

# پیش بینی زلزله



## از طریق آنالیز استرین شبکه‌های جابه‌جایی به روش المانهای محدود توسط GPS

رامین کیامهر دانشجوی کارشناسی ارشد

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

ژئودزی به روش GPS به تفصیل تشریح و ضمن اشاره به نکات مهم در برنامه‌ریزی مشاهدات ماهواره‌ای GPS دقت‌های لازم جهت این امور و مزایای استفاده از این روش و نهایتاً روش آنالیز استرین و حصول به پارامترهای max shear, dilatation به منظور تفسیر جابه‌جایی در این شبکه‌ها به دو روش تفاضل محدود و روش المانهای محدود Finite Element Approach به تفصیل تشریح می‌گردد.

چکیده

یکی از روشهای تشخیص الگوی لرزه زمین ساخت در بعد فضا و زمان، بررسی رخداد کرنش با استفاده از ثبت تغییرات پوسته زمین به طور دائم با بهره‌گیری از شبکه‌های monitoring ژئودزی و مشاهدات ماهواره‌ای و فضایی است در این مقاله روش آنالیز جابه‌جایی در شبکه‌های

۲) امکان تعیین موقعیت سه بعدی در سیستم مختصات جهانی به دور از تأثیرات تغییر شکل شبکه‌های محلی.

۳) امکان اندازه‌گیری حرکات پدیده‌های دینامیکی به صورت متوالی که بررسی پدیده جابه‌جایی ضرورت آن را ایجاب می‌کند.

۴) امکان اندازه‌گیری در شرایط جوی مختلف و نظم و تداوم در مشاهدات.

۵) سرعت بالای مشاهدات ماهواره‌ای در مقایسه با مشاهدات زمینی و هزینه پایین عملیاتی.

## ۲-۱ چه نکاتی در به‌کارگیری مشاهدات GPS در آنالیز جابه‌جایی بایستی مد نظر قرار داد؟

در طراحی عملیات به منظور محاسبه جابه‌جایی بایستی در نظر گرفت که با تکنیک GPS دقت نسبی  $10^{-6}$  الی  $10^{-7}$  به صورت عملی قابل دسترسی است برای طولهای پایه تا ۱۰۰ کیلومتر این دقت درصد ۱-۱۰ سانتیمتر و برای طولهای پایه تا ۱۰۰۰ کیلومتر دقت نسبی در حدود ۱۰۰-۱۰ سانتیمتر به راحتی قابل حصول است مهمترین فاکتور محدودکننده جهت رسیدن به دقت‌های بهتر، منابع خطاهای ذیل هستند:

(۱) پارامتر دقت مداری ماهواره

(۲) مدوله کردن انکسار اتمسفری

برای رسیدن به دقت نسبی  $10^{-7}$ ، مدار ماهواره بایستی با دقتی حدود  $\pm 2$  سانتیمتر محاسبه گردد که دقت اطلاعات اولیه مداری (broadcast) ده برابر کمتر از این مقدار می‌باشد لذا برای رسیدن به دقت مداری مورد نیاز بایستی نه تنها از اطلاعات دقیق (precise ephemeris) محاسبه شده از آنالیز مداری برای روزهای قبل استفاده کرد بلکه مشاهدات همزمان بایستی در سیستم مختصات با مبنا دقیق به منظور ترمیم دقت مدار و محاسبه مداری در منطقه کاری صورت گیرد این کار عملاً با استفاده از نقاط مبنای محلی با مختصات دقیق (fiducial station) و تعریف آنها در مدل سرشکنی شبکه صورت می‌پذیرد. در صورتیکه خطاهای باقیمانده ماحصل از تصحیح انکسار تروپوسفری در حد ۳-۱ سانتیمتر باشد برای افزایش دقت نسبی استفاده از رادیومترهای بخار آب الزامی است ضمناً استفاده از گیرنده‌های ۲ فرکانسه به منظور محدود کردن تأثیر یونیوسفری و برنامه‌ریزی و انتخاب شکل مهندسی مناسب برای شبکه، زمان مناسب مشاهداتی و نهایتاً مدل سرشکنی مناسب نقش عمده‌ای را در افزایش دقت نسبی این شبکه‌ها از طریق مشاهدات GPS ایفا می‌کند.

