

تجزیه هارمونیک توابع گیرنده برای بررسی ناپیوستگی‌ها در مکران

سارا عباسی¹، سید خلیل متقی²

¹دانشجوی دکتری زلزله شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، Saraabbasi@iasbs.ac.ir
²استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، kmotaghi@iasbs.ac.ir

.....

چکیده

منطقه فعال فرورانشی مکران، حاصل از همگرایی صفحات عربی و اوراسیا است. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده توسط 11 ایستگاه باند پهن دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان که در امتداد یک خط شمالی-جنوبی از ساحل مکران تا شهر بزمان نصب شده‌اند، توابع گیرنده P محاسبه و تجزیه هارمونیک آن‌ها انجام شد. بررسی تغییرات دامنه فازهای تبدیلی بر روی توابع گیرنده و برانبارش‌های هارمونیک، نشان می‌دهد که مرز تقریبی موهو از عمق حدود 28 تا 51 ± 2 کیلومتری در زیر ایستگاه‌های AZIZ تا BAZM قرار دارد و در زیر گودال جازموریان، در عمق حدود 40 ± 2 کیلومتر است. همچنین، تجزیه هارمونیک توابع گیرنده، نشان‌دهنده وجود یک لایه ناهمسانگرد شیب‌دار با محور تقارن شمالی-جنوبی تا عمق حدود 8 کیلومتر (که احتمالاً مرتبط با رسوبات گوه افزایشی است) و یک لایه ناهمسانگرد افقی (شرقی-غربی) در عمق 16 تا 22 کیلومتر، در زیر ایستگاه‌های AZIZ تا MALK می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مکران، تابع گیرنده، تجزیه هارمونیک، ناهمسانگردی.

Harmonic Decomposition of Receiver Functions to investigate Discontinuities in Makran

Sara Abbasi¹, Khalil Motaghi²

¹Ph. D. student, Earth Sciences Department, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran.

²Assistant Professor, Earth Sciences Department, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran.

...

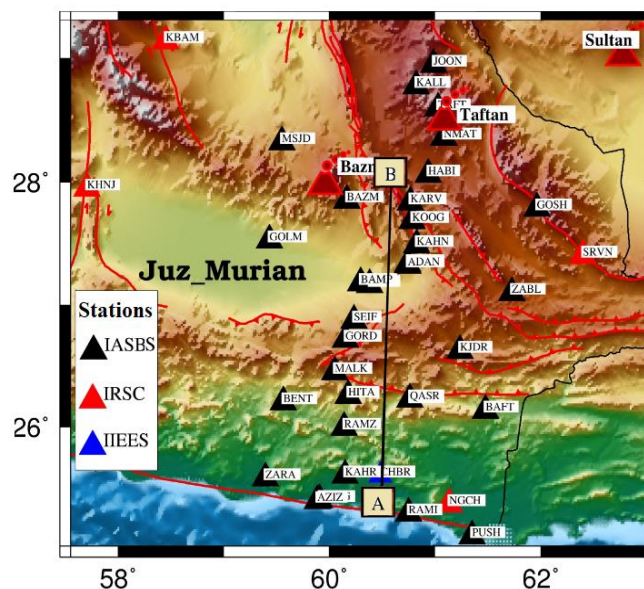
Abstract

The Makran active subduction zone, is due to convergence of Arabian and Eurasian plates. In this study, using data gathered by 11 broad-band stations of Institute for Advanced Studies in Basic Sciences of Zanjan, located along a north-south profile from Makran coast to Bazman, the P receiver functions calculated and harmonic decomposition of them, performed. Investigation of amplitude variations of converted phases on the RFs and H-D stacks shows that the Moho boundary lies beneath the stations from AZIZ to BAZM at almost 28 to 51 ± 2 km depth, and beneath depression of Jaz Murian is at 40 ± 2 km depth. Also, H-D of receiver functions indicates existence of a dipping anisotropic layer with north-south symmetry axis to a depth of 8 km (which is probably related to the accretionary prism sediments), and a horizontal anisotropic layer (east-west) at the depth of 16 to 22 km, beneath AZIZ to MALK stations.

Keywords: Makran, Receiver function, Harmonic decomposition, Anisotropy.

