

بررسی ساختار سرعتی پوسته در زیر شبکه لرزه‌نگاری قوچان با استفاده از برگردان زمان سیر امواج زمین لرزه‌های محلی

مصطفی جوان‌مه‌ری^{۱*}، اسماعیل بایرام‌نژاد^۲، محمدرضا قیطانچی^۳ و سید محمود اظهاری^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۴/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

چکیده

روش مدل‌سازی وارون هم‌زمان پارامترهای زمین لرزه‌ای یکی از روش‌های متداول در تحقیقات ساختار سرعتی پوسته زمین است. در این روش، پارامترهای مکانی و زمانی زمین لرزه‌ها و ساختار سرعتی پوسته، طی مراحل مدل‌سازی وارون به‌طور هم‌زمان بهینه می‌شوند. در این تحقیق برای تعیین مدل سرعتی بهینه پوسته در ناحیه کپه‌داغ از روش مدل‌سازی وارون هم‌زمان و نرم‌افزار ولست استفاده شده است. ناحیه کپه‌داغ، قسمتی از کمربند کوه‌زایی آلپ-هیمالیا است که در شمال شرق ایران و روی حاشیه جنوب غربی پوسته قاره‌ای توران قرار دارد. شهر قوچان که در مرکز این ناحیه واقع شده، از ۱۸۷۰ تا به حال، بارها با زمین لرزه‌های بزرگ و مخرب ویران شده است. این زمین لرزه‌ها از بزرگ‌ترین زمین لرزه‌هایی بودند که در طول ۱۶۰ سال اخیر در منطقه کپه‌داغ رخ داده‌اند و تلفات و خسارات بسیاری در شهر قوچان و دهکده‌های اطراف آن برجای گذاشته‌اند. در ابتدا برای برآورد مدل یک‌بعدی اولیه از نمودار زمان سیر اولین فازهای رسیده برحسب فاصله استفاده شده است و از نتیجه آن در مراحل بعدی برای تهیه تعدادی مدل اولیه مورد نیاز در نرم‌افزار ولست استفاده شد. سپس با به‌کارگیری نرم‌افزار ولست مدل پوسته نهایی محاسبه شد که بر وجود سه لایه با سرعت‌های ۵/۹۵ تا عمق ۵ کیلومتری، ۶/۱ تا عمق ۱۵ کیلومتری و ۷/۹۷ اعماق بیش از ۴۶ کیلومتر دلالت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کپه‌داغ، مدل‌سازی وارون هم‌زمان، نرم‌افزار ولست، مدل سرعتی پوسته

Crustal seismic velocity structure study in Kope Dagh using simultaneous inversion modeling

Javan-Mehri, M.¹, Bayramnejad, E.², Gheitanchi, M. R.³ and Azhari, S. M.⁴

¹M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

⁴M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 03 Jul 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

Abstract

Crustal Velocity Structure Model has a significant role in truly understanding of seismicity and also in relocating earthquakes. On the other hand, it can be used for recognizing major and potential seismic sources which is very critical for seismicity and earthquake hazard assessment studies. Seismic parameters simultaneous inversion

modeling is one of the most prevalent methods in the study of seismic velocity structure. This approach optimizes the coordinate parameters, time of the events and the velocity structures simultaneously by processing the initially assumed values. The resulted velocity model can be used for relocating the seismic events, registered on the local seismic network, and locating future seismic events as well as establishing the future seismic tomography studies.

In this study, the simultaneous inversion modeling and VELEST software were used in order to find an optimum crustal velocity model. Located in east of Caspian Sea, north east of Iran and south of Touran plate tectonics, the Kope Dagh region lies within a broad zone of deformation and forms part of Alpine-Himalayan orogenic belt which is actually the conjunction zone of Touran and Iran plates. This region is separated from Touran plate by Main Kope Dagh Fault from the north, and its southern boundary is assumed Sabzevar Reverse Fault and Mayamey Reverse Fault. Our study area covers Sabzevar, Mashhad, Shirvan and Quchan cities. Quchan is located in the central Kope Dagh region and has experienced four destructive earthquakes in the past centuries (1851, 1871, 1893 and 1895). These earthquakes caused widespread devastation and heavy human loss in Quchan and many surrounding villages.

To estimate the layer configuration, velocities and thicknesses; we used first arrival travel times. More than 14000 first arrival data related to 2200 seismic events, registered by the local seismic network, were considered. They are all registered in the stations located less than 400 meters of epicenters. First arrival times were plotted versus their distances. The chart suggests three major layers; therefore we decided to fit three lines on three sections of the chart which are 50-100 meters, 120-180 meters and 190-350 meters, using least square method. By inverting the slopes of these three lines, we calculated the mean velocities for the three layers which are 6.01, 6.36 and 8.10 km/sec related to 0-20 km, 20-46 km and more than 46 km respectively. The second anomaly is corresponding to Moho Depth so it shows thickness of the crust in the study area. We used this resulted information as an initial velocity model to prepare numerous models needed for VELEST software runs.

In the next step of our work, in order to improve resulted velocity model, we used VELEST for seven run groups, each containing 20 independent runs using 20 initial models. These initial models are created by a FORTRAN program in a way that 20 initial models have all same thickness but different velocities which are restricted in defined intervals. We considered the convergence of the resulted models in each group to select one as the best run and then to determine a proper velocity model and Moho Depth as well. Hence the third group was selected as the best run group and therefore the related Moho Depth is 46. It is exactly the same as Moho Depth resulted from the first arrival travel times.

In the final step, we used the resulted velocity models in the previous step and calculated their mean values as the mean velocity model. This model was used as another initial model for the final run of VELEST program, but in this run we added several layers to initial model so that their velocities increase regularly. The calculated model, by the VELEST, is very similar to the mean resulted model of the second step. We determined this three layers model as an optimum velocity model for the study area in which the thicknesses of layers are 5, 10 and 31 and velocities of P-wave in these layers are 5.95, 6.1 and 7.97 km/sec respectively. Quchan station is determined as our origin station, therefore its time correction was assumed zero. The most time correction resulted by the final VELEST run is related to Moghan Station.

Key words: Kope Dagh, Simultaneous inversion, VELEST, Crustal seismic velocity model

۱ مقدمه

شرق دریای خزر و شمال شرق ایران و جنوب صفحه توران واقع شده است. ناحیه چین‌خورده کپه‌داغ قسمتی از کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیاست که در شمال شرقی ایران و روی حاشیه جنوب غربی پوسته قاره‌ای توران قرار دارد و در محل برخورد صفحه ایران با صفحه توران واقع شده است (بربریان، ۱۹۸۱؛ روگوژین، ۱۹۹۵). این ناحیه را می‌توان ادامه شرقی کمربند آلپی-همالیایی در شمال شرق ایران دانست. این ناحیه از شمال با گسل اصلی کپه‌داغ از صفحه توران جدا می‌شود (چالانکو، ۱۹۷۵)، مرز جنوبی آن گسل‌های معکوس سبزوار و میامی است و مرز غربی و شرقی آن با مجموعه‌ای از فعالیت‌های لرزه‌ای و ساختمانی مشخص شده است (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸).

