مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یکم، شماره اول، پاییز ۱۳۹۲
Vol.1, No.2, Autumn 2013

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

مسعود مشهدی حسینعلی*[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 مونتپلیر 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 ـ که در اینجا انحنای متوسط است ـ 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

۱- مقدمه

کشور ایران، واقع بر کمربند لرزه‌خیز آلپ ـ هیمالیا، مستعد و دستخوش انواع تغییر شکل‌های لرزه‌مرجع[1] و غیرلرزه‌مرجع[2] است [۱]. این تغییر شکل‌ها غالباً با مؤلفه‌های مسطحاتی بزرگی (در حد دقت سیستم‌های جدید اندازه‌گیری) که به‌مراتب بزرگ‌تر از مؤلفه ارتفاعیِ مربوط هستند، همراه‌اند [۲]. روش‌های ژئودتیک آنالیز تغییر شکل که غالباً رویکردی هندسی به موضوع آنالیز تغییر شکل دارند، به عنوان تنها ابزارهای موجود برای بررسی وضع حاضر تغییر شکل‌های سطحی پوسته زمین شناخته می‌شوند [۳]. بدین لحاظ توسعه این روش‌ها مدت‌ها مورد توجه متخصصان ذی‌ربط بوده است [۸، ۷، ۶، ۵، ۴].

براساس بررسی‌های به‌عمل آمده در این تحقیق، تاکنون در ایران مطالعه تغییر شکل‌های سطحی پوسته زمین به بررسی و مطالعه تغییر شکل‌های مسطحاتی محدود شده است. بنابراین مقاله حاضر نخستین تحقیق در زمینه مطالعه تغییر شکل ارتفاعی در فلات ایران به‌شمار می‌آید. کوچک‌تر بودن مؤلفه ارتفاعی تغییر شکل از مؤلفه‌های مسطحاتی مربوط، آنالیز همزمان تغییر شکل‌های مسطحاتی و ارتفاعی به روش‌های ژئوتیک را با مشکلاتی همراه می‌سازد [۹]. بدین لحاظ استفاده از ترازیابی دقیق هنوز هم بهترین ابزار برای مطالعه تغییر شکل‌های ارتفاعی پوسته زمین محسوب می‌شود. بنابراین از بُعدِ نظری، شبکه ترازیابی دقیق سراسری کشور با ۳۰۵۰۰ کیلومتر مسیر ترازیابی دقیق به لحاظ پوشش مکانی، و همچنین ماهیت مشاهدات و دقت آنها، مناسب‌ترین داده‌ها برای بررسی چگونگی تغییر شکل ارتفاعی پوسته زمین در فلات ایران به نظر می‌رسد.

با این حال، متأسفانه دلایل مختلفی مانند کامل نبودن دور جدید مشاهدات این شبکه، آلوده بودن مشاهدات دور نخست به خطاهای سیستماتیک [۱۱ و ۱۰]، 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 می‌نماید.

بدین ترتیب در این تحقیق استفاده از داده‌های GPS به عنوان تنها مشاهداتی که در وهلهٔ نخست ماهیتی سه‌بعدی دارند و بنابراین مطالعه تغییر شکل ارتفاعی را ممکن می‌سازند و دوم، به عنوان تنها مشاهدات اخیر موجود که بررسی چگونگی وضعیت حاضر تغییر شکل ارتفاعی در کشور را امکان‌پذیر می‌سازند، مورد توجه قرار گرفت. برای این منظور، داده‌های شبکه GPS موردی ایران سراسری از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد و پس از پردازش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این داده‌ها و جزئیات مربوط به پردازش آنها با نرم‌افزار 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 شکل‌های ارتفاعی را می‌توان از طریق مطالعه تغییرات فرم اساسی دوم گوس و یکی از معیارهای محاسبه انحنای سطح پوسته زمین مطالعه و تحلیل کرد [۱۳، ۱۲]. 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 می‌گردد و با سایر شواهد موجود ارزیابی و مقایسه می‌شود.

