

## آنالیز ۳ بعدی تغییر شکل پوسته زمین بروش ایزوپارامتریک و درون یابی با شبکه های

### عصبی مصنوعی

### (منطقه مورد مطالعه : شبکه ژئودینامیک ایران)

میر رضا غفاری رزین<sup>۱</sup>، علی محمدزاده<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۳۱

#### چکیده

یکی از کاربردهای مهم ژئودزی در تحقیقات ژئودینامیک، مطالعه تغییرات پوسته ای زمین می باشد. در این مقاله مساله آنالیز سطحی تغییر شکل پوسته زمین در منطقه ایران بصورت مدل ۳ بعدی مورد بررسی قرار می گیرد. از روش ایزوپارامتریک ۳ بعدی و داده های GPS شبکه مبنای دائمی ژئودینامیک کشور ایران (۳۷ ایستگاه بین سالهای ۲۰۰۷-۲۰۰۸) جهت برآورد مولفه های تنسور استرین استفاده شده است. بنا به ویژگیهای مدلسازی ۳ بعدی پوسته زمین بروش ایزوپارامتریک، با یک مساله بد وضع روبرو خواهیم شد. جهت حل این مساله از روش پایدارسازی تیخونوف در این مقاله استفاده شده است. اپتیمم مقدار پارامتر پایدارسازی جهت برآورد پارامترهای تنسور استرین، طوری انتخاب گردیده که نتایج حاصل از خطای نسبی کمتری برخوردار باشند. ارزیابی مقدار این خطا از روی عناصر قطر اصلی ماتریس رزولوشن انجام گرفته است. همچنین جهت درون یابی مقادیر میدان سرعت و مولفه های استرین در سایر نقاط ژئودتیکی موجود در فلات ایران، از یک شبکه عصبی مصنوعی ۳ لایه استفاده شده است. تعداد نورونهای مورد استفاده جهت برآورد کمیت های میدان سرعت و استرین براساس مینیمم سازی مقدار خطای نسبی در آموزش بطریقه پس انتشار خطا انتخاب شده است. ۴ ایستگاه با توزیع مناسب جهت تست نتایج انتخاب گردیده است. مینیمم خطای نسبی بدست آمده برای میدان سرعت در مولفه شمالی ( $V_N$ ) ۶/۸۰ درصد و برای مولفه شرقی ( $V_E$ ) ۶/۲۵ تعیین شده است. همچنین جذر خطای میانگین مربعی (RMSE) برای مولفه شمالی  $\pm 1/85$  میلیمتر و برای مولفه شرقی  $\pm 1/72$  میلیمتر بدست آمده است.

**کلید واژه ها :** روش ایزوپارامتریک، تنسور استرین، میدان سرعت، پایدارسازی، شبکه عصبی، GPS

\*نویسنده مسئول: گروه سنجش از دور و فتوگرامتری، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۰۹۱۲۴۷۵۲۹۶۱

Email: a\_mohammadzadeh@kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

تغییر شکل زمین ماهیتاً پدیده‌ای ۳بعدی است. بنابراین مطالعه این پدیده بصورت تغییر شکل ۲ بعدی (تغییر شکل مسطحاتی) و یا ۱بعدی (تغییر شکل ارتفاعی) می‌تواند یک تصور غیر واقعی از موضوع تغییر شکل باشد، مخصوصاً زمانی که میزان تغییرات ارتفاعی یا مسطحاتی نسبت به همدیگر خیلی زیاد است. تفکیک بررسی تغییر شکل زمین در اینگونه موارد می‌تواند مشکل ساز شود. جهت غلبه بر چنین مشکلاتی می‌توان از روشهای ۳بعدی تغییر شکل زمین استفاده کرد. یکی از این روشها که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد روش ایزوپارامتریک است [۱]. ویژگی این روش در این است که نتایج آن بصورت مستقیم می‌تواند قابل تفسیر و بررسی باشد. در ارائه چنین مدلی جهت بیان تغییر شکل ۳بعدی، می‌بایستی اندازه و نیز ساختار شبکه مورد بررسی قرار گیرد. چالش دیگر در استفاده از روش ایزوپارامتریک جهت بیان تغییر شکل پوسته زمین، ناپایدار بودن ماتریس نرمال است [۱].

در میان روشهای مختلف و متفاوت بررسی تغییر شکل پوسته زمین، روشهای متکی بر مشاهدات ژئودتیکی می‌تواند اطلاعات بارزش و مفیدی را در رابطه با آنالیز تغییر شکل زمین در اختیار گذارد [۲]. دیگر روشهای بررسی تغییر شکل تنها می‌توانند حالت متوسطی از تغییر شکل زمین را در مقیاسهای زمانی و مکانی بزرگ نشان دهند بطور مثال روشهای مبتنی بر زلزله از تنسورهای ممان لرزه‌ای جهت بررسی تغییر شکل پوسته زمین در یک حجم خاص به کمک مشاهدات چندین ساله استفاده می‌کنند [۳]. استفاده از تجهیزاتی همانند تیلت متر یا استرین متر تنها می‌تواند پارامترهای تغییر شکل زمین را در یک محدوده خاص و در یک دوره زمانی کوتاه بدست آورد. در سال ۱۹۲۹ ترادا و میایی اولین ایده استفاده از مشاهدات ژئودتیکی

را جهت محاسبه و بررسی پارامترهای استرین ارائه دادند [۴]. بعد از آنها روشهای مختلف و متفاوتی جهت آنالیز تغییر شکل زمین ارائه گردید [۵، ۶ و ۷]. فرض اولیه در اکثر روشهای ارائه شده این بوده است که تغییر شکل ارتفاعی کوچک، اثر کاملاً ناچیزی در تغییرات مسطحاتی دارد.

کشور ایران از نقطه نظر ساینمو تکتونیکی (لرزه زمین ساخت) بخشی از کمربند زلزله خیز آلپ هیمالیا را تشکیل داده است. تکتونیک کنونی کشور ایران حاصل همگرایی شمالی- جنوبی بین صفحات تکتونیک عربی در جنوب غربی و اوراسیا در شمال شرقی با سرعت ۲۲ میلیمتر در سال می‌باشد [۸]. وجود زلزله‌های متعدد در طول تاریخ گواه بر زلزله خیز بودن کشور ایران است و به این دلیل، مطالعه و آنالیز تغییر شکل در ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

کشور ایران به‌عنوان بخشی از رشته‌کوههای چین خورده آلپ- هیمالیا، طرح پیچیده‌ای از مجموعه پیوسته‌ای قطعات زمین ساخت و مناطق متفاوت زمین ساختی است که از نگاه نو زمین ساختی و لرزه زمین ساختی، ویژگیهای خاص دارد. شواهد گوناگون مانند زمین‌لرزه‌های امروزی، آشفشانهای نیمه فعال، سواحل بالا آمده، پیدایش گسل‌های لرزه‌ای و ... نشانگر تغییر و تحول ژئودینامیکی کنونی پوسته ایران و عدم تعادل آن است. در یک نگاه کلی، از شمال به جنوب، می‌توان سه صفحه بزرگ را در ایران شناسایی کرد. صفحه شمالی، به عنوان لبه جنوبی صفحه توران شامل چین‌های حاشیه‌ای کپه داغ و منطقه فرونشست خزر جنوبی است. صفحه میانی که رشته کوههای چین خورده البرز و پهنه‌های مختلف ایران مرکزی را دربردارد. سرانجام ورقه جنوبی که لبه شمال خاوری سکوی عربستان را شامل می‌باشد و بخش ایرانی آن، کوه‌های زاگرس نام دارد. جدا از صفحه‌های مذکور باید

هدف این مقاله تعیین میدان جابجایی ۳ بعدی و متعاقب آن درون‌یابی مولفه‌های تنسور استرین و میدان سرعت، توسط روش شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> در منطقه ایران می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی جدید جهت یادگیری ماشینی، نمایش دانش و در انتها اعمال دانش به دست آمده در جهت بیش‌بینی پاسخهای خروجی یک سیستم می‌باشند. این شبکه‌ها برای تخمین<sup>۵</sup> و تقریب<sup>۶</sup> کارایی بسیار بالایی از خود نشان داده‌اند. حسن استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در سرعت عمل و دقت بالای آنها در پیش‌بینی رفتار پدیده‌های غیر خطی است [۱۴].