از دیدگاه ساختمانی کپه‌داغ همانند زاگرس است که مرز جنوب غربی کمربند آلپ-همالیاست را تشکیل می‌دهد. رشته‌کوه‌های کپه‌داغ و بینالود با یک سامانه گسلی آلپی پسین که عمدتاً از گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد با راستای NNW-SSE و گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد با راستای SW-NE تشکیل شده است که با مجموعه‌ای از گسل‌های رانده فرعی بریده می‌شود. (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸). رشته‌کوه‌های کپه‌داغ و بینالود با یک سامانه گسلش مورب قطع شده‌اند. این سامانه گسلی شامل گسل‌های راست‌گرد NNW-SSE که عمدتاً در شرق کپه‌داغ هستند و گسل‌های چپ‌گرد NE-SW که بیشتر در شرق کپه‌داغ قرار دارند، است.

گسل‌های راست‌گرد شرق عمدتاً در محدوده‌ای با طول ۱۵۰ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر قرار دارند و در قسمت شمال غربی به گسل اصلی و در انتهای جنوب شرقی آنها به سمت حوزه رودخانه اترک منحرف شده‌اند (هالینگزورد و همکاران، ۲۰۰۶). مهم‌ترین این گسل‌ها (از نظر طول و میزان جابه‌جایی) در زون بخاردن-قوچان یافت می‌شوند که در لرزه‌خیزی منطقه نقشی کلیدی و

ساده‌ترین و دقیق‌ترین اندازه‌گیری در ثبت‌های لرزه‌ای، زمان‌سیرهای امواج لرزه‌ای است و دقت بیشتر تعیین محل زمین‌لرزه‌ها به توانایی تعیین دقیق‌تر زمان‌سیرها نیاز دارد که این خود به دانستن ساختار سرعتی محیط عبور امواج لرزه‌ای وابسته است. درحالت کلی تعیین محل زمین‌لرزه‌ها با استفاده از مدل‌های یک‌بُعدی صورت می‌گیرد. مدل ساختار سرعتی پوسته در فهم درست لرزه‌زمین‌ساخت ناحیه و نیز در تعیین موقعیت زمین‌لرزه‌ها با دقت بهتر، نقش ویژه‌ای دارد. از طرفی بررسی سرعتی ساختار پوسته را می‌توان در تشخیص و شناسایی چشمه‌های بالقوه و پنهان زمین‌لرزه‌ای (گسل‌های لرزه‌زا) مورد استفاده قرار داد. اما ساختار محیط معمولاً یک ساختار پیچیده سه‌بُعدی است. لذا توموگرافی سه‌بُعدی لرزه‌ای با استفاده از یک مدل بهینه یک‌بُعدی، سعی دارد ساختار سه‌بُعدی سرعتی محیط عبور امواج لرزه‌ای را به دست دهد.

در روش مدل‌سازی وارون هم‌زمان پارامترهای زمین‌لرزه‌ای، پارامترهای مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌ها و ساختار سرعتی پوسته به صورت اولیه تعیین و طی مراحل مدل‌سازی وارون به‌طور هم‌زمان بهینه می‌شوند. مدل پوسته بهینه شده حاصل از این روش علاوه بر بهبود داده‌های مورد استفاده و کاربرد برای تعیین محل دقیق‌تر زمین‌لرزه‌های آینده، در بررسی‌های توموگرافی لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (بایرام‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۶). نرم‌افزار ولست یکی از نرم‌افزارهای شناخته شده برای مدل‌سازی وارون هم‌زمان است که به‌طور هم‌زمان محل کانون‌های زلزله‌ها، مدل پوسته و تصحیحات زمانی ایستگاه‌ها را بهینه می‌سازد. در این تحقیق برای به دست آوردن مدل پوسته بهینه از نرم‌افزار ولست استفاده شده است (کیسلینگ، ۱۹۹۵؛ بایرام‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۶).

۲ لرزه‌زمین‌ساخت منطقه

منطقه‌ای که از آن تحت عنوان کپه‌داغ یاد می‌شود در

مهم بازی می کنند (چالنگو، ۱۹۷۵).

گسل های چپ گرد NE-SW، عمدتاً در غرب کپه داغ قرار دارند و نسبت به گسل های راست گردی که قبلاً ذکر شد، کوتاه ترند. بیشینه جابه جایی افقی در طول این گسل ها بین ۲/۴ تا ۴ کیلومتر برآورد شده است. در ایران این گسل ها در شمال مراوه تپه قرار دارند (هالینگزورد و همکاران، ۲۰۰۶).

منطقه مورد بررسی شامل گستره جغرافیایی ۳۶ تا ۳۸ درجه عرض شمالی و ۵۷/۵ تا ۶۰/۵ درجه طول شرقی است و شهرهای مشهد، قوچان، سبزوار و شیروان را در بر می گیرد (آمبرسیز و همکاران، ۱۹۸۲). این منطقه دارای شبکه لرزه نگاری محلی شامل یازده ایستگاه لرزه نگاری با پوشش محلی نسبتاً مناسب است که خود قسمتی از شبکه لرزه نگاری ایران محسوب می شود و تاکنون بیش از ۲۲۰۰ زمین لرزه در آن ثبت و گزارش شده است. ویژگی فعالیت لرزه ای این منطقه، فراوانی نسبی زمین لرزه های بزرگ با عمق کم است و زمین لرزه ای با عمق متوسط در این ناحیه به ثبت نرسیده است. عمده فعالیت های لرزه ای در این ناحیه را بین اعماق ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر در نظر گرفته اند (چالنگو، ۱۹۷۵؛ جکسون و مکزی، ۱۹۸۴). با بررسی عمق موهو در این ناحیه، ضخامت پوسته بین ۳۶ تا ۴۷ در نظر گرفته شده است (دهقانی و ماکریس، ۱۹۸۳).

۳ تعیین ساختار سرعتی پوسته در گستره قوچان

روش مدل سازی وارون هم زمان پارامترهای زمین لرزه ای، امروزه به صورت گسترده ای در بررسی ساختار سرعتی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش، پارامترهای مکانی و زمانی زمین لرزه ها و ساختار سرعتی پوسته، به صورت اولیه تعیین و طی مراحل مدل سازی وارون به طور هم زمان بهینه می شوند. مدل پوسته بهینه شده حاصل از این روش علاوه بر بهبود داده های مورد استفاده و کاربرد برای تعیین محل دقیق تر زمین لرزه های

آینده، در بررسی های توموگرافی لرزه ای مورد استفاده قرار می گیرد.

