

تعیین الگوی تغییر شکل ارتفاعی سطح پوسته زمین در فلات ایران با استفاده از داده‌های شبکه GPS موردی ایران سراسری

مسعود مشهدی حسینی^{۱*}، حمیدرضا حیدری^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- کارشناس ارشد ژئودزی دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۸/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۸/۲۴

چکیده

در نوشتار حاضر تغییر شکل‌های ارتفاعی سطح پوسته زمین در فلات ایران با استفاده از روش تحلیلی آنالیز تغییر شکل بررسی می‌گردد. برای این منظور از مشاهدات GPS شبکه موردی موسوم به شبکه ایران سراسری استفاده شده است. این شبکه نخستین شبکه سراسری ژئودزی ماهواره‌ای کشور است که در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ میلادی به همت سازمان نقشه‌برداری کشور و در قالب همکاری علمی مشترک با دانشگاه مون‌پلییر در فرانسه، اجرا و اندازه‌گیری شد. در پردازش داده‌های این شبکه از نرم‌افزار GAMIT/GLOBK استفاده شده است. برای تعیین الگوی تغییر شکل ارتفاعی سطح پوسته زمین در فلات ایران در این روش از تغییرات فرم اساسی دوم و یکی از معیارهای تغییر انحنای پوسته زمین در سطح آن - که در اینجا انحنای متوسط است - استفاده می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق با سایر شواهد موجود همچون سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌هایی که در بازه زمانی مشاهده‌های این شبکه به وقوع پیوسته‌اند، مقایسه و ارزیابی شده است. با توجه به این که نتایج پژوهش حاضر نخستین نتایج در زمینه وضعیت تغییر شکل ارتفاعی پوسته زمین در فلات ایران به شمار می‌آید، وضعیت سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های مورد استناد در این مقاله دست‌کم اعتبار محلی نتایج مذکور را تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: آنالیز تغییر شکل، سیستم تعیین موقعیت جهانی، آنالیز تحلیلی تغییر شکل، تغییر شکل ارتفاعی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر (عج)، بالاتر از تقاطع میرداماد، پلاک ۱۳۴۶، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری.

تلفن: ۸۸۷۸۶۲۱۲

Email: Hossainali@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

کشور ایران، واقع بر کمربند لرزه خیز آلپ - هیمالیا، مستعد و دستخوش انواع تغییر شکل های لرزه مرجع^۱ و غیر لرزه مرجع^۲ است [۱]. این تغییر شکل ها غالباً با مؤلفه های مسطحاتی بزرگی (در حد دقت سیستم های جدید اندازه گیری) که به مراتب بزرگ تر از مؤلفه ارتفاعی مربوط هستند، همراه اند [۲]. روش های ژئودتیک آنالیز تغییر شکل که غالباً رویکردی هندسی به موضوع آنالیز تغییر شکل دارند، به عنوان تنها ابزارهای موجود برای بررسی وضع حاضر تغییر شکل های سطحی پوسته زمین شناخته می شوند [۳]. بدین لحاظ توسعه این روش ها مدت ها مورد توجه متخصصان ذی ربط بوده است [۴، ۵، ۶، ۷، ۸].

براساس بررسی های به عمل آمده در این تحقیق، تاکنون در ایران مطالعه تغییر شکل های سطحی پوسته زمین به بررسی و مطالعه تغییر شکل های مسطحاتی محدود شده است. بنابراین مقاله حاضر نخستین تحقیق در زمینه مطالعه تغییر شکل ارتفاعی در فلات ایران به شمار می آید. کوچک تر بودن مؤلفه ارتفاعی تغییر شکل از مؤلفه های مسطحاتی مربوط، آنالیز همزمان تغییر شکل های مسطحاتی و ارتفاعی به روش های ژئوتیک را با مشکلاتی همراه می سازد [۹]. بدین لحاظ استفاده از تراز یابی دقیق هنوز هم بهترین ابزار برای مطالعه تغییر شکل های ارتفاعی پوسته زمین محسوب می شود. بنابراین از بُعد نظری، شبکه تراز یابی دقیق سراسری کشور با ۳۰۵۰۰ کیلومتر مسیر تراز یابی دقیق به لحاظ پوشش مکانی، و همچنین ماهیت مشاهدات و دقت آنها، مناسب ترین داده ها برای بررسی چگونگی تغییر شکل ارتفاعی پوسته زمین در فلات ایران به نظر می رسد.

با این حال، متأسفانه دلایل مختلفی مانند کامل نبودن دور جدید مشاهدات این شبکه، آلوده بودن مشاهدات دور نخست به خطاهای سیستماتیک [۱۰ و ۱۱]، مدت زمان بسیار طولانی لازم برای انجام

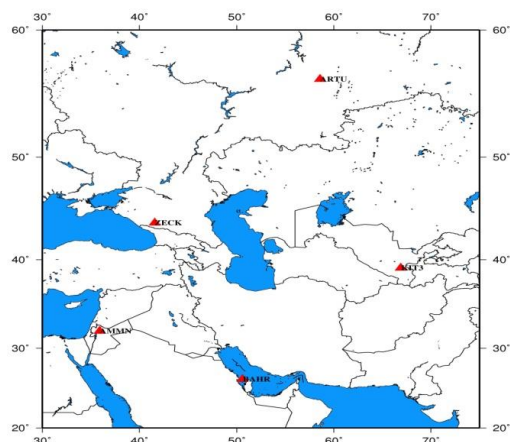
هر دور مشاهدات این شبکه و فاصله زمانی نامناسب دور دوم مشاهدات این شبکه از مشاهدات دور نخست استفاده از این شبکه، بررسی وضعیت کنونی تغییر شکل ارتفاعی در کشور را ناممکن می نماید.

بدین ترتیب در این تحقیق استفاده از داده های GPS به عنوان تنها مشاهداتی که در وهله نخست ماهیتی سه بعدی دارند و بنابراین مطالعه تغییر شکل ارتفاعی را ممکن می سازند و دوم، به عنوان تنها مشاهدات اخیر موجود که بررسی چگونگی وضعیت حاضر تغییر شکل ارتفاعی در کشور را امکان پذیر می سازند، مورد توجه قرار گرفت. برای این منظور، داده های شبکه GPS موردی ایران سراسری از سازمان نقشه برداری کشور تهیه شد و پس از پردازش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این داده ها و جزئیات مربوط به پردازش آنها با نرم افزار GAMIT/GLOBK در بخش بعدی این مقاله معرفی خواهند شد. در ادامه برای دستیابی به الگویی از وضعیت حاضر تغییر شکل ارتفاعی در کشور به کمک نتایج حاصل از پردازش این مشاهدات، از تئوری تحلیلی آنالیز تغییر شکل استفاده شده است. مطابق با این تئوری، تغییر شکل های ارتفاعی را می توان از طریق مطالعه تغییرات فرم اساسی دوم گوس و یکی از معیارهای محاسبه انحنای سطح پوسته زمین مطالعه و تحلیل کرد [۱۲، ۱۳]. برای این منظور در این مقاله از معیار انحنای متوسط استفاده شده است. در ادامه ضمن معرفی این روش، جزئیات مربوط به نتایج به دست آمده ارائه می گردد و با سایر شواهد موجود ارزیابی و مقایسه می شود.