این مقاله شامل بخشهای زیر است: در بخش دوم در مورد نمایش تغییر شکل زمین بصورت ۳ بعدی بحث و بررسی شده و فرمولهای ریاضی لازم ارائه خواهد شد. همچنین در ادامه این بخش در مورد ناپایداری مساله مورد نظر و دلایل آن توضیح ارائه می‌شود. در بخش سوم در مورد روش پایدارسازی تیخونوف و چگونگی استفاده از آن در مساله مورد نظر بحث می‌شود. در بخش چهارم در مورد شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه و ساختار آنها توضیح ارائه خواهد شد. بخش پنجم مربوط به نتایج محاسبات بوده و سرانجام در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارائه می‌شود.

## ۲- نمایش تغییر شکل زمین در ۳ بعد به کمک روش ایزوپارامتریک

برطبق تئوری الاستیسیته تغییر شکل پیوسته در یک جسم تغییر شکل پذیر می‌تواند بوسیله تغییرات نسبی فاصله مابین یک نقطه و نقاط مجاور آن بدست آید [۱۵]. روش فوق بر این فرض استوار است که نقاطی از جسم که در محاسبه پارامترهای استرین

به رشته‌کوه‌هایی اشاره کرد که ویژگی مناطق فرورانش کم شیب را دارد [۸]. به طور کلی در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی به علت نیروهای تراکمی ناشی از حرکت صفحه عربی به طرف صفحه ایران، و در نواحی شرقی به علت فعالیت گسل‌های امتداد لغز شمالی-جنوبی و در مناطق شمالی در نتیجه‌ی حرکت‌های امتداد لغز شرقی-غربی و نیز نیروهای حاصل از برخورد صفحات ایران و توران به یکدیگر زمین لرزه‌های فراوانی رخ می‌دهند [۹].

با توسعه شبکه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای بصورت محلی و منطقه‌ای، ایده استفاده از مشاهدات این شبکه‌ها جهت بررسی تغییرات سطح پوسته زمین گسترش پیدا کرد. در این راستا تحقیقات بسیار وسیع و گسترده‌ای جهت مطالعه چگونگی ساز و کارهای ژئودینامیکی پوسته در منطقه ایران صورت گرفته است [۸، ۹، ۱۰، ۱۱]. تعیین دقیق میدان سرعت و جابجایی نقاط مبنا در شبکه‌های ژئودزی از اهمیت زیادی برخوردار است. با در دسترس بودن اطلاعات مربوط به میدان سرعت ایستگاههای GPS در یک شبکه ژئودزی می‌توان کینماتیک و دینامیک پوسته زمین در آن منطقه را مدل‌سازی کرد [۱۲]. در سالین اخیر تلاشهای گسترده‌ای جهت تعیین میدان سرعت پوسته زمین با استفاده از ایستگاههای مبنای شبکه‌های ژئودزی انجام گرفته است. وثوقی در سال ۲۰۰۰ از محاسبات تنسوری جهت بدست آوردن تنسور انحناء<sup>۱</sup> و میدان جابجایی پوسته زمین بصورت ۳ بعدی استفاده کرد [۱۳]. مشهدی حسینعلی در سال ۲۰۰۶ جهت محاسبه میدان جابجایی از روشهای ایزوپارامتریک<sup>۲</sup> و لاگرانژ<sup>۳</sup> ۳ بعدی استفاده کرد [۱].

4 Artificial Neural Network

5 Estimation

6 Approximation

1 Curvature Tensor

2 Isoparametric Method

3 Lagrange Method

استفاده می‌شوند در همسایگی نزدیکی از نقطه مبدا باشند. دو نقطه A و B از جسم تغییر شکل پذیر V را در نظر می‌گیریم. فاصله این دو نقطه قبل از تغییر شکل r می‌باشد. اگر مختصات نقطه A قبل از تغییر شکل  $(x, y, z)$  باشد در اینصورت مختصات نقطه B را می‌توان بصورت  $(x+rl, y+rm, z+rn)$  در نظر گرفت. کسینوس هادیهای خط واصل بین دو نقطه A و B قبل از تغییر شکل می‌باشند.

$$\begin{aligned} u_B &= u(x+rl, y+rm, z+rn) \\ v_B &= v(x+rl, y+rm, z+rn) \\ w_B &= w(x+rl, y+rm, z+rn) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در اثر تغییر شکل نقطه A به موقعیت جدید  $u_A=u(x, y, z)$  منتقل می‌شود که

$$\begin{aligned} u_B &= u_A + r \left( l \frac{\partial u}{\partial x} + m \frac{\partial u}{\partial y} + n \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \sum_{j=2}^{\infty} \frac{1}{j!} \left( rl \frac{\partial}{\partial x} + rm \frac{\partial}{\partial y} + rn \frac{\partial}{\partial z} \right)^j u \\ v_B &= v_A + r \left( l \frac{\partial v}{\partial x} + m \frac{\partial v}{\partial y} + n \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \sum_{j=2}^{\infty} \frac{1}{j!} \left( rl \frac{\partial}{\partial x} + rm \frac{\partial}{\partial y} + rn \frac{\partial}{\partial z} \right)^j v \\ w_B &= w_A + r \left( l \frac{\partial w}{\partial x} + m \frac{\partial w}{\partial y} + n \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \sum_{j=2}^{\infty} \frac{1}{j!} \left( rl \frac{\partial}{\partial x} + rm \frac{\partial}{\partial y} + rn \frac{\partial}{\partial z} \right)^j w \end{aligned}$$

رابطه (۲)

$$\begin{aligned} r_1^2 &= \left[ rl + r \left( l \frac{\partial u}{\partial x} + m \frac{\partial u}{\partial y} + n \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]^2 \\ &+ \left[ rm + r \left( l \frac{\partial v}{\partial x} + m \frac{\partial v}{\partial y} + n \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]^2 \\ &+ \left[ rn + r \left( l \frac{\partial w}{\partial x} + m \frac{\partial w}{\partial y} + n \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right]^2 \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴)}$$

رابطه (۵)

$$q = \frac{r_1 - r}{r} = e_{xx}l^2 + e_{yy}m^2 + e_{zz}n^2 + e_{xy}lm + e_{xz}ln + e_{yz}mn$$

بنابراین حذف فرم‌های غیر خطی در رابطه (۲) مبتنی بر فرض کوچک بودن r امکان پذیر نیست، البته با فرض هموزن بودن تغییر شکل (خطی بودن میدان جابجایی نسبت به موقعیت نقاط) تقریب فوق هم چنان امکان پذیر است. رابطه (۵) کمیت کشش طولی خطی<sup>۱</sup> نامیده شده و خواهیم داشت:

اگر نقطه A در نزدیکی نقطه B باشد در اینصورت می‌توان از جملات با مراتب بالاتر r صرفنظر کرده و مختصات نقطه B را بصورت زیر نوشت [1]:

$$\begin{aligned} x_B &= x + rl + u_A + r \left( l \frac{\partial u}{\partial x} + m \frac{\partial u}{\partial y} + n \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ y_B &= y + rl + v_A + r \left( l \frac{\partial v}{\partial x} + m \frac{\partial v}{\partial y} + n \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ z_B &= z + rl + w_A + r \left( l \frac{\partial w}{\partial x} + m \frac{\partial w}{\partial y} + n \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳)}$$

بنابراین فاصله  $r_1^2$  میان دو نقطه A و B بصورت تابعی از پارامترهای استرین بصورت رابطه ۴ نوشته خواهد شد. اگر تغییر شکل کوچک باشد در رابطه (۴) می‌توان از بعضی جملات مربعی و حاصلضرب آنها صرف نظر کرده و رابطه (۴) را بصورت رابطه (۵) زیر نوشت.