منطقه مورد بررسی، دارای شبکه لرزه نگاری محلی شامل یازده ایستگاه لرزه نگاری با پوشش محلی نسبتاً مناسب است که قسمتی از شبکه لرزه نگاری ایران محسوب می شود و تاکنون بیش از ۲۲۰۰ زمین لرزه در آن ثبت و گزارش شده است (شکل ۱). اسامی و مشخصات این یازده ایستگاه در جدول ۱ و محل جغرافیایی آنها در شکل ۱، به همراه رومرکز زمین لرزه های ثبت شده، مشخص شده است.

۱-۳ آماده سازی داده ها

برای حل مسائل وارون، داشتن یک مدل اولیه مناسب ضروری است و هر چقدر این مدل اولیه به واقعیت نزدیک تر باشد، نتیجه بهتری حاصل خواهد شد. در مدل سازی وارون هم زمان نیز مدل سرعتی اولیه یکی از معلومات است. لذا به منظور برآورد اولیه از وضعیت لایه بندی، سرعت امواج طولی و ضخامت پوسته، از نمودار زمان سیر اولین فازهای رسیده به ایستگاه ها استفاده شد. برای این منظور بیش از ۱۴۰۰۰ زمان سیر اولین فازهای رسیده از تعداد ۲۲۰۰ زمین لرزه ثبت شده تا فاصله رومرکزی ۴۰۰ کیلومتری محاسبه و نسبت به فاصله رسم شدند (شکل ۲).

این داده ها در سه بازه از فاصله رومرکزی (۵۰-۱۰۰)، (۱۸۰-۱۲۰) و (۳۵۰-۱۹۰) کیلومتری با استفاده از روش کمترین مربعات، با سه خط برازش شدند. بازه های فوق با توجه به انتظار رسیدن فازهای مستقیم و سرموج ها و همچنین شکل کلی داده های رسم شده که نشان دهنده حداقل دو ناپیوستگی در مدل سرعتی امواج طولی است، در نظر گرفته شدند. عکس شیب خطوط برازش شده با تقریب خوبی سرعت متوسط امواج طولی در لایه های مورد انتظار را نشان می دهد که به ترتیب معادل

هم‌زمان زمان‌سیرها، تعداد بیست مدل محاسبه شد. مدل‌های نهایی محاسبه شده با ولست در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده به‌طور کلی نشان‌دهنده شش لایه سرعتی متفاوت است ولی برای اطمینان بیشتر از این لایه‌ها و تعیین سرعت موج P در هر لایه، لازم است اجرای ولست در دفعات بیشتری صورت گیرد. بدین منظور، با استفاده از مدل‌های اولیه تولید شده از روی اجرای قبلی ولست این فرایند تکرار شد.

لذا از مدل متوسط به دست آمده در حکم مدل اولیه مرحله بعد استفاده شد و تعداد بیست مدل اولیه دیگر براساس آن تهیه و در نرم‌افزار ولست به کار گرفته شد (بازه تغییر سرعت لایه‌ها $0.3 \pm$ است). همان‌طور که در شکل ۵، مشخص است، مرزهای لایه‌ها، مخصوصاً عمق موهو دارای عدم قطعیت نامطلوبی هستند. برای اطمینان بیشتر از این مرزها، به خصوص عمق موهو، به دفعات بیشتری از اجرای ولست نیاز داریم. برای این منظور و در طی مرحله دوم تعداد هفت اجرای بیست‌تایی دیگر از ولست صورت گرفت.

شکل‌های ۶ تا ۷ مدل‌های اولیه و مدل‌های خروجی مربوط به هفت اجرای مرحله دوم به کارگیری ولست را نشان می‌دهد. در این اجراها عمق موهو در مدل‌های اولیه ورودی از ۴۴ کیلومتر تا ۵۰ کیلومتر تغییر می‌کند. شکل ۸ نیز منحنی‌های تغییرات باقی‌مانده کلی از هر اجرای برنامه ولست را نشان می‌دهد. روند بهبود تغییرات باقی‌مانده کلی از اجرای اول تا سوم قابل مشاهده است ولی در بقیه اجراها بهبود محسوسی مشاهده نمی‌شود. این مسئله ممکن است به این دلیل پیش آمده باشد که زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری منطقه به اندازه کافی عمیق نیستند. میانگین عمق این زمین‌لرزه‌ها حدود ۲۲ کیلومتر ثبت شده است. لذا برای تعیین یکی از این اجراها در حکم بهترین اجرا و به دنبال آن برای تعیین بهترین عمق موهو، روی همگرایی مدل‌های خروجی تاکید شد. در شکل‌های ۶ و ۷، همگرایی مدل‌های خروجی

۶/۰۱، ۶/۳۶ و ۸/۱۰ کیلومتر بر ثانیه محاسبه شدند (شکل ۳). با توجه به سرعت‌های به دست آمده، معادلات مربوط به خطوط برازش شده و عمق متوسط زمین‌لرزه‌ای ناحیه که حدود ۲۲ کیلومتر است، ناپیوستگی‌های مربوط به این سرعت‌ها به ترتیب ۲۲ و ۴۷ کیلومتر محاسبه شد. ناپیوستگی دوم مربوط به عمق موهو است.

۳-۲ مدل سرعتی بهینه

از داده‌های تعداد ۲۲۰۰ زمین‌لرزه ثبت شده در منطقه، تعداد ۶۰۰ زمین‌لرزه در حکم ورودی موردنیاز برای وارون‌سازی هم‌زمان در برنامه ولست، به صورتی که گپ آزمایشی آنها بین ۰ تا ۲۷۰ باشد، انتخاب شد. از این داده‌ها در وارون‌سازی هم‌زمان زمان-سیرها با استفاده از نرم‌افزار ولست، به منظور یافتن یک مدل بهینه یک‌بُعدی مناسب، استفاده شده است. این عمل شامل اجرای برنامه ولست در طی چندین مرحله و در هر مرحله اجرای آن برای بیست مدل اولیه است.