بدیهی است استفاده از طول پریودهای زمانی مشاهداتی تا حداقل ۲۴ ساعت باعث بهبود وضعیت باقیمانده‌ها در مشاهدات می‌گردد. در چنین حالتی حتی الامکان استفاده از شبکه با گیرنده‌های ثابت GPS و یا زمان مشاهداتی ۲۴ به صورت دائم وجود داشته و امکان ارسال اطلاعات از تمام سایتها با سیستم ارتباطی سرعت بالا به مرکز پردازش اصلی وجود خواهد داشت تغییرات عمومی در موقعیت این نقاط می‌تواند نشانگر تغییر شکل حاصل از زلزله یا فعالیت آتشفشانی یا زمینه‌های برای فعالیتهای آینده این پدیده‌ها باشد. نقطه مورد تأکید در حصول به دقت‌های نسبی در حد میلیمتر داشتن حداقل یک نقطه پایدار و ثابت در محل است که این نقطه می‌تواند از

کشور ایران به خاطر واقع شدن در کمربند زلزله جهانی، یکی از کشورهای است که دائماً با این پدیده طبیعی دست به‌گریبان بوده و هست در این رهگذر براساس آمار موجود از ۴۰ بلای طبیعی ۳۱ مورد آن در کشور ما رخ می‌دهد که بیشترین ضایعات بیار آمده مربوط به دو عامل سیل و زلزله بوده است و در طول ۹۰ سال گذشته با وقوع ۸۳ زلزله با قدرت تخریب بالا متأسفانه ۱۲۰ هزار نفر از مردم کشورمان جان خود را از دست داده‌اند. با وجود اینکه تاکنون روش صریح و روشی برای پیش‌بینی دقیق پدیده زلزله ثبت نشده ولی تحقیقات گروه‌های مختلف کارشناسی و تلفیق نتایج آنها در آینده نزدیک می‌تواند نویدبخش روشن شدن حقایق تازه‌ای برای کنترل این پدیده باشد. در این میان استفاده از روشهای ژئودتیکی و تغییر پارامترهای جابه‌جایی حاصل از این نوع آنالیز از آنجاییکه به صورت مطلق نسبت به سیستم مختصات بدون تغییر انجام می‌گیرد در مقایسه با روشهای نسبی که صرفاً جابه‌جایی نقاط را نسبت به یکدیگر بیان می‌کنند از ارجحیت خاصی برخوردار است. امروزه بهره‌گیری از روش GPS و استفاده از تلفیق اطلاعات آن با مشاهدات فضایی دیگر نظیر SLR, LLR, VLBI و مشاهدات تکمیلی زمینی و افزایش روزافزون قابلیت‌ها و دقت‌های حاصل از این روشها جایگاه تازه‌ای را به منظور استفاده از روشهای فوق در امر تشخیص جابه‌جایی و تغییر شکل ابنیه و سازه‌های مهندسی و تغییرات پوسته زمین چه در بعد محلی و چه در بعد قاره‌ای آن برای کارشناسان ژئودزی باز کرده است.

