

درون‌یابی میدان سرعت مسطحاتی GPS در محدوده برخورد مایل صفحات زمین ساختی عربستان-اوراسیا با استفاده از توابع گرین

*اصغر راستبود

استادیار، گروه نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰)

چکیده

در این پژوهش داده‌های برداری دو بعدی پراکنده میدان سرعت مسطحاتی GPS با استفاده از توابع گرین مستخرج از قبود ارجاعی درون‌یابی می‌شوند. این روش بر اساس توابع گرین یک جسم کشسان است که تحت تأثیر نیروهای صفحه‌ای قرار دارد. رویکرد مورد استفاده در این تحقیق وابستگی کشسانی مایبن دو مؤلفه درون‌یابی را در نظر می‌گیرد. میزان وابستگی را می‌توان با تعییر نسبت پواسون کنترل کرد. هموارسازی با صرف نظر کردن از کوچکترین مقادیر ویژه در ماتریس جواب برای استحکام نیروهای حجمی ناشناخته انجام می‌شود. منطقه موردمطالعه محدوده برخورد مایل صفحات زمین ساختی عربستان-اوراسیا است که دارای میدان سرعت GPS با توزیع نامنظم است. از سیستم تصویر مرکاتور برای ایجاد نیم‌فضا جهت انجام درون‌یابی استفاده شد. بهمنظور آموزش و آزمون داده‌ها به صورت تصادفی به دو مجموعه آموزشی و آزمونی تقسیم شدند. فاصله کمانی نقاط شبکه‌بندی از هم یک دقیقه کمانی در نظر گرفته شد. شبکه‌بندی با نسبت پواسون ۰/۵ جهت درنظر گرفتن وابستگی دو مؤلفه مسطحاتی بردارهای سرعت GPS انجام شد. سرعت‌های مسطحاتی GPS در یک شبکه جغرافیایی منظم با فاصله یک دقیقه کمانی درون‌یابی شدند. داده‌هایی که دور از نقاط شبکه هستند نمایش داده نشدند. در نهایت مقادیر باقی‌مانده مایبن برآوردها و داده‌های ورودی اولیه محاسبه شد. با محاسبه آماره میانگین مربع نسبت انحراف استاندارد (MSDR) برای ارزیابی صحنت شبکه‌بندی مقدار ۰/۸۶ برای این آماره به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: درون‌یابی، توابع گرین، میدان سرعت مسطحاتی GPS، عربستان-اوراسیا.

۱. مقدمه

تفکیک پذیری زمانی بالا بوده ولی از نظر مکانی پراکنده هستند. بسیاری از روش‌های پردازش داده نیازمند توزیع داده‌ها بر روی یک شبکه یکنواخت منظم هستند، به عنوان مثال روش‌هایی که شامل تبدیل فوريه یا محاسبه مشتقات جهت‌دار هستند یا زمانی که از جابه‌جایی‌های حاصل از مشاهدات GPS به عنوان قید در پردازش‌های InSAR استفاده می‌شود.

یکی از تکنیک‌های اساسی برای تبدیل داده‌های گستته به سطوح پیوسته درون‌یابی است. درون‌یابی برآورد مقدار پذیده‌ها در موقعیت‌های نمونه‌برداری نشده با استفاده از مقادیر معلوم در نقاط نمونه‌برداری شده و همسایگی است. خروجی درون‌یابی می‌تواند به عنوان یک لایه اطلاعاتی در تحلیل‌های GIS مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو،

جابه‌جایی سطحی پوسته زمین از نوع داده‌های پیوسته است که در طبیعت از یکپارچگی برخوردار است و هر موقعیت از سطح زمین مقداری از آن را دارا می‌باشد و امکان اندازه‌گیری آن در سطح زمین امکان‌پذیر است. داده‌های پیوسته از جمله جابه‌جایی به دلیل پیوستگی که دارند در تمام نقاط سطح قبل اندازه‌گیری نیستند، لذا عموماً به شکل نمونه‌ای با استفاده از ابزارهای ژئودتیکی برداشت می‌شوند.

جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده بر روی سطح زمین اغلب پراکنده بوده و به صورت ناهمگن توزیع شده‌اند. به عنوان مثال، اندازه‌گیری‌های جابه‌جایی با استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) محدود به در دسترس بودن ایستگاه‌های زمینی هستند. این اندازه‌گیری‌ها دارای دقت و

بررسی شده است.

رویکرد حداقل انحنای چندشبکه‌ای بسیار کارآمد است و می‌تواند مجموعه داده‌های بزرگی تا شاید یک میلیارد نقطه داده را مدیریت کند، ولی دارای عیب همگرایی عددی کند است. روش اسپلاین‌های بی‌هارمونیک به گروهی از رویکردها تعلق دارد که اغلب توابع پایه شعاعی نامیده می‌شوند و مشابه اسپلاین با صفحه نازک است (فرانک، ۱۹۸۲). در این روش‌ها، داده‌ها با ترکیب خطی توابع گرین نمایش داده می‌شوند، $d_i = \sum_{j=1}^M p_j G(x_i, x_j)$ که در آن d_i داده i ام، p_j یک ضریب اسکالر، G تابع گرین، و x_i و x_j به ترتیب بردارهای موقعیت برای داده و نقطه تعریف تابع گرین هستند. درونیابی با برآورده M ضرایب p_j از طریق کمترین مربعات خطی و استفاده از آنها برای پیش‌بینی مقادیر داده‌ها در مکان‌های جدید در شبکه انجام می‌شود. در اصل، این روش‌ها مدل‌های خطی هستند که برای پیش‌بینی استفاده می‌شوند. بسیاری از تکنیک‌های انتخاب و ارزیابی مدل مورد استفاده در یادگیری ماشین را می‌توان برای مسائل شبکه‌بندی نیز به کار برد (اویدا، ۲۰۱۸).