از مدل اولیه به دست آمده از نمودار زمان‌سیر برای برآورد مدل اولیه مناسب، برای استفاده در برنامه ولست به‌منزله مدل اولیه ورودی برنامه، استفاده شد. برای این منظور با کد فرترن (Fortran) برنامه‌ای نوشته شد که تعداد مشخصی مدل اولیه تولید کند. به طوری که سرعت در همه این مدل‌ها، سرعت مشخصی باشد که در بازه مشخص تغییر می‌کند. به این ترتیب و با استفاده از این برنامه، تعداد بیست مدل اولیه براساس مدل اولیه به دست آمده از نمودار زمان‌سیرها تولید شد (بازه تغییر سرعت لایه‌ها $0.4 \pm$ است). برای مشاهده جزئیات بیشتر در خروجی برنامه ولست، این بیست مدل اولیه به زیرلایه‌هایی با ضخامت دو کیلومتر تقسیم شدند (شکل ۴).

مدل‌های اولیه‌ای که قبلاً ذکر شد در برنامه ولست مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از روش وارون‌سازی

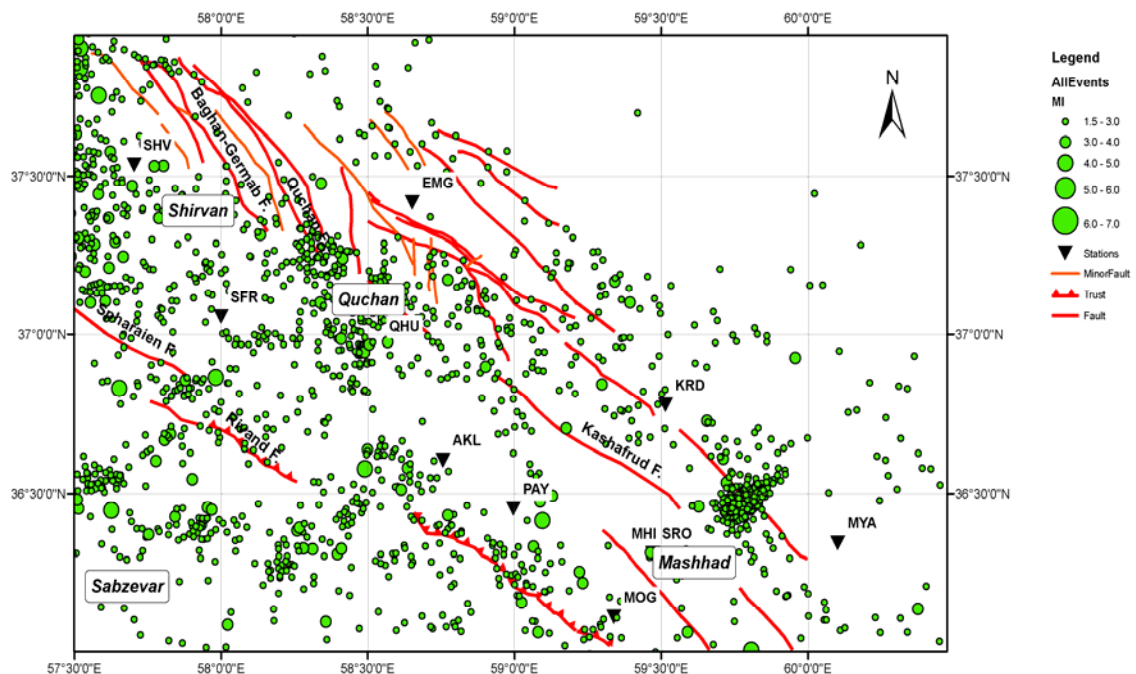
ولست، مدل سرعتی یک بُعدی نهایی محاسبه شد که به مدل متوسط قبلی شبیه است. لذا این مدل، در حکم مدل سرعتی بهینه موج P برای گستره مورد بررسی تعیین شد. نمودار این مدل نهایی بر حسب عمق در شکل ۱۰ و مقادیر دقیق سرعتها و عمق لایهها در جدول ۲ نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل ۱۰ و جدول ۲ نشان داده شده است، مدل سرعتی بهینه به دست آمده، یک مدل سه لایه با ضخامت های ۵، ۱۰ و ۳۱ کیلومتر با سرعت های به ترتیب ۵/۹۵، ۶/۱ و ۷/۹۷ کیلومتر بر ثانیه است. روند تغییرات باقی مانده کلی مربوط به مرحله اول تا سوم اجرای ولست بهبود قابل توجهی نشان می دهد.

منحنی های تغییرات باقی مانده کلی مربوط به مرحله اول تا سوم اجرای ولست در شکل ۱۱ نشان داده شده اند. روند بهبود تغییرات باقی مانده کلی به خوبی در این شکل قابل مشاهده است.

برنامه ولست در اجرای سوم مربوط به عمق موهو ۴۶ کیلومتری، در نمودارهای ۵ و ۶ از شکل ۶ به خوبی قابل مشاهده است و نسبت به بقیه اجراها همگرایی بهتری در مدل های سرعتی خروجی ولست نشان می دهد. بنابراین اجرای سوم در حکم مناسب ترین اجرای برنامه ولست در این مرحله در نظر گرفته شد. و مقدار میانگین عمق موهو در محدوده مورد بررسی ۴۶ کیلومتر تعیین شد. این مقدار دقیقاً همان عمق موهوی محاسبه شده با استفاده از منحنی های زمان سیر است. میانگین مدل های سرعتی خروجی در اجرای سوم در شکل ۹ نشان داده شده است.

در مرحله سوم و آخر، مدل متوسط به دست آمده از مدل های خروجی اجرای سوم، در حکم مدل اولیه اجرای نهایی برنامه ولست در نظر گرفته شد. با این تفاوت که به تعداد لایهها اضافه شد و تغییر سرعتها در این لایهها به صورت پله ای صورت گرفت. بعد از اجرای نهایی برنامه

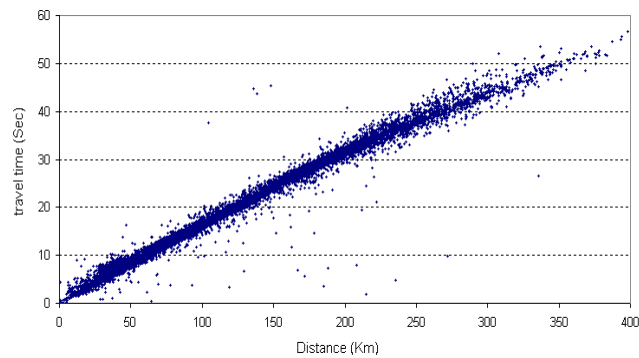


شکل ۱. نقشه گسل های مهم منطقه مورد بررسی به همراه رو مرکز تعداد کل زمین لرزه های ثبت شده و محل ایستگاه های لرزه نگاری.

