا بودن همبستگی فضایی سرعت تا مقیاس‌های جغرافیایی بسیار گسترده است. همچنین، شاخص AIC نشان می‌دهد که مدل‌های انتخاب شده برای مجموعه داده‌های زون ۳ و زون پنج سناریوی ۳ دارای بهترین برازش (کمترین مقدارAIC) هستند، در حالی که مجموعه داده‌های زون ۱ و ٤ با مقادیر AIC بالاتر، نشان‌دهنده چالش‌های بیشتری در برازش مدل‌های استاندارد هستند. با توجه به اینکه سرعت برآیند اغلب مدل متفاوتی نسبت به مؤلفه‌های تکی خود دارد، این موضوع اهمیت استفاده از مدل‌های اختصاصی برای هر متغیر را در فرآیند کریجینگ برای جلوگیری از صاف‌سازی بیش‌ازحد یا خطای پیش‌بینی برجسته می‌سازد.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

جدول ۲. پارامترهای بهینه برازش مدل واریوگرام برای روش کریجینگ در زون‌ها و سناریوهای مختلف

Range_H	Range_L	Sill_H	Sill_L	AIC	بهترین مدل	متغیر	سناریو	زون
170383.1235	0	0.00005	0.00003	-395.92257	Exponential	Vx	1	1
83931.54225	0	0.00004	0.00003	-397.63882	Spherical	Vy		
125986.7773	0	0.00006	0.00003	-381.93917	Spherical	Vz		
190154.3217	0	0.00006	0.00003	-389.0276	Exponential	V_res		
245200.9505	0	0.00007	0.00003	-379.46892	Exponential	Vx	2	
195641.8247	0	0.00005	0.00002	-383.54017	Exponential	Vy		
187873.673	0	0.00008	0.00004	-369.73706	Exponential	Vz		
236496.1271	0	0.00007	0.00003	-378.68076	Exponential	V_res		
341275.1324	0	0.00009	0.00002	-365.54765	Exponential	Vx	3	
128181.2744	0	0.00006	0.00003	-369.37144	Spherical	Vy		
201520.2746	0	0.00006	0.00002	-362.41842	Exponential	Vz		
356865.835	0	0.0001	0.00002	-360.85402	Exponential	V_res		
239121.9866	49504.04907	0.00008	0.00002	-425.44191	Gaussian	Vx	1	2
365637.185	16616.22906	0.0002	0	-410.25591	Gaussian	Vy		
217852.0453	63986.61786	0.00012	0.00004	-410.63432	Gaussian	Vz		
255054.5596	48323.17546	0.00012	0.00002	-410.65258	Gaussian	V_res		
259352.5862	66794.35703	0.00007	0.00002	-428.66045	Gaussian	Vx	2	
392278.8418	47410.29557	0.00022	0	-407.5112	Gaussian	Vy		
403988.7724	23295.06045	0.00029	0	-392.04007	Gaussian	Vz		
286676.8115	63467.88045	0.00012	0.00003	-410.52163	Gaussian	V_res		
287235.6593	59090.16816	0.00008	0.00002	-426.19428	Gaussian	Vx	3	
379941.1926	24794.30111	0.00017	0	-405.44792	Gaussian	Vy		
479124.3392	0	0.00031	0	-393.12844	Gaussian	Vz		
399532.5084	24386.5934	0.00017	0	-411.43991	Gaussian	V_res		
236001.652	46431.91881	0.00001	0	-447.88546	Gaussian	Vx	1	3
246191.5417	36242.02912	0.00005	0.00001	-402.0991	Gaussian	Vy		
230762.4588	51671.11201	0.00002	0.00001	-440.3506	Gaussian	Vz		
236580.5282	45853.04257	0.00001	0	-454.34518	Gaussian	V_res		
263285.4683	19148.10252	0.00002	0.00001	-449.60839	Gaussian	Vx	2	
254941.6508	27491.91999	0.00005	0.00001	-420.59286	Gaussian	Vy		
240997.6374	41435.93334	0.00002	0.00001	-460.33288	Gaussian	Vz		
253931.1197	28502.45107	0.00002	0	-463.57675	Gaussian	V_res		
226055.9704	23315.04675	0.00002	0.00001	-451.85285	Gaussian	Vx	3	
294149.0319	3806.16564	0.00007	0.00001	-416.26069	Gaussian	Vy		
224287.9584	25083.05875	0.00003	0.00001	-440.11222	Gaussian	Vz		
222481.9448	26889.0724	0.00002	0.00001	-455.0559	Gaussian	V_res		
400383.5444	11390.7041	0.00013	0.00009	-377.59814	Spherical	Vx	1	4
455156.163	3793.70924	0.0002	0.00012	-360.12449	Spherical	Vy		
477225.7235	0	0.00008	0.00005	-396.37625	Exponential	Vz		

308666.7917	0	0.00014	0.00007	-362.21201	Gaussian	V_res		
344956.9375	0	0.00011	0.00006	-370.88663	Exponential	Vx	2	
685771.7989	0	0.00015	0.00007	-362.70418	Exponential	Vy		
363956.4345	0	0.00006	0.00003	-393.56736	Exponential	Vz		
284820.93	0	0.00013	0.00006	-365.93907	Gaussian	V_res		
152244.9381	0	0.0001	0.00006	-377.99199	Gaussian	Vx	3	
181212.7339	0	0.00014	0.00007	-361.2292	Gaussian	Vy		
144037.3243	0	0.0001	0.00006	-380.36804	Gaussian	Vz		
3585037.482	0	0.00016	0	-369.4326	Exponential	V_res		
628657.4169	275938.4968	0.00008	0.00006	-419.00851	Spherical	Vx	1	5
495809.7589	226875.7769	0.00009	0.00007	-419.53408	Spherical	Vy		
434460.8229	194370.0727	0.00007	0.00006	-429.8335	Spherical	Vz		
525469.2784	85360.98648	0.00007	0.00005	-407.61056	Spherical	V_res		
661044.3603	225727.5302	0.00006	0.00005	-438.24138	Exponential	Vx	2	
470839.0372	235218.307	0.00009	0.00007	-424.4468	Spherical	Vy		
495891.2826	185205.2844	0.00008	0.00006	-417.16874	Spherical	Vz		
461522.5924	105950.1867	0.00005	0.00004	-424.43104	Spherical	V_res		
1449151.654	50149.63832	0.00009	0.00005	-412.89689	Exponential	Vx	3	
1362423.288	22116.28516	0.00009	0.00005	-410.3377	Exponential	Vy		
1008054.622	45171.86507	0.00007	0.00004	-416.91102	Exponential	Vz		
1670952.197	0	0.0001	0.00004	-402.65337	Exponential	V_res		

مقاله فقط نمونه است
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۳-۳- سناریوهای آموزش-آزمون

به منظور ارزیابی تاثیر تعداد داده‌های در دسترس بر دقت و پایداری مدل‌ها، سه سناریوی مختلف برای تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های آموزش و آزمون تعریف شده است. این سناریوها شامل نسبت‌های ۹۰—۱۰، ۸۰—۲۰ و ۷۰—۳۰ (به‌ترتیب برای داده‌های آموزش—آزمون) هستند. در هر سناریو، داده‌های آموزش برای انجام درون‌یابی مکانی مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد مدل با استفاده از داده‌های آزمون مستقل که در فرایند درون‌یابی شرکت نداشته‌اند، ارزیابی می‌شود (جدول ۳).

برای سنجش پایداری رتبه‌بندی روش‌ها نسبت به گزینش ایستگاه‌های آزمون، در کنار سناریوهای اولیه، اعتبارسنجی مکانی تکرارشونده اجرا شد. ایستگاه‌ها در بلوک‌های جغرافیاییِ حدود ۲×۲ درجه قرار گرفتند و در هر تکرار چند بلوک کامل کنار گذاشته شد؛ برازش مدل فقط با ایستگاه‌های آموزش انجام گرفت و سپس خطا در ایستگاه‌های آزمون محاسبه شد .برای سهم آزمون ۱۰ درصد، ۲۰ تقسیم؛ برای ۲۰ درصد، ۳۰ تقسیم؛ و برای ۳۰ درصد، ۲۰ تقسیم اجرا شد. در این تقسیم‌ها ایستگاهِ آزمون به آموزش وارد نشد و پارامترهای برازش در هر مرحله فقط از آموزش به دست آمدند. آزمون اصلیِ مقایسهٔ دقت بر سناریوی ۲۰/۸۰ استوار شد و از نتایج ۱۰/۹۰ و ۳۰/۷۰ برای سنجش حساسیت به سهم آموزش استفاده گردید. برای امکان پیگیری محاسبات، شناسه ایستگاه‌های آزمون و کد بلوک‌های خارج‌شده در هر بار تقسیم جداگانه ثبت شده‌اند. هر سه سناریو یک الگوریتم کلی اعتبارسنجی دارند، اما با تغییر نسبت تقسیم، شمار ایستگاه‌های آزمون و ترکیب بلوک‌های کنار گذاشته‌شده تفاوت می‌کند. از این‌رو اختلاف RMSE سناریوهای مختلف الزاماً حاصل تغییر پارامترهای درون‌یابی نیست و بخشی از آن می‌تواند به محل ایستگاه‌های خارج‌شده مربوط باشد .حذف کامل بلوک‌های مکانی برای جلوگیری از نشت اطلاعات از همسایگان نزدیک طراحی شده است؛ در تقسیم تصادفی نقطه‌ای ممکن است ایستگاه مجاورِ نقطهٔ آزمون در آموزش باقی بماند و خطا به‌شکل خوش‌بینانه برآورد شود. این محدودیت به‌ویژه برای نواحی با پوشش ایستگاهی نامنظم اهمیت دارد.

جدول۳. مشخصات سناریوهای آموزش و آزمون در زون‌های مختلف.

Zone	تعداد ایستگاه‌ها	سناریوی ۱		سناریوی ۲		سناریوی ۳	
		Test 10	Train 90	Test 20	Train 80	Test 30	Train 70
1	26	3	23	5	21	8	18
2	32	3	29	6	26	10	22
3	24	2	22	5	19	7	17
4	22	2	20	4	18	7	15
All	104	10	94	21	83	31	73

٤-٣- معیارهای ارزیابی عملکرد

مقاله در نوبت انتشار

برای بررسی میزان دقت و کیفیت نتایج درون یابی، لازم است مقادیر پیش بینی شده مدل با داده‌های واقعی مقایسه شوند. به همین منظور از شاخص‌های آماری خطا استفاده می‌شود. در این پژوهش سه شاخص پرکاربرد شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) [1]، میانگین اریبی خطا (MBE) [2] و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) [3] انتخاب شده‌اند، زیرا هر کدام جنبه متفاوتی از خطای مدل را نشان داده و در کنار هم تصویر کامل‌تری از عملکرد روش ارائه می‌کنند. روابط ریاضی این سه شاخص به صورت زیر است:

(۱۲)
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i}^{N}(z(x_i)-\hat{z}(x_i))^2}$$

(۱۳)
$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N}(z(x_i)-\hat{z}(x_i))$$

(۱٤)
$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N}|z(x_i)-\hat{z}(x_i)|$$

نشریه علمی پژوهشی

در این روابط $z(x_i)$ نشان‌دهنده مقدار کمیت مدل‌سازی شده، $\hat{z}(x_i)$ بیانگر مقدار واقعی و N تعداد نمونه‌های مورد تست را نشان می‌دهند. معیار ارزیابی RMSE میزان تطابق منحنی تابع با داده‌ها یا فاصله پیش‌بینی‌ها با مقادیر حقیقی را اندازه می‌گیرد. دامنه مقادیر حاصل از RMSE از صفر تا مثبت بی‌نهایت متغیر است و همچنین واحد اندازه‌گیری یکسانی با متغیر وابسته یا هدف دارد. هر چقدر مقدار این شاخص به عدد صفر نزدیکتر باشد، مدل مورد نظر خطایی کمتری در پیش بینی دارد. به‌طور معمول زمانی از شاخص MAE استفاده می‌شود که بخواهیم کیفیت پیش‌بینی‌ها را نسبت به اندازه مطلق و نه اندازه نسبی آن‌ها ارزیابی کرد. از دلایل استفاده از شاخص MAE، مقاومت آن نسبت به نمونه‌های پرت [4] است.