1 مقدمه

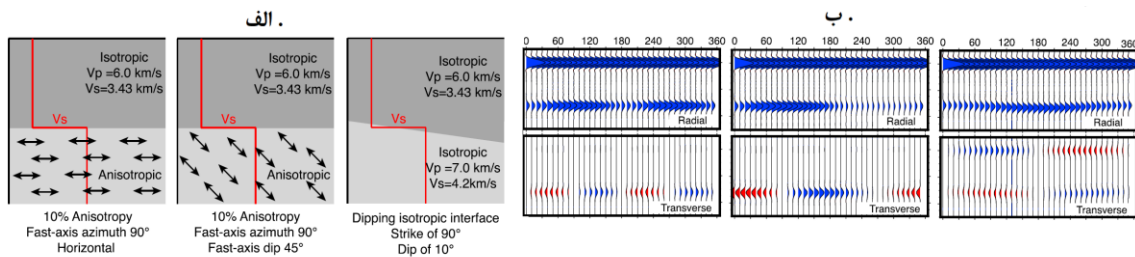
ناحیه فرورانشی فعال مکران، حاصل از همگرایی صفحات عربی و اوراسیا است. منشور بر افزایشی مکران، با طول حدود هزار کیلومتر و مساحت 160 هزار کیلومتر مربع، از شرق تنگه هرمز در ایران و سیستم گسلی زندان-میناب شروع شده و تا شرق پاکستان و سیستم گسلی ارنج-نال گسترش یافته است. ضخامت زیاد رسوبات، زاویه مخروطی کم و شیب کم در مقایسه با دیگر مناطق فرورانشی، از ویژگی‌های منشور افزایشی مکران است. فروافتادگی‌های جازمورین در ایران و مشکل در پاکستان حوضه‌های پیش‌کمانی، و آتشفشان‌های بزمان و تفتان در ایران و کوه سلطان و چاگائی هیلز در پاکستان، کمان‌های آتشفشانی آندزیتی این حوزه فرورانشی معرفی شده‌اند (شکل 1). بررسی ناهمسانگردی، هندسه و عمق مرزهای درون‌پوسته‌ای و مرز پوسته با گوشته، یکی از مسائل مطرح در پهنه فرورانشی مکران است که اطلاع از آن سبب فهم بهتر هندسه فرورانش می‌گردد. توموگرافی امواج حجمی دورلرز (شادمنامن و همکاران، 2011) و محاسبه توابع گیرنده P و منحنی پاشش امواج سطحی در مکران ساحلی (متقی و همکاران، 2020)، وجود یک لیتوسفر فرورونده با شیب کم در منطقه را تایید می‌کنند. یک ابزار مناسب برای بررسی هندسه و ناهمسانگردی ساختارهای زیرسطحی، محاسبه توابع گیرنده و تجزیه هارمونیک این توابع است. تابع گیرنده، یک سری زمانی شامل چند تابع ضربه با زمان رسیده‌ها و دامنه‌های متفاوت می‌باشد. اساس کار در روش تابع گیرنده، استفاده از ویژگی تبدیل موج از P به S در حین برخورد به ناپیوستگی‌های درون زمین است. لایه‌بندی‌های زمین، به دلیل تفاوت خواص فیزیکی و در نتیجه، اختلاف سرعتی در دو طرف مرزهای ناپیوستگی است. بنابراین به هنگام عبور از این مرزها، انرژی موج P، به دو قسمت تقسیم، و امواج P و Sv عبوری به ترتیب، فاز مستقیم P و فاز تبدیلی Ps نامیده می‌شوند. در توابع گیرنده موج P، فاز تبدیلی Ps بعد از فاز مستقیم P به دستگاه گیرنده می‌رسد. برای محاسبه توابع گیرنده، از روش واهمامیخت تکراری در حوزه زمان استفاده می‌کنیم. با انجام واهمامیخت مولفه‌های عمودی از شعاعی و مماسی، آثار چشمه، مسیر و دستگاه حذف می‌شوند و تنها اثر ساختارهای زیر گیرنده باقی می‌مانند. با محاسبه اختلاف زمان رسید فازهای مستقیم و تبدیلی و به کمک یک مدل سرعتی مناسب، عمق مرز ناپیوستگی مسبب ایجاد فاز تبدیلی بدست می‌آید.