رویکرد مستقیم اسپلاین بی‌هارمونیک اعطاف‌پذیرتر است و می‌تواند داده‌ها را با عدم قطعیت‌های متفاوت درونیابی کند، ولی فقط به چند هزار نقطه محدود می‌شود زیرا نیاز به وارونسازی ماتریس داده N در N دارد. علاوه‌براین، وارونسازی برای دستیابی به یک نتیجه هموار معمولاً نیاز به پایدارسازی عددی دارد. رویکرد اصلی اعمال بارهای نقطه‌ای قائم به یک صفحه کشسان نازک در محل‌های قیود داده است. سپس استحکام این نیروها از طریق وارونسازی کمترین مربعات به نحوی تعديل می‌شود که صفحه تغییر‌شکل یافته با نقاط داده در محدوده عدم قطعیت آنها مطابقت داشته باشد. در ادامه تغییر‌شکل، یا مشتقات آن را می‌توان در هر نقطه از مرزهای داده محاسبه کرد. تابع گرین برای پاسخ یک صفحه کشسان نازک به بار نقطه‌ای در (x_0, y_0) به صورت ساده $\phi(\vec{r}) = [r^2 \ln(r) - 1]$ است که در آن $(x - x_0, y - y_0) = \vec{r}$

درونیابی اندازه‌گیری‌های پراکنده روی یک شبکه منظم (شبکه‌بندی) یک مسئله مهم در علوم زمین است. میزان صحبت نتایج درونیابی به دقت مکانی، تعداد و توزیع نقاط معلوم و مدل‌های مورد استفاده بستگی دارد. بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که رفتار تابع ریاضی با رفتار پدیده موردنظر مشابه باشد (حسنی‌پاک، ۱۳۸۹).

روش‌های رایج درونیابی داده‌های اسکالر با موقعیت تصادفی بر روی یک شبکه منظم عبارت‌اند از شبکه‌های عصبی، کریجینگ، تفاضل محدود، حداقل انحنای چندشبکه‌ای (اسمیت و وسل، ۱۹۹۰؛ سوین، ۱۹۷۶؛ بریگز، ۱۹۷۴) یا روش اسپلاین‌های بی‌هارمونیک (سندول، ۱۹۸۷؛ وسل و برکوویچی، ۱۹۹۸).

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در علم ژئودزی و بویژه بررسی کارایی آن در پیش‌بینی رفتار پدیده‌های غیرخطی به سالیان اخیر برمی‌گردد. قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورده میدان سرعت ایستگاه‌های GPS توسط مقتصدآذر و زالتیک (۲۰۰۹) بررسی شده است. گولو و همکاران در سال ۲۰۱۱ درونیابی برمبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی را جهت برآورده میدان سرعت ارزیابی کردند. از روش ایزوپارامتریک سه‌بعدی به همراه شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت مدل‌سازی سه‌بعدی میدان سرعت پوسته زمین استفاده شده است (غفاری رزین و محمدزاده، ۲۰۱۵).

درونیابی کریجینگ نیز یک روش آماری دقیق برای برآورده رفتار پدیده‌های غیرخطی است. با توجه به ماهیت روش کریجینگ می‌توان از آن برای برآورده میدان سرعت پوسته زمین استفاده کرد. از این روش برای برآورده میدان سرعت پوسته در کشور ترکیه استفاده شده است (ونگورپ و همکاران، ۲۰۰۶). از انترپلاسیون کریجینگ تعمیم یافته برای برآورده میدان سرعت پوسته در منطقه اروپا استفاده شده است (بگسز و همکاران، ۲۰۱۳). کارایی و قابلیت استفاده از دو روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و درونیابی کریجینگ، برای برآورده میدان سرعت توسط غفاری رزین و وثوقی در سال ۱۳۹۵

می‌کند تطابق داد.

۲. توابع گرین

هدف محاسبه بردار جابه‌جایی دو بعدی $\vec{u}(x, y) = \hat{u}(x, y)\hat{i} + v(x, y)\hat{j}$ از نیروی حجمی برداری دو بعدی صفحه‌ای است. هایزن و همکاران (۲۰۱۵) معادلات تعادل نیروی شبیه‌استاتیک را در دو بعد به صورت زیر توسعه دادند:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{2}{1-\nu}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{2\nu}{1-\nu}\right) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \\ & + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = \frac{-f_x}{\mu} \delta(x) \delta(y) \\ & \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \left(\frac{2\nu}{1-\nu}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \\ & + \left(\frac{2}{1-\nu}\right) \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{-f_y}{\mu} \delta(x) \delta(y), \end{aligned} \quad (1)$$

که ۷ نسبت پواسون، μ مدول برشی و (f_x, f_y) بردار نیرو است. واحدان نیرو در فاصله هستند و نیروها در یک نقطه با استفاده از تابع دلتای دو بعدی $\delta(x)\delta(y)$ اعمال می‌شوند. این مسئله به راحتی با گرفتن تبدیل فوریه دو بعدی معادلات (۱) حل می‌شود. معادلات تبدیل شده به-

صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{2}{1-\nu}\right) k_x^2 + k_y^2 & \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right) k_x k_y \\ \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right) k_x k_y & \left(\frac{2}{1-\nu}\right) k_y^2 + k_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(\vec{k}) \\ V(\vec{k}) \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi^2 \mu} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن k_x و k_y تعداد موج (عکس طول موج) هستند. برای تعیین پاسخ نیروی نقطه‌ای بایستی این مجموعه معادلات معکوس شده و تبدیل فوریه دو بعدی معکوس نتیجه گرفته شود. معکوس ماتریس به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} U(\vec{k}) \\ V(\vec{k}) \end{bmatrix} = \frac{1}{8\pi^2 \mu k_r^4} \begin{bmatrix} 2k_r^2 - (1+\nu)k_x^2 & -(1+\nu)k_x k_y \\ -(1+\nu)k_x k_y & 2k_r^2 - (1+\nu)k_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن $k_r^2 = k_x^2 + k_y^2$. در حالت خاص نسبت پواسون ۱، جواب به صورت زیر ساده می‌شود:

می‌باشد. ولل و برکوویچی در سال ۱۹۹۸ این روش را توسعه دادند تا کشش درون صفحه را نیز دربرگیرد که باعث ریزش اضافه‌جهش‌های نامطلوب صفحه کشسان می‌شود. در این حالت تابع گرین کمی پیچیده‌تر است، $\phi(\vec{r}) = K_0(pr) + \ln(pr)$ ، که در آن K_0 تابع بسل اصلاح شده نوع دوم مرتبه صفر، و p مربوط به ضریب کشش تعیین شده است.