۲- شبکه مورد مطالعه

شبکه موردی ایران سراسری، نخستین شبکه سراسری ژئودزی ماهواره ای کشور است که در سال های ۱۹۹۹ و

1. Seismic Deformation
2. Aseismic Deformation

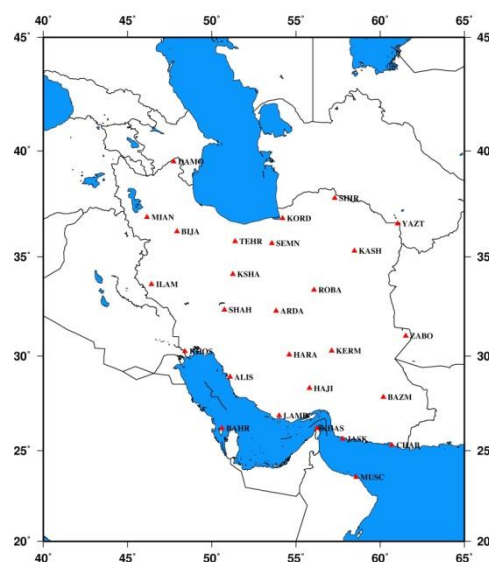


٢-١-١- مشاهدات سال ١٩٩٩

مشاهدات این سال در ۱۱ روز متوالی انجام شده است. در این مرحله ۲۸ ایستگاه مطابق با جدول «۱-ض» اندازه‌گیری شده است. این مشاهدات با استفاده از گیرنده‌های ASHTECH Z-XII3 و TRIMBLE 4000SSI و به‌کارگیری آنتن‌های ASH701945B-M انجام شده است. جدول «۱-ض» تکرارپذیری مشاهدات این مرحله را برای هر یک از ایستگاه‌های شبکه موردی ایران - سراسری نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این جدول می‌توان دید، ۲۲ ایستگاه در دو فاز ۲۴ ساعته اندازه‌گیری شده‌اند. بخش غربی شبکه ایران در روزهای ۲۶۲-۲۵۹ و بخش شرقی در روزهای ۲۶۹-۲۶۶ اندازه‌گیری شد. سه روز هم برای جابه‌جایی گیرنده‌ها و تیم‌های مشاهداتی بین دو فاز در نظر گرفته شد [۱۴]. در ۶ ایستگاه، اندازه‌گیری در تمام طول مدت مشاهدات انجام گرفت. این اندازه‌گیری‌ها

1. International GNSS Service for Geodynamics
2. Scripts Orbit and Permanent Array Center

به منظور اتصال این شبکه به شبکه^۱ IGNSS، مشاهدات ۵ ایستگاه از این شبکه که توزیع هندسی نسبتاً منظمی دارند (تقریباً به زوایا و فواصل مساوی از مرکز ایران)، از طریق سرویس^۲ SOPAC دریافت شد و به همراه مشاهدات این شبکه پردازش گردید. استفاده از ایستگاه‌های شبکه IGNSS در پردازش، امکان استفاده از موقعیت و سرعت حرکت این نقاط را در فریم ITRF فراهم می‌سازد و در نتیجه مشکل سیستم مختصات را در برآورد میدان سرعت مرتفع می‌کند [۱۵]. شکل ۲ توزیع مکانی ایستگاه‌های IGNSS مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ایستگاه‌های GPS موردی شبکه موسوم به ایران سراسری. نام اختصاری هر ایستگاه در کنار محل ایستگاه نمایش داده شده است.

ایستگاه‌های شبکه موردی ایران سراسری نمایش می‌دهد [۱۴].

۲-۱-۲-۳- مشاهدات سال ۲۰۰۵

مشاهدات این سال طی ۱۲ روز مطابق با جدول «۳-ض» انجام گرفت. در این مشاهدات نیز از گیرنده‌های ASHTECH Z-XII3 و TRIMBLE 4000SSI و ASHTECH UZ-12 و آنتن ASH701945B_M استفاده شده است. در این مرحله اندازه‌گیری نیز فاصله زمانی بین اپک‌ها ۳۰ ثانیه است. در این سال ۲۴ ایستگاه در سه فاز ۲۴ ساعته اندازه‌گیری شدند که سهم هر فاز ۸ ایستگاه بوده است. همچنین ۶ ایستگاه با تعداد روزهای اندازه‌گیری ۴ روز یا بیشتر برای اتصال این ۳ فاز در نظر گرفته شدند. بین هر فاز اندازه‌گیری ۱ روز برای جابه‌جایی افراد ذی‌ربط و وسایل اندازه‌گیری در نظر گرفته شد. جدول «۳-ض» تکرارپذیری مشاهدات این مرحله را برای هر یک از ایستگاه‌های شبکه موردی ایران سراسری نمایش می‌دهد.

۳- پردازش داده‌ها با نرم‌افزار GAMIT

این نرم‌افزار یکی از نرم‌افزارهای جامع پردازش مشاهدات GPS و محصول مؤسسه تحقیقاتی MIT^۴ است. نرم‌افزار مذکور تحت سیستم عامل خانواده UNIX اجرا می‌شود. از مزیت‌های آن در مقایسه با نرم‌افزارهای تجاری، مواردی چون محاسبه تصحیحات مربوط به پارامترهای مداری، تصحیحات مربوط به جزر و مد خشکی و دریا، تصحیحات مربوط به حرکات صفحات تکتونیکی و مانند اینهاست [۱۶]. در ادامه خلاصه‌ای از استراتژی به کار رفته برای پردازش مشاهدات به کمک این نرم‌افزار ارائه می‌شود.

امکان اتصال دو فاز مشاهداتی این شبکه را فراهم می‌سازند. فاصله زمانی بین اپک‌ها ۳۰ ثانیه است. همچنین برای اجتناب از خطای چندمسیری، حداقل زاویه ارتفاعی مشاهدات^۱ در ایستگاه‌های شبکه بر روی ۱۵ درجه تنظیم شد. استقرار گیرنده‌های GPS به دو صورت سانتراژ خودکار^۲ و سانتراژ به وسیله سه پایه^۳ با شاغل اپتیکی صورت پذیرفت. این موضوع برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری مختلف در جدول «۱-ض» به ترتیب در آخرین ستون این جدول با حروف P و T مشخص شده است [۱۴].

۲-۱-۲-۲- مشاهدات سال ۲۰۰۱

مشاهدات این سال طی ۱۲ روز مطابق با جدول «۲-ض» انجام گرفت. این مشاهدات نیز با استفاده از گیرنده TRIMBLE 4000SSI, ASHTECH Z-XII3 و آنتن ASH701945B_M انجام شدند. فاصله زمانی بین اپک‌ها ۳۰ ثانیه است. تمامی ایستگاه‌های شبکه که در سال ۱۹۹۹ اندازه‌گیری شدند، جز ایستگاه NKS1 (به دلایل امنیتی در کشور ازبکستان) دوباره اندازه‌گیری گردیدند. تعداد ایستگاه‌هایی که به طور متوالی اندازه‌گیری شدند در قیاس با سال ۱۹۹۹ افزایش یافته و سه ایستگاه جدید به شبکه ایران سراسری افزوده شده است. بخش غربی شبکه (شامل ۱۰ ایستگاه) بین روزهای ۲۸۱-۲۸۴ و بخش شرقی بین روزهای ۲۹۱-۲۸۸ اندازه‌گیری شد. در این مرحله از اندازه‌گیری‌ها، در مجموع ۳۰ ایستگاه اندازه‌گیری شدند. گفتنی است ۲۷ ایستگاه از مجموعه ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در این مرحله با ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۹۹۹ مشترک‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به جز ایستگاه‌های KERM, HAJI و BAZM, KHAS که به ترتیب سه و دو روز اندازه‌گیری شدند، سایر ایستگاه‌ها ۴ روز یا بیشتر اندازه‌گیری شدند. جدول «۲-ض» تکرارپذیری مشاهدات این مرحله را برای هر یک از