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

٥-٣- تحلیل‌های آماری مقایسه عملکرد مدل‌ها

برای مقایسهٔ چهار مدل کریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله، تابع پایهٔ شعاعی و اسپلاین، توزیع خطاها، شاخص‌های پیش‌بینی و پایداری مدل‌ها بررسی شد. در تحلیل اولیه آزمون‌های ناپارامتری از جمله فریدمن، ویلکاکسون و دی‌بولد–ماریانو نیز گزارش شدند؛ اما چون ایستگاه‌ها ممکن است در زون‌ها و سناریوهای مختلف تکرار شوند و خطاها همبستگی مکانی دارند، مقادیر احتمال این آزمون‌ها بدون اصلاح ساختار وابستگی برای استنتاج قطعی کافی نیستند. ازاین‌رو در ارزیابی تکمیلی، مقایسهٔ زوجی

[1] Root Mean Square error
[2] Mean Bias Error
[3] Mean Absolut Error
[4] Outliers

بر مبنای ایستگاه‌های مشترک، بلوک‌های مکانی و فاصلهٔ اطمینان بوت‌استرپ انجام شد و نتایج آزمون‌های پیشین صرفاً جنبه توصیفی دارند.

ـ آزمون نرمال بودن توزیع خطاها

پیش از انجام مقایسات آماری، فرض نرمال بودن توزیع خطاهای پیش‌بینی‌شده برای هر روش درون‌یابی با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون برای نمونه‌های کوچک و متوسط و حتی نمونه‌های بزرگ‌تر در شناسایی انحرافات از توزیع نرمال حساسیت بالایی دارد. نتایج این آزمون تعیین‌کننده انتخاب بین آزمون‌های پارامتریک و ناپارامتری برای مقایسه مدل‌ها خواهد بود. در صورت عدم نرمال بودن توزیع خطاها، که در مطالعات زمین‌آماری با داده‌های پراکنده رایج است، از آزمون‌های ناپارامتری مناسب استفاده می‌شود.

مقاله در نوبت انتشار

ـ مقایسه چندگانه روش‌ها (آزمون فریدمن و پساآزمون‌ها)

آزمون فریدمن (Friedman) در تحلیل اولیه برای مقایسهٔ رتبه‌های چهار روش روی ایستگاه‌های آزمون به‌کار رفت و در صورت مشاهده تفاوت، پساآزمون‌های نمنیی و ویلکاکسون علامت‌دار گزارش شدند. اگرچه جفت‌بودن داده‌های هر ایستگاه در مقایسه روش‌ها اهمیت دارد، تکرار همان ایستگاه در تقسیم‌های مختلف و اشتراک زون کل کشور با زون‌های ناحیه‌ای سبب می‌شود کل ردیف‌های خطا را نتوان نمونه‌های مستقل دانست. بنابراین نتیجه این آزمون‌ها در جدول‌های مربوط حفظ شده، اما استنباط نهایی بر اعتبارسنجیِ مکانی و بوت‌استرپ بلوکی استوار است، نه صرفاً مقدار p در آزمون‌های قبلی. در تحلیل سراسری، زون ۵ شامل ایستگاه‌های زون‌های ۱ تا ٤ نیز هست؛ به همین دلیل مشاهده‌های تکرارشده بین زون‌ها یا نسبت‌های آموزش–آزمون به‌منزلهٔ نمونه‌های مستقل شمرده نشده‌اند. در اعتبارسنجی تکمیلی، خطاهای پیش‌بینی هر ایستگاه در تقسیم‌های متناظر سناریوی ۲۰/۸۰ ابتدا در سطح همان ایستگاه خلاصه شد، سپس شاخص‌ها با وزن یکسان برای ایستگاه‌های یکتا تجمیع گردید. برای مقایسهٔ روش‌ها، اختلاف خطای هر دو روش بر ایستگاه مشترک محاسبه و بازنمونه‌گیری در سطح بلوک جغرافیایی انجام گرفت. این طرح امکان لحاظ بخشی از وابستگی مکانی را فراهم می‌کند، هرچند نبود مدل کامل همبستگی مکانی و استفاده از داده‌های یک دوره زمانی، همچنان محدودیت استنباط محسوب می‌شود. برای روشن‌شدن قاعده تجمیع، ابتدا در هر ایستگاه مقادیر متوسط مربعات خطا، قدرمطلق خطا و خطای دارای علامت بر همهٔ تکرارهایی که همان ایستگاه در آزمون بوده است محاسبه می‌شود. سپس برای هر یک از این سه کمیت، میانگینِ تمام ایستگاه‌های یکتا به دست آمده و در مورد RMSE ریشه دومِ میانگین مربعات اخذ می‌شود. این شیوه مانع آن است که یک ایستگاه صرفاً به دلیل ظاهرشدن در تعداد بیشتری از تقسیم‌ها در شاخص نهایی سهم نامتناسب پیدا کند. با این‌حال برابرکردن وزن ایستگاه‌ها همبستگی مکانی میان آن‌ها را حذف نمی‌کند؛ در نتیجه برای استنباط از بازنمونه‌گیری بلوک‌های جغرافیایی استفاده شده است. برای کنترل افزایش خطای نوع اول در مقایسه‌های متعدد، مقادیر p حاصل از تحلیل اولیه با روش‌های هولم–بونفرونی و بنجامینی–هوکبرگ تعدیل شده‌اند. بااین‌حال تعدیل مقایسه‌های متعدد، وابستگی مکانی یا تکرار ایستگاهی را برطرف نمی‌کند؛ ازاین‌رو این نتایج فقط در کنار اعتبارسنجی مکانی و فواصل اطمینان بلوکی قابل تفسیرند.

نشریه علمی پژوهشی

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

ـ مقایسه دقت پیش‌بینی (آزمون دی‌بولد–مارینو)

آزمون دی‌بولد–ماریانو بر اختلاف تابع زیان مدل‌های پیش‌بینی متکی است و صورت متعارف برای داده‌هایی با ساختار وابستگی زمانی طراحی شده است. در مشاهدات مکانی GNSS، خطاهای ایستگاه‌های نزدیک ممکن است همبسته باشند و یک ایستگاه نیز در چند تقسیم ظاهر شود؛ بنابراین محاسبهٔ معمول این آزمون بدون برآورد کوواریانس مکانی و لحاظ تکرارها، تضمین‌کنندهٔ

سطح معناداری اسمی نیست. مقادیر گزارش‌شده در جدول مربوط صرفاً برای مقایسهٔ توصیفی حفظ شده‌اند و در تصمیم‌گیری نهایی مبنا قرار نمی‌گیرند.

ـ ارزیابی پایستگی و عدم قطعیت (بوت‌استرپ بلوکی)

برای برآورد عدم‌قطعیت شاخص‌های MAE، RMSE و MBE در سناریوی اصلی ۲۰/۸۰، خطاهای هر ایستگاه در ۳۰ تقسیم تکرارشونده ابتدا در سطح همان ایستگاه خلاصه شده و سپس ۳۷ بلوک جغرافیایی با جایگذاری بازنمونه‌گیری شدند. در هر یک از ۲۵۰۰ تکرار بوت‌استرپ، ایستگاه‌های داخل بلوک انتخاب‌شده با وزن یکسان در محاسبهٔ شاخص‌های خطا مشارکت داشتند. نقطه‌برآورد شاخص‌ها از کل ایستگاه‌های یکتا و کران‌های فاصلهٔ اطمینان ۹۵ درصد از صدک‌های ۲/۵ و ۹۷/۵ درصدِ توزیع بازنمونه‌گیری به دست آمد. برای مقایسهٔ دو روش، توزیع اختلاف زوجیِ معیار خطا محاسبه شد؛ صرف همپوشانی یا عدم همپوشانیِ دو فاصلهٔ اطمینانِ جداگانه برای نتیجه‌گیری دربارهٔ معناداری اختلاف کافی نیست. نمونه‌گیری مجدد در سطح بلوک موجب می‌شود ایستگاه‌های متعلق به یک خوشهٔ مکانی با هم وارد نمونه شوند؛ بدین‌ترتیب بخشی از وابستگی فضایی در فاصلهٔ اطمینان حفظ می‌شود. در هر تکرار، بلوک‌های انتخاب‌شده ممکن است بیش از یک بار ظاهر شوند و میانگین ایستگاه‌های متناظر با وزن مناسب برای ساخت شاخص جدید به کار رود. عرض فاصله اطمینان به تعداد بلوک‌ها، پراکندگی خطاها و چگونگی تعریف محدودهٔ مکانی وابسته است؛ بنابراین این فواصل اطمینان، عدم‌قطعیت ناشی از نحوهٔ نمونه‌گیری را بیان می‌کنند و جایگزین برآورد کامل عدم‌قطعیت مدل ژئودینامیکی نیستند. همچنین برای مقایسه دو روش باید اختلاف خطا روی همان ایستگاه و در همان تکرار محاسبه شود؛ استفاده از دو بازه اطمینان غیرجفتی برای داوری قطعی کافی نیست. این چارچوب تحلیلی چندلایه، امکان ارزیابی جامع از جنبه‌های مختلف دقت، بی‌طرفی، پایداری و اهمیت آماری روش‌های درون‌یابی را فراهم آورده و مبنای علمی محکمی برای انتخاب روش بهینه در بخش نتایج ارائه می‌دهد.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

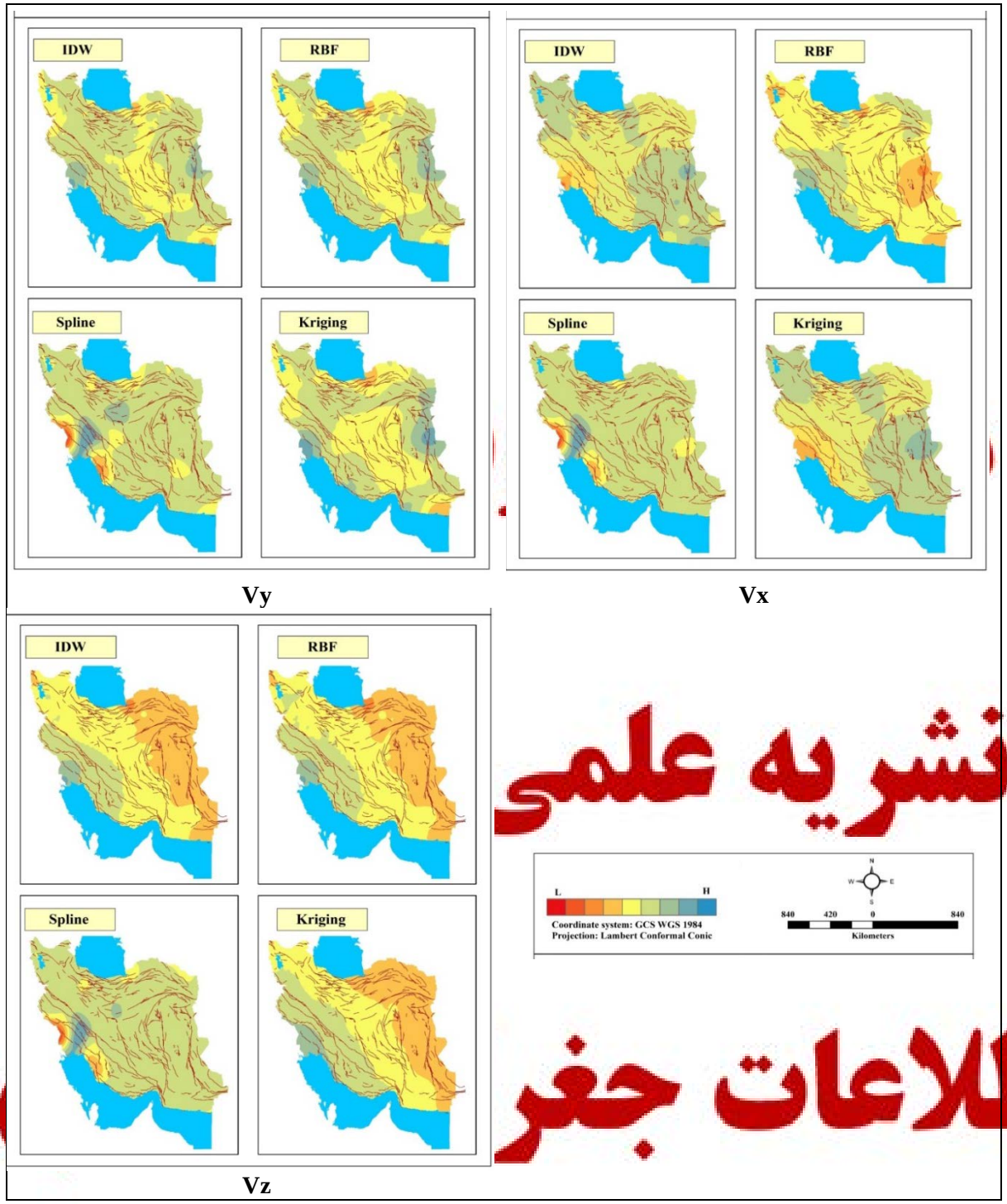
٤- نتایج

در این بخش، نتایج و تحلیل‌های آماری انجام شده برای ارزیابی دقت مدل‌ها ارائه شده است. همچنین تفسیرهای لازم در مورد دقت مدل‌ها و نوع کارائی آنها در مدل‌سازی میدان سرعت پوسته زمین بیان شده است.