شکل 1. منطقه مورد مطالعه در مکران. 11 ایستگاه باند پهن متعلق به دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان با مثلث‌های سیاه‌رنگ در امتداد خط A-B مشخص شده‌اند (AZIZ, KAHR, RAMZ, HITA, MALK, SEIF, SAID, ABAD, KAHN, KOOG, BAZM). خطوط قرمز، گسله‌های فعال منطقه را نشان می‌دهند.

در یک مرز ناپیوستگی تخت و همسانگرد، بیش‌ترین مقدار انرژی فازهای مستقیم P و تبدیلی Ps به ترتیب بر روی مولفه‌های عمودی و شعاعی ثبت می‌شود، اما از آنجایی‌که مرز زیر ایستگاه، شیب‌دار و یا ناهمسانگرد است، مقداری نشت انرژی P بر روی مولفه R و مقداری نشت انرژی‌های P و Ps بسته به ناهمسانگرد یا شیب‌دار بودن مرز، بر روی

مولفه T مشاهده می‌شود. فازهای تبدیلی ساختارهای همسانگرد، بر روی مولفه R و فازهای تبدیلی مرزهای شیب‌دار و ناهمسانگرد، بر روی T ثبت می‌شوند. با تجزیه توابع گیرنده به هارمونیک‌های وابسته به یک آزیموت، می‌توان ترکیب هر دو مولفه را تحلیل و تغییرات دامنه در یک زمان مشخص را بررسی نمود که انجام این کار برای رژیم‌های تکتونیکی پیچیده مانند ناحیه فرورانشی مکران اهمیت زیادی دارد. اساس روش H-D، جداسازی هارمونیک‌های یک مجموعه تابع گیرنده، به عنوان تابعی از زاویه سمتی برگشتی است. این تکنیک موجب جداسازی بخش‌های دارای آزیموت ثابت از قسمت‌های دارای وابستگی آزیموتی، می‌گردد (بیانچی و همکاران، 2010). فورد و همکاران (2016)، با ایجاد مدل‌های مصنوعی، تفاوت توابع گیرنده را در سه حالت مرز شیب‌دار همسانگرد، لایه تخت با ناهمسانگردی شیب‌دار و لایه تخت با ناهمسانگردی افقی بررسی نمودند (شکل 2). در یک مرز شیب‌دار همسانگرد یا تخت با ناهمسانگردی شیب‌دار (شکل 2-الف و ب، راست و میانی)، دامنه فاز تبدیلی توابع گیرنده، با تغییر زاویه سمتی برگشتی به طور متناوب با دوره تناوب 360 درجه، و در یک لایه تخت با ناهمسانگردی افقی (شکل 2، چپ)، با دوره تناوب 180 درجه تغییر می‌کند.



شکل 2. الف) تصویر مدل‌های استفاده شده برای محاسبه ب) مولفه‌های شعاعی و مماسی توابع گیرنده مصنوعی (فورد و همکاران، 2016).