۲- شبکه مورد مطالعه

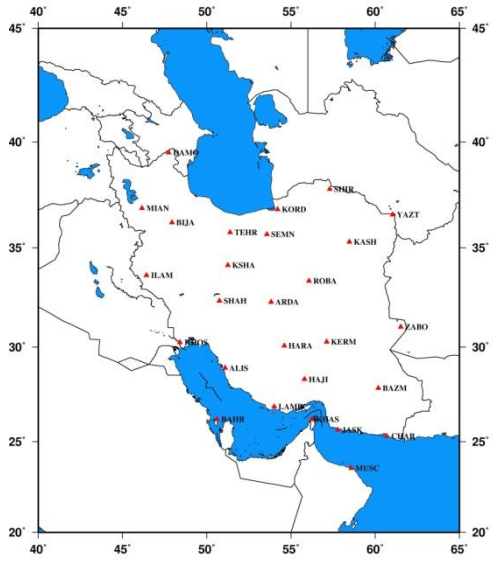
شبکه موردی ایران سراسری، نخستین شبکه سراسری ژئودزی ماهواره‌ای کشور است که در سال‌های ۱۹۹۹ و

1. Seismic Deformation
2. Aseismic Deformation

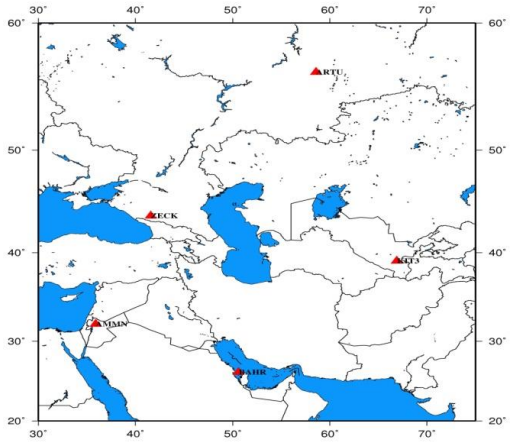
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ میلادی اندازه‌گیری شد [۱، ۱۴]. این شبکه متشکل از ۲۸ ایستگاه موردی GPS است که سراسر کشور را پوشش می‌دهد. شکل ۱ توزیع مکانی نقاط این شبکه را نشان می‌دهد. مشاهدات این شبکه در روزهای ۲۶۴-۲۵۹ از سال ۱۹۹۹ و ۲۹۱-۲۸۰ از سال ۲۰۰۱ و ۲۷۳-۲۶۴ از سال ۲۰۰۵ به‌وسیلهٔ سازمان نقشه‌برداری انجام شده است.

به منظور اتصال این شبکه به شبکه IGNSS[1]، مشاهدات ۵ ایستگاه از این شبکه که توزیع هندسی نسبتاً منظمی دارند (تقریباً به زوایا و فواصل مساوی از مرکز ایران)، از طریق سرویس SOPAC[2] 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.



شکل ۲. ایستگاه‌های GNSS مورد استفاده در پردازش داده‌های این تحقیق. محل ایستگاه‌های مورد استفاده از این شبکه با مثلث نشان داده شده، و نام اختصاری هر ایستگاه در کنار محل هر ایستگاه به نمایش درآمده است.

۲-۱- مشاهدات شبکه ایران سراسری.

۲-۱-۱- مشاهدات سال ۱۹۹۹

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 به‌کارگیریِ آنتن‌های ASH701945B-M انجام شده است. جدول «۱-ض» تکرارپذیری مشاهدات این مرحله را برای هر یک از ایستگاه‌های شبکه موردی ایران ـ 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

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[1] در ایستگاه‌های شبکه بر روی ۱۵ درجه تنظیم شد. استقرار گیرنده‌های GPS به دو صورت سانتراژ خودکار[2] و سانتراژ به‌وسیله سه‌پایه[3] با شاغول 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- 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 ASHTECH UZ-12 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 KHAS، BAZM و HAJI ، KERM 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 ایستگاه‌های شبکه موردی ایران سراسری نمایش می‌دهد [۱۴].

۲-۱-۳- 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[4] 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.