## ۱- نقش مشاهدات GPS در فرایند آنالیز جابه‌جایی‌ها

سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS ابتدا به منظور دستیابی ارتش آمریکا به اهداف نظامی طراحی گردید. مطالعات اولیه روی این سیستم در دهه ۷۰ شروع و اولین ماهواره از این سیستم در سال ۱۹۷۸ در مدار زمین قرار گرفت امروزه این سیستم با بهره‌گیری از ۲۴ ماهواره پرتاب شده در طول ۱۵ سال گذشته نتوانسته است پوشش کاملی از زمین را به منظور امکان تعیین موقعیت در تمام شبانه‌روز فراهم آورد. بطور کلی شاید طراحان سیستم فوق باور نمی‌داشتند که روزی قابلیت‌های سیستم فوق از طریق روشهای ژئودتیکی و مدل‌های کنترل خطا و ظهور گیرنده‌های جدید تا به آنجا افزایش یابد که از آن برای آنالیز تغییرات جزئی در حد کنترل جابه‌جایی ابنیه استفاده کرد. بحث مربوط به این سیستم و نکات تکنیکی آن در حوصله این مقاله نبوده و علاقه‌مندان می‌توانند به مراجع ضمیمه مقاله مراجعه فرمایند در این مقاله صرفاً نکاتی که بایستی در به‌کارگیری از این سیستم در امور جابه‌جایی رعایت گردد تشریح و مزایای به‌کارگیری آن روشن می‌گردد.

## ۱-۱ مزایای به‌کارگیری GPS در آنالیز جابه‌جایی

به طور کلی مزایای ذیل را در استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای GPS بر مشاهدات کلاسیک در شبکه‌های جابه‌جایی می‌توان متصور شد:

(۱) سهولت انتخاب نقاط کنترل براساس معیارهای ژئوتکتونیک و بی‌نیازی از لزوم دید بین نقاط.

که در آن:

$$r = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}$$

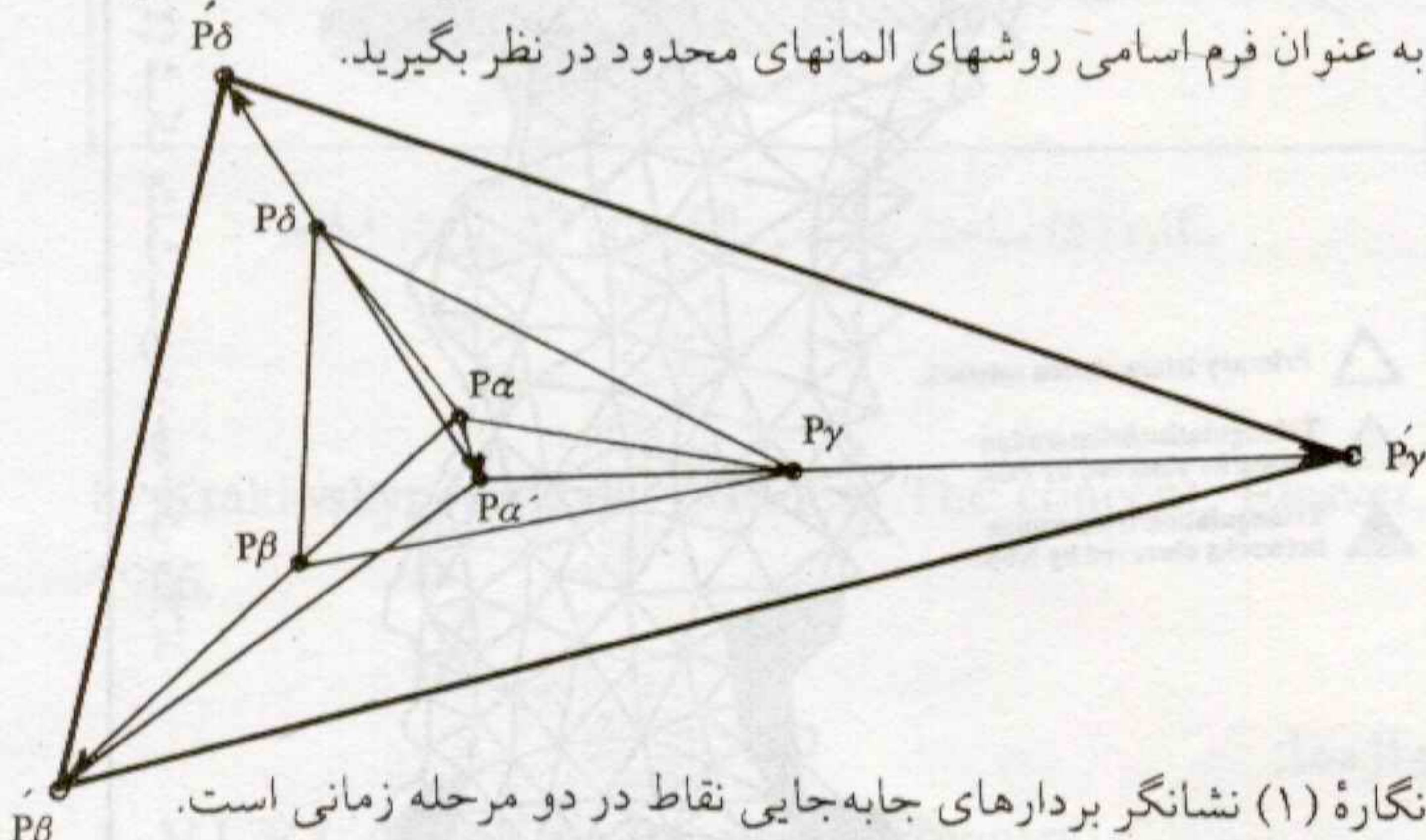
در مدل بالا J نشانگر ژاکوبین، انتقال از فضای موقعیت به فضای جابه‌جایی است و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial d}{\partial x} & \frac{\partial d}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x}{\partial x} & \frac{\partial \Delta x}{\partial y} \\ \frac{\partial \Delta y}{\partial x} & \frac{\partial \Delta y}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix}$$