٤-١- درون‌یابی و ارزیابی مؤلفه‌های میدان سرعت

میدان سرعت حاصل از داده‌های GNSS شامل سه مؤلفه Vx، Vy و Vz در دستگاه ECEF است. این مؤلفه‌ها محورهای کارتزین زمین‌مرکز را توصیف می‌کنند و به‌تنهایی معادل راستاهای محلیِ شرق، شمال و قائم نیستند. در گام نخست، مؤلفه‌های میدان سرعت برای فلات ایران با روش‌های کریجینگ، RBF، اسپلاین و IDW درون‌یابی و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۳ نقشه‌های متناظر هر سه مؤلفهٔ ECEF را نشان می‌دهد و برای تفسیر جهت‌دار محلی باید تبدیل ENU و چارچوب مرجع نیز مدنظر قرار گیرد.[1]

[1] Velocity field



نشریه علمی
« اطلاعات جغر

شکل ۳. نقشه‌های درون‌یابی مولفه‌های Vx، Vy و Vz میدان سرعت با مدل‌های مختلف در فلات ایران.

نقشه‌های درون‌یابی مؤلفه Vx تفاوت‌هایی میان چهار روش نشان می‌دهند. در مدل IDW تغییرات عمدتاً به‌صورت گرادیان‌های پیوسته دیده می‌شود، حال‌آنکه RBF و اسپلاین در برخی نواحی جزئیات یا نوسان‌های محلی بیشتری ایجاد کرده‌اند. نقشه کریجینگ نیز ترکیبی از روند نسبتاً هموار و تغییرات کوتاه‌بُرد را نشان می‌دهد. تفاوت ظاهر نقشه‌ها می‌تواند حاصل نوع مدل همبستگی مکانی، مقدار هموارسازی و تراکم ایستگاه‌ها باشد؛ بااین‌حال از شکل نقشه به‌تنهایی نمی‌توان نتیجه گرفت که یکی از روش‌ها ناپیوستگی‌های واقعیِ دو طرف گسل را بهتر بازسازی کرده است. در مؤلفه Vz نیز تفاوت‌هایی از نظر گستره و شدت تغییرات مکانی میان روش‌ها مشاهده می‌شود که برای داوری درباره آن‌ها باید خطای نقاط آزمون و عدم‌قطعیت پیش‌بینی

بررسی شود. در مؤلفه Vy، نقشه IDW الگوی هموارتری نشان می‌دهد و RBF در مقایسه با آن تغییرات محلی بیشتری را بازتاب می‌دهد. در تصویر اسپلاین، نوسانات و مرزهای تیزتری مشاهده می‌شود که لزوماً به معنای وجود مرز زمین‌ساختی در همان مکان نیست. نقشه کریجینگ میان گرادیان‌های منطقه‌ای و تغییرات موضعی تعادل متفاوتی ایجاد می‌کند؛ اما انطباق احتمالی یک مرز رنگی با ردّ گسل، بدون آزمون اختلاف سرعت دو سوی گسل یا مقایسهٔ مدل مانع‌دار و بدون مانع، شاهد کافی برای اثبات اعتبار فیزیکی آن نیست. جداول ٤ تا ٦ شاخص‌های عددی مقایسه روش‌ها در سه مؤلفهٔ سرعت را نشان می‌دهند و مقادیر مشخص‌شده در آن‌ها صرفاً مربوط به کمترین خطای همان جدول است.

جدول٤. مقادیر MBE، RMSE و MAE مولفه Vx در روش‌های درون‌یابی مختلف بر حسب متر بر سال.

Vx	MBE	RMSE	MAE
IDW	0.000015884615	0.008236757593	0.005697865385
RBF	0.000073163462	0.008300572033	0.005673528846
SPL	0.001739741935	0.012577159716	0.009118451613
Kriging	0.000068278846	0.008173242800	0.005596298077

جدول٥. مقادیر MBE، RMSE و MAE مولفه Vy در روش‌های درون‌یابی مختلف بر حسب متر بر سال.

Vy	MBE	RMSE	MAE
IDW	0.000429259615	0.008763415042	0.006579144231
RBF	0.000200442308	0.009028310211	0.006614211538
SPL	0.001794516129	0.011205110775	0.009564516129
Kriging	0.000093250000	0.009005596065	0.006510230769

جدول٦. مقادیر MBE، RMSE و MAE مولفه Vz در روش‌های درون‌یابی مختلف بر حسب متر بر سال.

Vz	MBE	RMSE	MAE
IDW	0.000068182692	0.008209373811	0.005575682692
RBF	0.000018596154	0.008315263817	0.005583596154
SPL	0.003744419355	0.014364264277	0.010847258065
Kriging	0.000107884615	0.007722512466	0.005493653846

جمع‌بندی نقشه‌های Vx، Vy و Vz نشان می‌دهد که هر یک از چهار روش با توجه به فرض‌های مدل، درجات متفاوتی از هموارسازی و تغییرات محلی را تولید می‌کنند. کریجینگ در بعضی سناریوها خطای کمتری دارد و در برخی موارد نیز IDW یا دیگر روش‌ها به آن نزدیک‌اند؛ در نتیجه انتخاب روش نباید تنها بر مبنای ظاهر نقشه یا یک شاخص از یک تقسیم آموزش–آزمون انجام شود. در این پژوهش هندسهٔ گسل‌ها به‌عنوان متغیر کمکی، مانع مکانی (Barrier) یا ناهمسانگردیِ مرتبط با گسل وارد مدل نشده است. بنابراین عبارت‌هایی مانند «تنها روش»، «اثبات برتری فیزیکی» و «تضمین بازنمایی گسل» با شواهد ارائه‌شده سازگار نیستند. ارزیابی اعتبار فیزیکی به آزمون کمی اختلاف سرعت در دو سوی گسل، با کنترل فاصله تا گسل و عدم‌قطعیت داده‌ها، نیاز دارد.[۳۲۱]

محدودهٔ تفسیر زمین‌ساختی نقشه‌ها

[1] Visually
[2] Quantitative
[3] Geological structure

مقاله پژوهشی فشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

در مدل کریجینگ، گسل‌ها به‌صورت صریح در ماتریس کوواریانس، در تعیین ناهمسانگردی یا در قالب مانع مکانی لحاظ نشده‌اند. بنابراین انطباق بصری برخی گرادیان‌ها با راستای گسل‌ها تنها یک مشاهدهٔ کیفی است، نه برهانِ بازسازی ناپیوستگی سرعت در دو سوی گسل. برای ارزیابی کمی مستقل می‌توان اختلاف سرعت دو سوی گسل، را در زوج نقاط هم‌فاصله از خط گسل محاسبه و با فواصل اطمینان آن مقایسه کرد؛ همچنین اعتبارسنجی مکانی با و بدون مانع زمین‌ساختی می‌تواند ملاک تکمیلی باشد. از آنجا که چنین آزمایشی در داده‌های حاضر اجرا نشده، رتبه‌بندی روش‌ها صرفاً از جنبه دقت پیش‌بینی در ایستگاه‌های آزمون تفسیر می‌شود و نتیجه‌ای درباره برتری قطعی بازنمایی گسل‌ها استنباط نمی‌گردد. در طراحی یک آزمون مستقل دو سوی گسل، نقاط مقایسه باید نسبت به خط گسل فاصلهٔ مشابه داشته باشند تا اثر دوری یا نزدیکی ایستگاه‌ها با اثر احتمالی مانع زمین‌ساختی اشتباه نشود. اعتبارسنجی با و بدون مانع باید از همان داده‌های آموزش و آزمون استفاده کند و هندسهٔ گسل‌ها پیش از ارزیابی تعیین شده باشد. ازآنجاکه جهت‌گیری و نوع لغزش گسل‌ها متفاوت است، گزارش اختلاف سرعت در دستگاه محلی پس از تعیین چارچوب مرجع برای تفسیر زمین‌ساختی مناسب‌تر از اتکا به یک مؤلفهٔ ECEF است. چنین آزمایشی در نتایج موجود انجام نشده و به همین دلیل ارزیابی حاضر تنها توان پیش‌بینیِ روش‌ها در ایستگاه‌های کنارگذاشته‌شده را نشان می‌دهد.

مقاله در نوبت انتشار
نسخه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۲-٤- درون‌یابی و ارزیابی میدان سرعت

به منظور تحلیل مکانی تغییرات سرعت پوسته‌ای، برآیند میدان سرعت در هر ایستگاه به‌صورت بزرگی بردار سرعت محاسبه شده است. در گام بعد، توزیع آماری داده‌های برآیند میدان سرعت به‌صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های اولیه شامل تحلیل توصیفی[1]، آزمون‌های نرمال بودن[2]، ارزیابی چولگی[3] و چگیدگی توزیع داده‌ها[4] نشان می‌دهد که مقادیر برآیند میدان سرعت از توزیع نرمال[5] پیروی نمی‌کنند. این رفتار غیرنرمال، با توجه به ماهیت فیزیکی داده‌ها (تأثیر رژیم‌های تکتونیکی متفاوت)، قابل انتظار است. علاوه بر بررسی توزیع آماری، وجود روند مکانی در داده‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها بیانگر حضور یک روند مکانی[6] ملایم بوده که نشان دهنده‌ی تغییرات تدریجی شدت میدان سرعت در مکان است. وجود هم زمان رفتار غیرنرمال و روند مکانی در داده‌ها، ضرورت انتخاب روشی را ایجاب می‌کند که نسبت به فرض نرمال بودن داده‌ها حساس نبوده و در عین حال قادر به مدل‌سازی روندهای مکانی باشد. در ادامه، برای ارزیابی اثر تعداد داده‌های در دسترس بر دقت مدل، سه سناریوی مختلف تعریف شده که در هر سناریو درصد متفاوتی از ایستگاه‌ها به عنوان داده‌ی آموزش[7] و باقی به عنوان داده‌ی آزمون اختصاص یافته است. در هر سناریو، داده‌های آموزش برای انجام درون‌یابی مکانی مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد مدل با استفاده از داده‌های آزمون مستقل ارزیابی می‌گردد.

۱-۲-٤- ارزیابی خطای مدل

بعد از انجام فرایند درونیابی، خطای مدل‌سازی حاصل از روش های چهارگانه، مطابق با اطلاعات جدول (۳) در سه سناریو و پنج زون مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته و در قالب نمودار نشان داده شده است. به منظور نمایش بصری و مقایسه دقیق‌تر، نتایج شاخص‌های آماری در ۱۰۰۰ ضرب شده است.

