

حرکات غیرعادی پوسته در جنوب شرق ایران

سیدامین قاسمی خالخالی^۱، علیرضا آزموه اردلان^۲ و روح اله کریمی^۳

^۱ مربی، گروه مهندسی نقشه برداری، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران و دانشجوی دکتری دانشکده

مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

eng.ghasemi@alumni.ut.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

ardalan@ut.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه ژئودزی و مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران،

karimi@tafreshu.ac.ir

چکیده

روند عمومی غیرخطی، فرونشست زیاد و غیرطبیعی و تغییرشکل‌های ناشی از وقوع زلزله‌های بزرگ سه رفتار غیرعادی بوده که می‌تواند در حرکت پوسته زمین دیده شود. پژوهش حاضر به بررسی این رفتارها در منطقه جنوب شرق ایران با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی مختصات روزانه ۱۲ ایستگاه شبکه IPGN پرداخته است. بر اساس نتایج این مطالعه، چهار ایستگاه DBST، FDNG، FHRJ و GLMT در مولفه‌های مسطحاتی خود دارای روندهای غیرخطی از نوع توابع چندجمله‌ای بوده که بیانگر وجود حرکت مسطحاتی شتاب‌دار در این ایستگاه‌ها است. همچنین در دو ایستگاه FDNG و FHRJ فرونشست‌های بسیار بزرگ (حدود ۶۰ میلیمتر در سال) مشاهده شد. هیچ‌یک از ۱۲ ایستگاه یادشده تحت تاثیر زلزله واقع نشده و تغییرشکل پس‌لرزه‌ای در آنها وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: حرکات پوسته، فرونشست، روند عمومی، آنالیز سری‌های زمانی، پرش، تغییرشکل پس‌لرزه‌ای

On the anomalous crustal motions in southeastern Iran

Seyed Amin Ghasemi Khalkhali¹, Alireza A. Ardalan², Roohollah Karimi³

¹ Instructor. Department of Surveying Engineering. Takestan Branch. Islamic Azad University. Takestan. Iran and Ph.D. student of School of Surveying and Geospatial Engineering. College of Engineering. University of Tehran. Tehran 11155-4563. Iran

² Professor. School of Surveying and Geospatial Engineering. College of Engineering. University of Tehran. Tehran 11155-4563. Iran

³ Associate Professor. Department of Geodesy and Surveying Engineering. Tafresh University. Tafresh 39518-79611. Iran

Abstract

The non-linear trend, anomalous subsidence, and earthquake-caused sudden large movements are the three abnormal movements that can be observed in the earth's crust. This study investigates mentioned behaviors in the southeastern region of Iran using time series analysis of daily coordinates of 12 IPGN stations. According to the obtained results, four stations namely DBST, FDNG, FHRJ and GLMT have non-linear trends in their horizontal components which indicate the existence of accelerated motion in these stations. Enormous subsidence (about 60 mm/year) is also observed in FDNG and FHRJ stations. None of the 12 stations were found to be affected during the study time span by the earthquake and no post-seismic deformation is observed.

Keywords: Crustal Motion, Subsidence, Trend, Time Series Analysis, Jump, Post-seismic Deformation

۱ مقدمه

بررسی حرکات و تغییرشکل پوسته زمین می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های مختلف مشاهداتی از جمله ایستگاه‌های دائمی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) در قالب سری‌های زمانی انجام شود. این سری‌های زمانی امکان برآورد جایجایی ایستگاه‌ها با دقت بالا را فراهم ساخته و در مطالعاتی مانند بالآمدگی و فرونشست پوسته (بوگاس و همکاران، ۲۰۱۹)، حرکت صفحات تکتونیکی (گراهام و همکاران، ۲۰۱۸) و اثر زلزله‌های بزرگ بر پوسته (کلوز و همکاران، ۲۰۱۹)

به‌عنوان داده‌های مبنایی تلقی می‌شوند. چندین دهه مشاهدات پیوسته سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) نشان می‌دهد که سری‌های زمانی مختصات ایستگاه‌ها دارای تغییرات خطی و غیرخطی است. می‌توان حرکت یک ایستگاه دائمی GNSS را شامل روند عمومی و تغییرات متناوب حاصل از سیگنال‌های پرلودیک در نظر گرفت (امیری سیمکویی و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر موارد فوق، پرش‌های دستگاهی ناشی از تغییر تجهیزات و پرش‌های لرزه‌ای ناشی از وقوع زلزله‌های بزرگ نیز به این حرکت اضافه می‌شوند (امیری سیمکویی و همکاران، ۲۰۱۹). پرش‌های لرزه‌ای باعث ایجاد یک چرخه لرزه‌ای در سه بخش هم‌لرزه، پس‌لرزه‌ای و بین‌لرزه‌ای تقسیم شده که در این حالات یک تغییرشکل پس‌لرزه‌ای (post-seismic deformation) در مدل حرکت ایستگاه به‌وجود می‌آید. در حالت عادی، روند عمومی حرکت یک ایستگاه دائمی از نوع خطی با سرعت ثابت بوده (کلوز و همکاران، ۲۰۱۸) و در مولفه قائم، مقدار این سرعت نسبتاً کم و در محدوده ۵- الی ۵+ میلیمتر در سال قرار دارد (استانسیاکس و همکاران، ۲۰۱۲).