بدیهی است برای یافتن ۶ پارامتر مجهول نیازمند ۶ معادله با به عبارتی دیگر داشتن اطلاعات جابه‌جایی ۳ نقطه مسطحاتی در شبکه است. در این حال به خاطر حضور مقادیر مختصات نقاط در ماتریس J و بزرگی این مقادیر غالباً این ماتریس ناهمگن بوده و دقت کافی را دارا نیست.

## ۲-۲ روش المانهای محدود

در این روش امکان محاسبه مدل جابه‌جایی برای هر نقطه با احتساب کلیه نقاط احاطه‌کننده نقطه وجود دارد به عبارتی در این حال امکان برآورد کمترین مربعات برای پارامترهای مجهول وجود خواهد داشت علاوه بر این، مزیت این روش بر روش تفاضل محدود پایداری ماتریسهای محاسباتی در برآورد پارامترهای مجهول می‌باشد. شکل چهاروجهی ذیل را به عنوان فرم اسامی روشهای المانهای محدود در نظر بگیرید.



$P_{\alpha}, P_{\beta}, P_{\gamma}, P_{\delta}$ : موقعیت سه بعدی چهار نقطه در مرحله زمانی (t)

$P_{\alpha}', P_{\beta}', P_{\gamma}', P_{\delta}'$ : موقعیت سه بعدی چهار نقطه در مرحله زمانی (t')

مدل ریاضی به کار رفته در آنالیز به صورت:

$$\begin{bmatrix} x_{\alpha'} & x_{\beta'} & x_{\gamma'} & x_{\delta'} \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} x_{\alpha} & x_{\beta} & x_{\gamma} & x_{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \end{bmatrix}$$

پارامتر مجهول      پارامتر      پارامتر مختصات

مختصات معلوم از یک t مجهول معلوم از یک t

(4x3)