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

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 به‌دست 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 پرسشن 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 ـ 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)

$$ATMDEL(\varepsilon) = T^z_{dry} \times m(\varepsilon) + T^z_{wet} \times m(\varepsilon)$$

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

رابطه (۲)

$$T^z_{dry} = 10^{-6} KRP/g_m$$

رابطه (۳)

$$T^z_{wet} = 0/002277(1255/T + 0/05)e$$

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 رديابی می‌شود. $m(\varepsilon)$ تابع نگاشتی است که تأخیر اتمسفری را از مقادیر این تأخیر در زنیت برای امتداد ماهواره مورد نظر به دست می‌دهد. در پردازش این داده‌ها از تابع نگاشت نیل استفاده شده است [۱۹]:

رابطه (۴)

$$m(\varepsilon) = \frac{1 + \dfrac{a}{1 + \dfrac{b}{1+c}}}{\sin(\varepsilon) + \dfrac{a}{\sin(\varepsilon) + \dfrac{b}{\sin(\varepsilon)+c}}}$$

در رابطه درج شده، ضرایب a و b و c ضرایب تجربی هستند که برای دو بخش خشک شکست تروپوسفریک و بخشِ ترِ 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 به‌دست می‌آیند. مقدار شکست تروپوسفری به‌دست آمده از این رابطه، مقدار اولیه برای محاسبه مقدار متوسط خطای تروپوسفری در طول یک جلسه[1] 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 ـ مارکو مرتبه اول[2] است.

1. session
2. First order Gauss Markov process

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

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

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

در آن، τ زمان وابستگی[1] و $w(t)$ خطای سفید[2] است.

جواب این معادله دیفرانسیل بدین صورت است [۲۰]:

رابطه (۶)

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

$$m = \exp(\frac{\Delta t}{\tau}) \qquad \text{رابطه (۷)}$$

همچنین گرادیان شکست تروپوسفری جمعاً به تعداد ۶ پارامتر (۳ پارامتر شمالی ـ جنوبی و ۳ تا شرقی ـ 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 به‌عنوان 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[3] پارامترهای ژئودتیک و اتمسفری و پارامترهای دوران زمین با تحمیل قیود شل[4] بر پارامترها، تخمین زده می‌شوند. در این مرحله از ۵ ایستگاه IGNSS شکل ۲ به‌منظور 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 به‌منظور تعریف فریم مرجع، نتایج حاصل از پردازش‌های روزانهٔ زیرشبکه‌های EURA، IGS3، IGS2، IGS1 از شبکه IGNSS با نتایج حاصل از پردازش روزانه ترکیب می‌شود [۲۳].

در مرحله سوم به‌منظور 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، وزن‌دهی به مشاهدات بر اساس زاویه ارتفاعی ماهواره‌ها صورت پذیرفته است و پیش‌فرض 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

صحت و درستی حل ابهام در فاز با مقایسه بین کمیت فاکتور واریانس در دو حالتی که اعداد ابهام در فاز اعشاری هستند (bias-free) و حالتی که اعداد ابهام در فاز صحیح‌اند (bias-fixed)، ارزیابی می‌شود. در صورت حل صحیح ابهام فاز، کمیت فاکتور واریانس باید تغییرات بس ناچیزی داشته باشد [۹].

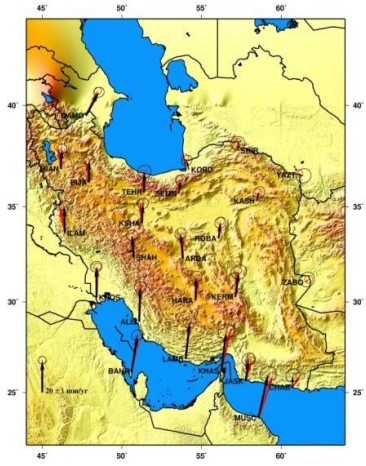
برای بررسی کیفیت نتایج حاصل از پردازش‌های روزانه، کمیت ریشه فاکتور واریانس و تصحیحات وارد شده به مختصات ایستگاه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ریشه فاکتور واریانس باید مقداری تقریباً برابر با ۰/۲۵ داشته باشد. همچنین مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ در این کمیت نشان‌دهنده جهش فاز[1] حل‌نشده در مشاهدات فاز موج حامل است. علاوه بر این، مقدار تصحیح وارد شده به مختصات ایستگاه هم باید کمتر از ۱۰ متر باشد [۱۶].