این پژوهش به بررسی حرکات غیرعادی پوسته زمین در منطقه جنوب شرق ایران با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های دائمی GPS می‌پردازد. این حرکات به سه بخش روندهای عمومی غیرخطی (حرکات شتاب‌دار)، بال‌آمدگی یا فرونشست غیرعادی پوسته و چرخه لرزه‌ای ناشی از وقوع زلزله تقسیم‌بندی شده است. برای این منظور از سری‌های زمانی مختصات روزانه ۱۲ ایستگاه شبکه ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک و GNSS ایران (IPGN) واقع در محدوده جنوب شرق کشور از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا ابتدای سال ۲۰۱۷ استفاده شد. این ۱۲ ایستگاه، شبکه محلی هرزگان تشکیل داده و هر یک از آنها دارای سه سری زمانی مختصات روزانه در مولفه‌های شرقی (E)، شمالی (N) و قائم (U) هستند. تعیین حرکات غیرعادی پوسته در منطقه یادشده با انجام یک آنالیز جامع سری‌های زمانی بر روی داده‌های مذکور در دو بخش آنالیز مدل تابعی و آنالیز مدل تصادفی یا همان آنالیز نويز امکان صورت گرفت.

۲ روش تحقیق

مدل حرکت یک ایستگاه دائمی برای هر مولفه مختصاتی مانند y را بر حسب زمان t می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$y(t) = y_0 + v_y t + \text{nonlinear trend} + \sum_{j=1}^{n_j} g_j H(t - t_{g_j}) + \sum_{p=1}^{n_p} [S_p \sin(\omega_p t) + C_p \cos(\omega_p t)] + \text{post-seismic deformation} + r(t) \quad (1)$$

که در آن y_0 مقدار اولیه، v_y سرعت ثابت ایستگاه، H تابع پله‌ای هوی‌ساید، g دامنه پرش، t_g اپوک وقوع پرش، S و C بترتیب ضرایب جملات سینوسی و کسینوسی سیگنال پرلودیک، ω فرکانس زاویه‌ای و r باقیمانده یا همان نويز مدل است. قبل از آنالیز سری‌های زمانی، پرش‌های موجود در سری‌های زمانی با استفاده از روش‌های میانگین‌گیری بر روی تمامی اپوک‌های مشاهداتی شناسایی شده (قاسمی و همکاران، ۲۰۲۱) و سپس پارامترهای مدل حرکت ایستگاه به روش کمترین مربعات وزن‌دار (WLS) برآورد شدند. با تلفیق داده‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری و اپوک‌های وقوع پرش در سری‌های زمانی پرش‌های لرزه‌ای و دستگاهی از یکدیگر تفکیک و مدلسازی تغییرشکل پس‌لرزه‌ای در مورد پرش‌های لرزه‌ای انجام شد. برای بررسی روند عمومی غیرخطی در ایستگاه‌ها از سه تابع شامل تابع چندجمله‌ای غیرخطی، تابع نمایی و تابع لگاریتمی و نیز ترکیبات مختلف آنها استفاده و تابع بهینه انتخاب شد. در آنالیز مدل تصادفی، ابتدا همبستگی مکانی بین داده‌ها با استفاده از روش پشته‌سازی وزن‌دار (ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۸) بدست آمد و پارامتر خطای حالت مشترک (CME) از بردار باقیمانده‌ها محاسبه و اثر آن از روی داده‌ها حذف شد. سپس همبستگی زمانی به روش برآورد بیشترین درست‌نمایی (MLE) و ترکیب نويز سفید و نويز فلیکر به‌عنوان مدل نويز بهینه (بیرهانو و همکاران، ۲۰۱۸) مورد ارزیابی قرار گرفت.