پردازش قبلی روی شبکه و از طریق تستهای آماری برای تشخیص پایداری نقاط تعیین گردد. نکته جالب در این بحث امکان دور بودن نقاط شبکه سنجش جابه‌جایی GPS از محل دارای فعالیت جابه‌جایی است که امکان حصول به نقاط پایدار و بی‌تأثیر از جابه‌جایی را در منطقه تسهیل می‌کند. خطاهای دیگری نیز در کاهش دقت نسبی مؤثرند که بایستی به طریق عملی یا محاسباتی سعی در کنترل و کاهش آنها داشت از جمله پدیده multypathing که باعث ایجاد تعداد زیادی sycleslip در مشاهدات شده و نتیجه موجهای برگشتی و انعکاسی از ساختمانها و اشیاء دارای قابلیت انعکاسی بالاست برای کاهش تأثیر این پدیده دوری از اشیاء دارای خاصیت انعکاسی و کاربرد آنتن میکروستریپ مفید خواهد بود ضمناً جهت کاهش خطای تغییر مرکز فاز آنتن به کارگیری از قطب‌نما و یکسان‌سازی امتداد توجیه آنتنها ضروری است به طور کلی به خاطر ماهیت جابه‌جایی و مقدار مطلق آن بایستی دقت خاصی در به کارگیری GPS و مدل‌های کنترل خطا و روشهای مشاهداتی در آن اعمال گردد به طوریکه ممکن است خطاهای سیستم با جابه‌جایی نقاط تفسیر گردد و نتایج نادرستی حاصل گردد.

## ۲- آنالیز جابه‌جایی و استرین شبکه

پس از سرشکنی روی شبکه و حصول نتایج اپکهای مختلف مشاهداتی امکان محاسبه جابه‌جایی و آنالیز استرین شبکه وجود خواهد داشت در این حال یکی از روش ذیل بسته به ماهیت متصور شده برای جابه‌جایی استفاده می‌گردد:

(۱) روش ساده (تفاضل محدود)

(۲) روش المانهای محدود (Finite Element method)

در روش آنالیز ساده برای هر نقطه یک مدل جابه‌جایی پیش‌بینی و محاسبه می‌گردد که این مدل صرفاً برای محدوده کوچکی از اطراف نقطه صادق خواهد بود. بدیهی است برای مناطق وسیع این مدل جابه‌جایی برای نقاط ارزش خود را از دست داده و روش المانهای محدود برای تفسیر صحیح بایستی استفاده گردد.

## ۲-۱ روش ساده در آنالیز استرین (روش تفاضل محدود)

فرض کنیم X بردار موقعیت حاصله از نتایج سری مشاهدات t و X' بردار و موقعیت نتایج مشاهدات زمان t' باشد در این حال بردار جابه‌جایی به صورت  $d = X' - X$  تعریف می‌گردد در این حال داریم:

$$J := dx'/dx$$

$$S := 1/2(J^T \cdot J - I)$$

که J و S به ترتیب ژاکوبین و ماتریس استرین نقطه مورد نظر است.

در صورت قائل شدن فرم خطی برای جابه‌جایی می‌توان نوشت (در فرم ۲ بعدی):

$$\begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1x + a_2y_i \\ b_0 + b_1x + b_2y_i \end{bmatrix}$$

$$d_i = \begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \end{bmatrix} = J \cdot r + d_0$$

$$\begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1x + a_2y_i \\ b_0 + b_1x + b_2y_i \end{bmatrix}$$

### ۳- نتیجه گیری

در نتیجه

$$S = \frac{1}{2} (J^T J - I) \Rightarrow \text{ماتریس استرین (زاکوپین انتقال)} \Rightarrow \text{نتیجه حل معادله حصول به تجربه ماتریس استرین و تحلیل پارامترهای حاصل از آنالیز}$$

$$s = v \Lambda v^T \Leftrightarrow v^T s v = \Lambda = \text{Diag}(x_1, x_2, x_3)$$

v: eigen vectors

(بردارهای ویژه)

Λ: eigen values

(مقادیر ویژه)

$$V = R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \Lambda = \begin{bmatrix} e_{\max} & 0 \\ 0 & e_{\min} \end{bmatrix}$$

استرینهای اصلی (principal strains)