---

[1] Descriptive analysis
[2] Normality tests
[3] Skewness assessment
[4] Skewness of data distribution
[5] Normal distribution
[6] Spatial trend
[7] Train

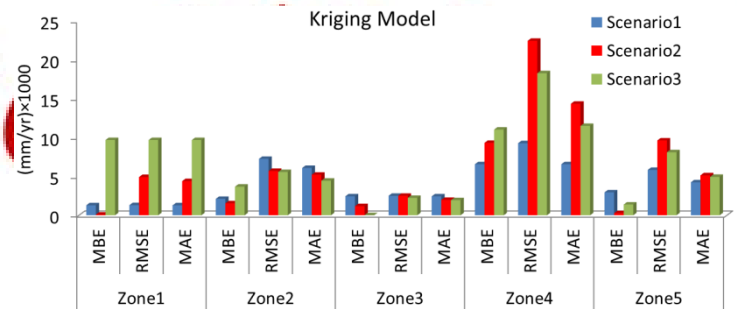
یکسان‌سازی واحد شاخص‌های خطا

مقادیر جدول‌های ٤ تا ٦ بر حسب متر بر سال (m/year) گزارش شده‌اند؛ در شکل‌ها برای خوانایی، مقادیر سرعت یا خطا در ضریب ۱۰۰۰ ضرب شده و بر حسب میلی‌متر بر سال (mm/year) نمایش داده شده‌اند. برای جلوگیری از اختلاط نتایج، جدول‌های ٤ تا ٦ به تقسیم‌های اولیه و مؤلفه‌های جداگانهٔ ECEF مربوط‌اند، ولی جدول ۱۱ نتیجهٔ اعتبارسنجی مکانی تکرارشونده در سناریوی ۲۰/۸۰ و تجمیع سه مؤلفه با وزن یکسان برای ایستگاه‌های یکتا است. ازاین‌رو مقادیر این جدول‌ها بدون توجه به تفاوت طرح نمونه‌گیری، مؤلفه و واحد، نباید مستقیماً یکسان پنداشته شوند.

ـ مدل کریجینگ

تحلیل حساسیت مدل کریجینگ نسبت به حجم داده‌های آموزشی در زون‌های مختلف، الگوهای رفتاری متمایزی را آشکار می‌سازد. در زون یک (شمال‌غربی)، دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق و پایدار مستلزم استفاده از حداقل ۸۰ تا ۹۰ درصد داده‌ها به عنوان مجموعه آموزش است؛ کاهش این نسبت به ۷۰ درصد (سناریوی سوم) منجر به افت شدید دقت و بروز خطای سیستماتیک می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت بالای مدل در این منطقه به کمبود داده است. در مقابل، زون دو (البرز مرکزی) رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که کاهش تدریجی داده‌های آموزش از ۹۰ به ۸۰ درصد حتی موجب بهبود جزئی دقت مدل شده است، اما کاهش بیشتر به ۷۰ درصد تأثیر منفی قابل‌توجهی بر پایداری و دقت مدل دارد. زون سه (شمال‌شرقی) پایداری بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد و کاهش حجم داده‌های آموزش تأثیر منفی بر عملکرد مدل نداشته است، به‌نحوی‌که حتی در سناریوی سوم (۷۰ درصد داده آموزش)، عملکرد مدل بهبود یافته که حاکی از توانایی بالای کریجینگ در استخراج الگوهای مکانی حتی با داده‌های محدود در این زون است. زون چهار (نیمه جنوبی) که دارای پراکندگی نامنظم ایستگاه‌ها و مقیاس مکانی گسترده‌تری است، بیشترین حساسیت را به کاهش داده‌ها دارد و برای دستیابی به نتایج قابل‌اعتماد، نیازمند حجم بالای داده‌های آموزش (حداقل ۹۰ درصد) است. در نهایت، تحلیل کل ایستگاه‌ها (سطح سراسری کشور) نشان می‌دهد که برای مدل‌سازی پایدار و دقیق میدان سرعت در مقیاس ملی، نسبت داده‌های آموزش باید به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ۷۰ درصد باشد، چرا که کاهش بیشتر از این حد با افزایش خطا و کاهش دقت کلی مدل همراه است (شکل ٤).

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعا (سپهر)»



شکل ٤. مقایسه نتایج شاخص‌های آماری حاصل از مدل کریجینگ در سه سناریو و پنج زون مختلف.

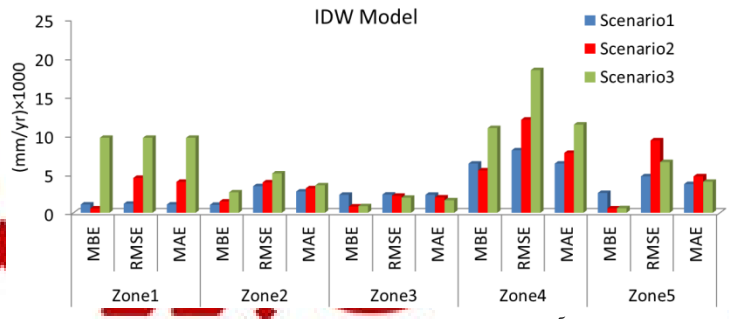
ـ مدل وزندهی معکوس فاصله

روش وزن‌دهی معکوس فاصله یکی از روش‌های قطعی و پرکاربرد در درون‌یابی مکانی است که بر اساس اصل همبستگی مکانی[1] عمل می‌کند. تحلیل حساسیت مدل وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) در زون‌های مختلف، الگوی رفتاری متغیری را بر

[1] Spatial correlation

اساس ویژگی‌های فضایی و تراکم ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در زون یک، با وجود پراکندگی نسبتاً منظم ایستگاه‌ها، مدل IDW حساسیت شدیدی به کاهش حجم داده‌های آموزشی دارد و کمترین خطا تنها در سناریوی اول (۹۰ درصد داده آموزش) مشاهده می‌شود. در زون دو که پیچیدگی مکانی بیشتری وجود دارد، مدل حساسیت کمتری نسبت به کاهش داده‌ها نشان می‌دهد و اگرچه کاهش شدید داده‌ها (به ۷۰ درصد) باعث افزایش خطای سیستماتیک می‌شود، اما به دلیل پراکندگی نسبی داده‌ها، همچنان دقت قابل‌قبولی حفظ می‌گردد. زون سه رفتار پایداری از خود نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که توزیع مناسب و تراکم ایستگاه‌ها در این منطقه باعث شده است مدل IDW حتی در سناریوی سوم (۷۰ درصد داده آموزش) نیز نتایجی با شاخص‌های خطای نزدیک به صفر و بدون سوگیری سیستماتیک ارائه دهد. در مقابل، زون چهار به دلیل پراکندگی نامنعم ایستگاه‌ها و مقیاس مکانی گسترده، آسیب‌پذیرترین عملکرد را نسبت به کاهش داده‌ها دارد و برای دستیابی به پیش‌بینی‌های پایدار، ضروری است که حداقل ۹۰ درصد داده‌ها در مجموعه آموزش قرار گیرند. در سطح سراسری (زون پنج)، اگرچه مدل IDW عملکرد کلی قابل‌قبولی دارد و سوگیری سیستماتیک معناداری (MBE نزدیک به صفر) نشان نمی‌دهد، اما افزایش خطاهای تصادفی با کاهش حجم داده‌های آموزش، نشان‌دهنده حساسیت بالای این مدل به کمبود داده است؛ بنابراین، برای استفاده از IDW، توجه به نسبت بالای داده‌های آموزش و ساختار پراکندگی مکانی ایستگاه‌ها امری ضروری است (شکل۵).

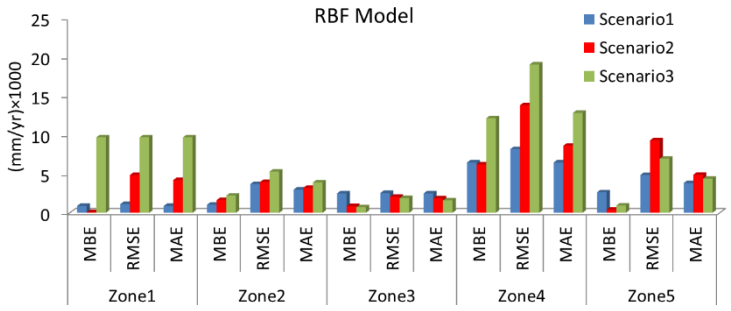
مقاله در نوبت انتشار
نشریه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)



شکل۵. مقایسه نتایج شاخص‌های آماری حاصل از مدل وزندهی معکوس فاصله در سه سناریو و پنج زون مختلف.

ـ مدل تابع پایه شعاعی

تحلیل عملکرد مدل تابع پایه شعاعی (RBF) در زون‌های مختلف، نشان‌دهنده وابستگی شدید دقت مدل به ترکیب ویژگی‌های فضایی و حجم داده‌های آموزشی است. در زون یک، مدل RBF در مقیاس‌های کوچک حساسیت بالایی به کاهش داده‌های آموزش دارد و دقت پیش‌بینی به‌سرعت افت می‌کند. این الگو در زون دو نیز تکرار می‌شود؛ به‌طوری‌که کاهش حجم داده‌ها نه‌تنها دقت مدل را کاهش می‌دهد، بلکه در سناریوی سوم منجر به افزایش شاخص MBE و بروز سوگیری سیستماتیک در نتایج می‌شود. با این حال، زون سه رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد و پایداری قابل‌توجهی از مدل RBF حکایت دارد؛ به‌نحوی‌که در سناریوی سوم (۷۰ درصد داده آموزش)، مقادیر RMSE، MAE و MBE نسبت به سایر سناریوها کمتر شده و نشان‌دهنده بهبود عملکرد و حفظ دقت مدل حتی با داده‌های محدود در این منطقه است. در مقابل، زون چهار که دارای پراکندگی نامنعم ایستگاه‌ها و مقیاس مکانی گسترده‌تری است، آسیب‌پذیرترین عملکرد را نسبت به کاهش داده‌ها نشان می‌دهد و کاهش حجم داده‌ها در این زون با کاهش شدید دقت و ظهور سوگیری سیستماتیک همراه است. در سطح سراسری (زون پنج) نیز مدل RBF حساسیت بالایی به کاهش داده‌های آموزش دارد؛ اگرچه سوگیری سیستماتیک معناداری مشاهده نمی‌شود، اما افزایش خطاهای تصادفی در سناریوهای با داده‌های کمتر، تأثیر منفی کاهش حجم آموزش بر دقت کلی مدل را تأیید می‌کند (شکل۶).



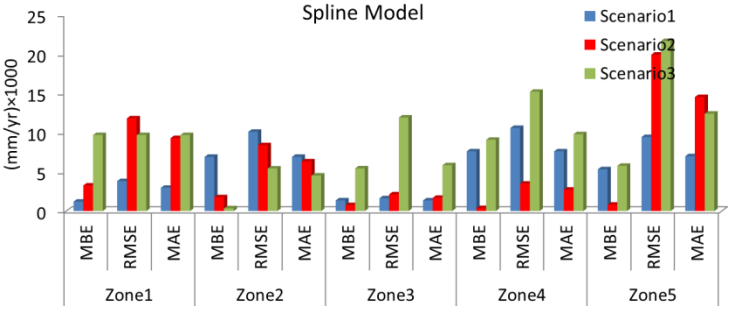
شکل٦. مقایسه نتایج شاخص‌های آماری حاصل از مدل تابع پایه شعاعی در سه سناریو و پنج زون مختلف.

ـ مدل اسپلاین

روش اسپلاین یکی از روش‌های قطعی درون‌یابی [1] است که از توابع ریاضی برای تخمین مقادیر در نقاط نامعلوم استفاده می‌کند. این روش به ویژه برای مدل‌سازی تغییرات تدریجی و پیوسته در متغیرهای مکانی مناسب است، زیرا برخلاف روش‌های دیگر که ممکن است سطوح خشن یا ناهموار تولید کنند، اسپیلاین تلاش می‌کند تا حد امکان انحنای سطح را به حداقل برساند و گذر نرمی از نقاط داده‌ای ایجاد کند.