2 روش تحقیق

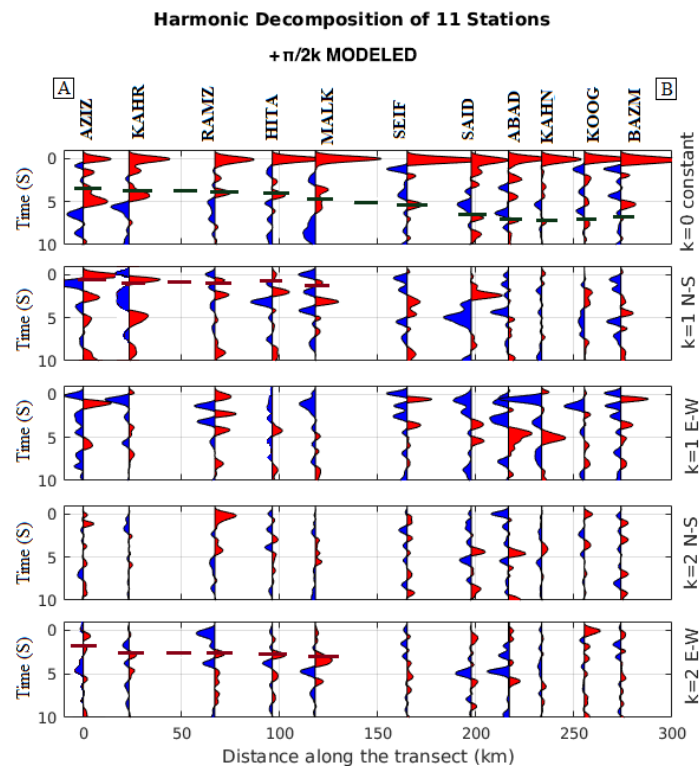
داده‌های مورد استفاده در این مطالعه توسط 11 ایستگاه لرزه‌نگاری باند پهن دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، که در راستای تقریبی خطی به طول 274 کیلومتر (خط A-B، شکل 1) از روستای عزیز آباد (جنوب استان سیستان و بلوچستان) تا شهر بزمان (شمال غرب ایرانشهر و شمال جازموریان) با میانگین فاصله بین ایستگاهی 26 کیلومتر، نصب شده‌اند، جمع‌آوری گردیده‌اند. بازه زمانی داده‌ها، از ماه دوازدهم سال 2016 میلادی تا ماه چهارم سال 2019 میلادی است. برای محاسبه توابع گیرنده P، 6132 رویداد با بزرگای بیش از 5 و فاصله کمانی 20 الی 140 درجه انتخاب و زمان رسید تئوری فازهای P و PKiKP بر اساس مدل IASP91 تعیین شد. بعد از جداسازی پنجره زمانی مناسب (60 ثانیه قبل و 100 ثانیه بعد از زمان رسید تئوری) و حذف مقدار میانگین و روند از روی نگاشت‌ها، فیلتر میان‌گذر (با فرکانس گوشه 0/05 تا 1/5 هرتز) بر روی شکل موج اعمال گردید. در نهایت، پس از چرخش پنجره انتخاب‌شده از دستگاه مختصات ZNE به ZRT، برای محاسبه تابع گیرنده P، مولفه Z لرزه‌نگاشت‌ها از مولفه‌های R و T واهمامیخت شد تا اثرات چشمه و مسیر خارج از محدوده ایستگاه‌ها از روی نگاشت‌ها حذف گردد. برای بررسی تغییرات دامنه، برانبارش توابع گیرنده در دسته‌های 15 درجه‌ای با هم‌پوشانی 5 درجه‌ای انجام شد. سپس، برای تجزیه هارمونیک توابع گیرنده P محاسبه شده، دامنه‌های توابع گیرنده شعاعی و مماسی در زمان‌های مشخص، به صورت یک ترکیب خطی از عبارت‌های $\cos k\varphi$ و $\sin k\varphi$ که $k = 0, 1, 2$ ، درجه هارمونیک است، بیان گردیدند (رابطه 1).

$$RF_m^R(t) = RF_{k=0}(t) + \sum_{k=1}^{k=2} [\cos(k\varphi_m)RF_{\cos(k\varphi)}(t) + \sin(k\varphi_m)RF_{\sin(k\varphi)}(t)] \quad (1)$$

$$RF_m^T(t) = \sum_{k=1}^{k=2} [\cos(k\varphi_m + \pi/2k)RF_{\cos(k\varphi)}(t) + \sin(k\varphi_m + \pi/2k)RF_{\sin(k\varphi)}(t)]$$

در رابطه 1، $RF_m^{R,T}(t)$ امین تابع گیرنده شعاعی یا مماسی، φ_m زاویه سمتی برگشتی برای امین تابع گیرنده و $RF_{k,\cos(k\varphi),\sin(k\varphi)}(t)$ مولفه‌های هارمونیک برانبارش تجزیه‌شده می‌باشند. $k = 0$ ، ساختارهای همسانگرد و عدم وابستگی دامنه به زاویه سمتی برگشتی، $k = 1$ ، یک لایه شیب‌دار همسانگرد یا تخت با ناهمسانگردی شیب‌دار و $k = 2$ ، یک لایه