استفاده از این رابطه در آنالیز تغییر شکل سطحی زمین به کمک شبکه‌های ژئودزی با این مشکل مواجه است که فاصله بین نقاط در این شبکه‌ها بسیار بزرگ است.

1 linear elongation

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, e_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, e_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, e_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad \text{رابطه (۶)}$$

رابطه (۷)

$$q = \frac{r_1 - r}{r}$$

$$.. = e_{xx} \left( \frac{\Delta x_{nk}}{|\overline{NK}|} \right)^2 + e_{yy} \left( \frac{\Delta y_{nk}}{|\overline{NK}|} \right)^2 + e_{zz} \left( \frac{\Delta z_{nk}}{|\overline{NK}|} \right)^2 + e_{xy} \left( \frac{\Delta x_{nk}}{|\overline{NK}|} \frac{\Delta y_{nk}}{|\overline{NK}|} \right) + e_{xz} \left( \frac{\Delta x_{nk}}{|\overline{NK}|} \frac{\Delta z_{nk}}{|\overline{NK}|} \right) + e_{yz} \left( \frac{\Delta y_{nk}}{|\overline{NK}|} \frac{\Delta z_{nk}}{|\overline{NK}|} \right)$$

رابطه (۸)

$$A_{N \times 6} = \begin{bmatrix} \left( \frac{\Delta x_{n1}}{|\overline{n1}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta y_{n1}}{|\overline{n1}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta z_{n1}}{|\overline{n1}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta x_{n1}}{|\overline{n1}|} \frac{\Delta y_{n1}}{|\overline{n1}|} \right) & \left( \frac{\Delta x_{n1}}{|\overline{n1}|} \frac{\Delta z_{n1}}{|\overline{n1}|} \right) & \left( \frac{\Delta y_{n1}}{|\overline{n1}|} \frac{\Delta z_{n1}}{|\overline{n1}|} \right) \\ \left( \frac{\Delta x_{n2}}{|\overline{n2}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta y_{n2}}{|\overline{n2}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta z_{n2}}{|\overline{n2}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta x_{n2}}{|\overline{n2}|} \frac{\Delta y_{n2}}{|\overline{n2}|} \right) & \left( \frac{\Delta x_{n2}}{|\overline{n2}|} \frac{\Delta z_{n2}}{|\overline{n2}|} \right) & \left( \frac{\Delta y_{n2}}{|\overline{n2}|} \frac{\Delta z_{n2}}{|\overline{n2}|} \right) \\ \left( \frac{\Delta x_{n3}}{|\overline{n3}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta y_{n3}}{|\overline{n3}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta z_{n3}}{|\overline{n3}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta x_{n3}}{|\overline{n3}|} \frac{\Delta y_{n3}}{|\overline{n3}|} \right) & \left( \frac{\Delta x_{n3}}{|\overline{n3}|} \frac{\Delta z_{n3}}{|\overline{n3}|} \right) & \left( \frac{\Delta y_{n3}}{|\overline{n3}|} \frac{\Delta z_{n3}}{|\overline{n3}|} \right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left( \frac{\Delta x_{NK}}{|\overline{NK}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta y_{NK}}{|\overline{NK}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta z_{NK}}{|\overline{NK}|} \right)^2 & \left( \frac{\Delta x_{NK}}{|\overline{NK}|} \frac{\Delta y_{NK}}{|\overline{NK}|} \right) & \left( \frac{\Delta x_{NK}}{|\overline{NK}|} \frac{\Delta z_{NK}}{|\overline{NK}|} \right) & \left( \frac{\Delta y_{NK}}{|\overline{NK}|} \frac{\Delta z_{NK}}{|\overline{NK}|} \right) \end{bmatrix}$$

مقادیر استرین محاسبه شده به این روش برای فرض استوار است که فاصله مابین نقاط در جسم تغییر شکل پذیر خیلی کوچک باشند که در اینصورت تنسور بدست آمده را تنسور استرین بینهایت کوچک<sup>۱</sup> می نامند. با در نظر گرفتن  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  به عنوان کسینوس هادی های طول مابین دو نقطه A و B و نیز مختصات دو نقطه A و B در سیستم مختصات محلی رابطه (۵) را می توان بصورت رابطه (۷) زیر بازنویسی کرد.

در رابطه (۷) اندیس  $k(1, 2, \dots, K)$  نشان دهنده نقطه ای از شبکه که پارامترهای استرین در آن محاسبه خواهند شد و اندیس  $n(1, 2, \dots, N)$  نشان دهنده سایر نقاط شبکه می باشند. پارامترهای

مقادیر استرین  $e_{xx}, e_{yy}, e_{zz}, e_{xy}, e_{xz}, e_{yz}$  مولفه های تنسور استرین هستند.  $r_1$  فاصله بین دو نقطه مورد نظر در اپک دوم و  $r$  همان فاصله، حاصل از نتایج اپک اول مشاهدات است. در نتیجه  $q$  تغییرات طول در فاصله زمانی مورد نظر را نشان می دهد. رابطه (۷) مدل ریاضی مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای استرین را از طریق محاسبه تغییرات نسبی طول بین نقاط یک جسم تغییر شکل پذیر در اختیار می گذارد. از آنجا که در تعیین تغییر شکل می بایست عناصر تنسور تغییر شکل در تمامی نقاط آن جسم تعیین گردند، در بررسی تغییر شکل های سطحی زمین به کمک شبکه های ژئودزی نیز می بایستی تنسور استرین در تمام نقاط شبکه محاسبه شود. همان طور که از رابطه (۵) پیداست برای محاسبه المانهای استرین در یک نقطه احتیاج به حداقل اندازه کشش فاصله بین آن نقطه و ۶ نقطه

مقادیر استرین محاسبه شده به این روش برای فرض استوار است که فاصله مابین نقاط در جسم تغییر شکل پذیر خیلی کوچک باشند که در اینصورت تنسور بدست آمده را تنسور استرین بینهایت کوچک<sup>۱</sup> می نامند. با در نظر گرفتن  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  به عنوان کسینوس هادی های طول مابین دو نقطه A و B و نیز مختصات دو نقطه A و B در سیستم مختصات محلی رابطه (۵) را می توان بصورت رابطه (۷) زیر بازنویسی کرد.

در رابطه (۷) اندیس  $k(1, 2, \dots, K)$  نشان دهنده نقطه ای از شبکه که پارامترهای استرین در آن محاسبه خواهند شد و اندیس  $n(1, 2, \dots, N)$  نشان دهنده سایر نقاط شبکه می باشند. پارامترهای

<sup>1</sup> infinitesimal tensor of strain

مجاور است. در صورت موجود بودن بیشتر از ۶ نقطه مجاور می‌توان المانهای تنسور استرین را محاسبه کرد. با دقت در ساختار ماتریس طرح (۸) می‌توان به شرایط زیر پی برد:

شبکه ژئودزی در منطقه نسبتاً مسطحی قرار گرفته باشد، در این حالت مولفه‌های  $\Delta z$  طول‌های باز بین نقاط (ستونهای ۳، ۵ و ۶ از ماتریس ضرایب) صفر یا نزدیک صفر شده و بنابراین مرتبه ماتریس ضرایب به اندازه ۳ کاهش پیدا خواهد کرد ( $\text{Rank}(A)=3<6$ ). در این شرایط فضای پوچ ماتریس ضرایب دارای عناصر غیربدیهی است و یا مساله مورد نظر دارای بینهایت جواب است [۱].