در این تحقیق از یک رویکرد مشابه تابع گرین برای درون‌یابی داده‌های برداری دو بعدی استفاده می‌شود که ایده جدیدی نیست ولی در این تحقیق برای اولین بار از این ایده برای درون‌یابی میدان سرعت مسطحاتی در محدوده برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان-اوراسیا استفاده می‌شود. هایزن و هولت (۱۹۹۳) و هایزن و همکاران (۲۰۱۵) استفاده از یک مدل کشسان دو بعدی را برای بیان وابستگی بین دو مؤلفه سرعت مسطحاتی GPS پیشنهاد کردند. اساس رویکرد شیوه به روش درون‌یابی اسپلاین بی‌هارمونیک است. نیروهای برداری درون صفحه‌ای در مکان‌های داده اعمال می‌شوند. این نیروها جسم کشسان را تغییرشکل می‌دهند و در نتیجه یک میدان تغییرشکل برداری ایجاد می‌شود. بردارهای نیرو به نحوی تعديل می‌شود تا سرعت‌ها بر داده‌های برداری منطبق شوند. هایزن و همکاران (۲۰۱۵) از رویکرد مدل‌سازی المان محدود استفاده کردند که در آن گره‌های المان در مکان‌های داده قرار می‌گیرند تا تابع گرین محاسبه شوند و سپس از روش کمترین مربuat برای تعديل نیروها جهت مطابقت با داده‌ها استفاده می‌شود. در این تحقیق محاسبات اجزای محدود با تابع گرین تحلیلی برای پاسخ درون صفحه‌ای یک جسم کشسان دو بعدی به نیروهای درون صفحه‌ای جایگزین می‌شوند. این امر محاسبات را بسیار ساده می‌کند و امکان محاسبه تحلیلی گرادیان تغییرشکل (تansور کرنش) را فراهم می‌کند. علاوه‌براین، با تنظیم نسبت پواسون می‌توان میدان کرنش را با حالت‌های حدی تراکم‌ناپذیر (۱/۰)، کشسان (۵/۰)، یا حتی مقدار ۱- که اساساً وابستگی کشسانی درون‌یابی برداری را حذف

آنها در معادله دیفرانسیل اصلی یعنی رابطه (۱) بررسی کرد که با قابلیت جبر کامپیوتراً قابل انجام است. در ادامه روش عددی شرح داده می‌شود. هدف محاسبه یک میدان سرعت برداری هموار است که با مجموعه محدودی از N بردار اندازه‌گیری شده (\vec{r}_i) و $u(\vec{r}_i)$ و $v(\vec{r}_i)$ مطابقت دارد، که $(x_i, y_i) = \vec{r}_i$ مکان برداره است. این کار با حل مجموعه N بردار نیروی حجمی f_x^j و f_y^j که در مکان‌های اندازه‌گیری سرعت اعمال می‌شوند، انجام می‌شود. برای تعیین نیروهای حجمی، سیستم معادلات خطی $2N \times 2N$ زیر معکوس می‌شود:

$$\begin{bmatrix} u(\vec{r}_i) \\ v(\vec{r}_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(\vec{r}_i - \vec{r}_j) & w(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \\ w(\vec{r}_i - \vec{r}_j) & p(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^j \\ f_y^j \end{bmatrix} \quad (9)$$

ماتریس $2N \times 2N$ رابطه (۹) را می‌توان به روش‌های مختلفی مانند الگوریتم تجزیه مقدار منفرد (SVD) حل کرد. کاربر می‌تواند تصمیم بگیرد که تمام مقادیر منفرد (جواب تجزیه LU) یا یک زیرمجموعه آن را که منجر به هموارسازی جواب می‌شود، حفظ کند. در نهایت، می‌توان میدان سرعت برداری را در هر مکانی با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد (سندول و وسل، ۲۰۱۶):

$$\begin{aligned} u(\vec{r}) &= \sum_{j=1}^N [q(\vec{r} - \vec{r}_j)f_x^j + w(\vec{r} - \vec{r}_j)f_y^j] \\ v(\vec{r}) &= \sum_{j=1}^N [w(\vec{r} - \vec{r}_j)f_x^j + p(\vec{r} - \vec{r}_j)f_y^j] \end{aligned} \quad (10)$$

به منظور ارزیابی صحت برآوردهای حاصل از درون‌یابی (Cross-Validation) می‌توان از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده کرد. بدین صورت که همه داده‌های اولیه یک‌به‌یک از محاسبات خارج شده و مجدداً برآورد می‌شوند. سپس از تفاضل مقادیر اولیه و برآورده شده با محاسبه آماره میانگین مربع نسبت انحراف استاندارد (MSDR) برای ارزیابی صحت شبکه‌بندی استفاده می‌شود (الیور و وستر، ۲۰۱۵). در صورتی که برآوردها کاملاً صحیح و بدون اشتباه باشند مقدار این آماره باید برابر یک شود که به مفهوم تساوی واریانس مقادیر واقعی با

$$\begin{bmatrix} U(\vec{k}) \\ V(\vec{k}) \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi^2\mu k_r^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

این حالت متناظر با درون‌یابی بدون وابستگی بین دو مؤلفه سرعت است و تابع گرین به صورت ساده $\phi(\vec{r}) = \ln r$ است. در این حالت دو مؤلفه سرعت GPS وابسته نبوده و به صورت جداگانه درون‌یابی می‌شوند. جواب عمومی به رابطه (۳) بستگی دارد:

$$\begin{aligned} Q(\vec{k}) &= \frac{2k_r^2 - (1+\nu)k_x^2}{k_r^4}, \\ P(\vec{k}) &= \frac{2k_r^2 - (1+\nu)k_y^2}{k_r^4}, \\ W(\vec{k}) &= \frac{-(1+\nu)k_x k_y}{k_r^4}. \end{aligned} \quad (5)$$

برای به دست آوردن جواب در حوزه مکان، بایستی تبدیل فوریه معکوس دو بعدی چهار تابع مؤلفه زیر برآورد شود:

$$\begin{aligned} F_2^{-1} \left[\frac{1}{k_x^2 + k_y^2} \right], \\ F_2^{-1} \left[\frac{k_x^2}{(k_x^2 + k_y^2)^2} \right], \\ F_2^{-1} \left[\frac{k_y^2}{(k_x^2 + k_y^2)^2} \right], \\ F_2^{-1} \left[\frac{k_x k_y}{(k_x^2 + k_y^2)^2} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

تبدیلات معکوس چهار تابع فوق ساده بوده و به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} -\ln r, \\ \frac{1}{2} \left[\frac{y^2}{r^2} - \ln r \right], \\ \frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{r^2} - \ln r \right], \\ -\frac{1}{2} \frac{xy}{r^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

در حوزه مکان، سه تابع گرین رابطه (۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} q(\vec{r}) &= 4 \ln r + (1+\nu) \left(\frac{y^2}{r^2} - \ln r \right) \\ &= (3-\nu) \ln r + (1+\nu) \frac{y^2}{r^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$p(\vec{r}) = (3-\nu) \ln r + (1+\nu) \frac{x^2}{r^2}$$

$$w(\vec{r}) = -(1+\nu) \frac{xy}{r^2}$$

صحت توابع گرین را می‌توان با نشان دادن صدق کردن

وابستگی مابین دو مؤلفه مسطحاتی سرعت را فراهم کرده و منجر به درون‌یابی دقیق‌تری از میدان سرعت و کرنش می‌شود.