1. Cut of angle
2. Self centering (Pillar)
3. Tripod
4. Massachusetts Institute of Technology

در آن، T_{dry}^z و T_{wet}^z به ترتیب تأخیر زینتی برای بخش خشک و تر اتمسفرند، که با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند:

$$T_{dry}^z = 10^6 KRP/g_m \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$T_{wet}^z = 0.002277(1255/T + 0.05)e \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این روابط K ضریب شکست، R ثابت گازها برای هوای خشک، P فشار هوا در ایستگاه مورد نظر، g_m شتاب ثقل، T دمای هوا و e فشار بخار آب است، و ε زاویه ارتفاعی ماهواره‌ای است که از ایستگاه مورد نظر ردیابی می‌شود. $m(\varepsilon)$ تابع نگاشتی است که تأخیر اتمسفری را از مقادیر این تأخیر در زینت برای امتداد ماهواره مورد نظر به دست می‌دهد. در پردازش این داده‌ها از تابع نگاشت نیل استفاده شده است [۱۹]:

$$m(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(\varepsilon) + \frac{a}{\sin(\varepsilon) + \frac{b}{\sin(\varepsilon) + c}}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه درج شده، ضرایب a و b و c ضرایب تجربی هستند که برای دو بخش خشک شکست تروپوسفریک و بخشی تر آن، جداگانه تعیین می‌شوند. مقادیر دما، فشار و رطوبت برای محاسبه شکست تروپوسفری، با استفاده از یک مدل، با نسبت دادن مقادیری از دما و فشار و رطوبت در ارتفاع صفر، و تخمین آن برای ایستگاه مورد نظر در ارتفاع ایستگاه به دست می‌آیند. مقدار شکست تروپوسفری به دست آمده از این رابطه، مقدار اولیه برای محاسبه مقدار متوسط خطای تروپوسفری در طول یک جلسه^۱ در سرشکنی است. همچنین تغییرات خطای تروپوسفری از این مقدار متوسط، به صورت هر ۱ ساعت یک بار، با استفاده از یک تابع خطی تخمین زده می‌شود. مدل مورد استفاده، مدل گوس - مارکو مرتبه اول^۲ است.

در تعیین موقعیت با سیستم GPS، ماهواره‌ها نقش نقاط معلوم را دارند. براساس قانون انتشار خطاها، از آنجا که خطای موقعیت نقاط معلوم مستقیماً به نقاط مجهول انتقال می‌یابد، در تعیین موقعیت دقیق می‌بایست موقعیت مداری ماهواره‌ها با دقت بالایی تعیین گردد. در این نرم‌افزار مدار ماهواره‌ها با انتگرال‌گیری عددی یک مدل نیرو شامل تأثیرات جاذبه ماه و خورشید بر روی ماهواره‌ها، مدل میدان جاذبه زمین (IGS92) و همچنین یک مدل ۹ پارامتری (موسوم به مدل BERNE) برای تشعشعات خورشیدی به دست می‌آید [۱۷]. با استفاده از مقادیر به دست آمده برای مدار ماهواره‌ها و مقادیر اولیه مختصات ایستگاه‌ها، و نیز با به کارگیری پارامترهای دوران زمین و مقادیر پرسش و نوتیشن محور دوران زمین از مدل IAU76 محاسبه می‌گردند [۱۸]. این نرم‌افزار مقادیر اولیه مشاهدات فاز را برای دو موج حامل L_1 و L_2 بین هر زوج ایستگاه - ماهواره محاسبه می‌کند. سپس مقادیر محاسبه شده از مقادیر مشاهده شده فاز موج حامل کم می‌شود تا مقادیر اولیه باقی‌مانده‌ها (از طریق مدل پارامتریک غیرخطی) محاسبه گردد. در ادامه، با استفاده از ترکیبات دو تفاضلی و به روش کمترین مربعات مختصات ایستگاه‌ها، پارامترهای مداری ماهواره‌ها و پارامترهای ابهام فاز با تخصیص وزن مناسب به اندازه‌گیری‌ها تخمین زده می‌شوند. برای این منظور، ترکیب عاری از یونوسفر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تأثیرات اتمسفری، این نرم‌افزار پارامتر متوسطی را برای کل مدت اندازه‌گیری تخمین می‌زند و اختلاف از این مقدار متوسط را خطی فرض می‌کند و پارامترهای این مدل خطی را هر یک ساعت برآورد می‌کند [۱۶]. در این تحقیق از مدل Saastamoinen برای این منظور استفاده شده است. در این مدل برای محاسبه خطای اتمسفری از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

رابطه (۱)

$$ATMDEL(\varepsilon) = T_{dry}^z \times m(\varepsilon) + T_{wet}^z \times m(\varepsilon)$$

1. session

2. First order Gauss Markov process

به کارگیری این مدل باعث خواهد شد تا پیوستگی تابع خطی در مرز (نقاط گروهی) حفظ گردد [۱۹]. رابطه زیر به رابطه گوس - مارکوف مرتبه اول معروف است:

$$\frac{d\Delta\nabla d_{\text{Trop}}}{dt} = \frac{-\Delta\nabla d_{\text{Trop}}(t)}{\tau_{\text{GM}}} + w(t) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در آن، τ زمان وابستگی^۱ و $w(t)$ خطای سفید^۲ است.

جواب این معادله دیفرانسیل بدین صورت است [۲۰]:

رابطه (۶)

$$\Delta\nabla d_{\text{Trop}}(t + \Delta t) = m\Delta\nabla d_{\text{Trop}}(t) + (1 - m)^{\frac{1}{2}}w(t)$$

$$m = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

همچنین گرادین شکست تروپوسفری جمعاً به تعداد ۶ پارامتر (۳ پارامتر شمالی - جنوبی و ۳ تا شرقی - غربی) برای هر ایستگاه در طول هر جلسه از پردازش مشاهدات تخمین زده می‌شود. این کار تکرارپذیری در مؤلفه افقی مختصات ایستگاه‌ها را افزایش می‌دهد [۲۱].

از آنجا که در سرشکنی مشاهدات فاز بیشترین تعداد مجهولات مربوط به پارامترهای ابهام فاز است، برای بهبود دقت نتایج سعی می‌شود تا مقادیر صحیح این پارامترها مشخص شوند و به عنوان پارامترهای معلوم به مدل ریاضی تعیین موقعیت معرفی گردند. این فرایند اصطلاحاً به حل ابهام فاز معروف است. روش‌های مختلفی برای حل ابهام مشاهدات فاز موج حامل وجود دارد. در اینجا از روش موسوم به تکنیک wide-lane برای حل پارامترهای ابهام فاز استفاده شده است [۱۶، ۲۲].

پردازش مشاهدات فاز با نرم‌افزار GAMIT/GLOBK را می‌توان در ۳ مرحله کلی زیر خلاصه کرد:

در مرحله اول (پردازش روزانه) با استفاده از

مشاهدات دوتفاضلی^۳ پارامترهای ژئودتیک و اتمسفری و پارامترهای دوران زمین با تحمیل قیود شل^۴ بر پارامترها، تخمین زده می‌شوند. در این مرحله از ۵ ایستگاه IGNSS شکل ۲ به منظور انتقال شبکه ایران به فریم مرجع ITRF 2000 استفاده شده است.

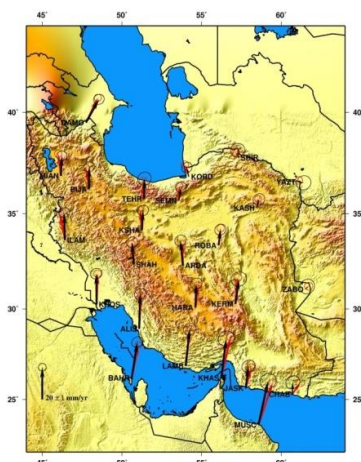
در مرحله دوم با استفاده از برنامه کالمن فیلتر (GLOBK) نتایج حاصل از پردازش روزانه، به منظور تخمین متوسط مختصات ایستگاه‌ها در طول مدت اندازه‌گیری، با هم ترکیب می‌شوند. همچنین در این مرحله از پردازش به منظور تعریف فریم مرجع، نتایج حاصل از پردازش‌های روزانه زیرشبکه‌های EURA، IGS1، IGS2، IGS3 از شبکه IGNSS با نتایج حاصل از پردازش روزانه ترکیب می‌شود [۲۳].

در مرحله سوم به منظور تعریف فریم مرجع مورد نیاز برای تخمین میدان سرعت شبکه ایران، ۶ پارامتر مربوط به سرعت دوران و سرعت انتقال شبکه با توجه به فریم مرجع ITRF2000، با استفاده از کمینه کردن مجموع مربعات تصحیحات سرعت ۱۰ ایستگاه IGNSS، تخمین زده می‌شود [۲۳].