نقاطی که در محاسبه تنسور تغییر شکل در نقطه مثلاً K ام شبکه مشارکت دارند در امتداد یکی از محورهای مختصات محلی قرار گیرند. در این صورت مولفه‌های طول‌های باز بین دو نقطه مساوی صفر شده و مجدداً ماتریس ضرایب A دچار کمبود مرتبه خواهد شد [۱]. آنچه در عمل اتفاق می‌افتد حالتی نه از شرایط ۱ و ۲ بلکه شرایطی نزدیک به آن است به نحوی که مثلاً اختلاف ارتفاع نقاط شبکه در مقایسه با سایر طول بازها در یک شبکه ژئودزی ناچیز است. در این شرایط مساله مورد بحث به مساله‌ای بد-وضع<sup>۱</sup> تبدیل خواهد شد به عبارت دیگر ماتریس A دارای مرتبه کاملی است ولی عدد شرط آن بزرگ می‌باشد. بنابراین استفاده از تکنیک‌های پایدارسازی برای رسیدن به جوابی پایدار برای حل این مساله ضروری است. جهت این منظور و در این مقاله از روش تیخونوف<sup>۲</sup> استفاده شده است.

### ۳- پایدار سازی سیستم معادلات با روش تیخونوف

با توجه به مطالبی که در بخش قبل به آن اشاره گردید جهت بدست آوردن پارامترهای استرین، می‌بایستی

در این صورت ماتریس طرح مشاهدات با روش ایزوپارامتریک<sup>۳</sup> بعدی بصورت رابطه (۸) خواهد بود. دستگاه معادلات رابطه (۵) حل گردد. اما با توجه به ساختار ماتریس ضرایب بدست آمده در مدل‌سازی<sup>۳</sup> بعدی بروش ایزوپارامتریک، می‌بایستی جهت برآورد پارامترهای استرین از یکی از روشهای پایدارسازی<sup>۴</sup> مطلوب استفاده شود. بر اساس قضیه تجزیه یک ماتریس به مقادیر و بردارهای منفرد، ماتریس حقیقی و دلخواه G با بعد  $m \times n$  را می‌توان بصورت زیر به فرم طیفی نوشت [۱۶]:

$$USV^T = G \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، U ماتریسی متعامد شامل بردارهای منفرد چپ-ماتریس ضرایب (بردارهای  $u_i (i=1, \dots, m)$ ، V ماتریسی متعامد شامل بردارهای منفرد راست-ماتریس ضرایب (بردارهای  $v_i (i=1, \dots, n)$  و S ماتریسی قطری با بعد  $m \times n$  است که درایه‌های روی قطر اصلی آن مقادیر منفرد ماتریس G می‌باشند. در نمایش یک ماتریس به فرم طیفی، مقادیر منفرد و بردارهای نظیر، غالباً بصورت نزولی مرتب و در ماتریس‌های مربوطه قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر (در صورتیکه G کمبود مرتبه نداشته باشد):

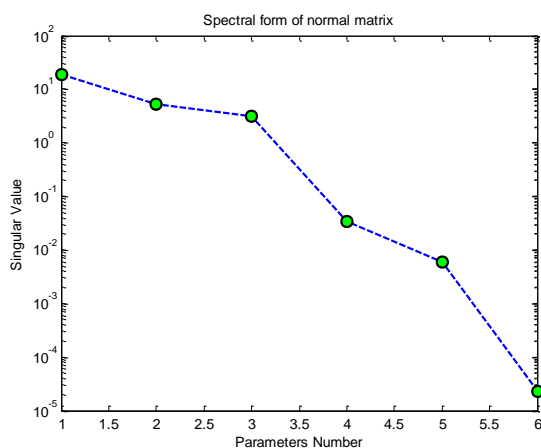
$$S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_{\min} \neq 0 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

شکل (۱) فرم طیفی ماتریس G را نمایش می‌دهد. کاهش نمایی مقادیر منفرد در این شکل، شاهی برای ناپایداری احتمالی دستگاه معادلات همزمان مربوطه است. جهت پایدارسازی دستگاه معادلات و نیز برآورد پارامترهای استرین، در این مقاله از روش تیخونوف مرتبه صفر<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. برای معرفی این روش مساله کمترین مربعات  $\min \|Gm - d\|_2^2$  را

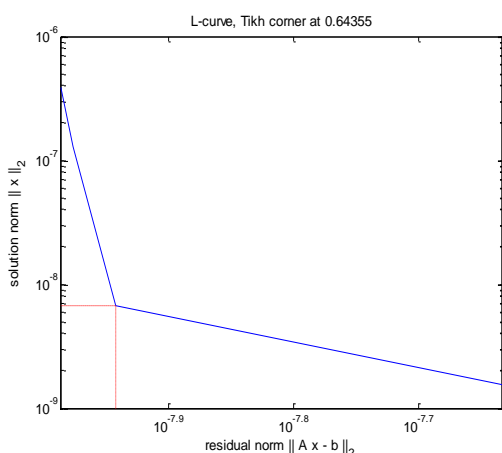
3 Regularization technique  
4 Zero order Tikhonov

1 Ill-posed  
2 Tikhonov

روشهای موجود برای انتخاب بهینه پارامتر پایداری (در اینجا  $\alpha$ ) در پایداری یک مساله گسسته معکوس ناپایدار است که در آن تغییرات نرم جواب پایداری شده نسبت به تغییرات نرم بردار باقیمانده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۷]. در مسائل گسسته معکوس ناپایدار، نمایش لگاریتمی منحنی این تغییرات غالباً به شکل  $L$  بوده و نقطه‌ای شکستگی این منحنی جواب پایداری شده با خطای پایداری مناسبی را پیشنهاد می‌کند. شکل (۲) منحنی بدست آمده از این روش را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نمودار تغییرات مقادیر منفرد ماتریس نرمال



شکل ۲: منحنی  $L$  برای ماتریس نرمال

در نظر می‌گیریم که در آن  $d$  بردار مشاهدات با بعد  $n$ ،  $m$  بردار مجهولات با بعد  $u$  و  $G$  ماتریسی  $n \times u$  است. این مساله به دستگاه معادلات نرمال  $G^T G m = G^T d$  منتهی می‌گردد که از حل آن جواب  $m = (G^T G)^{-1} G^T d$  برای دستگاه معادلات ناسازگار  $G m = d$  بدست می‌آید. در نظر بگیرید که در حل این مساله کمترین مربعات شرط کمترین مربعات با شرط زیر جایگزین گردد:

$$\min \|Gm - d\|_2^2 + \alpha^2 \|m\|_2^2 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

برای حل مساله بالا از روش لاگرانژ استفاده می‌کنیم. مقدار  $m$  را چنان تعیین می‌کنیم که نقطه‌ای مینیمم برای تابع اسکالر زیر باشد:

$$\phi(m) = \min \|Gm - d\|_2^2 + \alpha^2 \|m\|_2^2 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

و یا

$$\phi(m) = (Gm - d)^T (Gm - d) + \alpha^2 m^T m \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

چون  $m$  نقطه‌ای مینیمم برای تابع اسکالر  $\phi$  است:

$$\frac{d\phi}{dm} = 0 \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

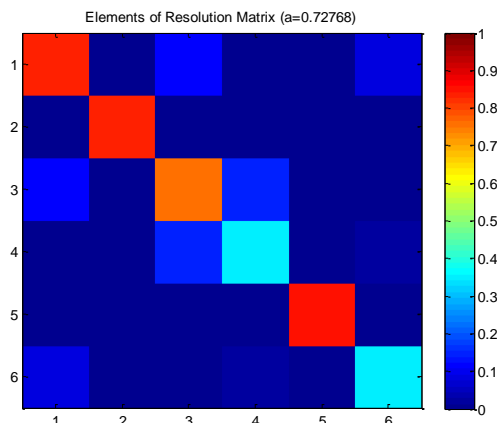
از حل معادله (۱۴) معادله زیر حاصل خواهد شد:

$$m_\alpha = (G^T G + \alpha^2 L)^{-1} G^T d \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در معادله بالا  $\alpha$  پارامتر پایداری<sup>۱</sup> بوده و مقداری بزرگتر از صفر می‌باشد.  $L$  یک ماتریس معین مثبت می‌باشد که نوع آن بستگی به مرتبه پایداری دارد. برای روش پایداری مرتبه صفرم تیخونف، ماتریس  $L$  یک ماتریس همانی است. مقدار پارامتر پایداری در این روش غالباً به کمک روش منحنی ال<sup>۲</sup> تعیین می‌شود [۱۶]. روش منحنی ال یکی از روشهای موجود در تعیین بهینه مقادیر منفردی است که با آن مقادیر، دستگاه معادلات حاصل از پایداری کافی برخوردار خواهد بود. این روش یکی از ساده‌ترین