تحلیل عملکرد مدل اسپلاین (Spline) در زون‌های مختلف، نشان‌دهنده حساسیت بالا و رفتار ناپایداری این روش نسبت به تغییرات حجم داده‌های آموزشی است. در زون یک، مدل اسپلاین در سناریوی اول (۹۰ درصد داده آموزش) با خطاهای نزدیک به صفر و بدون سوگیری سیستماتیک، عملکردی نسبتاً دقیق ارائه می‌دهد، اما با کاهش حجم داده‌های آموزش، خطای مدل به‌شدت افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده وابستگی شدید این روش به تراکم بالای داده‌ها در این منطقه است. در زون دو، عملکرد مدل نوساناتی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که اگرچه در سناریوی سوم (۷۰ درصد داده آموزش) خطای RMSE کاهش یافته است، اما این رفتار غیرمنتظره احتمالاً ناشی از ساختار خاص مکانی داده‌ها و توزیع نامتعارف ایستگاه‌ها در این زون است و نمی‌توان آن را به عنوان پایداری مدل تفسیر کرد. زون سه نیز با کاهش داده‌های آموزش، با افزایش خطای قابل‌توجه مواجه شده و حساسیت مدل به کمبود داده در این منطقه تأیید می‌شود. در زون چهار که پراکندگی ایستگاه‌ها نامنعم است، مدل اسپلاین آسیب‌پذیرترین عملکرد را نسبت به کاهش داده‌ها دارد و در سناریوی سوم، خطای مدل نسبت به سایر سناریوها به‌شدت افزایش می‌یابد. در سطح سراسری (زون پنج) نیز مدل اسپلاین با کاهش شدید دقت، بروز خطاهای تصادفی و سوگیری سیستماتیک همراه است. نتایج کلی حاکی از آن است که روش اسپلاین برای مدل‌سازی میدان جابجایی در مقیاس‌های بزرگ و با داده‌های محدود، گزینه‌ای پایدار نیست و دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق و بدون سوگیری، مستلزم استفاده از نسبت بسیار بالایی از داده‌های آموزشی است که در عمل دشوار و کم‌بازده می‌باشد (شکل ۷).

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



شکل۷. مقایسه نتایج شاخص‌های آماری حاصل از مدل اسپلاین در سه سناریو و پنج زون مختلف.

[1] Deterministic interpolation methods

٤-٣- تحلیل آماری عملکرد روش‌های درون‌یابی

برای ارزیابی عملکرد چهار روش کریجینگ، IDW، RBF و اسپلاین، نرمال‌بودن توزیع خطاها در تحلیل اولیه با آزمون شاپیرو–ویلک بررسی شد (جدول ۷). برخی زون‌ها رفتار متفاوتی نشان داده‌اند که می‌تواند به شمار ایستگاه‌ها، چیدمان مکانی و پراکندگی خطا مربوط باشد. اما آزمون نرمال‌بودن به‌تنهایی استقلال مکانی یا عدم وابستگی مشاهده‌های تکرارشده را اثبات نمی‌کند. ازاین‌رو نتایج آزمون‌های توزیعی و مقایسه‌های ناپارامتریِ اولیه به‌عنوان اطلاعات توصیفی حفظ شدند و برای ارزیابی پایداری، طرح اعتبارسنجی مکانی تکرارشونده و بوت‌استرپ بلوکی به‌کار گرفته شد.

جدول ۷. آزمون نرمال بودن (شاپیرو–ویلک)

سطح	گروه	n	W	p-value	نرمال	سطح	گروه	n	W	p-value	نرمال
کل	IDW	124	0.285172	0.000000	خیر	Zone=Z03	IDW	14	0.953978	0.623980	بله
کل	Krg	124	0.745235	0.000000	خیر	Zone=Z03	Krg	14	0.963039	0.772660	بله
کل	RBF	124	0.286453	0.000000	خیر	Zone=Z03	RBF	14	0.951793	0.588872	بله
کل	SPL	124	0.315574	0.000000	خیر	Zone=Z03	SPL	14	0.510453	0.000007	خیر
Zone=Z01	IDW	16	0.650378	0.000050	خیر	Zone=Z04	IDW	13	0.825508	0.013920	خیر
Zone=Z01	Krg	16	0.970287	0.843244	بله	Zone=Z04	Krg	13	0.828714	0.015263	خیر
Zone=Z01	RBF	16	0.650713	0.000051	خیر	Zone=Z04	RBF	13	0.839935	0.021155	خیر
Zone=Z01	SPL	16	0.655661	0.000057	خیر	Zone=Z04	SPL	13	0.823792	0.013254	خیر
Zone=Z02	IDW	19	0.922078	0.123641	بله	Zone=Z05	IDW	62	0.643787	0.000000	خیر
Zone=Z02	Krg	19	0.941356	0.278906	بله	Zone=Z05	Krg	62	0.751748	0.000000	خیر
Zone=Z02	RBF	19	0.945732	0.333486	بله	Zone=Z05	RBF	62	0.668344	0.000000	خیر
Zone=Z02	SPL	19	0.950172	0.397881	بله	Zone=Z05	SPL	62	0.894243	0.000063	خیر

برای مقایسهٔ رتبه‌ای چهار روش در سطح سراسری، آزمون فریدمن در تحلیل اولیه انجام شد و آماره χ^2 = ۱۷٫۵۵، درجهٔ آزادی ۳ و p=0.0005 گزارش گردید. با وجود این، اندازهٔ اثر کندال پایین است و به سبب تکرار ایستگاه‌ها در سناریوها و اشتراک زون‌ها، مقادیر احتمال بدون مدل‌کردن وابستگی مکانی مبنای استنتاج قطعی قرار نمی‌گیرند. جدول ۸ نتایج پساآزمون نمنیی را با همین محدودیت نشان می‌دهد؛ در مقابل، در اعتبارسنجی مکانی جدید اختلاف دقت کریجینگ و IDW کوچک و از نظر فاصله اطمینان اختلاف MAE غیرقطعی است. آزمون ویلکاکسون با تعدیل هولم و آزمون دی‌بولد–ماریانو نیز در تحلیل اولیه گزارش شده‌اند (جدول‌های ۹ و ۱۰). گرچه مقادیر p در برخی مقایسه‌ها کوچک‌اند، وابستگی مکانی ایستگاه‌ها و تکرار همان ایستگاه‌ها در سناریوهای مختلف می‌تواند اعتبار آزمون‌های مبتنی بر استقلال را محدود کند. ازاین‌رو این آزمون‌ها برای مقایسه توصیفی نگه داشته شده‌اند؛ نتیجه‌گیری اصلی از خطاهای آزمون مکانی تکرارشونده و فاصلهٔ اطمینان اختلاف جفتیِ روش‌ها به دست می‌آید، نه از کوچکی p در آزمون دی‌بولد–ماریانو.

جدول ۸. پساآزمون نمنیی

مدل اول	مدل دوم	Mean rank diff	Critical difference ((alpha=0.05	معناداری	q-statistic	p-value approx
Krg	IDW	0.130081301	0.422918119	خیر	1.117488473	0.858954757
Krg	RBF	0.089430894	0.422918119	خیر	0.768273325	0.948380332
Krg	SPL	0.512195122	0.422918119	بله	4.400110863	0.010062087
IDW	RBF	0.219512195	0.422918119	خیر	1.885761799	0.541520759
IDW	SPL	0.642276423	0.422918119	بله	5.517599337	0.000553699

مقاله در وقت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

0.050124211	3.631837538	خیر	0.422918119	0.422764228	SPL	RBF

جدول ۹. پساآزمون ویلکاکسون

Sig FDR	Sig Holm	p-value			diff		W	مدل دوم	مدل اول
		FDR	Holm	raw	Mean	Median			
خیر	خیر	0.34144	0.56907	0.28454	-0.06202	0.00007	3389	IDW	Krg
خیر	خیر	0.96980	0.96980	0.96980	-0.06229	0.00000	3798	RBF	Krg
بله	بله	0.00002	0.00002	0.00000	-0.06667	-0.00129	1977	SPL	Krg
بله	خیر	0.03977	0.07953	0.02651	-0.00027	-0.00002	2540	RBF	IDW
بله	بله	0.00002	0.00004	0.00001	-0.00465	-0.00092	1737	SPL	IDW
بله	بله	0.00002	0.00004	0.00001	-0.00438	-0.00095	1732	SPL	RBF

جدول ۱۰. آزمون دی‌بولد-مارینو

Sig Holm	p-value		روش با خطای کمتر	DM	مدل دوم	مدل اول
	Holm	raw				
بله	0.018857152	0.004269204	Krg	-2.91217	IDW	Krg
بله	0.018857152	0.004266442	Krg	-2.91238	RBF	Krg
بله	0.018857152	0.004156945	Krg	-2.92107	SPL	Krg
خیر	0.122107955	0.122107955	IDW	-1.55680	RBF	IDW
بله	0.017637816	0.002939636	IDW	-3.03510	SPL	IDW
بله	0.018857152	0.00377143	RBF	-2.95341	SPL	RBF

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

برای سنجش پایداری و عدم‌قطعیت نتایج، فواصل اطمینان ۹۵ درصد RMSE، MAE و MBE با بوت‌استرپ بلوکی دو سناریوی اصلی ۲۰/۸۰ برآورد شد (جدول ۱۱). در این تحلیل، هر یک از ۱۰۴ ایستگاه وزن یکسانی دارد، حتی اگر در چند تقسیم آزمون ظاهر شده باشد. در مقیاس میلی‌متر بر سال، مقدار نقطه‌ای RMSE برای کریجینگ ۷/۹۶۷ و برای IDW برابر ۷/۸۳۵ به دست آمد؛ این اختلاف کوچک است و به‌تنهایی برتری قطعی یکی از روش‌ها را نشان نمی‌دهد. فواصل اطمینان MBE نیز باید با صفر مقایسه شوند و شاخص اریبی تنها در کنار RMSE و MAE تفسیر گردد. از سوی دیگر فاصلهٔ اطمینان اختلاف زوجی MAE روش IDW نسبت به کریجینگ در تحلیل بلوکی، صفر را دربرمی‌گیرد؛ بنابراین برتری آماری قطعی کریجینگ بر IDW تأیید نمی‌شود.

جدول ۱۱ شامل مقدار نقطه‌ای و کران‌های ۹۵ درصدِ بوت‌استرپِ همان شاخص با واحد یکسان mm/year است. برای محاسبه، نخست خطاهای سه مؤلفهٔ ECEF در هر ایستگاه در ۳۰ تقسیم مکانی سناریوی ۲۰/۸۰ خلاصه شدند؛ سپس میانگین کمیت‌های مربّع خطا، قدر مطلق خطا و خطای علامت‌دار بر ۱۰۴ ایستگاه یکتا محاسبه شد. RMSE از ریشهٔ میانگین مربعات، MAE از میانگین قدر مطلق و MBE از میانگین خطای علامت‌دار به دست آمد. فواصل اطمینان با ۲۵۰۰ بار نمونه‌گیریِ باجایگذاری از ۳۷ بلوک جغرافیایی برآورد شدند. بدین ترتیب اختلاف مقادیر جدول ۱۱ با برخی جدول‌های پیشین، علاوه بر تبدیل واحد، ناشی از تفاوت در طرح آموزش–آزمون و شیوهٔ تجمیع ایستگاه‌ها نیز هست؛ این دو مجموعه شاخص را نباید حاصل یک محاسبه یکسان معرفی کرد. در مقایسهٔ زوجی، کران‌های بازه اطمینان دو روش به‌تنهایی برای آزمون اختلاف کافی نیستند؛ زیرا خطاهای دو مدل روی همان ایستگاه ممکن است همبسته باشند. در هر تکرار بلوکی باید اختلاف معیار در همان مجموعه ایستگاه‌های متناظر محاسبه شود. برای مثال، اختلاف MAE روش IDW منهای کریجینگ بر اساس میانگین‌های ایستگاهی حدود منفی ۰/۰۷۰ میلی‌متر بر سال به دست آمد و فاصله اطمینان بلوکی این اختلاف صفر را در برگرفت. بنابراین تفاوت کوچک

مقدار نقطه‌ای، به‌خصوص در داده‌هایی با خوشه‌بندی مکانی، به معنی برتری پایدار یا معنادار یکی از دو روش نیست. چنین نتیجه‌ای نباید با شاخص‌های تقسیم‌های اولیه که از طرح نمونه‌گیری متفاوت حاصل شده‌اند درآمیخته شود.

جدول ۱۱. شاخص‌های MAE، RMSE و MBE و فواصل اطمینان ۹۵ درصد بوت‌استرپ بلوکی؛ اعتبارسنجی مکانی ۲۰/۸۰، واحد: میلی‌متر بر سال (mm/year).