به منظور شبکه‌بندی از گسترده‌ترین و به روزترین میدان سرعت GPS یکپارچه برای منطقه برخورد مایل صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان-اوراسیا استفاده شد (شکل ۱). این میدان نتیجه ترکیب پردازش داده‌های جمع‌آوری شده در طول ۱۰ سال از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ از شبکه دائمی GNSS ایران (IPGN) با میدان‌های سرعت منتشر شده قبلی از مشاهدات GPS طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۳ است (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹).

چون توابع گرین مورد استفاده برای محیط نیم‌فضا توسعه داده شده‌اند لذا از سیستم تصویر مرکاتور برای ایجاد نیم‌فضا جهت انجام درون‌یابی و شبکه‌بندی استفاده شد (سندول و ول، ۲۰۱۶). انتخاب سیستم تصویر مرکاتور اختیاری است و می‌توان از سیستم‌های تصویر دیگر نیز استفاده کرد. داده‌ها به صورت تصادفی به دو مجموعه آموزشی و آزمونی تقسیم شدند. شبکه‌بندی برداری با استفاده از مجموعه آموزشی انجام شد و از مجموعه آزمون برای ارزیابی خوبی عملکرد درون‌یابی استفاده شد. فاصله کمانی نقاط شبکه جغرافیایی منظم از هم یک دقیقه کمانی در نظر گرفته شد. برای درنظر گرفتن وابستگی مابین دو مؤلفه مسطحاتی بردارهای سرعت GPS نسبت پواسن با روند سعی و خطأ جهت رسیدن به بهترین حالت اعتبارسنجی برابر ۰/۵ انتخاب شد. برآش روی داده‌های آموزشی انجام شد و از داده‌های تست برای اعتبارسنجی استفاده شد. در بهترین حالت داده‌های آزمایشی به طور کامل پیش‌بینی شده و امتیاز یک به برآش داده می‌شود. داده‌هایی که دور از نقاط شبکه هستند نمایش داده نشدن. سپس مقادیر باقی‌مانده مابین پیش‌بینی‌ها و داده‌های ورودی اولیه محاسبه شد. در نهایت بردارهای سرعت اولیه، بردارهای سرعت شبکه‌بندی شده و باقی‌مانده‌ها ترسیم شدند. شکل ۲ مؤلفه شرقی-غربی، شکل ۳ مؤلفه شمالی-جنوبی و شکل ۴ دامنه میدان سرعت درون‌یابی

واریانس برآوردها خواهد بود.

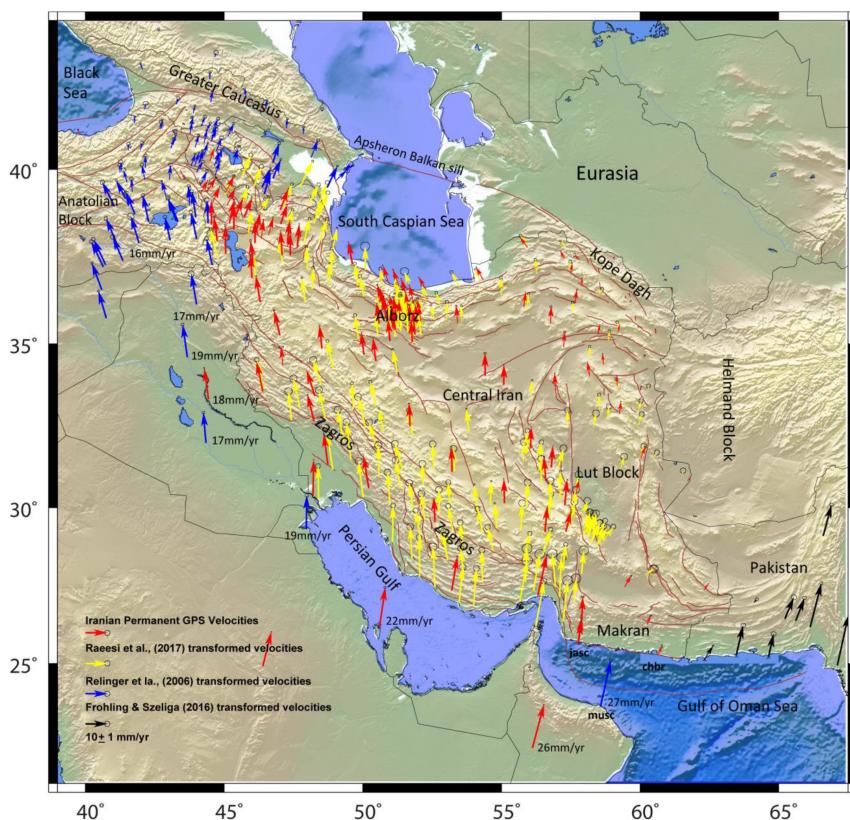
$$MSDR = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[(\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)) / \hat{\sigma}(x_i) \right]^2 / n} \quad (11)$$

۳. محاسبات

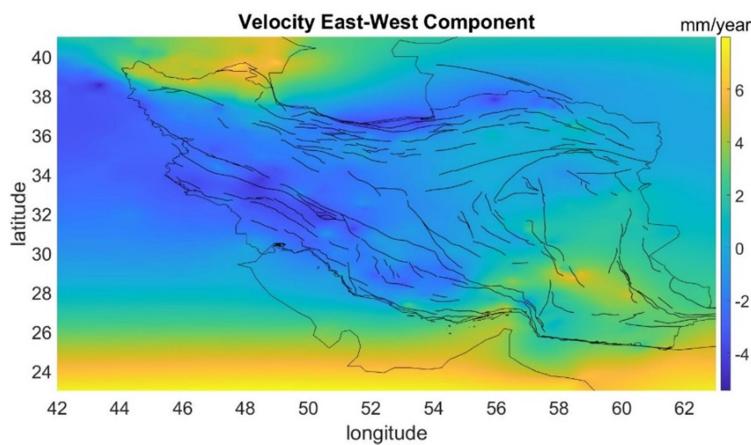
میدان سرعت دو بعدی حاصل از اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی سطحی، کمیت مهمی است که برای اندازه‌گیری کرنش محلی در بالای گسل‌های قفل شده و همچنین تجمع کرنش در داخل بلوک‌های پوسته استفاده می‌شود. گسل‌هایی که عمق قفل‌شده‌گی کمی دارند به تفکیک مکانی ۲ الی ۳ کیلومتر داده‌های ژئودتیکی سطحی نیاز دارند (اسمیت و سندول، ۲۰۰۳). در حالی که حداقل فاصله ایستگاه‌های GPS در منطقه موردمطالعه ۱۰ الی ۱۵ کیلومتر است (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹)؛ بنابراین میدان نرخ کرنش به طور کامل توسط داده‌های GPS به دست نخواهد آمد. در حال حاضر، چندین رویکرد برای تعیین نرخ کرنش با استفاده از داده‌های برداری GPS وجود دارد. دقیق‌ترین رویکردها مفروضاتی را در مورد موقعیت، نرخ لغزش و عمق قفل‌شده‌گی گسل‌های اصلی در نظر می‌گیرند (هرن و همکاران، ۲۰۱۰) که عموماً براساس مدل‌های بلوکی هستند. گاهی اوقات این مدل‌ها دارای یک کرنش یکنواخت در فضای داخلی بلوک هستند تا سرعت باقی‌مانده‌ای که توسط نابرجایی‌های قفل شده گرفته نشده را جذب کنند (مک‌کافری و همکاران، ۲۰۱۳). رویکرد دیگر این است که هیچ فرضی در مورد ساختار گسل نداشته و به سادگی یک درون‌یابی بی‌هارمونیک از هر مؤلفه سرعت به طور مستقل انجام شود (هاکل و همکاران، ۲۰۰۹) که به نتایج غیربهینه منجر می‌شود. رویکرد کمترین مربعات وزنده‌شده با فاصله، که توسط شن و همکاران (۲۰۱۵) توسعه یافته است، یک نقشه نرخ کرنش بهبود یافته را بدون استفاده از اطلاعات پیشین در مورد موقعیت و جهت گسل ارائه می‌دهد. رویکرد درون‌یابی ارائه شده توسط هایزن و هولت (۱۹۹۳) و هایزن و همکاران (۲۰۱۵) امکان