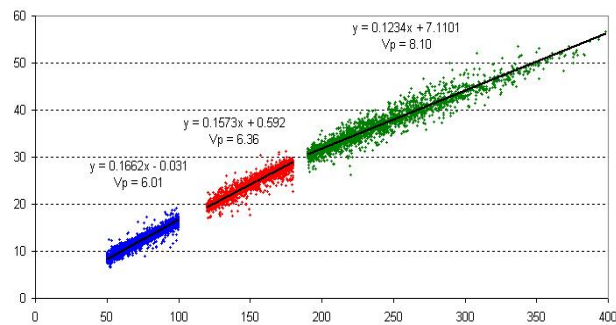
۳-۳ تصحیحات ایستگاهی

با انتخاب مدل نهایی بهینه شده در حکم مدل اولیه و اعمال تصحیحات ایستگاهی حاصل در هر مورد برنامه ولست با سبک تک‌رویدادی مجدداً اجرا و چگونگی تغییرات باقی‌مانده کلی با آنچه که از مدل اولیه به دست آمده بود مقایسه شد که در هر مورد بهبود باقی‌مانده

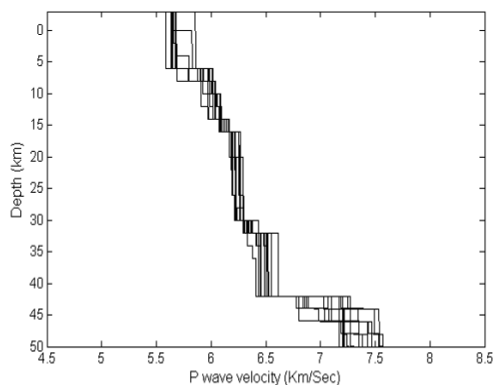
کلی مشهود بود. تصحیحات ایستگاهی به دست آمده در جدول ۳ آورده شده که بیشترین مقدار تصحیح زمانی، مربوط به ایستگاه مغان است (MOG). ایستگاه قوچان (QHU) به علت واقع شدن در حدود مرکز شبکه، به منزله ایستگاه مبدا با تصحیح ایستگاهی صفر در نظر گرفته شده است.



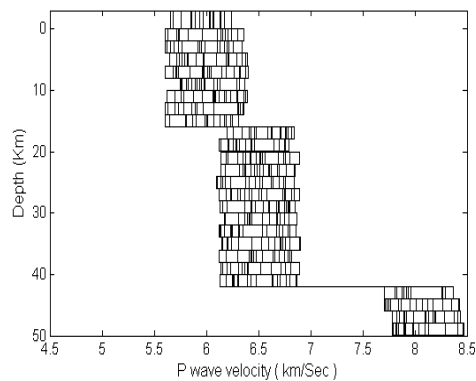
شکل ۲. نمودار زمان سیر اولین فازهای رسیده به ایستگاه‌ها.



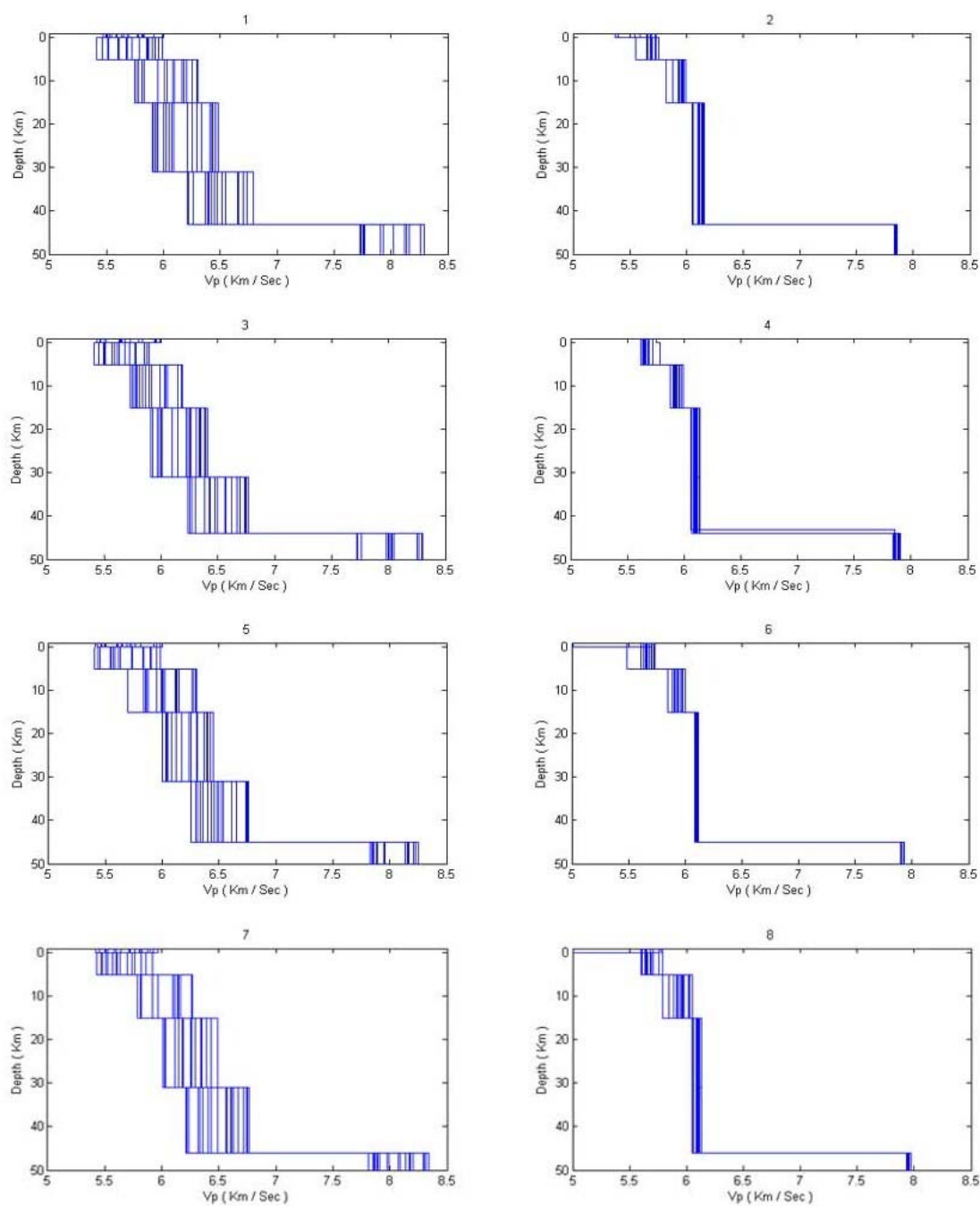
شکل ۳. نمودار زمان سیر اولین فازهای رسیده به ایستگاه‌ها که در سه بازه از فاصله رومرکزی (۵۰-۱۰۰)، (۱۲۰-۱۸۰) و (۱۹۰-۳۵۰) کیلومتری با استفاده از روش کمترین مربعات، با سه خط برازش شده‌اند.