MBE			MAE			RMSE			مدل
CI high	CI low	point	CI high	CI low	point	CI high	CI low	point	
1.305	-1.893	-0.174	6.628	3.701	4.823	10.626	5.494	7.835	IDW
1.675	-1.588	0.205	6.683	3.748	4.894	10.638	5.756	7.967	Kriging
2.669	-1.970	0.534	9.178	5.832	7.248	13.467	8.340	10.644	RBF
1.600	-2.039	-0.083	7.646	4.574	5.828	11.621	7.045	9.102	Spline

مقاله در نوبت انتشار

در تحلیل منطقه‌ای (جدول ۱۲) نتایج فریدمن در برخی ترکیب‌های زون و سناریو تفاوت رتبه‌ای نشان می‌دهد. با این حال تعداد ایستگاه‌ها در چند زیرمجموعه کم است و زون کل کشور با زیرزون‌ها اشتراک دارد؛ ازاین‌رو شدت معناداری و شاخص کندال در این زیرمجموعه‌ها نباید به‌عنوان شاهد مستقل برتری یک روش برای کل کشور تعبیر شود. برای نتیجه‌گیری درباره پایداری، ارزیابی تکرارشوندهٔ مکانی و مقایسهٔ خطاهای ایستگاه‌های کنارگذاشته‌شده مناسب‌تر است.

جدول۱۲. تحلیل موضعی آزمون فریدمن

Sig	Kendalls W	p-value	statistic	n	سناریو	زون
بله	1	2.498E-05	24	8	S03	Z01
خیر	0.104	0.373491032	3.12	10	S03	Z02
خیر	0.14	0.240661885	4.2	10	S01	Z05
بله	0.149206349	0.024419337	9.4	21	S02	Z05
بله	0.112444444	0.017573155	10.12	30	S03	Z05

نشریه علمی پژوهشی

* در بقیه زون ها و سناریوها به دلیل پایین بودن تعداد (n<8) آزمون فریدمن صورت نگرفته است.

مجموعهٔ آزمون‌های مکانی نشان می‌دهد که رتبه‌بندی روش‌ها به روش نمونه‌گیری و تراکم ایستگاه‌ها وابسته است. در سناریوی اصلی ۲۰/۸۰، RMSE روش‌های IDW و کریجینگ به‌ترتیب ۷/۸۳۵ و ۷/۹۶۷ و MAE آن‌ها ۴/۸۲۳ و ۴/۸۹۴ میلی‌متر بر سال است؛ مقادیر دو روش به یکدیگر نزدیک‌اند و فاصلهٔ اطمینان اختلاف MAE در بوت‌استرپ بلوکی صفر را دربرمی‌گیرد. RBF و اسپلاین در همین آزمون خطای بیشتری دارند، اما این مشاهده به‌تنهایی وجود سوگیری سیستماتیک یا برتری فیزیکی یک روش را اثبات نمی‌کند. بنابراین هیچ‌یک از روش‌ها بدون قید شرایط داده و شواهد اعتبارسنجی مکانی به‌عنوان بهترین و پایدارترین مدل مطلق معرفی نمی‌شود.

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

۵- بحث و تحلیل نتایج مدل‌ها

چهار روش درون‌یابی شامل کریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله، اسپلاین و تابع پایع شعاعی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. این ارزیابی با استفاده از داده‌های مختلف در زون‌های ژئودینامیکی متفاوت ایران صورت گرفت. هدف اصلی این تحقیق، انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی میدان سرعت در زون‌های مختلف و همچنین در سطح کل کشور با توجه به ویژگی‌های مکانی و میزان داده‌های موجود است. در ادامه مقایسه و تفسیر نتایج ارائه شده است:

۵-۱- مقایسه مدل‌ها

براساس نتایج حاصل از مرحله آزمون چهار مدل در زون‌ها و سناریوهای مختلف، موارد زیر حاصل شده است:

- ✓ مدل کریجینگ: این روش در کلیه زون ها نتایج پایداری از خود نشان داده و در اکثر سناریوها، مقادیر RMSE و MAE نسبت به دیگر روش‌ها پایین‌تر بوده است. به ویژه در زون‌های محلی با تراکم ایستگاهی مناسب و ساختار مکانی همگن[1]، عملکرد بسیار خوبی داشته است. در سطح کل کشور، با استفاده از ۹۰ درصد داده‌های آموزش، کریجینگ دقیق‌ترین نتایج را ارائه داده است. در عین حال، با کاهش داده‌های آموزش به ۷۰ درصد، دقت مدل کاهش و خطای سیستماتیک در پیش‌بینی‌ها مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در زون‌هایی با پراکندگی نامنظم ایستگاه‌ها همانند زون چهار، مدل کریجینگ نیاز به حجم بالاتری از داده‌های آموزش داشته تا بتواند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه دهد.
- ✓ مدل IDW: در مقایسه با مدل کریجینگ، IDW به طور کلی عملکرد ضعیف‌تری، مخصوصاً در سناریوهایی که داده‌های آموزش کاهش یافته، داشته است. در زون‌های یک و دو، IDW به طور خاص در سناریو های ۸۰–۲۰ و ۷۰–۳۰ دقت کمتری را ارائه داده و در سناریوی سوم خطاهای سیستماتیک قابل توجهی را نشان داده است. به طور کلی، IDW برای زون‌هایی با ساختار مکانی نامنظم و با پراکندگی زیاد ایستگاه‌ها (مانند زون چهار) مناسب نیست. با این حال، در زون‌هایی با ساختار مکانی ساده‌تر و ایستگاه‌های بیشتر (مانند زون سه)، عملکرد بهتری داشته ولی از کریجینگ ضعیف‌تر است.
- ✓ مدل RBF: این مدل در زون‌های یک و سه (سناریوهای دوم و سوم) عملکرد نسبتاً دقیقی از خود نشان داده است. در زون‌های دو و چهار، به ویژه در سناریوهای با داده‌های آموزش کمتر، دقت مدل کاهش یافته و مدل RBF به نتایج ضعیف‌تری نسبت به کریجینگ رسیده است. همچنین در سناریو سوم، مدل RBF به دلیل وجود خطای سیستماتیک قابل توجه، عملکرد خوبی نداشته است.
- ✓ مدل اسپلاین: این مدل در زون‌های مختلف به ویژه در سناریوهایی با داده‌های آموزشی کمتر، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به دیگر روش‌ها داشته است. در زون چهار، مدل اسپلاین در سناریوهای دوم و سوم با خطای سیستماتیک بزرگ‌تر از سناریو سوم مواجه شده است. در زون‌های یک و دو که داده‌ها ساختار مکانی نسبتاً همگن‌تری دارند، اسپلاین عملکرد قابل قبولی داشته ولی همچنان در سناریوهای با داده‌های آموزش کم، از مدل کریجینگ ضعیف‌تر بوده است.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

۲-۵- تحلیل نتایج مدل‌ها در زون‌های ژئودینامیکی مختلف

در این مقاله پنج زون مختلف ژئودینامیکی براساس ایستگاه‌های GNSS موجود و همچنین مطابق با وضعیت تکتونیکی متفاوت جهت تحلیل نتایج مدل‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین نتایج مدل‌های مختلف برای کلیه ایستگاه‌های فلات ایران ارزیابی گردیده است. برای زون‌های مختلف نتایج زیر حاصل شد:

- ✓ زون ۱ (زون شمال‌غربی): در این زون که ویژگی‌های مکانی نسبتاً ساده و همگنی دارد روش کریجینگ بهترین عملکرد را داشته به طوری که در سناریوی اول کمترین RMSE و MAE را ارائه داده است. مدل IDW و اسپلاین نیز عملکرد قابل قبولی در این زون دارند اما در مقایسه با کریجینگ، دقت نتایج پایین‌تر است.

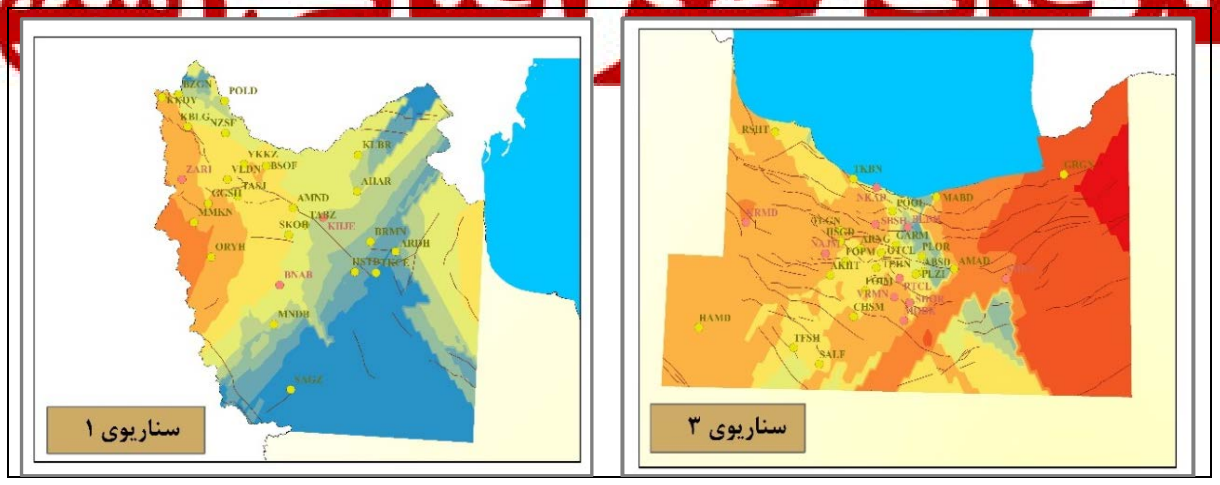
[1] Homogeneous spatial structure

- ✓ زون ۲ (زون البرز مرکزی): در این زون که پراکندگی ایستگاه‌ها بیشتر از زون یک است مدل کریجینگ باز هم عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. با این حال مدل اسپلاین در این زون با داده‌های آموزشی کمتر (سناریو دوم) عملکرد دقیق‌تری از خود نشان داده و خطای سیستماتیک کمتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است.
- ✓ زون ۳ (زون شمال‌شرقی): در این زون مدل‌های کریجینگ و RBF نتایج دقیق‌تری داشته‌اند. با این حال مدل کریجینگ حتی در سناریوهای با داده‌های آموزش کمتر (سناریوهای دوم و سوم) نیز عملکرد بهتری داشته است.
- ✓ زون ٤ (زون نیمه جنوبی): در این زون که توزیع ایستگاه‌ها نامنظم است مدل کریجینگ برای انجام پیش‌بینی‌های دقیق نیاز به داده‌های آموزش بیشتری دارد. مدل‌های اسپلاین و RBF در این زون به ویژه در سناریوهایی با داده‌های آموزشی کمتر عملکرد خوبی نداشته و خطای زیادی داشته‌اند.
- ✓ داده‌های کل کشور (زون فلات ایران): در سطح ۱۰٤ ایستگاه، بررسی سناریوهای آموزش—آزمون نشان می‌دهد که با تغییر سهم داده‌های آموزشی، خطاهای برآوردی نیز تغییر می‌کنند. در اعتبارسنجی مکانی ۲۰/۸۰ با بلوک‌های جغرافیایی، خطاهای کریجینگ و IDW نزدیک بودند و اختلاف آن‌ها برای استنباط برتری قطعی کافی نبود. تفاوت این نتیجه با بعضی رتبه‌بندی‌های تقسیم‌های اولیه نشان می‌دهد که وابستگی مکانی و شیوهٔ انتخاب ایستگاه آزمون بر نتیجه اثر دارد. در مقیاس کشوری، مدل‌های درون‌یابی پیوسته از ایستگاه‌های گسسته برآورد می‌شوند و دقت آن‌ها در نواحی فاقد ایستگاه با محدودیت روبه‌رو است؛ بنابراین تعمیم عملکرد هر روش به تمامی نقاط فلات ایران نیازمند احتیاط است.