1 Regularization parameter

2 L-curve



شکل ۴: تغییرات عناصر ماتریس رزولوشن برای پارامتر  
پایدارسازی  $\alpha = 0.72768$

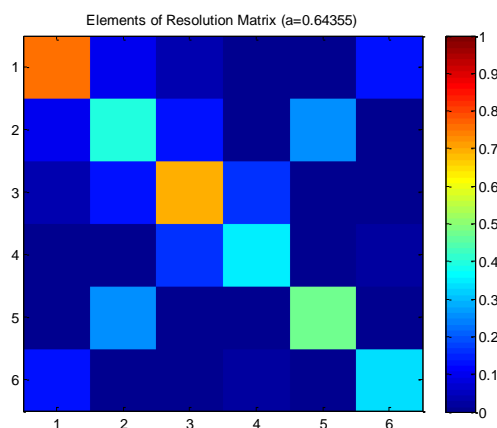
#### ۴- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی تقریباً جدید برای تقریب توابع و پیش بینی حالت آینده سیستم‌های مختلف می‌باشند. این شبکه‌ها برای حالتی که بین ورودی و خروجی سیستم روابط غیرخطی برقرار است، به نتایج قابل قبول منتج می‌شوند و از این رو در بسیاری از حوزه‌های علمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شبکه‌های عصبی نسبت به روش‌های رایج همانند کمترین مربعات دارای سرعت عمل و دقت بالاتری بوده و حساسیت آنها نسبت به نویزها بسیار پایینتر است [۱۸]. هر شبکه عصبی از تعدادی گره<sup>۲</sup> که همان نرون‌ها<sup>۳</sup> هستند و وزنهای ارتباطی که گره‌ها را به هم وصل می‌کنند، تشکیل شده است. داده‌های ورودی در وزن متناظرشان ضرب می‌شوند و مجموع آنها به نرون‌ها وارد می‌گردند. هر نرون دارای یک تابع فعالسازی<sup>۴</sup> می‌باشد. این مقدار ورودی از تابع فعالسازی عبور کرده و مقدار خروجی نرون را مشخص می‌کنند [۱۹]. تعداد نرون‌ها و لایه‌های شبکه عصبی متناسب با مسئله مورد نظر و

میزان بایاس موجود در جواب مساله پایدار شده غالباً از طریق ماتریس رزولوشن<sup>۱</sup> بررسی و کنترل می‌گردد. در غیاب بایاس در نتایج، مقادیر روی قطر اصلی ماتریس رزولوشن عدد یک خواهند بود [۱۶]. بنابراین هر چقدر درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس رزولوشن به عدد یک نزدیک‌تر باشند، صحت جواب پایدارسازی شده بیشتر است. این ماتریس در روش پایدارسازی تیخونوف بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = (G^T G + \alpha^2 L)^{-1} G \quad (۱۶)$$

اشکال (۳) و (۴) نشان‌دهنده تغییرات عناصر ماتریس رزولوشن برای دو مقدار متفاوت پارامتر پایدارسازی می‌باشند. با توجه به درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس رزولوشن می‌توان به این نکته مهم دست یافت که در شکل (۴) صحت جواب پایدارسازی شده با روش تیخونوف به مراتب بالاتر از شکل (۳) می‌باشد. بنابراین انتخاب پارامتر مناسب پایدارسازی در صحت جواب بدست آمده بسیار موثر خواهد بود.



شکل ۳: تغییرات عناصر ماتریس رزولوشن برای پارامتر  
پایدارسازی  $\alpha = 0.64355$

2 node  
3 neuron  
4 Activation Function

1 Resolution Matrix



تابع سیگموئید<sup>۵</sup> می‌باشد که بصورت تابع ریاضی زیر تعریف می‌گردد [۱۸]:

$$f(z) = \frac{1}{(1 + e^{-z})} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

که در رابطه (۱۸)  $z$  اطلاعات ورودی نرون و  $f(z) \in [0,1]$  می‌باشند. معمولاً در شبکه‌های عصبی جهت بدست آوردن اپتیمم ساختار شبکه، داده‌های ورودی به سه دسته مجزا از هم تقسیم می‌شوند: مجموعه آموزش<sup>۶</sup>، مجموعه تست<sup>۷</sup> و مجموعه ارزیابی<sup>۸</sup>. در هر سه دسته جهت ارزیابی خطا از مفهوم خطای مربعی میانگین<sup>۹</sup> بصورت زیر استفاده می‌شود:

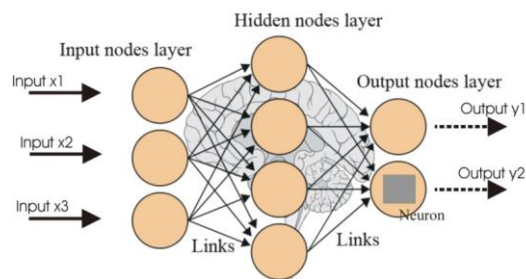
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{Actual} - y_i^{Predict})^2 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

که در رابطه (۱۹)  $y_i^{Actual}$  نشان‌دهنده مقادیر خروجی واقعی و  $y_i^{Predict}$  بیانگر خروجیهای شبکه عصبی می‌باشند. ارزیابی نتایج بدست آمده بصورت مقایسه آن با بردارهای سرعت بدست آمده از پردازشهای GPS نسبت به صفحه اوراسیا می‌باشد. این ارزیابی بصورت زیر انجام گرفته است:

$$\Delta V_{E,N} = V_{(Known)} - V_{(Estimated)} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

در رابطه (۲۰)  $\Delta V_{E,N}$  مقادیر خطای بدست آمده برای بردارهای سرعت تخمین زده شده،  $V_{(known)}$  مقادیر سرعت بدست آمده از مشاهدات GPS و  $V_{(estimated)}$  مقادیر سرعت تخمین زده شده از شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. جذر خطای مربعی میانگین<sup>۱۰</sup> بهترین معیار جهت ارزیابی مقادیر خطای بدست آمده از مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. این معیار بصورت زیر تعریف شده است:

با روش سعی و خطا به دست می‌آید. شکل (۷) ساختار یک شبکه عصبی با لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: شبکه عصبی ۳ لایه با اتصالات کامل

در این مقاله جهت مدلسازی میدان سرعت از یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. حسن این کار در تسریع عملیات برآورد پارامترها و نوع یادگیری و آموزش شبکه می‌باشد. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه مورد استفاده دارای یک لایه ورودی<sup>۲</sup> با  $N$  مشاهده ورودی، چندین لایه پنهان<sup>۳</sup> و یک لایه خروجی<sup>۴</sup> با  $n$  پارامتر می‌باشد. مدل مورد استفاده جهت محاسبه پارامترهای لایه خروجی بصورت رابطه زیر می‌باشد:

$$y = f\left(\sum_{j=1}^q W_{j,l} f\left(\sum_{l=1}^N w_{j,l} x_l + w_{j,0}\right) + W_0\right) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$W_{j,l}$  وزن مابین لایه پنهان و خروجی،  $W_{j,0}$  وزن مابین لایه پنهان و ورودی و  $W_0$  بایاس مربوط به عصبهای لایه‌های ورودی و پنهان و  $W_0$  بایاس مربوط به عصبهای لایه‌های پنهان و خروجی. جهت ارتباط میان لایه‌های پنهان و خروجی به یک تابع فعالسازی مناسب نیاز می‌باشد. یکی از مناسب ترین توابع فعالسازی