خطای مشاهدات GPS قرار گرفته است. مقادیر درون یابی شده دامنه بردارهای باقیمانده میدان سرعت شبکه‌بندی شده نسبت به میدان سرعت مشاهداتی در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق مدل اکادا (۱۹۸۵) دامنه جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از لغزش یک گسل در نزدیکی گسل بیشینه بوده و با فاصله گرفتن از گسل کم می‌شود. بردارهای باقیمانده با دامنه بزرگ تا ۳ میلی‌متر می‌تواند ناشی از نزدیک بودن ایستگاه مشاهداتی به گسل خاص یا تغییرات محلی نسبت پواسن در آن منطقه باشد. به منظور ارزیابی صحت برآوردهای حاصل از درون یابی از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. با محاسبه آماره میانگین مریع نسبت انحراف استاندارد (MSDR) برای ارزیابی صحت شبکه‌بندی مقدار ۰/۸۶ برای این آماره به دست آمد.

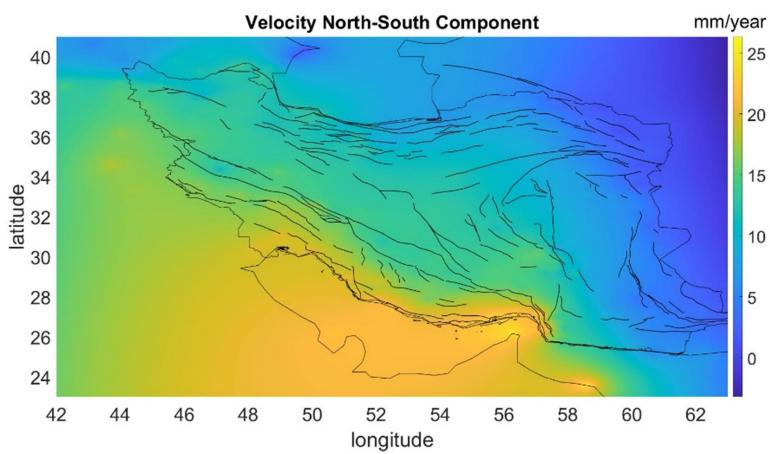
شده نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲ دامنه مؤلفه شرقی-غربی در شمال غرب و جنوب شرق مثبت و در غرب، شمال و شمال شرق منفی و در مرکز و شرق ایران حول و حوش صفر است. همچنین مطابق شکل ۳ دامنه مؤلفه شمال-جنوبی از جنوب غرب به شمال شرق ایران در حال کاهش است. در حالت کلی دامنه میدان سرعت درون یابی شده از جنوب به شمال و از غرب به شرق ایران در حال کاهش است (شکل ۴). بردارهای سرعت درون یابی شده در محل ایستگاه‌های مشاهداتی GPS نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا در محل ایستگاه‌های مشاهداتی GPS بر حسب میلی‌متر در سال در شکل ۵ نشان داده است. شکل ۶ بردارهای باقیمانده میدان سرعت شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد. مطابق این شکل در اکثر موارد بردار باقیمانده در داخل بیضی



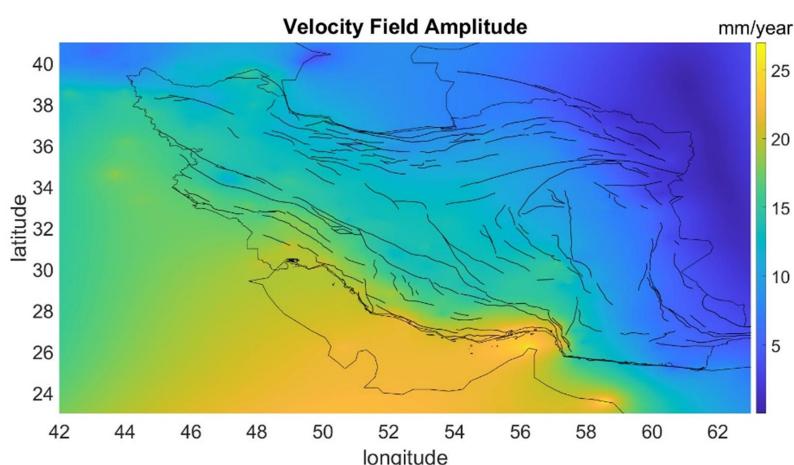
شکل ۱. میدان سرعت GPS یکپارچه نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹، ۲۰۱۶). میدان‌های سرعت رایلینگر و همکاران، ۲۰۰۶ (بردارهای آبی)، فرولینگ و شلایگا، ۲۰۱۶ (بردارهای سیاه) و رئیسی و همکاران، ۲۰۱۷ (بردارهای زرد) به چارچوب مرجع IPGN تبدیل شده‌اند (بردارهای قرمز). گسل‌های اصلی ایران، شرق ترکیه و قفقاز از حسامی و همکاران (۲۰۰۳)، طالیان و همکاران (۲۰۱۳)، قدس و همکاران (۲۰۱۵) اقتباس شده است.