DILATATION (تغییر مقیاس)  $t(s) = e_{\max} + e_{\min}$

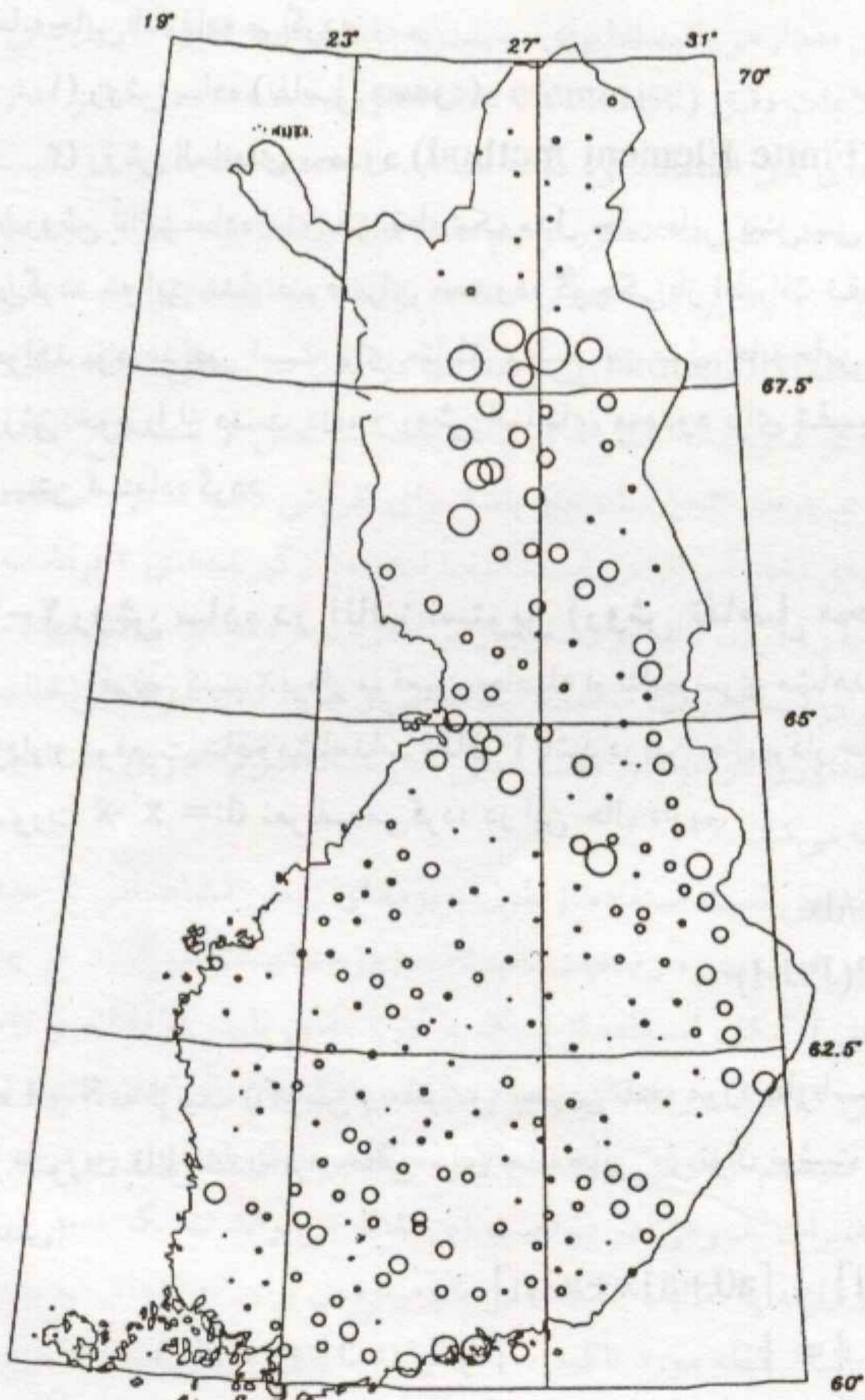
MAX.SHEAR (ماکزیمم برش)  $\gamma = e_{\max} - e_{\min}$

SHEAR COMPONENTS (مؤلفه‌های برش):  $\gamma_1 = \gamma \cos 2\phi$   
 $\gamma_2 = \gamma (-\sin 2\phi)$