تخت ناهمسانگرد افقی را نشان می‌دهد. با انجام برگردان رابطه 1، ضرایب عبارتهای هارمونیک \sin و \cos برای تمام توابع گیرنده بدست آمدند و مولفه‌های هارمونیک توابع گیرنده R و T ترکیب شده، برای 11 ایستگاه (در امتداد A-B) نسبت به زمان ترسیم گردیدند (شکل 3). طبق شکل 3، یک مرز (موهو) با زمان $3/5$ تا $6/4$ ثانیه (در عمق 28 تا 51 ± 2 کیلومتر) در زیر ایستگاه‌های AZIZ تا BAZM قرار دارد. همچنین، نتایج این مطالعه، نشان‌دهنده وجود یک مرز ناهمسانگرد شیب‌دار با محور تقارن شمالی-جنوبی در عمق حدود یک تا 8 کیلومتری، و یک مرز ناهمسانگرد افقی با محور شرقی-غربی در عمق 16 تا 22 کیلومتری در زیر ایستگاه‌های AZIZ تا MALK می‌باشد.



شکل 3 تجزیه‌های هارمونیک توابع گیرنده $(R+iT)$ وابسته به زاویه سمتی برگشتی برای 11 ایستگاه منطقه در امتداد خط A-B (شکل 1)، نمادهای N-S و E-W، به ترتیب، نشان‌دهنده روابط هارمونیک $\cos k\phi$ و $\sin k\phi$ می‌باشند که $k=0,1,2$ درجه هارمونیک است. خط چین سبز (در $k=0$)، مرز تقریبی موهو در زیر ایستگاه‌ها و خط‌چین‌های قرمز (در $k=1$, N-S و $k=2$, E-W)، دو مرز ناهمسانگرد در زیر ایستگاه‌های AZIZ تا MALK را نشان می‌دهند. پالس‌های قرمز و آبی، نمایانگر دامنه‌های مثبت و منفی هستند که با مقیاس 120 بزرگ‌نمایی شده‌اند.

3 نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توابع گیرنده P در 11 ایستگاه لرزه‌نگاری در مکران غربی محاسبه و با تجزیه هارمونیک توابع گیرنده، ناهمسانگردی، هندسه و عمق ناپیوستگی‌ها تخمین زده شد. تجزیه هارمونیک توابع گیرنده، نشان می‌دهد که یک مرز (احتمالاً موهو) از عمق 28 تا 51 ± 2 کیلومتری در زیر ایستگاه‌های AZIZ تا BAZM است. با حرکت از ساحل مکران به سمت شمال، عمق موهو با شیب خیلی کم افزایش می‌یابد و در زیر کمان آتشفشانی بزمان به دلیل خمش لیتوسفر اقیانوسی، به بیش‌ترین مقدار می‌رسد. در ناحیه پیش‌کمان (زیر گودال جازموریان) عمق موهو 40 ± 2 کیلومتر است. همچنین، نتایج این مطالعه، نشان‌دهنده وجود یک مرز ناهمسانگرد شیب‌دار با محور تقارن شمالی-جنوبی (احتمالاً مرتبط با رسوبات گوه برف‌افزایی است) در عمق یک تا 8 کیلومتری، و یک مرز ناهمسانگرد افقی با محور شرقی-غربی در عمق 16 تا 22 کیلومتری در زیر ایستگاه‌های AZIZ تا MALK واقع در بالای موهو می‌باشد. مقادیر فوق، تاکنون برای 11 ایستگاه در منطقه مورد مطالعه محاسبه شده‌اند و برای سایر ایستگاه‌ها نیز این مقادیر محاسبه و گزارش خواهند شد.

- Bianchi, I., Park, J., Piana Agostinetti, N. and Levin, V., 2010, Mapping seismic anisotropy using harmonic decomposition of receiver functions: An application to northern Apennines, Italy. *J. Geophys. Res.*, **115**, B12317, doi:10.1029/2009JB007061.
- Ford, H. A., Long, M. D. and Wirth, E. A., 2016, Midlithospheric discontinuities and complex anisotropic layering in the mantle lithosphere beneath the Wyoming and Superior Provinces: *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 6675–6697, doi:10.1002/2016JB012978.
- Motaghi, K., Shabaniyan, E. and Nozad Khalil, T., 2020, Deep structure of the western coast of the Makran subduction zone, SE Iran: *Tectonophysics*, **776**, 228314.
- Shad Manaman, N., Shomali, H. and Koyi, H., 2011, New constraints on upper-mantle Svelocity structure and crustal thickness of the Iranian plateau using partitioned waveform inversion: *Geophysical Journal International*, **184**, 247–267.