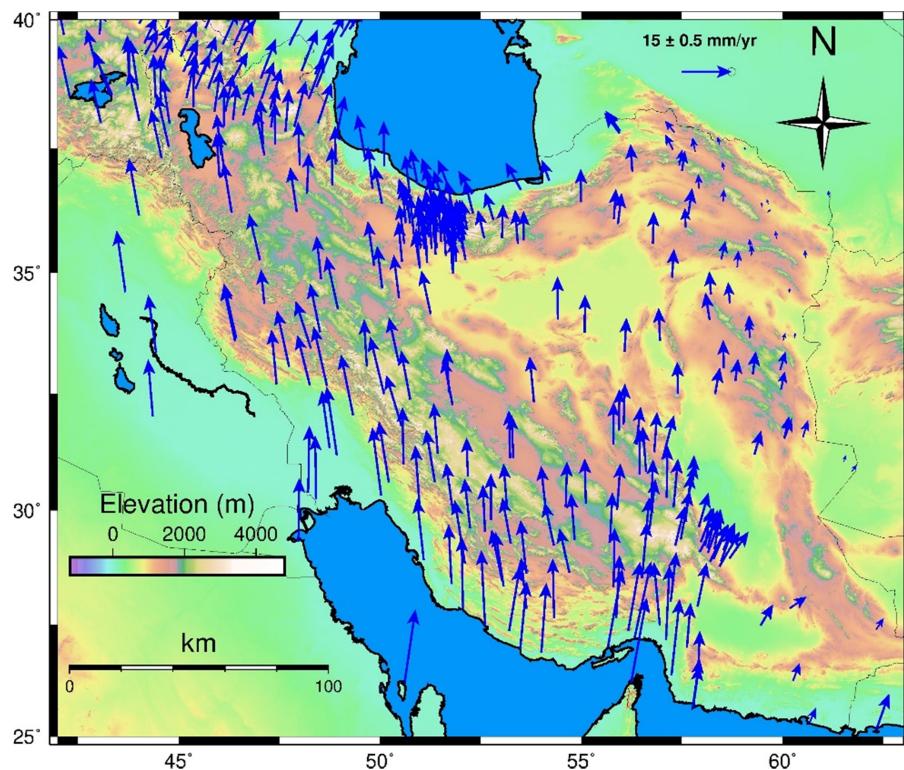
شکل ۲. مؤلفه شرقی-غربی میدان سرعت درون‌یابی شده نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا برحسب میلی‌متر در سال. دامنه این مؤلفه در شمال غرب و جنوب شرق مثبت و در غرب، شمال و شمال شرق منفی و در مرکز و شرق ایران حول و حوش صفر است.



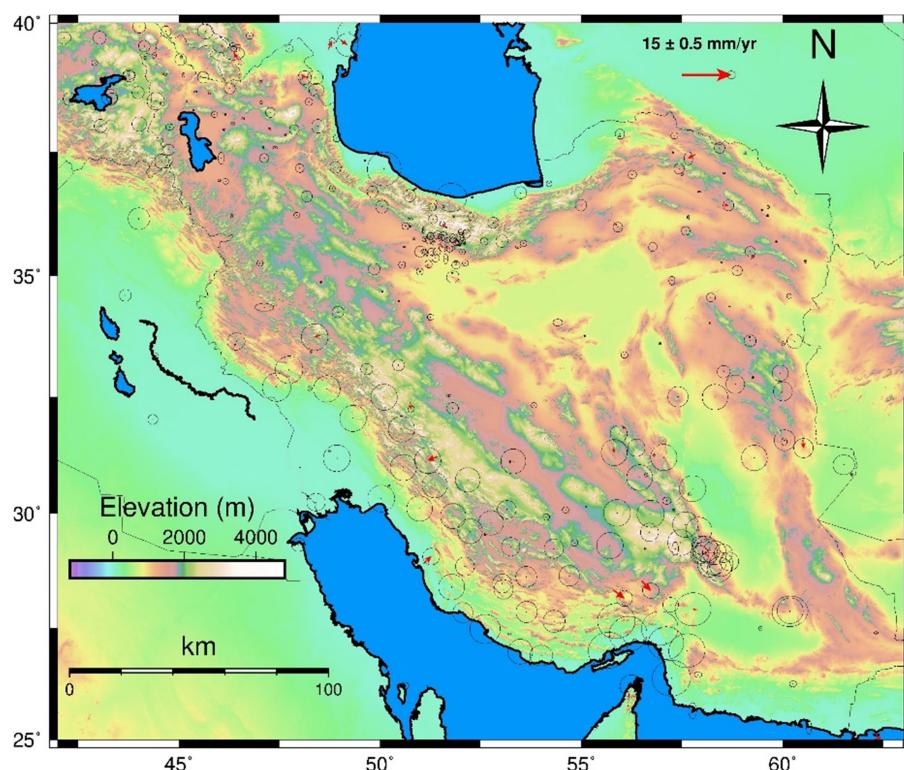
شکل ۳. مؤلفه شمالی-جنوبي میدان سرعت درون‌یابی شده نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا برحسب میلی‌متر در سال. دامنه این مؤلفه از جنوب غرب به شمال شرق ایران در حال کاهش است.



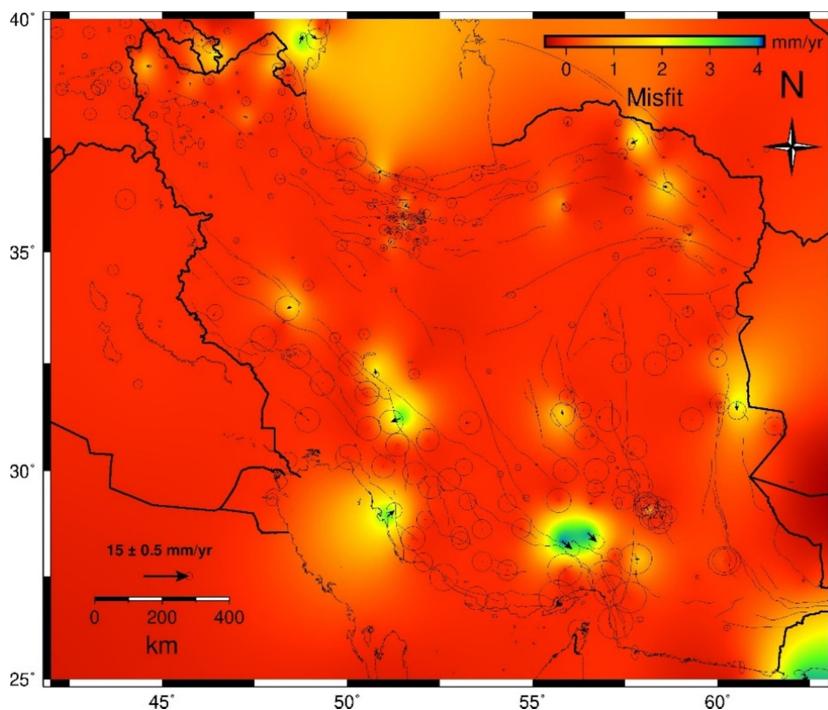
شکل ۴. دامنه میدان سرعت درون‌یابی شده نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا برحسب میلی‌متر در سال. دامنه میدان سرعت درون‌یابی شده از جنوب غرب به شمال شرق ایران در حال کاهش است.