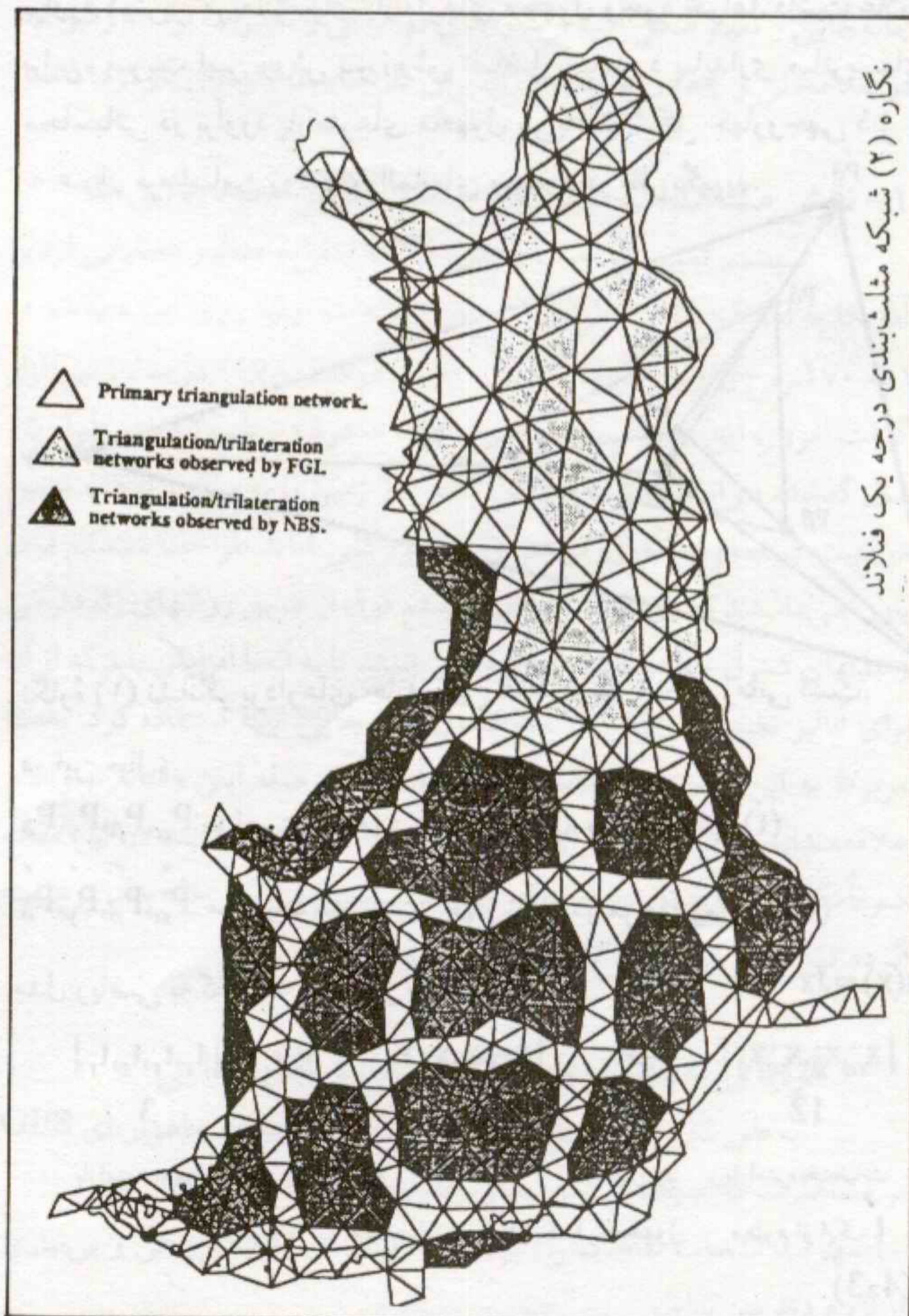
$$\tan 2\phi = -\gamma_2/\gamma_1, \gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}$$