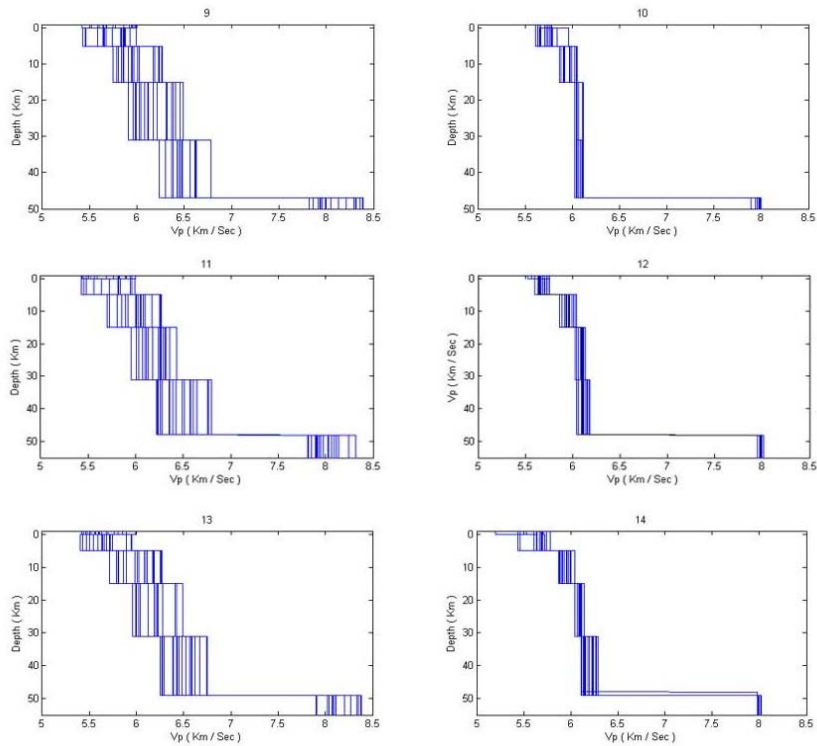
شکل ۵. مدل‌های نهایی محاسبه‌شده با نرم‌افزار ولست در مرحله اول.



شکل ۴. مدل‌های اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار ولست در مرحله اول.



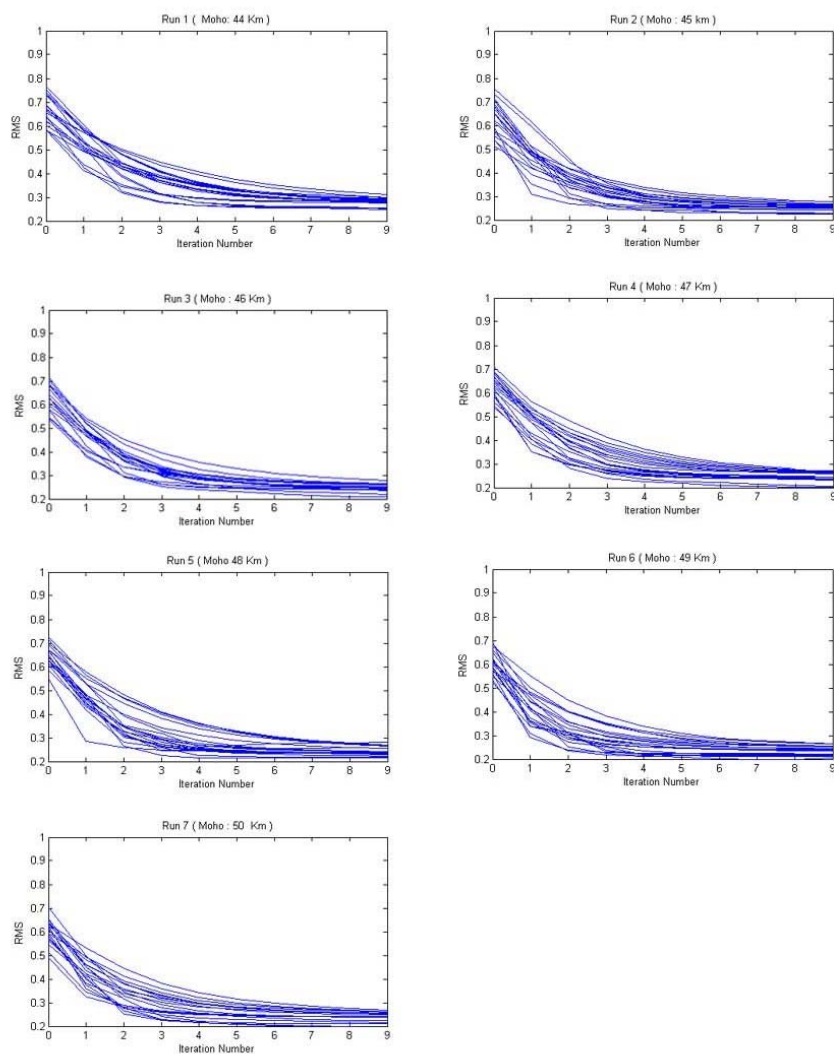
شکل ۶. شماره‌های ۱ و ۲ به ترتیب مدل‌های اولیه (بیست مدل) و مدل‌های خروجی مربوط به اجرای اول از مرحله دوم برنامه ولست. در مدل‌های اولیه ورودی برنامه، عمق موهو ۴۴ کیلومتر در نظر گرفته شده است. ۳ و ۴ به ترتیب مدل‌های اولیه (بیست مدل) و مدل‌های خروجی مربوط به اجرای دوم از مرحله دوم برنامه ولست (در مدل‌های اولیه ورودی، عمق موهو ۴۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است). ۵ و ۶ به ترتیب مدل‌های اولیه و مدل‌های خروجی مربوط به اجرای سوم از مرحله دوم برنامه ولست (در مدل‌های اولیه ورودی، عمق موهو ۴۶ کیلومتر در نظر گرفته شده است). شماره‌های ۷ و ۸ به ترتیب مدل‌های اولیه و مدل‌های خروجی مربوط به اجرای چهارم از مرحله دوم برنامه ولست (در مدل‌های اولیه ورودی، عمق موهو ۴۷ کیلومتر در نظر گرفته شده است).