شکل ۵. بردارهای سرعت درون‌بایی شده نسبت به چارچوب ثابت اوراسیا در محل ایستگاه‌های مشاهداتی GPS بر حسب میلی‌متر در سال. رنگ زمینه نشان‌دهنده توپوگرافی می‌باشد.



شکل ۶. بردارهای باقی‌مانده میدان سرعت شبکه‌بندی شده بر حسب میلی‌متر در سال. در اکثر موارد بردار باقی‌مانده در داخل بیضی خطای مشاهدات GPS قرار گرفته است. رنگ زمینه نشان‌دهنده توپوگرافی می‌باشد.



شکل ۷. درون‌یابی دامنه بردارهای باقی‌مانده شبکه‌بندی شده نسبت به میدان سرعت مشاهداتی برحسب میلی‌متر در سال.

داده‌های نویزدار مهم خواهند بود. اولین مورد این است که اگر نسبت بزرگترین به کوچک‌ترین فاصله موقعیت‌های برداری خیلی زیاد شود، وارون‌سازی مجموعه معادلات خطی در رابطه (۹) از نظر عددی ناپایدار خواهد بود.

در این تحقیق برای نخستین بار درون‌یابی به‌منظور شبکه‌بندی میدان سرعت مسطحاتی GPS در محدوده برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان-اوراسیا با استفاده از توابع گرین مستخرج از قیود ارجاعی با میانگین مریع نسبت انحراف استاندارد 0.86 ± 0.04 انجام گرفت. شبکه‌بندی حاصل از درون‌یابی را می‌توان به عنوان یک لایه اطلاعاتی در تحلیل‌های GIS مورد استفاده قرار داد.

درون‌یابی میدان‌های سرعت مسطحاتی GPS شبکه‌های ژئodynamیک محلی برای رسیدن به برآوردهای از مقادیر نسبت پواسن به صورت محلی در بهترین حالت صحبت‌سنگی پیشنهاد می‌شود.

در این تحقیق درون‌یابی داده‌های دو بعدی GPS انجام شد. شبکه‌بندی داده‌های سه بعدی GPS نیز با استفاده از

۴. بحث و نتیجه‌گیری

محاسبه صحیح کرنیش در پوسته زمین نیازمند شبکه‌بندی و افزایش تراکم مشاهدات پراکنده GPS با درون‌یابی است. یکی از راه‌های شبکه‌بندی داده‌های برداری، شبکه‌بندی هر مؤلفه به طور جداگانه است. روش جایگزین شبکه‌بندی همزمان دو مؤلفه به گونه‌ای است که وابستگی مؤلفه‌ها از طریق تئوری تغییر‌شکل کشسان در نظر گرفته شود. این رویکرد به ویژه برای داده‌هایی مانند سرعت‌های مسطحاتی GPS که نشان‌دهنده تغییر شکل کشسان یا نیمه‌کشسان است، مناسب می‌باشد.

هرچند رویکرد تحلیلی مورد استفاده در این تحقیق جدید نیست، ولی بینشی در مورد وابستگی رفتار درون‌یابی به طیف وسیعی از مقادیر نسبت پواسن ارائه می‌دهد. این رویکرد درون‌یابی بهبود یافته داده‌های برداری پراکنده را زمانی که فیزیک ماده تغییر‌شکل دهنده از معادلات ارجاعی پیروی می‌کند، فراهم می‌آورد. ویژگی‌های دیگری در این رویکرد وجود دارد که در این تحقیق مورد بحث قرار نگرفته‌اند، هرچند برای درون‌یابی

انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۳۱۴ ص.

غفاری رزین، م. ر. و وثوقی، ب.، ۱۳۹۵، برآورد میدان سرعت پوسته زمین با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و درون‌یابی کریجینگ فراگیر (منطقه موردمطالعه: شبکه ژئودینامیک کشور ایران)، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۱)، ۸۹-۹۸.

- Bogusz, J., Klos, A., Grzempowski, P. and Kontny, B., 2013, Modelling the velocity field in a regular grid in the area of poland on the basis of the velocities of European permanent stations, *Pure and Applied Geophysics*, doi: 10.1007/s00024-013-0645-2.
- Briggs, I. C., 1974, Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, 39(1), 39–48.
- Frohling, E. and Szeliga, W., 2016, GPS constraints on interpolate locking within Makran subduction zone, *Geophys. J. Int.*, 205, 67–76.
- Franke, R., 1982, Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines. *Computers & Mathematics with Applications*, 8(4), 273–281. doi:10.1016/0898-1221(82)90009-8.
- Ghaffari Razin, M. R. and Mohammadzadeh, A., 2015, 3-D crustal deformation analysis using isoparametric method and multi-layer artificial neural networks (Case Study: Iran), *Engineering Journal of Geospatial Information Technolog*, 2 (4), 1-15.
- Ghods, A., Shabani, E., Bergman, E., Faridi, M., Donner, S., Mortezanejad, G. and Aziz Zanjani, A., 2015, The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet (Mw 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran. *Geophys. J. Int.*, 203, 522–540.
- Gullu, M., Yilmaz, I., Yilmaz, M. and Turgut, B., 2011, An alternative method for estimating densification point velocity based on back propagation artificial neural networks, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55(1), 73-86.
- Hackl, M., Malservaisi, R. and Wdowinski, S., 2009, Strain pattern from dense GPS networks, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 9, 1177–1187.
- Haines, A. J. and Holt, W. E., 1993, A procedure for obtaining the complete horizontal motions within zones of distributed deformation from the inversion of strain rate data, *J. Geophys. Res.*, 98, 12,057–12, 082, doi:10.1029/93JB00892.
- Haines, A. J., Dimitrova, L. L., Wallace, L. M. and Williams, C. A., 2015, Enhanced Surface Imaging of Crustal Deformation: Obtaining

توابع گرین ارائه شده توسط اویدا و همکاران (۲۰۱۸) قابل انجام است. همچنین استفاده از توابع گرین مختلف برای شبکه‌بندی انواع داده‌های مکانی پیشنهاد می‌شود.