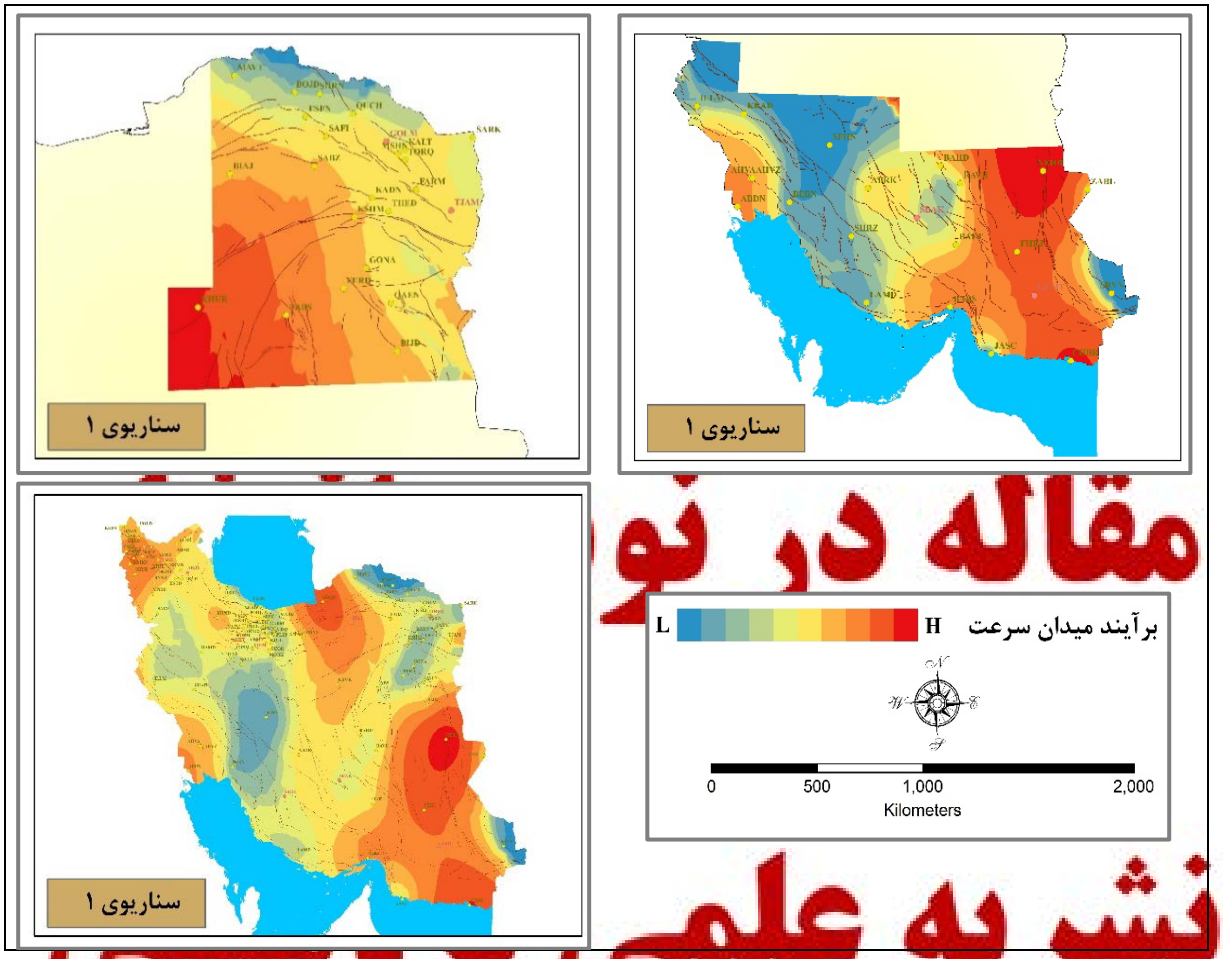
مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

٦- تفسیرهای ژئودینامیکی میدان سرعت

میدان سرعت پوستهٔ زمین در ایران بازتاب فرایندهای تکتونیکی و حرکت بلوک‌های پوسته‌ای است و الگوهای ایستگاه‌های GNSS می‌توانند اطلاعاتی درباره تغییرات مکانی سرعت فراهم کنند. با توجه به ارزیابی اولیه زون‌ها و سناریوها، شکل ۸ میدان پیوستهٔ درون‌یابی‌شده با کریجینگ را برای برخی ترکیب‌ها نمایش می‌دهد. این شکل نمونه‌ای از بازنمایی مکانی داده‌هاست و به‌تنهایی نشان نمی‌دهد که کریجینگ در تمام زون‌ها بهترین روش یا مدل دارای اعتبار فیزیکی تأییدشده برای گسل‌هاست. ارزیابی کمی روش‌ها باید بر داده‌های آزمون کنارگذاشته‌شده و اختلاف خطاها استوار باشد؛ ازاین‌رو نقشه‌ها در کنار نتایج کمی و محدودیت چارچوب مرجع و تراکم شبکه تفسیر می‌شوند.[1]



[1] Active tectonic structures



شکل۸. میدان سرعت پیوسته حاصل از مدل کریجینگ در زون‌های ژئودینامیکی مختلف و سناریوهایی با کمترین مقدار RMSE در مرحله آزمون.

مطابق شکل ۸، الگوی مکانی میدان سرعت در نواحی مختلف یکسان نیست و تفاوت‌هایی میان شمال‌غرب، جنوب‌شرق و اطراف دریای خزر دیده می‌شود. این تفاوت‌ها می‌توانند با ساختار زمین‌ساختی و پوشش مکانی ایستگاه‌ها مرتبط باشند، اما از تطابق بصری گرادیان رنگی با یک گسل، نرخ لغزش یا انباشت کرنش در دو سوی آن مستقیماً به دست نمی‌آید. زلزلهٔ سال ۲۰۱۲ اهر پس از بازهٔ داده‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ رخ داده است و نتایج این پژوهش برای پیش‌بینی آن رویداد استفاده نشده‌اند. همچنین مؤلفه‌های V_x، V_y و V_z در چارچوب ECEF قرار دارند و از آن‌ها بدون تبدیل ENU و تعیین چارچوب مرجع حرکت صفحه، نمی‌توان جهت جغرافیایی «شمال» یا «شمال‌شرق» را برای میدان برآوردشده نتیجه گرفت. در نتیجه، تفسیر ژئودینامیکی این نقشه‌ها به ویژگی‌های دوره و چارچوب مختصات محدود می‌شود.

مقاله در نوع نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

۷- بحث

انتخاب روش درون‌یابی برای مدل‌سازی میدان سرعت پوستهٔ زمین در فلات ایران افزون بر خطاهای عددی، به توزیع ایستگاه‌ها، ناهمگنی فضایی و محدودیت داده‌های GNSS بستگی دارد. نتایج سناریوهای اولیه نشان‌دهندهٔ تفاوت عملکرد روش‌ها در زون‌های مختلف است؛ بااین‌حال اعتبارسنجی تکرارشوندهٔ مکانی نشان داد که کریجینگ و IDW در مقیاس سراسریِ آزمون ۲۰/۸۰ دقتی نزدیک دارند. بنابراین نتیجه‌گیری بر پایه مقایسهٔ خطای ایستگاه‌های کنارگذاشته‌شده، فاصلهٔ اطمینان بلوکی و حدود تفسیر فیزیکی ارائه می‌شود، نه فقط یک تقسیم آموزش–آزمون یا انطباق بصری نقشه‌ها.

دامنهٔ اعتبار نتایج

در این پژوهش، نتایج اصلی با توجه به پراکندگی مکانی ایستگاه‌ها و ساختار تکراری داده‌ها تفسیر می‌شوند. مقدار نقطه‌ای شاخص خطا برای هیچ روشی به‌تنهایی به معنای برتری معنادار نیست و تکرار ایستگاه‌ها در زون‌ها نباید حجم نمونه مستقل را به‌طور مصنوعی افزایش دهد. برای برآورد عدم‌قطعیت، مقایسهٔ زوجی روش‌ها با بوت‌استرپ جغرافیایی انجام شد. داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ هستند و نتیجه‌گیری حاضر دربارهٔ عملکرد روش‌های درون‌یابی در همین دوره است، نه پایش وضعیت امروز گسل‌ها. سه سطح نتیجه باید از یکدیگر جدا شوند: نخست دقت پیش‌بینی در ایستگاه‌های آزمون که با RMSE و MAE سنجیده می‌شود؛ دوم پایداری رتبه‌بندی در برابر حذف بلوک‌های مکانی که با تکرارها و بازنمونه‌گیری بررسی می‌شود؛ و سوم اعتبار فیزیکی ارتباط گرادیان میدان با گسل‌ها که نیازمند آزمون زمین‌ساختی مستقل است. در این مطالعه دو سطح نخست تحلیل کمی دارند، اما برای سطح سوم نه هندسه گسل‌ها به‌صورت مانع وارد مدل شده و نه داده مستقلِ دو طرف گسل با پیش‌بینی‌ها مقایسه شده است. همچنین ناشناخته‌بودن تحقق چارچوب مرجع، تفسیر سرعت مطلق یا نسبی صفحه‌ها را محدود می‌کند. پس نقش نتایج، سنجش قابلیت روش‌های درون‌یابی بر داده‌های تاریخی است، نه پیش‌بینی رخدادهای لرزه‌ای جدید.

ـ تأثیر ساختار زمین‌ساختی و ناپیوستگی‌های مکانی بر انتخاب مدل

یکی از چالش‌های مدل‌سازی میدان سرعت ایران، وجود گسل‌ها و بلوک‌های زمین‌ساختی با رفتارهای متفاوت است. روش‌های IDW، RBF و اسپلاین با فرض‌های مختلفی دربارهٔ هموواری یا وابستگی فاصله‌ای سطح برآوردی می‌سازند؛ کریجینگ نیز همبستگی فضایی داده‌ها را از طریق واریوگرام مدل می‌کند. در برخی نقشه‌ها گرادیان‌های تند یا هموارسازی گسترده دیده می‌شود، اما این تفاوت‌ها به‌تنهایی نشان‌دهندهٔ بازسازی واقعی ناپیوستگی در امتداد گسل نیستند. چون هیچ‌یک از مدل‌های آزمون‌شده در این مقایسه هندسهٔ گسل را به‌عنوان مانع مکانی وارد نکرده‌اند، نمی‌توان برتری فیزیکی کریجینگ یا ناتوانی قطعی سایر روش‌ها را اثبات‌شده تلقی کرد. در کاربردهای تحلیل خطر لرزه‌ای، مقایسه با اندازه‌گیری دو سوی گسل و اعتبارسنجی مکانی مستقل پیش از هر توصیه اجرایی ضروری است.[1]

ـ حساسیت به پراکندگی ایستگاه‌ها و محدودیت‌های داده‌ای

پراکندگی نامنظم ایستگاه‌های GNSS در ایران، به‌ویژه در نیمهٔ جنوبی و مرکزی، محدودیت مهمی برای همهٔ روش‌های درون‌یابی است. در زون‌های متراکم‌تر، داده‌های آموزشی پیرامون ایستگاه‌های آزمون بیشتر است و خطا ممکن است کاهش یابد؛ اما این الگو به پارامترهای مدل و جایگاه بلوک‌های کنارگذاشته‌شده وابسته است. در زون‌های کم‌تراکم، برآورد میدان سرعت به‌تعداد و آرایش نقاط بسیار حساس می‌شود و از یک تقسیم منفرد نمی‌توان آستانه ثابتی مانند «نیاز قطعی کریجینگ به ۹۰ درصد آموزش» نتیجه گرفت. بنابراین مقایسهٔ مدل‌ها باید به‌صورت منطقه‌ای، با گزارش تراکم ایستگاهی و عدم‌قطعیت و با تقسیم‌های مستقل مکانی انجام شود؛ پیشنهاد تلفیق GNSS با InSAR در پژوهش‌های بعدی نیز برای چنین نواحی قابل بررسی است.

ـ مقایسه عملکرد روش‌ها در مقیاس سراسری و محلی

در مجموعه سراسری ایستگاه‌ها، نقشه‌های حاصل از کریجینگ یک سطح پیوسته برآورد می‌کنند و نقشه‌های سایر روش‌ها درجات متفاوتی از هموارسازی نشان می‌دهند. در ۳۰ تقسیم مکانی سناریوی ۲۰/۸۰، اختلاف RMSE و MAE کریجینگ و IDW اندک بود و فاصلهٔ اطمینان بلوکی اختلاف MAE آن‌ها صفر را در برگرفت؛ درنتیجه رتبه‌بندی قطعی این دو مدل بر پایهٔ داده‌های

[1] Over-smoothing

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

حاضر ممکن نیست. رفتار RBF و اسپلاین در همین اعتبارسنجی متفاوت است و در بعضی زون‌ها به انتخاب بلوک‌های آزمون حساسیت دارد. بنابراین داوری دربارهٔ مدل مناسب برای یک ناحیهٔ خاص باید بر اساس خطا و عدم‌قطعیتِ همان ناحیه انجام شود.