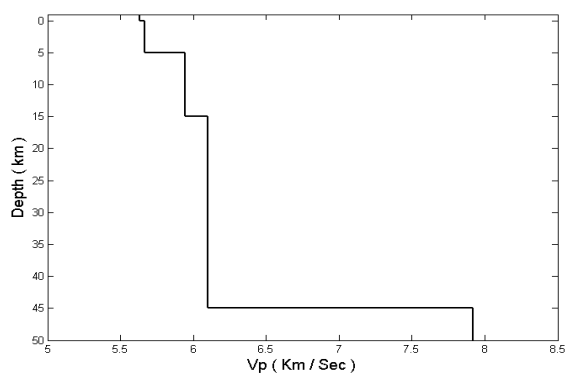
شکل ۷. شماره‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب مدل‌های اولیه (بیست مدل) و مدل‌های خروجی مربوط به اجرای پنجم از مرحله دوم برنامه ولست (در مدل‌های اولیه ورودی، عمق موهو ۴۸ کیلومتر در نظر گرفته شده است). ۱۱ و ۱۲ به ترتیب مدل‌های اولیه و مدل‌های خروجی مربوط به اجرای ششم از مرحله دوم برنامه ولست (در مدل‌های اولیه ورودی، عمق موهو ۴۹ کیلومتر در نظر گرفته شده است). شماره‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مدل‌های اولیه و مدل‌های خروجی مربوط به اجرای هفتم از مرحله دوم برنامه ولست (در مدل‌های اولیه ورودی، عمق موهو ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است).

جدول ۱. مشخصات یازده ایستگاه لرزه‌نگاری محل مربوط به شبکه‌های قوچان و مشهد که در داده‌های آنها در تعیین ساختار سرعتی پوسته مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

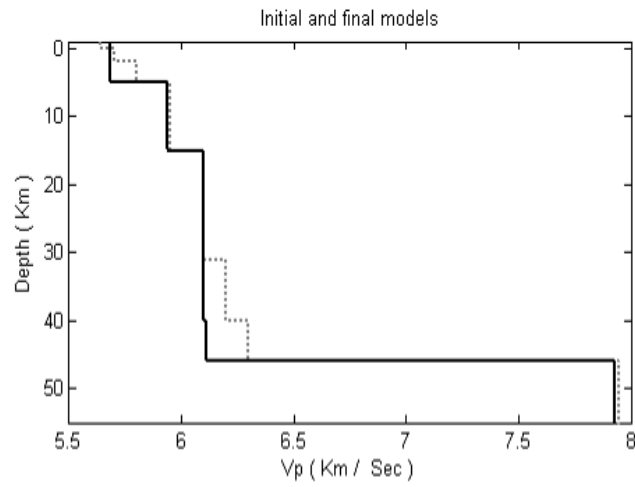
ارتفاع (km)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام اختصاری	نام ایستگاه
۱۳۲۰	۳۷.۰۷۳	۵۸.۵۳۹	QHU	قوچان
۲۵۰۸	۳۶.۶۰۲	۵۸.۷۵۷	AKL	اخلمد
۲۵۶۵	۳۷.۴۱۵	۵۸.۶۵۲	EMG	امام قلی
۲۴۴۸	۳۷.۰۵۴	۵۸.۰۰۰	SFR	اسفراین
۱۹۲۵	۳۷.۵۳۵	۵۷.۷۰۳	SHV	شیروان
۱۶۸۴	۳۶.۳۴۲	۶۰.۱۰۲	MYA	میامی
۲۲۴۵	۳۶.۷۷۶	۵۹.۵۱۵	KRD	کارده
۲۱۰۰	۳۶.۴۵۰	۵۸.۹۹۶	PAY	پایه
۲۵۷۷	۳۶.۱۰۸	۵۹.۳۴۰	MOG	مغان
۱۱۵۰	۳۶.۳۰۹	۵۹.۴۷۱	MHI	مشهد
۱۰۵۰	۳۶.۳۰۹	۵۹.۴۷۱	SRO	مشهد



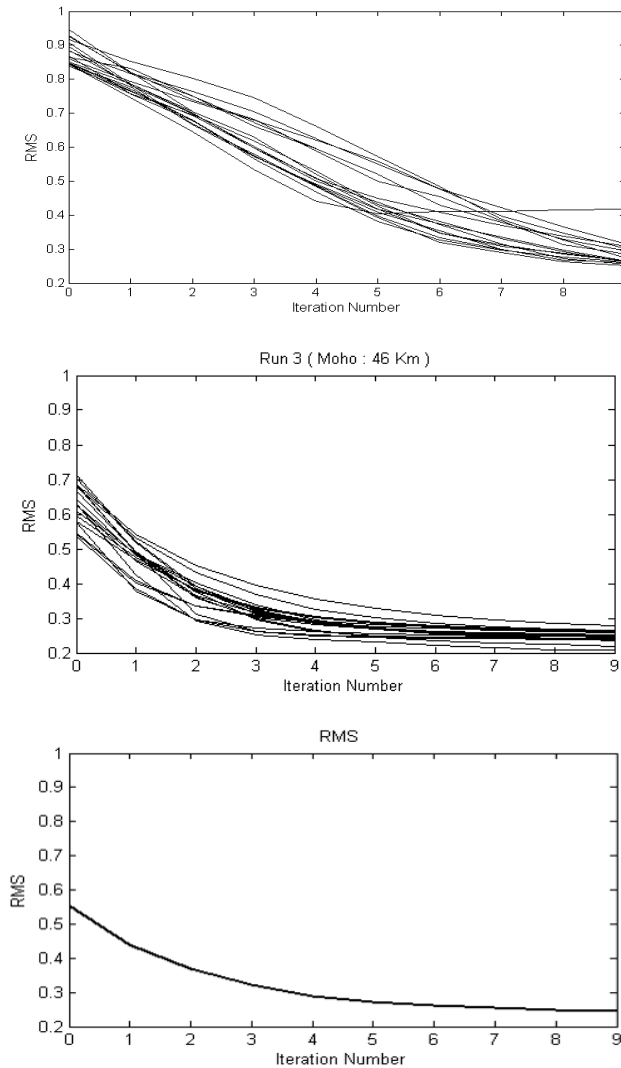
شکل ۸. منحنی‌های تغییرات باقی‌مانده کلی از اجراهای اول تا هفتم از مرحله دوم برنامه ولست. در اجراهای اول تا هفتم به ترتیب، در مدل‌های اولیه ورودی، عمق موهو ۴۴ تا ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. روند بهبود تغییرات باقی‌مانده کلی از اجرای اول تا سوم قابل مشاهده است ولی در بقیه اجراها بهبود محسوسی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۹. مدل سرعتی متوسط از تعداد بیست مدل خروجی اجرای سوم از مرحله دوم برنامه ولست.



شکل ۱۰. مدل اولیه و نهایی در مرحله سوم و نهایی اجرای برنامه ولست. خط نقطه‌چین مدل سرعتی اولیه و خط توپُر مدل سرعتی نهایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. از بالا به پایین به ترتیب، منحنی‌های تغییرات باقی‌مانده کلی مربوط به مرحله اول تا سوم اجرای ولست. روند بهبود تغییرات باقی‌مانده کلی به خوبی در این شکل قابل مشاهده است.