در سرشکنی مشاهدات فاز، وزن دهی به مشاهدات بر اساس زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها صورت پذیرفته است و پیش فرض آن به گونه‌ای است که وزن یک مشاهده در زاویه ۴۰ درجه ارتفاعی، برابر با مقدار ۱۰ با واحد عکس میلی‌متر و وزن یک مشاهده در ۲۰ درجه ارتفاعی برابر با نصف این مقدار باشد [۱۶].

تغییرات مرکز فاز آنتن گیرنده برحسب زاویه ارتفاعی و آزیموت ماهواره‌ها، مدل و وارد محاسبات شده است. برای این منظور مقادیر انحراف مرکز فاز آنتن در قالب یک جدول برای مقادیر زاویه ارتفاعی و آزیموت مختلف ماهواره‌ها، در نرم‌افزار استفاده می‌شود [۱۶].

1. Correlation time
2. White noise
3. Double difference
4. Loosly constraint



بررسی میدان‌های سرعت محاسبه شده در فریم‌های اوراسیا و ITRF2000، نشان می‌دهد که در ایستگاه بحرین سرعت صفحه عربی نسبت به صفحه اوراسیا ۲۳ میلی‌متر بر سال به دست آمده است. ایستگاه‌های YAZT و ZABO نسبت به صفحه اوراسیا حرکت معنی‌داری ندارند، و این خود نشان می‌دهد که غرب افغانستان (بلوک هلمند^۲) حرکت معنی‌داری نسبت به صفحه اوراسیا ندارد. ایستگاه‌های MIAN، ARDA، SHAH و BIJA با سرعت یکسان به سمت صفحه اوراسیا حرکت می‌کنند. حال با توجه به اینکه ایستگاه‌های مذکور بر روی بلوک ایران مرکزی واقع شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که بلوک ایران مرکزی صلب است و فعالیت زلزله‌ای در آن وجود ندارد. با توجه به سرعت‌های به دست آمده در شرق ایران، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت فرورانش^۳ پلیت اقیانوسی عربی نسبت به ناحیه مکران، (سرعت ایستگاه MUSC نسبت به ایستگاه CHAB) در شرق از ۱۸ میلی‌متر بر سال تا غرب ۱۵ میلی‌متر بر سال کاسته می‌شود (سرعت ایستگاه MUSC نسبت به ایستگاه JASK [۱].

1. Cycle slip
2. Helmand block
3. Subduction

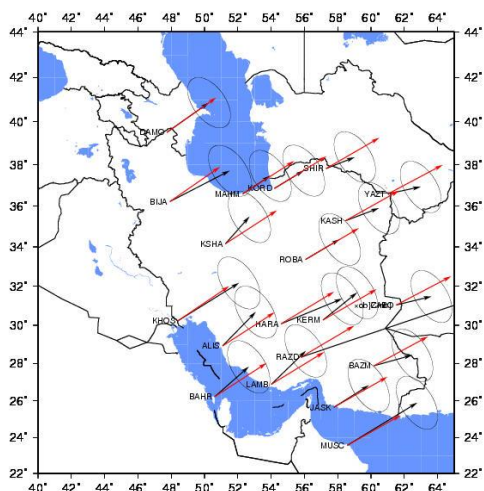
با توجه به انطباق مناسب و در خور قبول میدان‌های سرعت محاسبه شده در این مقاله، و میدان سرعتی که ماسون و همکاران [۱] از داده‌هایی مشابه پیشنهاد می‌کنند، تحلیل مشابهی از بررسی این میدان‌ها انتظار می‌رود. در ادامه، به بررسی موارد مختلف قابل استنتاج از مطالعه این میدان‌ها پرداخته می‌شود.

سرعت مشاهده شده در ایستگاه‌های GPS، از جنوب به شرق از ۴۵ درجه به ۸۵ درجه تغییر می‌کند، در حالی که مدل ژئوفیزیکی، تغییرات ناگهانی در آزیموت میدان سرعت از جنوب به شرق را نشان می‌دهد. این تفاوت به دلیل صلب در نظر گرفتن صفحات تکتونیکی در تعریف مدل ژئوفیزیکی است. به علاوه، در این مدل تأثیر حرکت صفحه افریقا در نظر گرفته نشده است [۱۴].

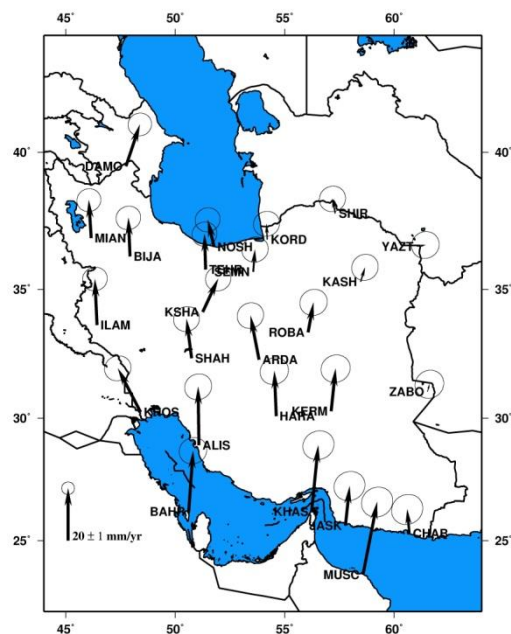
در مقایسه میدان سرعت به دست آمده از مشاهدات GPS با مدل ژئوفیزیکی در شکل (۴ و ۵)، وابستگی نزدیکی در جهت و اندازه میدان سرعت، بین ایستگاه‌هایی که بر روی صفحه عربستان قرار گرفته‌اند (MUSC, KHAS, BAHR, KHOS, ILAM) با شرقی‌ترین ایستگاه‌های شبکه (YAZT, ZABO) که بر روی صفحه اوراسیا قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود. بین این دو دسته ایستگاه‌ها تغییرات میدان سرعت در دو نگرش متفاوت است. به عبارت دیگر، آزیموت میدان

جدول ۱. میدان سرعت ایستگاه‌های ایران در فریم EURASI، خطای هر یک از مؤلفه‌های میدان سرعت در سطح اطمینان استاندارد ارائه شده است. V_H و V_N ، V_E به ترتیب مؤلفه‌های بردار سرعت در این فریم؛ σ_E ، σ_N و σ_H انحراف معیار این مؤلفه و σ_{EN} کوواریانس بین دو مؤلفه مسطحاتی بردارهای این میدان سرعت است.