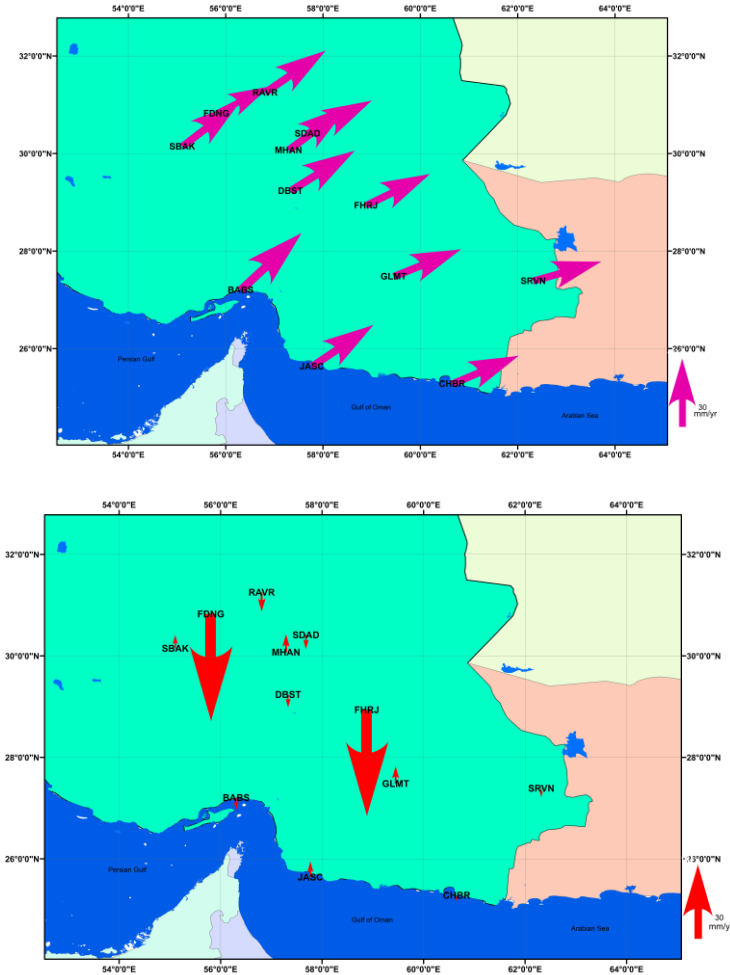
۳ نتیجه گیری

با انجام آنالیز مدل‌های تابعی و تصادفی سری‌های زمانی، پارامترهای مدل حرکت ایستگاه‌های شبکه محلی هرمزگان همراه با عدم قطعیت آنها محاسبه شد. در بازه مشاهداتی ۱۱ ساله این پژوهش، در هر ایستگاه بطور متوسط ۵/۵ پرش شناسایی گردید که تمامی آنها از نوع پرش‌های دستگاهی هستند. چراکه در زمان وقوع این پرش‌ها هیچ زلزله‌ای در اطراف ایستگاه‌ها رخ نداده و بنابراین تغییر شکل پس‌لرزه‌ای در این شبکه محلی وجود ندارد. در گام بعد امکان وجود روند عمومی غیرخطی در همه ایستگاه‌ها و هر سه مولفه مختصاتی بررسی شد که ایستگاه‌های FDNG و FHRJ در مولفه شرقی و ایستگاه‌های DBST، FHRJ و GLMT در مولفه شمالی دارای حرکات شتاب‌دار از نوع توابع چندجمله‌ای با درجات دو یا سه شناسایی شدند. همچنین مشخص گردید که برآزش این مدل‌های خطی بر مشاهدات باعث کاهش نرم بردار باقیمانده‌ها (σ) به میزان ۱۵ الی ۲۹ درصد در مقایسه با روند عمومی خطی می‌شود. برخلاف سرعت‌های مسطحاتی، سرعت قائم در تمامی ایستگاه‌ها یک روند عمومی خطی داشته و حرکت شتاب‌داری در این مولفه دیده نمی‌شود. جدول ۱ سرعت‌های قابل اطمینان (۷) ایستگاه‌های شبکه محلی هرمزگان را به همراه عدم قطعیت‌های واقعی این سرعت‌ها (σ_v) در هر سه مولفه مختصاتی نشان می‌دهد.