مراجع

حسنی پاک، ع. ا.، ۱۳۸۹، زمین آمار (ژئواستاتیستیک)،

- Tectonic Force Fields Using GPS Data, 99 pp., Springer Int. Publ., New York, doi:10.1007/978-3-319-21578-5.
- Hearn, E., Johnson, K., Sandwell, D. and Thatcher, W., 2010, SCEC UCERF workshop report. [Available at http://www.scec.org/workshops/2010/gps-ucerf3/FinalReport_GPS_UCERF3Workshop.pdf.]
- Hessami, K., Jamali, F. and Tabassi, H., 2003, Major Active Faults of Iran (map), Ministry of Science, Research and Technology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., Saadat, S. A., Walpersdorf, A., Hosseini, S., Tavakoli, P., Aghamohammadi, A. and Alijanzade, M., 2019, An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophys. J. Int.*, 217, 832–843.
- McCaffrey, R., King, R. W., Payne, S. J. and Lancaster, M., 2013, Active tectonics of northwestern US inferred from GPS-derived surface velocities, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 709–723, doi:10.1029/2012JB009473.
- Moghtased-Azar, K. and Zaletnyik, P., 2009, Crustal velocity field modeling with neural network and polynomials, in: Sideris, M.G., (Ed.), *Observing our changing Earth*, International Association of Geodesy Symposia, 133, 809-816.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 4, 1135-1154.
- Oliver, M. A. and Webster, R., 2015, Basic steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging, Springer, 106 pp.
- Raeesi, M., Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Boroujeni S. and Tiampo, K., 2017, Quantitative Analysis of Seismicity in Iran. *Pure Appl. Geophys.*, 174, 793-833.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan,

- R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. and Karam, G., 2006, GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *J. geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JB004051.
- Sandwell, D. T. and Wessel P., 2016, Interpolation of 2-D vector data using constraints from elasticity, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10, 703–10,709, doi:10.1002/2016GL070340.
- Sandwell, D. T., 1987, Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 139–142, doi:10.1029/GL014i002p00139.
- Shen, Z. K., Wang, M., Zeng, Y. and Wang, F., 2015, Optimal interpolation of spatially discretized geodetic data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105(4), 2117–2127, doi:10.1785/0120140247.
- Smith, B. and Sandwell, D., 2003, Coulomb stress accumulation along the San Andreas Fault system, *J. Geophys. Res.*, 108(B6), 2296, doi:10.1029/2002JB002136.
- Smith, W. H. F. and Wessel, P., 1990, Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, 55(3), 293–305, doi:10.1190/1.1442837.
- Swain, C. J., 1976, A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature, *Comput. Geosci.*, 1(4), 231–240.
- Talebian, M., Ghorashi, M. and Nazari, H., 2013, Seismotectonic map of the Central Alborz, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran.
- Uieda, L., 2018, Verde: Processing and gridding spatial data using Green's functions. *Journal of Open Source Software*, 3(30), 957. <https://doi.org/10.21105/joss.00957>.
- Uieda, L., Sandwell, D. and Wessel, P., 2018, Presentation: Joint Interpolation of 3-component GPS Velocities Constrained by Elasticity. figshare. doi:10.6084/m9.figshare.6387467.
- VanGorp, S., Masson, F. and Chéry, J., 2006, The use of Kriging to interpolate GPS velocity field and its application to the Arabia-Eurasia collision zone, *Geophysical Research Abstracts*, 8, 02120.
- Wessel, P. and Bercovici, D., 1998, Interpolation with splines in tension: A Green's function approach, *Math. Geol.*, 30(1), 77–93, doi:10.1023/A:1021713421882.

Interpolation of horizontal GPS velocity field in the oblique collision zone of Arabia-Eurasia tectonic plates using Green's functions

Rastbood, A.*

Assistant Professor, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(Received: 19 Feb 2022, Accepted: 19 April 2022)

Summary

One way of gridding two dimensional vector data is gridding each component separately. Alternatively, using Green's functions we can grid two components simultaneously in a way that couples them through elastic deformation theory. This is particularly suited, though not exclusive, to data that represent elastic/semi-elastic deformation, like horizontal GPS velocity fields. Measurements made on the surface of the Earth are often sparse and unevenly distributed. For example, GPS displacement measurements are limited by the availability of ground stations and airborne geophysical measurements are highly sampled along flight lines but there is often a large gap between lines. Many data processing methods require data distributed on a uniform regular grid, particularly methods involving the Fourier transform or the computation of directional derivatives. Hence, the interpolation of sparse measurements onto a regular grid (known as gridding) is a prominent problem in the Earth Sciences.

In this research, sparse two-dimensional vector data of the horizontal GPS velocity field are interpolated using Green's functions derived from elastic constraints. The method is based on the Green's functions of an elastic body subjected to in-plane forces. This approach ensures elastic coupling between the two components of the interpolation. Users may adjust the coupling by varying Poisson's ratio. Smoothing can be achieved by ignoring the smallest eigenvalues in the matrix solution for the strengths of the unknown body forces. The study area is the oblique collision zone of Arabia-Eurasia tectonic plates, which has a GPS velocity field with sparse distribution.

Since the Green's functions developed for the half-space environment, the Mercator map projection used to create the half-space for interpolation and gridding. Data split into a training and testing set. We will fit the gridded on the training set and use the testing set to evaluate how well the gridded is performing. The vector gridding was done using the Poisson's ratio 0.5 to couple the two horizontal components. Then score on the testing data. The best possible score is 1, meaning a perfect prediction of the test data. By calculating the mean square deviation ratio (MSDR) to evaluate the gridding accuracy, the score of 0.86 obtained for this statistic.

While this method is not new, it provides some insight into the behavior of the coupled interpolation for a wide range of Poisson's ratio. This approach provides improved interpolation of sparse vector data when the physics of the deforming material follows elasticity equations.

We interpolated our horizontal GPS velocities onto a regular geographic grid with 1 arc second spacing and masked the data that were far from the observation points and finally the residuals between the predictions and the original input data were calculated. Interpolation of horizontal GPS velocity fields of local geodynamic networks were proposed to obtain an estimate for Poisson's ratio values in the best case for gridding validation.

In this study, two dimensional GPS data were interpolated. Three dimensional GPS data gridding can also be done using the Green's functions provided by Uieda et al., (2018). It is also recommended to use different Green's functions to grid different types of spatial data.

Keywords: interpolation, Green's Functions, Horizontal GPS velocity field, Arabia-Eurasia.

* Corresponding author:

arastbood@tabrizu.ac.ir