St.	Lon.(°)	Lat. (°)	V_E (mm/y)	σ_E (mm/y)	V_N (mm/y)	σ_N (mm/y)	σ_{EN} (mm/y)	V_H (mm/y)	σ_H (mm/y)
ALIS	51.082	28.919	0.27	1.54	21.9	1.45	0.055	-1.45	2.41
ARDA	53.822	32.313	-1.83	1.51	15.69	1.43	0.053	18.82	2.33
ARTU	58.560	56.430	2.49	0.23	-1.74	0.23	0.016	-2.52	1.99
BAHR	50.608	26.209	4.42	1.56	23.23	1.65	-0.019	1.48	1.38
BIJA	47.930	36.232	-0.26	1.38	14.06	1.32	0.031	-3.11	2.30
CHAB	60.694	25.300	0.00	1.89	7.75	1.70	0.073	0.82	2.82
DAMO	47.744	39.513	7.73	1.38	14.28	1.3	0.045	8.77	2.21
HARA	54.608	30.079	0.18	1.56	14.92	1.47	0.062	13.22	2.62
ILAM	46.427	33.648	-0.70	1.42	17.03	1.32	0.035	-1.82	2.27
JASK	57.767	25.636	1.34	1.75	13.95	1.61	0.069	-2.80	2.85
KASH	58.464	35.293	0.88	1.58	5.38	1.49	0.055	-1.05	2.40
KERM	57.119	30.277	1.94	2.02	15.49	1.87	0.05	6.06	2.97
KHAS	56.233	26.208	2.92	2.16	24.57	1.95	0.06	-35.24	3.32
KHOS	48.409	30.246	-0.49	1.51	19.20	1.41	0.05	6.20	2.42
KORD	54.199	36.860	-1.64	1.38	5.73	1.35	0.047	-66.29	2.43
KSHA	51.255	34.150	0.32	1.45	12.37	1.38	0.047	-2.35	2.3
LAMB	54.004	26.883	2.11	1.69	23.13	1.55	0.054	0.14	3.26
MIAN	46.162	36.908	0.43	1.34	12.43	1.28	0.024	25.75	2.18
MUSC	58.569	23.564	5.97	2.12	27.18	1.99	0.059	31.16	2.81
ROBA	56.070	33.369	-2.03	1.77	9.62	1.70	0.031	16.06	2.31
SEMN	53.564	35.662	1.15	1.40	8.26	1.35	0.048	-0.39	2.42
SHAH	50.748	32.367	-1.50	1.47	13.91	1.39	0.048	-4.54	2.34
SHIR	57.308	37.814	-0.87	1.86	4.72	1.77	0.033	11.33	2.62
TEHR	51.386	35.747	-0.09	1.76	12.78	1.70	0.032	-6.93	2.32
YAZT	61.034	36.601	3.35	1.92	-0.29	1.84	0.039	-1.27	2.81
ZABO	61.517	31.049	0.87	1.95	2.06	1.89	0.052	-2.09	2.59



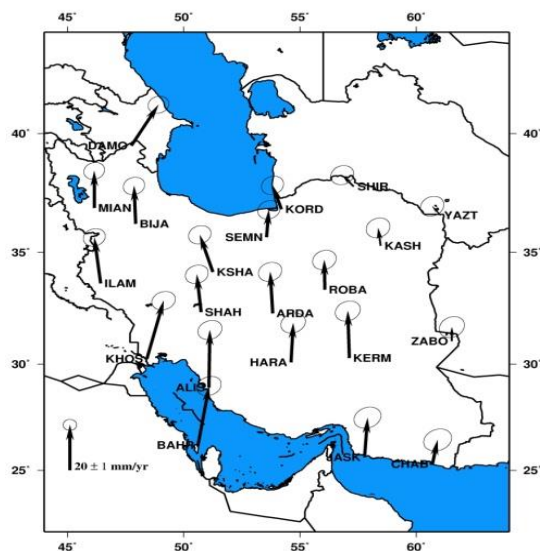
شکل ۶. مقایسه میدان سرعت حاصل از پردازش مشاهدات GPS شبکه ایران سراسری در بازه ۱۹۹۹-۲۰۰۵ با میدان سرعت حاصل از مدل ژئوفیزیکی NUVEL-1A (بردارهای قرمز رنگ) در فریم ITRF2000 بیضی‌های خطا در سطح اطمینان ۹۵ درصد ترسیم شده‌اند.



شکل ۴. میدان سرعت شبکه ایران بین سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۰۱ در فریم اوراسیا. بیضی‌های خطای موقعیت نقاط در سطح اطمینان ۹۵ درصد ترسیم شده‌اند.

۵- آنالیز تحلیلی تغییر شکل ارتفاعی در سطح فلات ایران

آگاهی از روند تغییر شکل ارتفاعی در ایران می‌تواند به درک و تحلیل نتایج حاصل از آنالیز دو بعدی تغییر شکل در کشور کمک کند. علاوه بر این، همان‌گونه که در مقدمه این مقاله اشاره شد، دستیابی به الگوی تغییر شکل ارتفاعی مناسب و پذیرفتنی برای کشور نخستین گام برای ارزیابی پتانسیل شبکه ترازیبی کشور (مشمول بر ۸۰۰۰۰ کیلومتر مسیر ترازیبی که ۳۰۵۰۰ کیلومتر آن ترازیبی درجه یک است) برای آشکارسازی روند تغییر شکل‌های پوسته زمین به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در پیش‌آگهی از عواقب جانبی و مالی ناشی از این تغییرات به‌شمار می‌آید. توجه به واقعیت‌هایی چون مدت زمان طولانی لازم برای انجام یا تکرار مشاهدات شبکه ترازیبی دقیق سراسری (دور اول ۱۷ سال و دور دوم ۹ سال) از یک سو، و هزینه بالای تکرار مشاهدات این شبکه از سوی دیگر، اهمیت اطمینان از توان و پتانسیل کافی این شبکه را برای



شکل ۵. میدان سرعت شبکه ایران بین سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۵ در فریم اوراسیا. بیضی‌های خطای موقعیت نقاط در سطح اطمینان ۹۵ درصد ترسیم شده‌اند.

$$H = \frac{1}{2} L_{\alpha\beta} f^{\alpha\beta}, \alpha, \beta \in \{1, 2\} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

همچنین می‌توان نشان داد که تغییرات این معیار انحنای از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\delta H = \left(\bar{f}_{\alpha\beta} \bar{L}_{\alpha\beta} - f_{\alpha\beta} L_{\alpha\beta} \right) / 2 = f_{\alpha\beta} \delta L_{\alpha\beta} + \bar{L}_{\alpha\beta} \delta f_{\alpha\beta} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

که در آن

$$\delta f_{\alpha\beta} = \bar{f}_{\alpha\beta} - f_{\alpha\beta} = x_{i,\alpha} z_{i,\beta} + x_{i,\beta} z_{i,\alpha} + \dots = \varepsilon_{\alpha\beta} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\delta L_{\alpha\beta} = \bar{L}_{\alpha\beta} - L_{\alpha\beta} = \varepsilon_{ijk} \left[x_{j,1} x_{k,2} z_{i,\alpha\beta} + \left(x_{j,1} z_{k,2} + x_{k,2} z_{j,1} \right) \right] / f^{1/2} + L_{\alpha\beta} \delta f / 2f \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در رابطه (۱۴) $\varepsilon_{\alpha\beta}$ تنسور تغییر شکل با سه مؤلفه $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}$ است. می‌توان نشان داد که در سیستم مختصات بیضوی با مختصات منحنی الخط $u^\alpha = (\lambda, \phi), \alpha \in \{1, 2\}$

$$f_{\alpha\beta} = \left[(R_1 + H)^2 \cos^2 \phi + (H_{,1})^2 \right] \delta_\alpha^1 \delta_\beta^1 + \left(\delta_\alpha^1 \delta_\beta^2 + \delta_\alpha^2 \delta_\beta^1 \right) H_{,1} H_{,2} + \left[(R_1 + H)^2 + (H_{,2})^2 \right] \delta_\alpha^2 \delta_\beta^2 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$x_{i,1} z_{i,1} = \left[z_{,1}^1 + \left(\Gamma_{1a}^1 + \Gamma_{3a}^1 H_{,1} \right) z^a \right] g_{11} + \left[z_{,1}^3 + \left(\Gamma_{1a}^3 + \Gamma_{3a}^3 H_{,1} \right) z^a \right] H_{,1} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$x_{i,1} z_{i,2} = \left[z_{,2}^1 + \left(\Gamma_{2a}^1 + \Gamma_{3a}^1 H_{,2} \right) z^a \right] g_{11} + \left[z_{,2}^3 + \left(\Gamma_{2a}^3 + \Gamma_{3a}^3 H_{,2} \right) z^a \right] H_{,2} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$x_{i,2} z_{i,1} = \left[z_{,1}^2 + \left(\Gamma_{1a}^2 + \Gamma_{3a}^2 H_{,1} \right) z^a \right] g_{22} + \left[z_{,1}^3 + \left(\Gamma_{1a}^3 + \Gamma_{3a}^3 H_{,1} \right) z^a \right] H_{,2} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

1. Permutation Tensor

مقاصد مطالعات ژئودینامیک روشن می‌سازد. بر این اساس، مطالعه تغییر شکل‌های ارتفاعی پوخته زمین در فلات ایران و تعیین الگوی بدین منظور، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود.