جدول ۱. سرعت‌های قابل اطمینان همراه با عدم قطعیت‌های واقعی آنها در ایستگاه‌های دائمی شبکه محلی هرمزگان

نام ایستگاه	$v_E \pm \sigma_{v_E} (mm / year)$	$v_N \pm \sigma_{v_N} (mm / year)$	$v_U \pm \sigma_{v_U} (mm / year)$
BABS	32.0 ± 88.57	30.0 ± 57.57	-0.1 ± 85.88
CHBR	31.0 ± 11.41	$13.0 \pm 0.3/42$	-0.1 ± 20.21
DBST	31.0 ± 32.64	19.1 ± 46.16	-0.1 ± 90.78
FDNG	20.1 ± 61.48	10.0 ± 33.34	$-62.2 \pm 0.6/68$
FHRJ	29.1 ± 59.66	14.2 ± 46.25	-61.1 ± 37.10
GLMT	31.0 ± 50.44	12.0 ± 65.86	1.1 ± 66.32
JASC	29.0 ± 36.36	19.0 ± 67.35	1.1 ± 35.07
MHAN	29.0 ± 33.35	21.0 ± 72.33	1.0 ± 78.99
RAVR	28.0 ± 72.25	19.0 ± 79.25	$-2.0 \pm 0.5/71$
SBAK	27.0 ± 46.26	21.0 ± 13.24	$1.0 \pm 0.1/66$
SDAD	29.0 ± 83.44	15.0 ± 26.42	-1.1 ± 11.30
SRVN	$31.0 \pm 0.2/27$	8.0 ± 77.30	-0.0 ± 42.73

شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های دائمی GPS شبکه محلی هرمزگان را همراه با بردارهای سرعت افقی و قائم این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱. بردارهای سرعت افقی (شکل بالا) و قائم (شکل پایین) ایستگاه‌های دائمی GPS شبکه محلی هرمزگان

مطابق جدول ۱ و شکل ۱، سرعت مولفه قائم در دو ایستگاه FDNG (۰۶/۶۲- میلیمتر در سال) و FHRJ (۳۷/۶۱- میلیمتر در سال) غیرعادی بوده و یک فرونشست بزرگ در آنها مشاهده می‌شود که دارای سرعتی ثابت است. سرعت ارتفاعی سایر ایستگاه‌ها در محدوده طبیعی قرار داشته و بالآمدگی غیرعادی در آنها وجود ندارد. لازم به ذکر است که این دو ایستگاه FDNG و FHRJ علاوه بر فرونشست غیرعادی، در مولفه‌های مسطحی خود دارای حرکات شتاب‌دار نیز هستند. در سه ایستگاه ساحلی BABS، CHBR و JASC هیچ حرکت غیرعادی مشاهده نشد.

منابع

- Amiri-Simkoei, A., Mohammadloo, T., & Argus, D. (2017). Multivariate analysis of GPS position time series of JPL second reprocessing campaign. *Journal of Geodesy*, 91(6), 685-704.
- Amiri-Simkoei, A., Hosseini-Asl, M., Asgari, J., & Zangeneh-Nejad, F. (2019). Offset detection in GPS position time series using multivariate analysis. *GPS solutions*, 23(1), 13.
- Birhanu, Y., Williams, S., Bendick, R., & Fisseha, S. (2018). Time dependence of noise characteristics in continuous GPS observations from East Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 144, 83-89.
- Bogusz, J., Klos, A., & Pokonieczny, K. (2019). Optimal Strategy of a GPS Position Time Series Analysis for Post-Glacial Rebound Investigation in Europe. *Remote Sensing*, 11(10), 1209.
- Graham, S. E., Loveless, J. P., & Meade, B. J. (2018). Global plate motions and earthquake cycle effects. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7), 2032-2048.

- Jiang, W., Ma, J., Li, Z., Zhou, X., & Zhou, B. (2018). Effect of removing the common mode errors on linear regression analysis of noise amplitudes in position time series of a regional GPS network & a case study of GPS stations in Southern California. *Advances in Space Research*, 61(10), 2521-2530.
- Khalkhali, S. A. G., Ardalan, A. A., & Karimi, R. (2021). A time series analysis of permanent GNSS stations in the northwest network of Iran. *Annals of Geophysics*, 64(2), GD218-GD218.
- Klos, A., Olivares, G., Teferle, F. N., Hunegnaw, A., & Bogusz, J. (2018). On the combined effect of periodic signals and colored noise on velocity uncertainties. *GPS solutions*, 22(1), 1.
- Klos, A., Kusche, J., Fenoglio-Marc, L., Bos, M. S., & Bogusz, J. (2019). Introducing a vertical land motion model for improving estimates of sea level rates derived from tide gauge records affected by earthquakes. *GPS Solutions*, 23(4), 102.
- Ostanciaux, E., Husson, L., Choblet, G., Robin, C., & Pedoja, K. (2012). Present-day trends of vertical ground motion along the coast lines. *Earth-Science Reviews*, 110(1-4), 74-92.