5 Sigmoid Function

6 Training Set

7 Testing Set

8 Validation Set

9 Mean Square Error (MSE)

10 Root Mean Square Error (RMSE)

1 Multi-layer perceptron

2 Input layer

3 Hidden layer

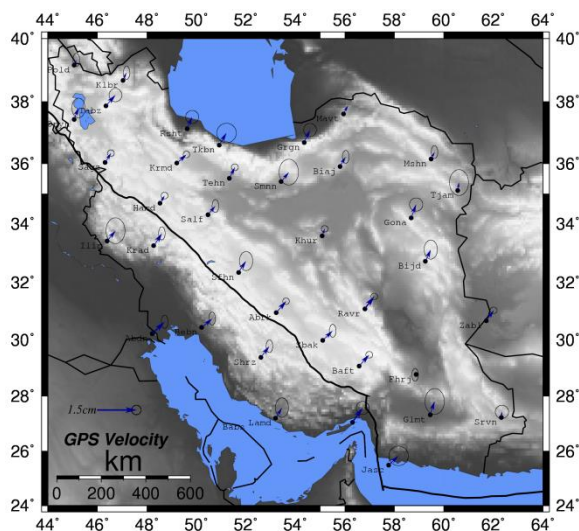
4 Output layer

$$\text{رابطه (۲۱)} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta V_{iE,N})^2}$$

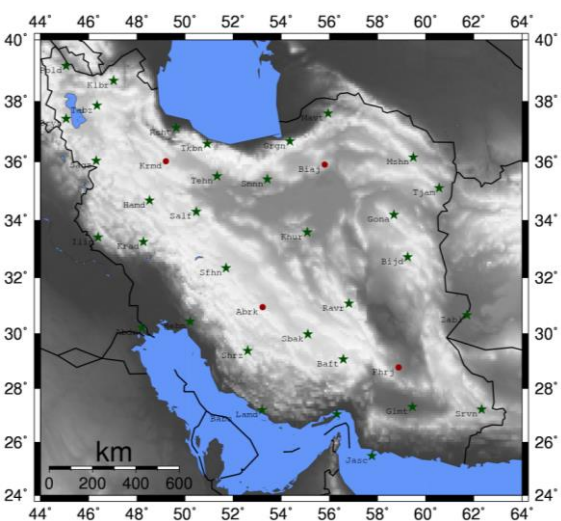
#### ۵- پردازش مشاهدات شبکه ژئودینامیک

مطالعات ژئودینامیک در ایران از سال ۱۳۷۷ به منظور پایش تغییرات پوسته زمین و حرکات تکتونیکی مربوط به آن آغاز شده است. در این راستا شبکه دائمی ژئودینامیک سراسری در سال ۱۳۸۳ به منظور بررسی سازوکارهای حرکات گسل های ایران طراحی و تدریجاً اجرا شد. در حال حاضر این شبکه دارای ۱۲۰ ایستگاه دائمی GPS می باشد. از این تعداد، ۳۷ ایستگاه با توزیع تقریباً یکنواخت در سراسر منطقه ایران و به فاصله تقریبی ۳۰۰ کیلومتر از هم به عنوان شبکه اصلی انتخاب شده است. در این مقاله هدف تخمین سرعت نقاط ژئودتیکی و میدان استرین در محدوده ژئودینامیکی کشور ایران می باشد. این محدوده در عرض جغرافیایی  $24^{\circ}N \leq \varphi \leq 40^{\circ}N$  و طول جغرافیایی  $44^{\circ}E \leq \varphi \leq 64^{\circ}E$  قرار گرفته است. شکل (۶) چگونگی توزیع مکانی ۳۷ ایستگاه از شبکه ژئودینامیک را نشان می دهد.

ایستگاههای مورد استفاده در این تحقیق به سه گروه تقسیم بندی شده است: ۳۰ ایستگاه جهت آموزش شبکه بروش پس انتشار خطا، ۳ ایستگاه جهت ارزیابی خطای شبکه و ۴ ایستگاه جهت تست نتایج بدست آمده از شبکه عصبی مصنوعی مدلسازی شده استفاده شده است. مختصات جغرافیایی هر ایستگاه در شبکه مورد نظر به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شده و بردارهای سرعت بدست آمده از پردازشهای مشاهدات GPS به عنوان پارامتر خروجی جهت آموزش شبکه معرفی شده اند. در این مقاله از دو شبکه عصبی مصنوعی مجزا جهت تخمین بردارهای سرعت نقاط ژئودتیکی استفاده شده است. تعداد نورونهای لایه مخفی در هر دو شبکه بر اساس معیار جذر خطای مربعی میانگین تعیین شده است. شکل (۷) بردارهای سرعت بدست آمده از پردازشهای GPS را نشان می دهد. همچنین شکل (۸) بیانگر میدان سرعت برآورده شده در سایر نقاط ژئودتیکی در فلات ایران می باشد.



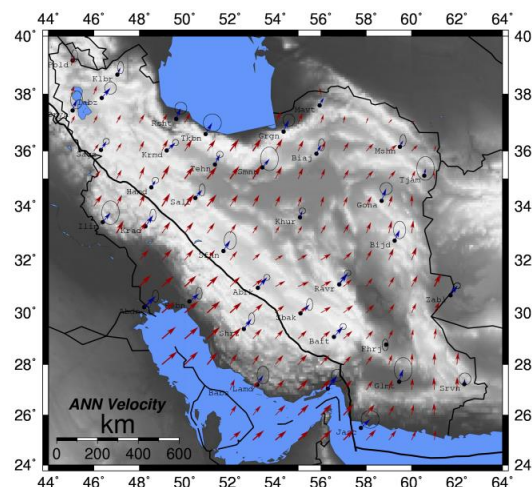
شکل ۷: بردارهای سرعت بدست آمده از داده های GPS نسبت به صفحه اوراسیا



شکل ۶: چگونگی توزیع مکانی ایستگاههای مورد استفاده در این تحقیق (ستاره ها نشان دهنده ایستگاههای آموزش و دایره ها بیانگر ایستگاههای تست می باشند)

جدول (۱) مقادیر میدان سرعت بدست آمده از پردازشهای GPS، مقادیر سرعت تخمین زده شده توسط شبکه عصبی مصنوعی و نیز مقادیر خطای نسبی را در ۴ ایستگاه تست نشان می‌دهد.

به کمک روش آنالیز استرین ایزوپارامتریک ۳ بعدی و نیز مختصاتهای بدست آمده از ایستگاههای شبکه ژئودینامیک کشور ایران در دو اپوک زمانی، مقادیر استرین برای تمامی ایستگاههای شبکه فوق محاسبه و نتایج در دو شکل (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۸: بردارهای سرعت تخمین زده شده با استفاده از شبکه عصبی سه لایه با تابع فعالسازی سیگموئیدی نسبت به صفحه اوراسیا

جدول ۱: مقادیر میدانهای سرعت بدست آمده از پردازش و میدان سرعت تخمین زده شده به همراه خطاهای نسبی در

ایستگاههای تست انتخاب شده در شبکه مورد نظر

ایستگاه	میدان سرعت بدست آمده از GPS (mm/yr)		میدان سرعت تخمین زده شده (mm/yr)		خطای نسبی (%)	
	$V_E$	$V_N$	$V_E$	$V_N$		
Krmd	-0.029	0.00904	-0.027	0.002	+7.41	15.2
Biaj	-0.037	0.00534	-0.032	0.005	+15.6	6.80
Abrk	-0.030	-0.00302	-0.032	-0.006	-6.25	-29.7
Fhrj	-0.050	0.01308	-0.055	0.016	-9.09	-18.3

جدول ۲: مقادیر پارامترهای استرین بدست آمده از پردازش و پارامترهای استرین تخمین زده شده به همراه خطاهای نسبی در