در تئوری تحلیلی آنالیز تغییر شکل، تغییر شکل سطحی پوخته زمین از طریق مطالعه تغییرات فرم‌های اساسی اول و دوم گوس صورت می‌پذیرد [۱۲]. چنانچه $x_i(u^\alpha)$ و $\bar{x}_i(u^\alpha)$ ، نمایش گوسی موقعیت نقاط P از رویه F در لحظات t و $\bar{t}$ در دو سیستم مختصات S و $\bar{S}$ باشند، واضح است که چنانچه $S \equiv \bar{S}$

$$z_i(u^\alpha) = \bar{x}_i(u^\alpha) - x_i(u^\alpha) \quad \text{رابطه (۸)}$$

جابه‌جایی نقاط P است. در این رابطه u^α مختصات منحنی الخط نقاط P در سیستم مختصات منحنی الخط اختیاری است. در این صورت، دو فرم اساسی اول و دوم گوس به ترتیب عبارت‌اند از [۱۳]:

$$f_{\alpha\beta} = x_{i,\alpha} x_{i,\beta}, \bar{f}_{\alpha\beta} = \bar{x}_{i,\alpha} \bar{x}_{i,\beta} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$L_{\alpha\beta} = \varepsilon_{ijk} x_{j,1} x_{k,2} f^{-1/2}, \bar{L}_{\alpha\beta} = \varepsilon_{ijk} \bar{x}_{j,1} \bar{x}_{k,2} \bar{f}^{-1/2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در این روابط به عنوان مثال $x_{i,\alpha} = \partial x_i / \partial u^\alpha$ ، $\bar{f}_{\alpha\beta}$ به ترتیب فرم اساسی اول در دو سیستم مختصات S و $\bar{S}$ ، $L_{\alpha\beta}$ و $\bar{L}_{\alpha\beta}$ به ترتیب فرم اساسی دوم در دو سیستم مختصات مذکور و ε_{ijk} تنسور پرموتیشن^۱ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_{ijk} = \varepsilon^{ijk} = \begin{cases} +1 & \text{if } i, j, k \text{ are cyclic} \\ -1 & \text{if } i, j, k \text{ are anticyclic} \\ 0 & \text{if } i, j, k \text{ are acyclic} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

با استفاده از دو فرم اساسی اول و دوم گوس به ترتیب انحنای متوسط رویه F از رابطه (۱۲) به دست می‌آیند:

علاوه بر این، در صورتی که داده‌های ورودی دارای پوشش مکانی مناسب نباشند، الگوی تغییر شکل ارتفاعی تعیین شده از این طریق می‌تواند از درون‌یابی میدان‌های سرعت و ارتفاع نقاط شبکه تأثیر بپذیرد.

در این تحقیق از تغییرات انحنای متوسط پوسته زمین به عنوان معیاری برای تشخیص الگوی تغییر شکل ارتفاعی سطحی پوسته در فلات ایران استفاده شده است. برای این منظور، در ابتدا شبکه‌ای منظم با پوشش مکانی ۱/۰ درجه در محدوده طول و عرض جغرافیایی ایران تولید شد. سپس ارتفاع نقاط شبکه و بردارهای سرعت مسطحاتی و ارتفاعی، و همچنین مشتقات مورد نیاز درون‌یابی شدند. از آنجا که تغییر شکل در هر نقطه از جسمی تغییرشکل‌پذیر متأثر از تغییر شکل ایجاد شده در سایر نقاط آن است، به‌طوری‌که نقاط نزدیک به نقطه مورد نظر تأثیر بیشتری بر تغییر شکل این نقطه دارند، توجه به چگونگی توزیع نقاط شبکه در این مرحله از محاسبات بس‌پُر اهمیت است. در این مقاله، ویژگی یاد شده با استفاده از کرنلی که تابعی نمایی از فاصله نقاط مختلف شبکه از نقطه مورد نظر است، در فرایند درون‌یابی پارامترهای مذکور به روش کولوکیشن^۱ [۳۰، ۳۱، ۳۲] در نظر گرفته شده است. برای جزئیات بیشتر در این زمینه ن.ک. منبع [۱۲] صفحه‌های ۴۴ تا ۴۹ در ادامه تغییر انحنای سطحی پوسته زمین محاسبه شد و از این طریق الگوی پیوسته‌ای از تغییر شکل در کشور به دست آمد. برای این منظور مجموعه برنامه‌هایی به زبان برنامه‌نویسی فرتن تهیه شد، که فایل اجرایی آنها را، همراه با راهنمایی که مراحل تهیه فایل‌های ورودی مورد نیاز در مراحل مختلف محاسباتی یاد شده، را در بر می‌گیرد، می‌توان ارائه کرد. شکل ۷ نتیجه این محاسبات را نمایش می‌دهد. در این شکل خطوط هم‌تراز معرف نقاط با تغییرات انحنای مشابه است.

1. Collocation

$$x_{i,2}z_{i,2} = \left[z_{,2}^1 + (\Gamma_{2a}^1 + \Gamma_{3a}^1 H_{,2}) z^a \right] g_{22} + \left[z_{,2}^3 + (\Gamma_{2a}^3 + \Gamma_{3a}^3 H_{,2}) z^a \right] H_{,2} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

کسه در آن به عنوان مثال $z^a, H_{,1} = \partial H / \partial u^1 = \partial H / \partial \lambda$ مؤلفه z^1, z^2 و به ترتیب مشابه مثلاً Γ_{ab}^c دلتای کرونگر، $R_1 = c/V$ مبمول کرسیتوفل، $V = (1 - e^2 + e^2)^{1/2}$ ، $c = a^2/b$ ، $R_2 = c/V^3$ ، $e^2 = (a^2 - b^2)/b^2$ نصف قطر کوچک‌تر بیضوی مورد استفاده و g_{ab} تنسور متریک در سیستم مختصات بیضوی است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g_{ab} = (R_1 + H)^2 \cos^2 \phi \delta_a^1 \delta_b^1 + (R_2 + H)^2 \delta_a^2 \delta_b^2 + \delta_a^3 \delta_b^3 \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

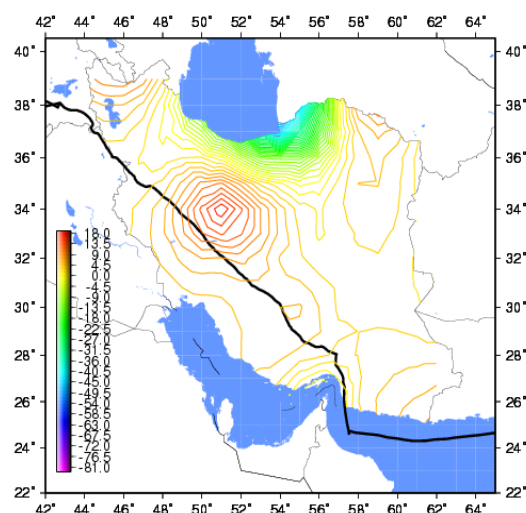
$$\Gamma_{ab}^c = g^{cd} (g_{ad,b} + g_{bd,a} - g_{ab,d}) / 2 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

برای مشتقات تنسور متریک نسبت به سه مؤلفه مختصاتی $a \in \{1, 2, 3\}$ در این روابط می‌توان به [۱۲] و یا [۱۳] مراجعه کرد.

همان‌گونه که از روابط نوشته شده می‌توان دید، در تئوری تحلیلی آنالیز تغییر شکل بررسی تغییرات فرم اساسی اول به مطالعه تغییر شکل مسطحاتی پوسته زمین و بررسی تغییرات فرم اساسی دوم از طریق یکی از معیارهای ممکن همچون تغییر انحنای متوسط سطح زمین، به اطلاعاتی در خصوص تغییر شکل ارتفاعی پوسته زمین منتهی می‌گردد.