در این مقاله ضمن مرور قابلیت‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS در بررسی تغییر شکل شبکه‌های ژئودزی مزایای به کارگیری از این سیستم بدین منظور تشریح شده و نکاتی که بایستی در به کارگیری مشاهدات GPS در چنین شبکه‌ها مورد توجه قرار گیرد مورد بحث قرار گرفت و روشهای حصول به پارامترهای Dilatation و Max shear و مؤلفه‌های استرین به دو روش تفاضل محدود و المانهای محدود تشریح گردید. مطالعات ژئوفیزیکی نتایج آماری حاصله از زمین لرزه‌های گذشته که در کشورهای دارای شبکه کنترل جابه‌جایی اند نشانگر این موضوع است که ۶۰ درصد از زمین لرزه‌ها در نقاطی اتفاق افتاده که دارای Max shear بحرانی باشند. آنچه مسلم است روشهای ژئودتیکی کنترل جابه‌جایی نیز نظیر روشهای دیگر به خودی خود نمی‌تواند پاسخی قاطع و دقیق از فرآیند زلزله و پیش‌بینی آنرا در دست دهد لیکن بررسی دقیق نقاط بحرانی و تلفیق نتایج حاصله از اطلاعات کارشناسان زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و زلزله‌شناسی می‌تواند تفسیر بهتری را از آن در دست دهد. اشکال ضمیمه مقاله نشانگر نتایج حاصله از پروژه عملی شبکه فنلاند و تفسیر پارامترهای حاصله از آن است. چنانچه مشخص است مرز نقاط تکتونیکی حاصل از نتایج زمین‌شناسی دقیقاً با نتایج حاصل از این آنالیز انطباق دارد. □

نگاره (۳) توزیع  $\gamma$  افقی (max shear) در فنلاند



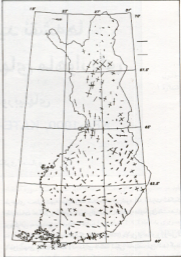
نگاره (۲) شبکه مثلث‌بندی درجه یک فنلاند



-  NE - SW extension, NW - SE compression.
-  Extension.
-  Maximum compression in the NW - SE direction.
-  Maximum compression in the NE - SW direction.
-  Insignificant deformations.
-  Measurements not available.



نگاره (۵) ساختار عمومی الگوهای استرین در فلات



نگاره (۶) استرینهای اصلی  $\sigma_{max}$  و  $\sigma_{min}$  و جهت آنها  $(\phi + \phi + \pi/2)$  در فلات

8- Krakiwskyp, Vanicek, Geodesy The concept, Elsever, 1986.

#### واژه‌ها:

1- V.L.B.L (very long Base Interfromatry)

روش که از طریق آن لیزر کوئرسیوم موجهای درازتری در دو ایستگاه از طریق کوازرها امکان تعیین موقعیت نسی با دقت بالا برای بررسی حرکات قاره‌ای و غیره استفاده می‌گردد.

2- S.L.R (satellite laser Ranging)

روش مشابه روش E.D.M که در آن ماهواره نقش رفلکتور را داشته و موج ارسالی از ایستگاه کنترل را برگشت داده و امکان ردیابی ماهواره‌ها و منظوره‌های طولیابی نسی را در شبکه‌های دقیق ژئودینمیک و ترمیم مدار ماهواره را فراهم می‌آورد.

3- L.L.R

روش نظیر S.L.R که رفلکتورهای ویژه در ماه نصب شده است.

#### منابع و ماخذ:

- 1- Gunter Steeber. Satellite geodesy, watter de Gruyter 1993.
- 2- remondi. B. W. Global positioning System, J.collins 1992.
- 3- Mueller .JL. International GPS Geodynamics service, GPS Bulletin, 4(1):7-16.
- 4- Sjoberg, L.E. The establishment of GPS Deformation Network, Great Britain. 1992.
- 5- Wells D. Guide To GPS Positioning, Canadian GPS associates, 1987.
- 6- Grafarend E.W, The Finite Element Approach To The Geodetic Deformation Parameters, 1992.
- 7- Kennie T.J.M, Engineering Surveying to chnology, Blackie and son, 1990.