ـ محدودیت‌های منطقه‌ای و تعمیم‌پذیری نتایج

باید توجه داشت که نتایج این پژوهش تحت تأثیر محدودیت‌های ذاتی داده‌های GNSS در ایران است و تعمیم قاطع آن‌ها به کل فلات ایران نیازمند احتیاط است:

- **بازه زمانی محدود (۲۰۰۷–۲۰۱۰):** داده‌های مورد استفاده مربوط به دوره‌ای هستند که ممکن است شامل اثرات پس‌لرزه‌ای یا تغییرات کوتاه‌مدت پوسته بوده باشند. تعمیم این مدل‌ها به دوره‌های جدیدتر نیازمند به‌روزرسانی با داده‌های GNSS جاری است.
- **توزیع ناهمگون ایستگاه‌ها:** تراکم ایستگاه‌ها در شمال و شمال‌غرب ایران بسیار بیشتر از نواحی مرکزی و جنوبی است. این موضوع باعث می‌شود دقت مدل کریجینگ در نواحی شمالی بالاتر باشد. در نواحی با ایستگاه‌های کم، عدم قطعیت مدل‌سازی افزایش می‌یابد و نتایج این پژوهش بیشتر نماینده‌ی شرایط مناطق با پوشش ایستگاهی مناسب است.
- **ماهیت غیرنرمال داده‌ها:** توزیع غیرنرمال بردارهای سرعت در برخی زون‌ها، نشان‌دهنده تأثیر رژیم‌های تکتونیکی چندگانه است. روش کریجینگ با استفاده از واریوگرام تجربی، انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش‌های پارامتریک ساده در برابر این ناهنجاری‌ها دارد.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی

۸- نتیجه گیری

این پژوهش چهار روش درون‌یابی را با داده‌های سرعت ۱۰۴ ایستگاه GNSS مقایسه کرد. ارزیابی اولیه در زون‌ها و سناریوهای آموزش–آزمون انجام شد و برای کنترل اثر انتخاب ایستگاه‌ها، تقسیم‌های تکرارشوندهٔ مکانی و فواصل اطمینان بوت‌استرپ بلوکی محاسبه شدند. یافته‌های اصلی با توجه به وابستگی مکانی، عدم‌قطعیت ایستگاه‌ها و محدودیت چارچوب مرجع به شرح زیر تفسیر می‌شوند:

- در شرایط داده‌های حاضر، عملکرد کریجینگ در برخی زیرمجموعه‌ها مطلوب است، اما برتری مطلق آن تأیید نمی‌شود. در آزمون اصلی ۲۰/۸۰، مقدار RMSE برای کریجینگ ۷/۹۶۷ و برای IDW برابر ۷/۸۳۵ میلی‌متر بر سال بود و فاصلهٔ اطمینان اختلاف MAE این دو روش صفر را شامل شد. بنابراین اختلاف مشاهده‌شده برای معرفی یک «بهترین روش» در تمام شرایط کافی نیست. همچنین چون مرز گسل‌ها در مدل به‌صورت مانع مکانی وارد نشده، توانایی بازسازی ناپیوستگی سرعت در امتداد گسل‌ها به‌طور مستقل سنجیده نشده است.
- تأثیر حساسیت منطقه‌ای و تراکم داده‌ها: عملکرد روش‌های درون‌یابی به شدت به ویژگی‌های محلی شبکه GNSS وابسته است. در زون‌هایی با تراکم ایستگاهی مناسب و ساختار تکتونیکی پیچیده (مانند شمال‌غرب و البرز)، کریجینگ عملکردی مطلوب داشت و حتی با کاهش حجم داده‌ها تا حدی، پایداری خود را حفظ کرد. در زون‌هایی با پراکندگی نامنظم و ایستگاه‌های کم (مانند نیمه جنوبی)، دقت مدل‌سازی با کاهش داده‌های آموزشی به شدت افت کرد. این یافته تأکید می‌کند که برای مناطق با شبکه GNSS رقیق، افزایش تراکم ایستگاه‌ها یا استفاده از روش‌های کمکی (مانند

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

تلفیق با داده‌هایInSAR) برای بهبود دقت کریجینگ ضروری است و نتایج در این نواحی با عدم قطعیت بیشتری همراه است.

- روش‌های IDW و RBF در بعضی نواحی یا سناریوها خطاهای قابل‌مقایسه‌ای دارند و اسپلاین در برخی آزمون‌ها به نوسانات بیشتری منجر شده است. ازآنجاکه اعتبار فیزیکی میدان، وابسته به داده‌های مرجع و آزمون کمی در دو سوی گسل است، هیچ روش قطعی یا زمین‌آماری صرفاً بر مبنای ظاهر نقشه، مناسب یا نامناسب مطلق تلقی نمی‌شود.

پیشنهادات برای کاربردهای عملی و پژوهش‌های آتی:

- برای تولید نقشه‌های کاربردی سرعت پوستهٔ زمین، انتخاب الگوریتم باید بر پایهٔ اعتبارسنجی مکانی مستقل، بررسی عدم‌قطعیت ایستگاه‌ها و انتخاب پارامترهای هر مدل انجام شود. در مناطق با پوشش ایستگاهی مناسب می‌توان کریجینگ معمولی یا IDW را بر اساس خطای آزمون همان ناحیه مقایسه کرد؛ اما استفاده از نقشه‌ها برای تحلیل نرخ لغزش گسل‌ها نیازمند داده‌های مکمل و آزمون کمی ساختار گسل است.
- با توجه به محدودیت بازه زمانی داده‌های فعلی (۲۰۰۷–۲۰۱۰)، مدل‌های توسعه یافته در این پژوهش نیازمند به‌روزرسانی با داده‌های GNSS جدیدتر هستند.
- برای مناطق با ایستگاه‌های کم (مانند زون ٤)، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از روش‌های ترکیبی (مانند کریجینگ با متغیرهای کمکی یا تلفیق با داده‌های ماهواره‌ای) استفاده شود تا محدودیت پراکندگی داده‌ها جبران گردد.

انتخاب مدل درون‌یابی نباید تنها بر مبنای کمینهٔ RMSE در یک تقسیم داده یا انطباق بصری نقشه با ساختار زمین‌شناسی انجام شود. در شبکهٔ GNSS ناهمگون ایران، خطای پیش‌بینی، حساسیت به آرایش مکانی ایستگاه‌ها و عدم‌قطعیت سرعت‌ها همگی در نتیجه مؤثرند. بر اساس اعتبارسنجی تکمیلی، کریجینگ و IDW در سناریوی سراسریِ ۲۰/۸۰ خطاهایی نزدیک دارند و برتری فیزیکی یک مدل در امتداد گسل‌ها از نتایج حاضر اثبات نمی‌شود. این نتیجه برای داده‌های سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ معتبر است و تعمیم آن به دورهٔ کنونی مستلزم مشاهدات جدید است.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از داوران محترم به دلیل ارائه نکات بسیار ارزنده و علمی تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین، از سازمان نقشه‌برداری کشور (NCC) به‌دلیل در اختیار گذاشتن مشاهدات ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیک سراسری ایران در بازه زمانی مورد درخواست، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

Ardalan, A., Raoofian, M. (2009). Estimation of strain tensor in geodynamic network. Master's thesis, Technical Faculties Campus, University of Tehran.

Ardalan A., A., Voosoghi, B., Raoofian-Naeeni, M. (2012). Deformation analysis of the Earth crust based on manifold intrinsic geometry Case Study: Deformation analysis of the geodynamic network of Iran within 1999 – 2005. Journal of the Earth and Space Physics, 37(4), pp. 125-146. doi: 10.22059/jesphys.2012.24306.

Ardalan, A., Raoofian, M. (2009). A proposal for deformation analysis via direct computation of strain tensor elements from the time-wise changes in the distances and angles in a geodetic network Case study:

Deformation computation of the geodynamic network of Iran. Journal of the Earth and Space Physics, 35(2).

Bian, et al., (2020). Green's function-based interpolation for crustal velocity field modeling in China.

Benmoshe, N., (2025). A Simple Solution for the Inverse Distance Weighting Interpolation (IDW) Clustering Problem. Sci. 7 (1): 30. doi:10.3390/sci7010030.

Chilès, J. P., Delfiner, P., (2012). Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. (2nd ed.). Wiley.

Cressie, N., (2015). Statistics for Spatial Data. John Wiley & Sons.

Cuevas, E., Luque, A., Escobar, H., (2024). Spline Interpolation. In: Computational Methods with MATLAB®. Synthesis Lectures on Engineering, Science, and Technology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40478-8_8.

Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H., Tavakoli, F., (2011). NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: results from the Iranian permanent GPS network. Earth. Planet. Sci. Lett. 307 (1), 27‑34.

Dach, R., Lutz, S., & Walser, P., (2015). Bernese GNSS Software: User Manual. Version 5.2. stronomical Institute, University of Bern.

Ghaffari Razin, M. R., Voosoghi, B. (2016). Estimation of Velocity Field Using Artificial Neural Networks and Kriging Interpolation (Case Study: Iran Geodynamic GPS Network). Journal of the Earth and Space Physics, 42(1), pp. 89-98. doi: 10.22059/jesphys.2016.53831.

Kordi, K., Hossainali, M.M., (2010). Two-dimensional analysis of Iran's geodynamic network using robustness analysis. Master's thesis, K.N.T. University of Technology.

Li, J., Heap, A. D., (2008). A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. Geoscience Australia Canberra, 137p.

Malekshahian, Z., Raoofian Naeeni, M., (2018). Deformation analysis of Iran Plateau using intrinsic geometry approach and C1 finite element interpolation of GPS observations. Journal of Geodynamics, Volume 119, September 2018, Pages 47-61.

Moghtased-Azar, K., Grafarend, E.W., (2009). Surface deformation analysis of dense GPS networks based on intrinsic geometry: deterministic and stochastic aspects. J.Geodesy 83 (5), 431‑454.

Mehrabi, H.,Voosoghi, B., Motagh, M., Hanssen, R.F., (2019). Three-Dimensional Displacement Fields from InSAR through Tikhonov Regularization and Least-Squares Variance Component Estimation. Journal of Surveying Engineering, Vol. 145, No. 4.

Matheron, G., (1971). The theory of regionalized variables, and its applications. Centre de Geostatistique, Fontainebleau, Paris, 1971.

Rastbood A. (2023). Present-day crustal deformation in Alborz region based on GPS velocity field and spline functions. Iranian Journal of Geophysics, 17(2), pp. 175-197. doi: 10.30499/ijg.2023.364145.1460.

Raeesi, M., Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Boroujeni, S., Tiampo, K., (2017). Quantitative Analysis of Seismicity in Iran. Pure Appl. Geophys, 174(3):793-833.

Rastbood, A., Vosooghi, B., (2012). Study of Tectonic Plate Motions Contribution of the Middle-East Region in the GPS Velocity Field of Iranian Campaign Global Geodynamic Network. Scientific Quarterly Journal. Geosciences, 21(84):15-24.

Shen, Z.-K., Jackson, D. D., McKenzie, D., (1996). Block modeling of crustal deformation in southern California. Journal of Geophysical Research, 101(B12).

Shirzaei, M., (2023). A Kalman Filter Framework for Resolving 3D Displacement Field Time Series By Combining Multitrack Multitemporal InSAR and GNSS Horizontal Velocities. arXiv preprint arXiv:2303.03954.

Watson, A. R., Elliott, J. R., Lazecký, M., Maghsoudi, Y., McGrath, J. D., & Walters, R. J., (2024). An InSAR–GNSS velocity field for Iran. Geophysical Research Letters, 51(10).

Wong, D.W.S., (2017). Interpolation: Inverse-Distance Weighting. In International Encyclopedia of Geography: People, the Earth. Environment and Technology (eds D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu and R.A. Marston).

Wright, G. B., Fornberg, B., (2003). Radial basis function interpolation: numerical and analytical developments. University of Colorado at Boulder College of Engineering Boulder, United States, AAI3087597.

Yilmaz, M., (2013). Artificial neural networks pruning approach for geodetic velocity field determination. BCG - Boletim de Ciências Geodésicas.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Raeesi, M., (2013). Crustal stress Map of Iran: insight from seismic and geodetic computations. Pure and Applied Geophysics, 171(7): p. 1219-1236.

مقاله در نوبت انتشار

نشریه علمی پژوهشی

« اطلاعات جغرافیایی(سپهر)»