ایستگاههای تست انتخاب شده در شبکه مورد نظر

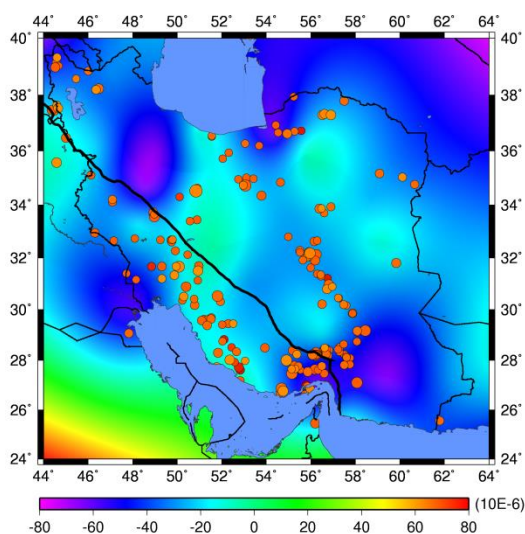
ایستگاه	مولفه های استرین بدست آمده از GPS ( $\mu$ -strain/year)			مولفه های استرین تخمین زده شده ( $\mu$ -strain/year)			خطای نسبی (%)		
	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{zz}$	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{yy}$	$\epsilon_{zz}$			
Krmd	-0.070492	-0.075359	-0.009875	-0.008864	-0.079651	-0.008164	10.24	-5.70	-12.58
Biaj	-0.071725	-0.003153	-0.000481	-0.000514	-0.002867	-0.000564	-6.86	9.07	14.00
Abrk	-0.074273	-0.060849	0.021290	0.02465	-0.055973	0.028650	-15.78	8.01	-3.12
Fhrj	-0.017299	-0.041994	0.018192	0.019921	-0.048618	0.020921	-9.50	-15.77	-23.46

شکل (۱۰) مقادیر تخمین زده شده پارامترهای استرین را در سایر نقاط ژئودتیکی در آزمونهای دلخواه نشان می‌دهد.

جدول (۲) مقادیر مولفه های اصلی استرین بدست آمده از پردازشهای GPS، مولفه های اصلی

در هر دو شکل مقادیر ویژه تنسور استرین با زوج بردارهایی که به سمت هم (فشارش) و در جهت مخالف هم (انبساط) را نمایش می‌دهند، آورده شده است. شکل (۹) مقادیر اصلی استرین بدست آمده از روش ایزوپارامتریک ۳ بعدی را در محل ایستگاههای شبکه ژئودینامیک را نشان داده و

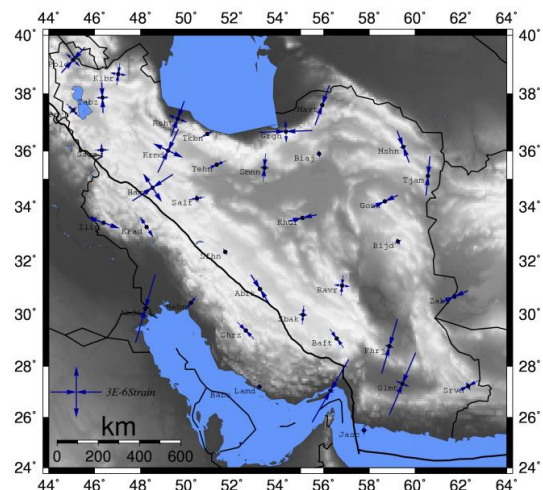
بیان می‌کند. این کمیت بدون واحد است و در حالت انبساط حجم، مثبت و برای انقباض منفی می‌باشد. ماکزیمم برش خاصیت غیر ایزوتروپیک تغییر شکل را نشان داده و تفسیر هندسی آن ماکزیمم مقدار تغییر در امتداد می‌باشد. این کمیت به عنوان یک کمیت کلیدی یا عامل کلیدی در مطالعات پیش بینی زلزله شناخته شده است. میزان ماکزیمم برش و اتساع برای فلات ایران در اشکال (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است.



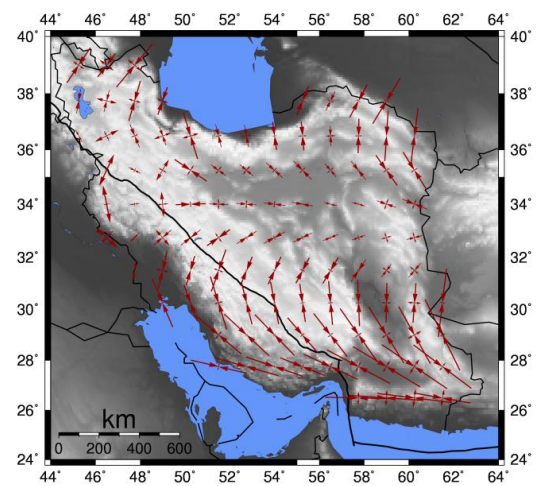
شکل ۱۱: میزان ماکزیمم برش برآورد شده در منطقه ایران با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی ۳ لایه به همراه چگونگی زلزله های بوقوع پیوسته در منطقه ایران در بازه زمانی مشاهدات

در شکل (۱۱) زلزله های بوقوع پیوسته در بازه زمانی یک ساله مشاهدات استفاده شده در این تحقیق به همراه چگونگی تغییرات کمیت برش آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که در موقعیتهایی که کمیت برش دارای مقادیر عددی زیادی است زلزله‌های فراوانی بوقوع پیوسته است.

استرین تخمین زده شده توسط شبکه عصبی مصنوعی و نیز مقادیر خطای نسبی را در ۴ ایستگاه تست نشان می‌دهد.



شکل ۹: مقادیر اصلی استرین بدست آمده از روش ایزوپارامتریک ۳ بعدی در محل ایستگاههای شبکه



شکل ۱۰: مقادیر استرین تخمین زده شده با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی ۳ لایه در نقاط ژئودتیکی مختلف

همچنین با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی می‌توان مقادیر اتساع<sup>۱</sup> و ماکزیمم برش<sup>۲</sup> را برای منطقه ایران تخمین زد. اتساع تغییر حجم جسم در واحد حجم را

1 Dilatation

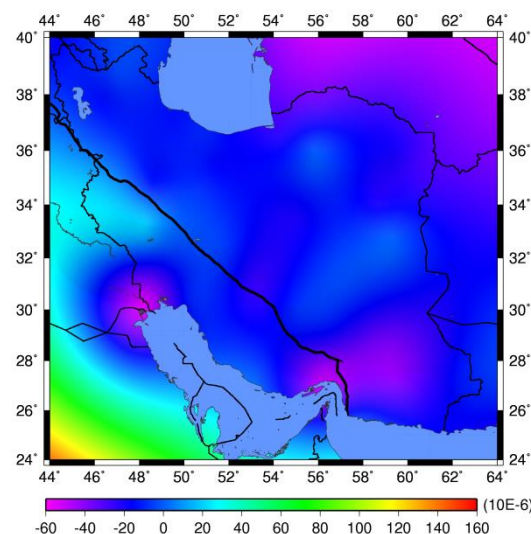
2 Maximum Shear



در این مقاله از روش ایزوپارامتریک سه بعدی جهت تفسیر تغییر شکل سطحی پوسته زمین استفاده شد. بدلیل ماهیت خاص این مساله، استفاده از روشهای پایداری جهت برآورد پارامترها امری اجتناب ناپذیر می باشد. به همین منظور در این مقاله از روش تیخونوف مرتبه صفرم جهت پایداری مساله استفاده شد. مقدار پارامتر پایداری بگونه ای انتخاب گردید که کمترین خطای نسبی در مقادیر پارامترهای برآورد شده بوجود آید.