انحنای سطحی پوسته زمین این ویژگی مهم را دارد که کمیتی ناورد است. بنابراین تغییرات آن متأثر از تغییرات احتمالی سیستم مختصات مورد استفاده نخواهد بود. این ویژگی مزیتی عمده برای این روش در مقایسه با سایر روش‌های مورد استفاده در تشخیص الگوی تغییر شکل ارتفاعی محسوب می‌شود [۲۸، ۲۹، ۲۷، ۲۵].

تغییرات مثبت انحنای به منزله بالاآمدگی^۱ و تغییرات منفی آن به منزله نشست^۲ در محدوده مورد نظر است.



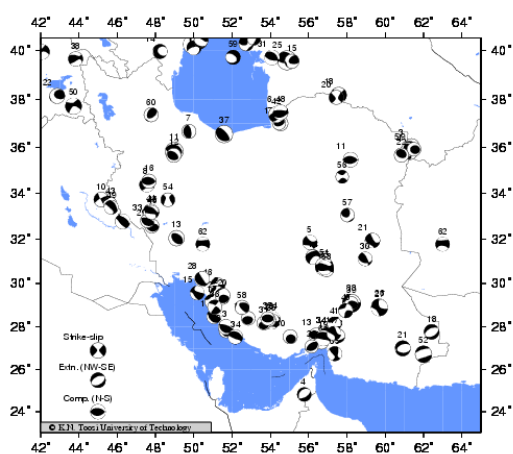
شکل ۷. الگوی تغییر شکل ارتفاعی در کشور حاصل از مشاهدات GPS شبکه موردی مرسوم به ایران سراسری. نتایج نمایش داده شده در ۱۰^۷ ضرب شده است. امتداد مرز صفحات تکتونیکی عربی و اوراسیا با خط مشکی رنگ توپر نمایش داده شده است.

۶- نتیجه گیری

به دلیل تراکم نامناسب ایستگاه‌های شبکه ایران سراسری، الگوی تغییر شکل ارتفاعی محاسبه شده در فلات ایران به کمک نتایج داده‌های این شبکه، از درون یابی میدان سرعت مربوط به آن تأثیر پذیرفته است. با این حال جزئیات مندرج در این نتایج، انطباقی در خور قبول را با ویژگی‌های زمین‌ساختی ایران نمایش می‌دهد. به عنوان مثال، می‌توان به تمایز الگوی تغییر شکل ارتفاعی در امتداد سلسله جبال البرز و زاگرس اشاره کرد. تفاوت الگوی تغییر شکل ارتفاعی در محدوده فروانش^۳ مکران، نتیجه سازوکار متفاوت تغییر شکل فلات ایران در محدوده این منطقه به نظر می‌رسد.

بررسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌هایی که در بازه زمانی مشاهدات این شبکه رخ داده‌اند، نشان می‌دهد

که این زمین‌لرزه‌ها غالباً در حواشی شمال شرقی و شمال، و همچنین جنوب غربی و غرب ایران اتفاق افتاده‌اند. دیگر اینکه این زمین‌لرزه‌ها عمدتاً ماهیتی فشارشی دارند. این ویژگی از سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های مورد بحث که در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند، مشاهده می‌شود. انطباق توزیع مکانی این زمین‌لرزه‌ها با حوزه‌های تغییر انحنای منعکس در نتایج این تحقیق از یک طرف، و ماهیت فشارشی این زمین‌لرزه‌ها از طرف دیگر، با روند تغییر شکل پیشنهادی در نتایج این تحقیق سازگار است.



شکل ۸. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌هایی که در بازه زمانی مشاهدات این تحقیق ثبت و تعیین شده‌اند. اعداد نمایش داده شده در کنار هر سازوکار کانونی، بزرگ آن زمین‌لرزه است.

این الگوی تغییر شکل نخستین تصویر جامع از تغییر شکل ارتفاعی در سراسر فلات ایران است. در اولین نگاه، در این الگو تغییر شکل ارتفاعی در ایران متشکل از مجموعه پیچیده‌ای از تغییر شکل‌های ارتفاعی محلی پیش‌بینی می‌گردد. با این حال، شناخت دقیق محدوده هر یک از این حوزه‌ها مستلزم استفاده از شبکه‌ای با تراکم مناسب‌تر از نقاط اندازه‌گیری است.

1. Uplift
2. Settlement
3. Subduction Zone

۷- ضمیمه

جدول ۱- ض. تکرارپذیری مشاهدات سال ۱۹۹۹: ایستگاه‌های شبکه ایران با IR و ایستگاه‌های شبکه IGNS با IGS مشخص شده است.

ایستگاه	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	Pillar/Tripod
ARTU IGS 11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	P
BAHR IGS 11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	P
ZECK IGS 11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	P
AMMN IGS 11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	P
KIT3 IGS 8	x	x	x	x	x	x	x	x				P
KHAS IR 11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	T
MUSC IR 11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	P
NKS1 IR 10		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	T
SHIR IR 10	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	P
TEHR IR 5					x	x	x	x	x			P
ZABO IR 10	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	P
ALIS IR 4	x	x	x	x								P
NOSH IR 4	x	x	x	x								P
ARDA IR 4	x	x	x	x								P
BIJA IR 4	x	x	x	x								P
DAMO IR 4	x	x	x	x								P
ILAM IR 4	x	x	x	x								P
KHOS IR 4	x	x	x	x								P
KSHA IR 4	x	x	x	x								T
SHAH IR 4	x	x	x	x								T
MIAN IR 4	x	x	x	x								P
LAMB IR 4	x	x	x	x								T
YAZT IR 4								x	x	x	x	P
BAZM IR 4								x	x	x	x	T
CHAB IR 4								x	x	x	x	P
HAJI IR 4								x	x	x	x	P
HARA IR 4								x	x	x	x	T
JASK IR 4								x	x	x	x	P
KASH IR 4								x	x	x	x	P
KERM IR 4								x	x	x	x	T
ROBA IR 4								x	x	x	x	P
KORD IR 4								x	x	x	x	P
SEMN IR 4								x	x	x	x	P

جدول ۲- ض. تکرارپذیری مشاهدات سال ۲۰۰۱: ایستگاه‌های شبکه ایران با IR و

ایستگاه‌های شبکه IGSS با IGS مشخص شده است.

ایستگاه			280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291
ARTU	IGS	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AMMN	IGS	9	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
BAHR	IGS	10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
KIT3	IGS	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ZECK	IGS	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MUSC	IR	10		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
TEHN	IR	11		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ZABO	IR	11		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
KASH	IR	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AHVA	IR	11		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ALIS	IR	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ARDA	IR	12	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TEHR	IR	4		x	x	x	x							
KSHA	IR	4		x	x	x	x							
LAMB	IR	4		x	x	x	x							
MIAN	IR	4		x	x	x	x							
NOSH	IR	4		x	x	x	x							
SHAH	IR	4		x	x	x	x							
BIJA	IR	4		x	x	x	x							
ILAM	IR	4		x	x	x	x							
DAMO	IR	4		x	x	x	x							
KHOS	IR	4		x	x	x	x							
BAZM	IR	3									x	x	x	
HARA	IR	4									x	x	x	x
JASK	IR	4									x	x	x	x
KERM	IR	2									x	x		
KHAS	IR	4										x	x	x
KORD	IR	4									x	x	x	x
ROBA	IR	4									x	x	x	x
SEMN	IR	4									x	x	x	x
SHIR	IR	4									x	x	x	x
YAZT	IR	4									x	x	x	x
HAJI	IR	2											x	x



جدول ۳- ض. تکرارپذیری مشاهدات سال ۲۰۰۵: ایستگاه‌های شبکه ایران با IR و

ایستگاه‌های شبکه IGNSS با IGS مشخص شده است.