در پردازش نهایی (استفاده از نرم‌افزار GLOBK) آن دسته از نتایج روزانه‌ای به کار رفته‌اند که ابهام فاز مربوط به آنها حل شده است [۲۳].

۴- نتایج و مقایسه آنها

میدان سرعت محاسبه شده از داده‌های سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵ در فریم اوراسیا محاسبه گردیده و در جدول ۱ ارائه شده است. برای بررسی صحت نتایج به دست آمده، اینها با نتایج ماسون و همکاران [۱]، در شکل ۳ مقایسه شده است. علاوه بر این، میدان‌های سرعت محاسبه شده برای بازه زمانی به نمایش درآمده است. این میدان با میدان سرعت حاصل از مدل ژئوفیزیکی NUVEL-1A در شکل ۶ در فریم ITRF2000 مقایسه شده است [۲۴].

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.



شکل ۳. میدان سرعت ایستگاه GPS شبکه ایران سراسری در فریم اوراسیا، بردارها نتایج [۱] هستند. بیضی‌های خطا در سطح اطمینان ۹۵ درصد ترسیم شده‌اند.

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[2]) 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 به‌دست آمده در شرق ایران، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت فرورانش[3] 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

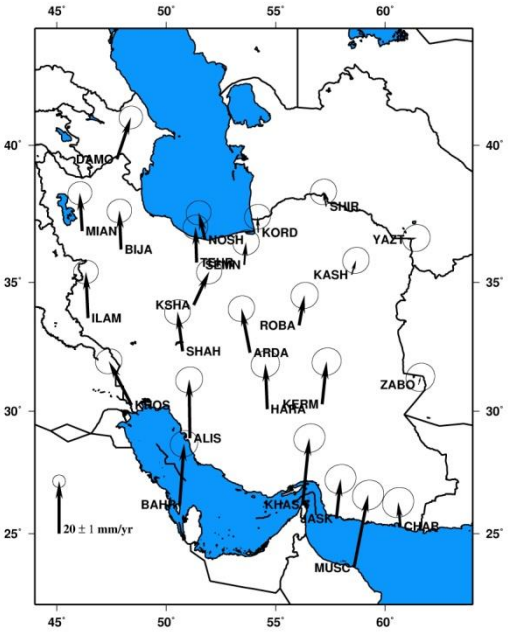
در مقایسه میدان سرعت به‌دست آمده از مشاهدات GPS با مدل ژئوفیزیکی در شکل (۴ و ۵)، وابستگی نزدیکی در جهت و اندازه میدان سرعت، بین ایستگاه‌هایی که بر روی صفحه عربستان قرار گرفته‌اند (MUSC, KHAS, BAHR, KHOS, ILAM) با شرقی‌ترین ایستگاه‌های شبکه (ZABO، YAZT) که بر روی صفحه اوراسیا قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود.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

جدول ۱. میدان سرعت ایستگاه‌های ایران در فریم EURASI، خطای هر یک از مؤلفه‌های میدان سرعت در سطح اطمینان استاندارد ارائه شده است. V_E، V_N و V_H 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.