طولی و ضخامت پوسته، از نمودار زمان سیر اولین فازهای رسیده به ایستگاه‌ها استفاده شد. برای این منظور بیش از ۱۴۰۰۰ زمان سیر اولین فازهای رسیده از تعداد ۲۲۰۰ زمین لرزه ثبت شده تا فاصله رومرکزی ۴۰۰ کیلومتری محاسبه و نسبت به فاصله رسم شد و در سه بازه از فاصله رومرکزی (۱۰۰-۵۰)، (۱۸۰-۱۲۰) و (۳۵۰-۱۹۰) کیلومتری با استفاده از روش کمترین مربعات، با سه خط برازش شد. عکس شیب خطوط برازش شده با تقریب خوبی سرعت متوسط امواج طولی در لایه‌های موردانتظار را نشان می‌دهد که به ترتیب معادل ۶/۰۱، ۶/۳۶ و ۸/۱۰ کیلومتر بر ثانیه محاسبه شدند. ناپیوستگی‌های مربوط به این سرعت‌ها به ترتیب ۲۰ و ۴۶ کیلومتر محاسبه شد. ناپیوستگی دوم مربوط به عمق موهو بود که نشان‌دهنده ضخامت پوسته در ناحیه مورد بررسی است.

برای اطمینان بیشتر از این مرزها، به خصوص عمق موهو، تعداد هفت اجرای بیست‌تایی دیگر از ولست صورت گرفت. برای تعیین یکی از این اجراها در حکم بهترین اجرا و به دنبال آن برای تعیین بهترین عمق موهو، روی همگرایی مدل‌های خروجی تاکید شد. همگرایی مدل‌های خروجی برنامه ولست در اجرای سوم مربوط به عمق موهو ۴۶ کیلومتری، نسبت به بقیه اجراها، همگرایی بهتری در مدل‌های سرعتی خروجی ولست نشان می‌دهد. بنابراین اجرای سوم در حکم مناسب‌ترین اجرای برنامه ولست در این مرحله در نظر گرفته و مقدار میانگین عمق موهو نیز در محدوده مورد بررسی ۴۶ کیلومتر تعیین شد. این مقدار دقیقاً همان عمق موهوی محاسبه شده با استفاده از منحنی‌های زمان سیر است.

در مرحله بعد مدل نهایی سرعتی بهینه موج P برای گستره مورد محاسبه شد که به مدل متوسط قبلی شبیه و شامل سه لایه با ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۳۱ کیلومتر با سرعت‌های به ترتیب ۵/۶۸، ۵/۹۵، ۶/۱ و ۷/۹۷ کیلومتر بر ثانیه است. با استفاده از مدل نهایی و اعمال تصحیحات

جدول ۲. شامل مقادیر دقیق سرعت‌ها و عمق لایه‌های مدل سرعتی یک‌بند بهینه.

عمق لایه بر حسب km	سرعت موج P بر حسب km/Sec
۰	۵.۶۸
۵	۵.۹۵
۱۵	۶.۱
۴۶	۷.۹۷

جدول ۳. تصحیحات زمانی مربوط به ایستگاه‌ها. ایستگاه قوچان (QHU) به علت واقع شدن در حدود مرکز شبکه، در حکم ایستگاه مبدا با تصحیح ایستگاهی صفر در نظر گرفته شده است.

نام ایستگاه	نام اختصاری	تصحیح زمانی
قوچان	QHU	0.00
اخلمد	AKL	-0.16
امام قلی	EMG	-0.02
اسفراین	SFR	-0.14
شیروان	SHV	-0.08
میامی	MYA	-0.14
کارده	KRD	0.07
پایه	PAY	-0.09
مغان	MOG	0.33
مشهد	MHI	0.19
مشهد	SRO	-0.20

۴ بحث و نتیجه‌گیری

به منظور برآورد اولیه وضعیت لایه‌بندی، سرعت امواج

- provinces, J. Earthquake prediction Research, 7, 465-495.
- Rogozhin, E. A., 1995, Tectonic position and geologic manifestations of the Ashkhabad earthquake, Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences.
- Tchalenko, J. S., 1975, Seismicity and structure of the Kopeh Dagh (Iran, USSR) Landon, A.G.B.DA, 278(1275), 1-28.

ایستگاهی حاصل در هر مورد t برنامه ولست با سبک تک‌رویدادی مجدداً اجرا شد و چگونگی تغییرات باقی‌مانده کلی با آنچه که از مدل اولیه به‌دست آمده بود، مورد مقایسه قرار گرفت. ایستگاه قوچان به‌علت واقع شدن در حدود مرکز شبکه، درحکم ایستگاه مبدا با تصحیح ایستگاهی صفر در نظر گرفته شد. و بیشترین مقدار تصحیح زمانی، مربوط به ایستگاه مغان بود. از مدل سرعتی بهینه یک‌بُعدی به‌دست آمده می‌توان در یافتن مدل سرعتی سه‌بُعدی پوسته استفاده کرد. مدل سه‌بُعدی به‌دست آمده با روش توموگرافی لرزه‌ای، تا حد بسیار زیادی به درستی مدل یک‌بُعدی بستگی دارد.

منابع

- بایرام‌نژاد، ا.، میرزایی، م. و قیطانچی، م. ر.، ۱۳۸۶، تعیین مدل پوسته بهینه برای شمال غرب ایران، با استفاده از برگردان همزمان زمان سیر امواج زلزله های محلی، نشریه تحقیقاتی فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۳)، ۴۷-۵۹.
- Ambraseys, N., and Melville, C., 1982, A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 219 pp.
- Berberian, M., 1981, Active faulting and tectonics of Iran: Zagros-Hindukush-Himalaya Geodynamic evolution Gupta, H. K. and Delany, F. M. (eds), Am. Geophys. Union and Geol. Soc. Am., Geodyn., 3, 33-69.
- Dehghani, G. A. and Makris, J., 1983, The gravity field and crustal structure in Iran, in geodynamic project (geotraverse) in Iran, Geol. Surv. Iran, 51, 51-67.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Gheitanchi, M. R. and Bolourchi, M. J., 2006, Strike-slip faulting, rotation and along-strike elongation in the Kopeh Dagh Mountains, NE Iran, Geophys. J. Int., 166, 1161-1177.
- Jackson, J. A. and McKenzie, D. P., 1984, Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between Western Turkey and Pakistan, Geophys. J. R. astr. Soc., 77, 185-264.
- Kissling, E., 1995, Institute of Geophysics, ETH Zuerich, Program VELEST USERS GUIDEShort Introduction.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major Seismotectonic