ایستگاه	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273
ARTU IGS 13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DRAG IGS 13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
BAHR IGS 13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
KIT3 IGS 13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ZECK IGS 13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
KERM IR 4	x	x	x	x									
ZABO IR 5	x	x	x	x	x								
HAJT IR 5					x	x	x	x	x				
ROBA IR 5					x	x	x	x	x				
SARB IR 4									x	x	x	x	
ARDA IR 4									x	x	x	x	
BAZM IR 3		x	x	x									
KASH IR 3		x	x	x									
ESFA IR 3		x	x	x									
ILAM IR 3		x	x	x									
MIAN IR 3		x	x	x									
KORD IR 3		x	x	x									
LAMB IR 3		x	x	x									
SEMN IR 3		x	x	x									
CHAB IR 3						x	x	x					
DAMO IR 3						x	x	x					
KSHA IR 3						x	x	x					
KHOS IR 3						x	x	x					
RAZD IR 3						x	x	x					
SHIR IR 3						x	x	x					
SHKH IR 3						x	x	x					
ZVNG IR 3						x	x	x					
ALIS IR 3										x	x	x	
HARA IR 3										x	x	x	
JASK IR 3										x	x	x	
KHSF IR 3										x	x	x	
SHAH IR 3										x	x	x	
YAZT IR 3										x	x	x	

۷- منابع

- [1] Masson F., J. C. D. Hatzfeld, J. Martinod, P. Vernant, F. Tavakoli and M. Ghafoory-Ashtiani, 2005. *Seismic Versus Aseismic Deformation in Iran Inferred from Earthquakes and Geodetic Data*. Geophys J. Int. 160, 217-226.
- [2] Lichtenegger, H. and H. Sünkel, 1989. *Mathematische-Geophysikalische Model, in Österreichische Beiträge zum Wegener-Medals-Projekt*. Mitteilungen der Geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, 65, 61-80.
- [3] 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. Int., 93(1), 45-73, doi: 10.1111/j.1365-246X.1988.tb01387.x
- [4] Frank, F.C., 1966. *Deduction of Earth Strains from Survey Data*. Bull, Seismol. Soc. Am., 56, 35-42.
- [5] Welsch, W., 1979. *A Review of the Adjustment of Free Networks*. Surv. Rev. 194(25), 167-180.
- [6] Bibby, H.M., 1982. *Unbiased Estimate of Strain from Triangulation Data Using the Method of Simultaneous Reduction*. Tectonophysics, 82, 161-174.
- [7] Chen, R., 1991. *On the Horizontal Crustal Deformations in Finland*. Helsinki, Finish Geodetic Institute.
- [8] Krumm, F. and E. Grafarend, 2002. *Datum-free Deformation Analysis of ITRF Networks*. Artificial Satellites, 37, 75-84.
- [9] Hossainali, M.M., 2006. *A Comprehensive Approach to the Analysis of the 3D-Kinematics of Deformation*. Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Ph.D. Thesis, 150 pp.
- [10] Amerian Y., 2002. *Investigating Systematic Errors in Precise Digital Leveling*. M.Sc. Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, Tehran, Iran.
- [11] Vosooghi B., 1994. *An Investigation of Systematic Errors in Precise Leveling Network of Iran*. M.Sc. Thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
- [12] Altiner, Y., 1999. *Analytical Surface Deformation Theory*. Springer, ISBN: 3-540-65820-3.
- [13] Heitz, S., 1988. *Coordinates in Geodesy*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- [14] Nilforoushan, F., F. Masson, P. Vernant, C. Vigny, J. Martinod, M. Abbassi, H. Nankali, D. Hatzfeld, R. Bayer, F. Tavakoli, A. Ashtiani, E. Doerflinger, M. Daignières, P. Collard, and J. Chéry, 2003. *GPS Network Monitors the Arabia-Eurasia Collision Deformation in Iran*. J. Geodesy, 77, 411-422.
- [15] Altamimi, Z., P. Sillard and C. Boucher, 2002. *ITRF 2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications*. J. Geophys. Res., 107 (B10), 2214, doi: 10.1029/2001 JB 000561.
- [16] Herring, T.A., R.W. King and S.C. McClusky, 2004. *GPS Analysis at MIT*. Gamit Reference Manual, Release 10.3, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [17] Beutler G., Brockmann, E., Gurtner W., Hugentobler, U., Mervart L. and Rothacher, M., 1994. *Extended Orbit Modeling Techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS)*. Theory and initial results, 19, 367-386.
- [18] McCarthy, D.D., 1992. *IERS Standards*. IERS Technical Notes, Central Bureau of IERS observatoire de Paris.
- [19] Shen, C., 2004. *A Method for Processing Data from a Regional Continuous Crustal Deformation GPS Monitoring Network*.

- M.Sc. E. Thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Technical Report No. 221.
- [20] Zhang, J., 1999. *Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays in a GPS Network*. Department of Geomatics Engineering. Alberta, Canada, Calgary, M.Sc. Thesis, 185pp.
- [21] Rothacher, M., S. Schaer et al., 1995. *Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data*. Paper presented at the 1995 IGS Workshop, Potsdam, Germany.
- [22] Jonge, P. J., 1998. *A Processing Strategy for the Application of the GPS in Networks*. Publications on Geodesy in the continuation of Publications on Geodesy New Series, Published by: NCG Nederlands Commissie voor Ceodesie Netherlands Geodetic Commission, Delft, The Netherlands, Ph.D. Thesis, 250pp.
- [23] Herring, T.A., R.W. King and S.C. McClusky, 2003. *Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program*. Globk Reference Manual, Release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [24] DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus and S. Stein, 1994. *Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions*. Geophys. Res. Lett., 21(20), 2191–2194, doi:10.1029/94GL02118.
- [25] Vaníček, P., 1976. *Vertical Crustal Movement Pattern in Maritime Canada*. Canad. J. of Earth Sci., 13(5), 661-667.
- [26] Lambert, A. and P. Vanicek, 1978. *Contemporary Crustal Movements in Canada*. Canadian Journal of Earth Sciences, 16, 647-668.
- [27] Vaníček, P. and D. Nagy, 1980. *Report on the Compilation of the Map of Vertical Crustal Movements in Canada*. Earth Physics Branch, Open File Report No. 80-2, Ottawa.
- [28] Vanicek, P., Elliott, M.R. and R. Castel, 1978. *Four Dimensional Modeling Of Recent Vertical Movements in the Area of the Southern California Uplift*. Tectonophysics, 52, 287-300.
- [29] Vaníček, P., D. Christodulides, 1974. *A Method for Evaluating Vertical Crustal Movements from Scattered Geodetic Relevellings*. Canad. J. of Earth Sci., 11(5), 605-610.
- [30] Moritz, H., 1973. *Least Squares Collocation*. Deucher Geodaetische Kommission, Munchen, ISBN: 3-7696-8162-2.
- [31] Moritz, H., 1980. *Advanced Physical Geodesy*. Abacus Press, 500 pp., ISBN-13: 978-3879071067.
- [32] Moritz H. and H. Sunkel, 1977. *Approximation Methods in Geodesy: Lectures Delivered at the 2, Internat. Summer School in the Mountains on Math. Methods in Phys. Geodesy*, Ramsau, Austria, August 23 - September 2, 1977, Wichmann Verlag, Karlsruhe.



The Vertical Pattern of Surface Deformation in Iran, Inferred from the GPS Measurement Campaigns

Mashadi Hossainali, M. ^{*1}, Heidari H.R. ²

1- Assistant Prof., Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology

2- M.Sc. in Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology

Abstract

Using the theory of analytical surface deformation analysis, the Earth's vertical surface deformation has been analyzed for Iran. Iran Global GPS campaign is used for the mentioned purpose. This network is the first regional GPS one in Iran which was designed and measured within a scientific cooperation between the National Cartographic Center of Iran and the University of Montpellier in France. The network measurements have been carried out in three successive epochs: 1999, 2001 and 2005. GAMIT/GLOBK GPS processing package has been used for processing the corresponding code and carrier phase measurements. To analyze vertical deformation in Iran, the change in the Gauss's second fundamental form and a measure for the change in curvature, mean curvature here, is used. Using the other available evidences such as focal mechanism solutions of the seismic events which have occurred during the observation period of this study has been verified.

Keywords: Deformation analysis, GPS, Analytical deformation analysis, vertical Deformation.