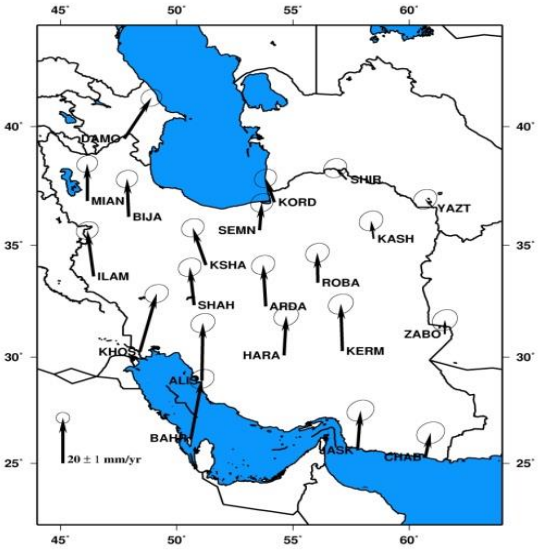
St.	Lon.(°)	Lat. (°)	V_E (mm/y)	σ_E (mm/y)	V_N (mm/y)	σ_N (mm/y)	σ_{EN} (mm/y)	V_H (mm/y)	σ_H (mm/y)
ALIS	51.082	28.919	0.27	1.54	21.9	1.45	0.055	−1.45	2.41
ARDA	53.822	32.313	−1.83	1.51	15.69	1.43	0.053	18.82	2.33
ARTU	58.560	56.430	2.49	0.23	−1.74	0.23	0.016	−2.52	1.99
BAHR	50.608	26.209	4.42	1.56	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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

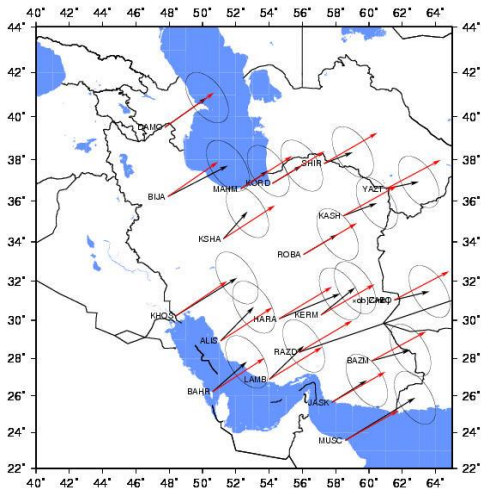
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]



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



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



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 قرمزرنگ) در فریم ITRF2000 بیضی‌های خطا 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 ترازیابی کشور (مشتمل بر ۸۰۰۰۰ کیلومتر مسیر ترازیابی که ۳۰۵۰۰ کیلومتر آن ترازیابی 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 ترازیابی 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

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

در تئوری تحلیلی آنالیز تغییر شکل، تغییر شکل سطحی پوسته زمین از طریق مطالعه تغییرات فرم‌های اساسی اول و دوم گوس صورت می‌پذیرد [۱۲]. چنانچه $x_{i.}(u^{\alpha})$ و $\bar{x}_{i.}(u^{\alpha})$، $\alpha \in \{1,2\}$، 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 $S \equiv \bar{S}$:

$$z_{i.}(u^{\alpha}) = \bar{x}_{i.}(u^{\alpha}) - x_{i.}(u^{\alpha}) \qquad \text{رابطه (۸)}$$

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

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

رابطه (۱۰)

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

در این روابط به عنوان مثال $x_{i,\alpha} = \partial x_i / \partial u^{\alpha}$، $f_{\alpha\beta}$ و $\bar{f}_{\alpha\beta}$ 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[1] است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۱۱)

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

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

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

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

رابطه (۱۳)

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

که در آن

رابطه (۱۴)

$$\delta f_{\alpha\beta} = \bar{f}_{\alpha\beta} - f_{\alpha\beta} = x_{i,\alpha}z_{i,\beta} + x_{i,\beta}z_{i,\alpha} + \ldots = \varepsilon_{\alpha\beta}$$

رابطه (۱۵)

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

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

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

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

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

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

1. Permutation Tensor

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

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

که در آن به عنوان مثال $H_{,1}=\partial H/\partial u^1=\partial H/\partial\lambda$، z^a بردار جابه‌جایی با سه مؤلفه z^1، z^2 و z^3 و به ترتیب مشابه مثلاً $z^3_{,2}=\partial z^3/\partial u^2=\partial z^3/\partial\phi$، δ^γ_α دلتای کرونکر، Γ^c_{ab} سمبول کریستوفل، $R_1=c/V$، $c=a^2/b$، $R_2=c/V^3$، $V=\left(1-e^2\sin^2\phi\right)^{1/2}$، $e'^2=\left(a^2-b^2\right)/b^2$، a نصف قطر بزرگ‌تر و b نصف قطر کوچک‌تر بیضوی مرجع مورد استفاده و g_{ab} تنسور متریک در سیستم مختصات بیضوی است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