یکی از مهمترین معایب و مشکلات استفاده از مشاهدات شبکه های ژئودزی ماهواره ای در برآورد و تعیین مقادیر میدان سرعت و استرین، در توزیع گاهاً نامناسب و تعداد کم ایستگاهها می باشد. این موضوع مخصوصاً در اطراف گسلهای فعال بیشتر نمود پیدا می کند. جهت رفع این مشکل، استفاده از روشهای مناسب و دقیق انترپولاسیون که بتواند مقادیر میدان سرعت و مولفه های استرین را در نقاط فاقد ایستگاههای شبکه ژئودزی ماهواره ای بدرستی برآورد نماید امری ضروری و اجتناب ناپذیر می باشد. بدین جهت در این مقاله کارائی و دقت برآورد میدان سرعت و مولفه های استرین، توسط روش شبکه های عصبی مصنوعی چند لایه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. جهت آموزش و تعیین وزنها شبکه عصبی، از میدان سرعت و استرین بدست آمده از پردازشهای GPS و روش ایزوپارامتریک ۳ بعدی ۳۷ ایستگاه از شبکه ژئودینامیک کشور ایران استفاده شد. از ۳۷ ایستگاه مورد استفاده، ۴ ایستگاه با توزیع مناسب در منطقه ایران، جهت تست نتایج بکار گرفته شد. میدانهای سرعت و استرین این ۴ ایستگاه در محاسبات مربوط به آموزش و تعیین وزنها استفاده نشده است.

در مدل شبکه های عصبی جهت برآورد میدان سرعت و استرین نقاط ژئودتیکی از یک ساختار ۳ لایه با ۲۲ نرون در لایه مخفی استفاده شد. تعداد نرونهای



شکل ۱۲: میزان اتساع برآورد شده در منطقه ایران با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی ۳ لایه

## ۶- نتایج و پیشنهادها

یکی از اهداف علم ژئودزی محاسبه و تعیین میدان سرعت و نیز پارامترهای تنسور استرین پوسته زمین، مخصوصاً در اطراف گسلهای فعال می باشد. با دانستن مقدار و جهت میدان سرعت و استرین می توان ارزیابی اولیه ای از چگونگی فعالیت گسلها بدست آورد. استفاده از داده های شبکه های ژئودزی ماهواره ای یک راه حل کلی در تعیین میدان سرعت و مولفه های استرین نقاط ژئودتیکی می باشد. روشهای متفاوت و گوناگونی جهت نیل به این هدف بوجود آمده است. این روشها را در یک دسته بندی کلی می توان بروشهای دوبعدی و سه بعدی آنالیز تغییر شکل پوسته زمین می توان دسته بندی نمود. در روشهای دو بعدی معمولاً از تغییرات در راستای ارتفاعی صرف نظر شده و این تغییرات و اثرات آن نادیده گرفته می شوند. در حالیه تغییر شکل پوسته زمین ماهیتاً یک مساله سه بعدی است. بنابراین در نظر نگرفتن بعد ارتفاعی یک تصور کاملاً غیر واقعی از مساله تغییر شکل را ارائه خواهد داد.

مولفه شرقی میدان سرعت بدست آمد. همچنین میانگین خطای نسبی تولید شده در نقاط تست  $+۱۰/۵۸$  برای مولفه  $e_{xx}$ ،  $+۹/۶۳$  برای مولفه  $e_{yy}$  و  $+۱۳/۲۹$  برای مولفه  $e_{zz}$  تعیین شد.

لایه مخفی براساس سعی و خطا و براساس مینیمم خطای نسبی تولید شده در نقاط تست تعیین گردید. با این ساختار، میانگین خطای نسبی تولید شده در نقاط تست  $+۹/۵۸$  برای مولفه شمالی و  $+۱۷/۵۰$  برای

## مراجع

- [1] Mashhadi Hossainali, M., (2006): A Comprehensive Approach to the Analysis of the 3D Kinematics of Deformation. Institute of Physical Geodesy. Ph.D. Thesis. Darmstadt, Darmstadt University of Technology, 152 pp.
- [2] Jackson, J., and D. McKenzie (1988): The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in Mediterranean and Middle East: *Geophys. J.*, 93: 45-73.
- [3] Kostrov, V. V. (1974): Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock, *Izv.: Earth Physics*, 1: 23-40.
- [4] Terada, T., and N. Miyabe (1929): Deformation of the Earth Crust in Kwansei District and its Relation to the Orographic Features: *Bull. Earthquake Res. Ins. U. of Tokyo*, 7, Part 2., p. 223-241.
- [5] Chen, R. (1991): On the horizontal crustal deformations in Finland, Helsinki, Finish Geodetic Institute.
- [6] Altiner, Y. (1999): Analytical Surface Deformation Theory for Detection of the Earth's Crust Movements, Springer.
- [7] Grafarend, E. W. (1986): Three-dimensional deformation analysis: Global vector spherical harmonic and local element representation: *Tectonophysics*, 130: 337-359.
- [8] Nilforoushan F., Masson F., Vernant P., Vigny C., Martinod J., Abbassi M., Nankali H., Hatzfeld D., Bayer R., Tavakoli F., Ashtiani A., Doerflinger E., Daignières M., Collard P. and Chéry J. (2003): "GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran." *Journal of geodesy*
- [9] Berberian, M. (1981): "Active fault and tectonic of Iran." *Journal of geodynamic*.
- [10] Masson F., Chéry J., Hatzfeld D., Martinod J., Vernant P., Tavakoli F., Ghafory-Ashtiani M (2007): "Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran." *Journal of Geophysics*: 170:436-440.
- [11] Vernant Ph., Nilforoushan F., Chery J., Bayera R., Djamour Y., Massona F., Nankali H., Ritza J.F., Sedighi M., Tavakoli F. (2004): "Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data." *Earth and Planetary Science Letters* 223: 177-185.
- [12] Yilmaz M (2013): Artificial Neural Networks Pruning Approach for Geodetic Velocity Filed Determination, *BCG-Boletim de Ciências Geodésicas*
- [13] Voosoghi B (2000): "Intrinsic deformation analysis of the earth surface based on 3-D displacement fields derived from space geodetic measurements". PhD Thesis, Department of Geodesy and Geoinformatics, Stuttgart University
- [14] Stanley, J., (1990): Introduction to Neural Networks, 3rd edition. Sierra Madre, California Scientific Software.
- [15] Love, A. E. H. (1944): A treatise on the mathematical theory of elasticity, Dover publications.
- [16] Aster, R. C., B. Borchers, and C. H. Thurber (2005): Parameter Estimation and Inverse Problems, Elsevier Academic Press.
- [17] Miler K (1970): Least-squares method for ill-posed problems with a prescribed bound. *SIAM, J. Math. Anal.*, 1, 52-74.
- [18] Haykin. S, (1994): "Neural Networks, a

comprehensive Foundation", Macmillan College Publishing Company, New York.

- [19] Norgaard M (1997): "Neural Network Based System Identification Toolbox"; Technical Report 97-E-51, Department of Automation, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 37p.



## 3-D Crustal Deformation Analysis Using Isoparametric method and Multi-Layer Artificial Neural Networks (Case Study: Iran)

Mir Reza Ghaffari Razin<sup>1</sup>, Ali Mohammadzadeh<sup>\*2</sup>

1- PhD student, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

### Abstract

One of the most important applications of geodesy in geodynamics is study of crustal deformations. In this paper, surface deformation analysis is investigated using 3-D model. 3-D isoparametric method and Iranian permanent GPS network (IPGN) were used to estimate strain tensor. In this method, strain parameters obtained from compares the relative distance between base point and its neighboring points. Since the strain tensor is calculated for each GPS station, considers the strain inhomogeneous and its compatibility with the reality. Due to the special characteristics of isoparametric method, using regularization techniques to solve this problem is inevitable. Tikhonov regularization is used for solving corresponding problem. Optimum value of regularization parameter is selected using minimum relative error in strain parameters, as well as, diagonal elements of resolution matrix is used for error analysis. For estimated velocity field and strain parameters in other geodetic points, in this research artificial neural network (ANN) with 3 layers is used. 4 GPS stations with convenient distribution were used for validating and testing. Minimum relative error obtained from this evaluation for velocity field in eastern component ( $V_E$ ) is 6.25% and northern component ( $V_N$ ) is 6.80%. Also root mean square error (RMSE) is computed  $\pm 1.85$  (mm) and  $\pm 1.72$  (mm) in  $V_N$  and  $V_E$  respectively. These results are agreement with focal mechanism of earthquakes in this region as well as Iran's geodynamic mechanisms.

**Key words:** Isoparametric, Artificial neural network, Strain tensor, Crustal velocity, GPS.