رابطه (۲۱)
$$g_{ab}=\left(R_1+H\right)^2\cos^2\phi\,\delta^1_a\delta^1_b+\left(R_2+H\right)^2\delta^2_a\delta^2_b+\delta^3_a\delta^3_b$$

رابطه (۲۲)
$$\Gamma^c_{ab}=g^{cd}\left(g_{ad,b}+g_{bd,a}-g_{ab,d}\right)/2$$

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 ناورداست. 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 [۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲۶، ۲۵].

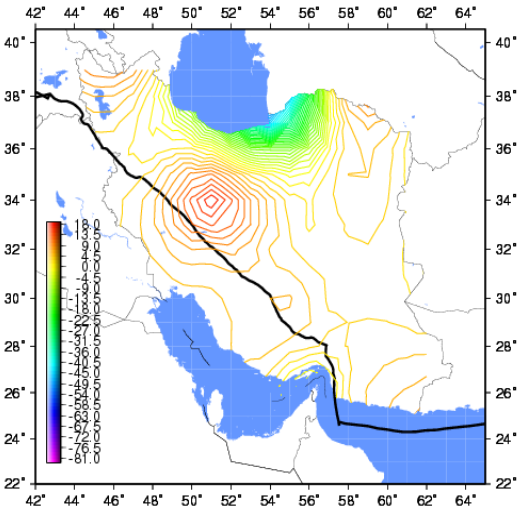
علاوه بر این، در صورتی‌که داده‌های ورودی دارای پوشش مکانی مناسب نباشند، الگوی تغییر شکل ارتفاعی تعیین شده از این طریق می‌تواند از درون‌یابی میدان‌های سرعت و ارتفاع نقاط شبکه تأثیر بپذیرد.

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 ۰/۱ درجه در محدودهٔ 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 بس پُر 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[1] [۳۲، ۳۱، ۳۰] 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 فرترن تهیه شد، که فایل اجرایی آنها را، همراه با راهنمایی که مراحل تهیهٔ 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

تغییرات مثبت انحنا بـه منزلـه بالاآمـدگی[1] و تغییـرات منفی آن به منزله نشست[2] در محدودهٔ مورد نظر است.

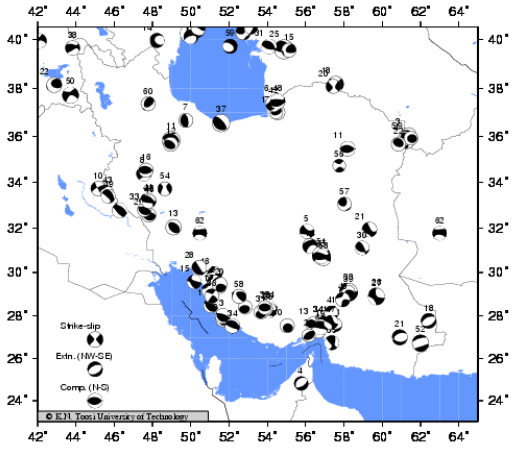


شکل ۷. الگوی تغییر شکل ارتفاعی در کشور حاصل از مشاهدات GPS شبکه موردی مرسوم به ایران سراسری. نتایج نمایش داده شده در 10^{7} ضرب شده است. امتداد مرز صفحات تکتونیکی عربی و اوراسیا با خط مشکی‌رنگ توپر نمایش داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

به دلیـل تـراکم نامناسـب ایسـتگاه‌هـای شـبکه ایـران سراسری، الگوی تغییر شکل ارتفاعی محاسـبه شـده در فلات ایـران بـه کمـک نتـایج داده‌هـای ایـن شـبکه، از درون‌یابی میدان سرعت مربـوط بـه آن تـأثیر پذیرفتـه است. با این حال جزئیات مندرج در این نتایج، انطبـاقی در خور قبـول را بـا ویژگـی‌هـای زمـین‌سـاختی ایـران نمایش می‌دهد. به عنوان مثال، می‌توان به تمایز الگـوی تغییر شکل ارتفـاعی در امتـداد سلسـله جبـال البـرز و زاگرس اشاره کرد. تفاوت الگوی تغییر شکل ارتفاعی در محدوده فرورانش[3] مکران، نتیجه سازوکار متفاوت تغییر شـکل فـلات ایـران در محـدوده ایـن منطقـه بـه نظـر می‌رسد.

بررسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌هـایی کـه در بـازه زمانی مشاهدات این شبکه رخ داده‌اند، نشـان مـی‌دهـد که این زمین‌لرزه‌هـا غالبـاً در حواشـی شـمال شـرقی و شمال، و همچنین جنـوب غربـی و غـرب ایـران اتفـاق افتاده‌اند. دیگر اینکه این زمین‌لـرزه‌هـا عمـدتاً مـاهیتی فشارشـی دارنـد. ایـن ویژگـی از سـازوکارهای کـانونی زمین‌لرزه‌های مورد بحث کـه در شـکل ۸ نمـایش داده شده‌اند، مشاهده مـی‌شـود. انطبـاق توزیـع مکـانی ایـن زمین‌لرزه‌ها با حوزه‌های تغییر انحنای منعکس در نتایج ایـن تحقیـق از یـک طـرف، و ماهیـت فشارشـی ایـن زمـین‌لـرزه‌هـا از طـرف دیگـر، بـا رونـد تغییـر شـکل 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 شـکل نخسـتین تصـویر جـامع از تغییر شکل ارتفاعی در سراسـر فـلات ایـران اسـت. در اولین نگاه، در این الگو تغییـر شـکل ارتفـاعی در ایـران متشـکل از مجموعـه پیچیـده‌ای از تغییـر شـکل‌هـای 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

۷- ضمیمه

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

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

جدول ۲- ض. تکرارپذیری مشاهدات سال ۲۰۰۱: ایستگاه‌های شبکه ایران با IR و ایستگاه‌های شبکهIGNSS با IGS مشخص شده است.

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

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	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
DRAG	IGS	13	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
BAHR	IGS	13	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
KIT3	IGS	13	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ZECK	IGS	13	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
KERM	IR	4	×	×	×	×									
ZABO	IR	5	×	×	×	×	×								
HAJT	IR	5					×	×	×	×	×				
ROBA	IR	5					×	×	×	×	×				
SARB	IR	4									×	×	×	×	
ARDA	IR	4									×	×	×	×	
BAZM	IR	3		×	×	×									
KASH	IR	3		×	×	×									
ESFA	IR	3		×	×	×									
ILAM	IR	3		×	×	×									
MIAN	IR	3		×	×	×									
KORD	IR	3		×	×	×									
LAMB	IR	3		×	×	×									
SEMN	IR	3		×	×	×									
CHAB	IR	3						×	×	×					
DAMO	IR	3						×	×	×					
KSHA	IR	3						×	×	×					
KHOS	IR	3						×	×	×					
RAZD	IR	3						×	×	×					
SHIR	IR	3						×	×	×					
SHKH	IR	3						×	×	×					
ZVNG	IR	3						×	×	×					
ALIS	IR	3										×	×	×	
HARA	IR	3										×	×	×	
JASK	IR	3										×	×	×	
KHSF	IR	3										×	×	×	
SHAH	IR	3										×	×	×	
YAZT	IR	3										×	×	×	

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

۷- منابع

[1] Masson F., J. C. D. Hatzfeld, J. Martinod, P. Vernant, F. Tavakoli and M. Ghafory-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 Beträge 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 Massachussetts 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*.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

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 Massachussetts 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.1, No.1, Autumn 2013
47-64

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.

Correspondence Address: Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Techcnology, No. 1346, Vali-asr Ave., Mirdamad Cross, Tehran, Iran. Tel: +98 21 88888445
Email: Hossainali@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.29252/jgit.1.1.47]