

تأثیر شدت دگرگونی و میزان تخلخل بر سرعت انتشار موج P در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای (زون سنندج سیرجان - منطقه سد زاینده‌رود)

لطیف ضمدی*

*دانشگاه تربیت‌معلم، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی.

دریافت مقاله: ۸۱/۶/۱۳۸۱ پذیرش مقاله: ۸۱/۱۱/۱۳۸۱

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش لرزه‌نگاری سطحی نحوه توزیع سرعت موج P در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای منطقه سد زاینده‌رود (زون سنندج- سیرجان) بررسی می‌شود. مطالعات صحرایی با سیستم لرزه‌نگار ۲۴ کاناله دیجیتال انجام شده است. تحلیل داده‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد که سرعت موج P در سنگ‌های دگرگونی منطقه با عمق به صورت خطی افزایش می‌یابد و از معادله $v(z) = 3200 + 6/5 \cdot z$ تبعیت می‌کند. میزان تغییرات سرعت موج P برحسب شدت دگرگونی (از اسلیت به شیب) از سطح تا عمق ۲۵۰ متری به‌طور پیوسته از ۳۲۰۰ تا ۵۴۷۵ متر بر ثانیه با گرادیان سرعت ۶/۵ (ثانیه/۱) تغییر می‌کند. بالا بودن گرادیان سرعت (در سنگ‌های دگرگونی بین ۵/۵ تا ۵) نشان می‌دهد که وجود تنش‌های زمین ساخت عامل گسترش درزه‌ها و شکستگی‌ها در سنگ‌های دگرگونی منطقه است و تخلخل ثانویه در سنگ ایجاد می‌کند و به دلیل عملکرد فرسایش و هوازدگی در قسمت‌های سطحی، گرادیان تغییرات سرعت با عمق را تشدید می‌نماید. با استفاده از فرمول زمان متوسط، میزان تخلخل درزه‌ای برحسب شدت دگرگونی در سنگ‌های منطقه، از سطح تا عمق ۳۵۰ متری به‌طور پیوسته از ۵/۵ به کمتر از ۱ در صد کاهش می‌یابد.

کلیدواژه: سنگ دگرگونی، موج P، تخلخل، گرادیان سرعت

۱ مقدمه

درصد تغییر کند (پتاپوف، ۱۹۹۰). در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای، شدت دگرگونی، میزان تخلخل، نوع سیال پرکننده خلل و فرج و فشارهای جانبی عوامل مؤثر در سرعت موج P هستند. تأثیر عوامل ترمودینامیکی ناشی از فشار طبقات و شیب زمین گرمایی در اعماق چند صد متری در مقایسه با عوامل ذکر شده ناچیز است. هرچند در سنگ‌های دگرگونی، میزان تخلخل در مقایسه با سنگ‌های رسوبی کم است، اما فشارهای تکتونیکی و زمین ساخت جانبی در زون‌های ناآرام، موجب گسترش درزه‌ها و تخلخل ثانویه در سنگ می‌شود. جواهریان و بیدهندی (۱۳۷۲) مطالعات جامعی در تأثیر تخلخل بر سرعت انتشار موج P در ماسه سنگ‌ها انجام داده‌اند. کمربند دگرگونی در محدوده وسیعی از ایران در امتداد شمال غرب - جنوب شرق گسترش دارد. مطالعه خصوصیات لرزه‌ای سنگ‌های

افزایش سرعت موج P با عمق در پوسته قاره‌ای پدیده شناخته شده‌ای است. داده‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد که افزایش فشار و دما، تأثیر متفاوتی بر سرعت امواج در سنگ‌های پوسته دارند به‌طوری که افزایش فشار به صورت گرادیان مثبت و افزایش دما به صورت گرادیان منفی بر سرعت امواج تأثیر می‌گذارد. درجه دگرگونی، تخلخل درزه‌ای و نوع ترکیب کانی شناختی از عوامل مهم در میزان سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های دگرگونی است. در قسمت‌های آرام پوسته زمین در صورتی که نوع ترکیب کانی شناختی سنگ تغییر نکند و شدت دگرگونی و تخلخل درزه‌ای نیز در سنگ وجود نداشته باشد، تغییرات سرعت موج P با عمق به کندی صورت می‌گیرد. در سنگ‌های یکپارچه، تغییر فشار طبقات به میزان ۲۵ مگاپاسکال که معادل افزایش عمق به اندازه ۱ کیلومتر است، سبب می‌شود که سرعت به میزان ۲ تا ۳

می‌شود. وجود زون‌های فرسایش یافته، هوازده و خرد شده توده‌های سنگی در سطح گسترش دارد و به دلیل عملکرد شدید فرسایش، ریخت‌شناختی نسبتاً همواری را در منطقه ایجاد کرده است. توده‌های سنگی عموماً به رنگ سبز و قهوه‌ای دیده می‌شوند.

از سنگ‌های رسوبی منطقه می‌توان به تناوب، به لایه‌های ماسه سنگی، شیلی و آهکی ژوراسیک اشاره کرد که در قسمت‌هایی از منطقه مورد مطالعه، رخنمون دارند. این توده‌های سنگی، تحت تأثیر فرایندهای زمین‌ساختی، خرد شده و گسلیده است. به نظر می‌رسد که توده‌های سنگی ژوراسیک با همبری گسلی در کنار توده‌های دگرگونی واقع شده‌اند. توده‌های آهکی کرتاسه و کنگلومرای قرمز رنگ در منطقه، ارتفاعات معروف کماسون را تشکیل می‌دهند و به نظر می‌رسد به صورت یک همبری گسلی در تماس با توده‌های سنگی ژوراسیک می‌باشند.

۳ روش مطالعه

برای مطالعه نحوه توزیع سرعت موج P در سنگ‌های دگرگونی منطقه سد زاینده‌رود از روش لرزه‌نگاری سطحی استفاده شده است. عملیات لرزه‌نگاری در دو امتداد عمود بر هم اجرا شده‌اند. در محدوده‌ای به طول ۲/۲ کیلومتر در راستای شمال غرب - جنوب شرق (NW-SE) برداشت‌ها به صورت هم‌جهت با ساختارهای عمومی زمین‌ساختی (۵ برداشت لرزه‌ای) و در جهت عمود بر آن (تعداد ۵ برداشت عمودی) اجرا شده‌اند. چشمه‌های امواج به صورت انفجاری (دینامیت) است. بسته به موقعیت چشمه‌های انفجاری نسبت به نزدیک‌ترین ژئوفون در هر برداشت و میزان مواد مصرفی، عمق چال‌های انفجار از ۲ تا ۴ متر متغیر بوده است. نگاشت‌های لرزه‌ای به صورت رقومی با سیستم لرزه‌نگار ۲۴ کاناله ثبت شده است. برای ثبت مولفه‌های قائم ارتعاش‌ها از ژئوفون‌های نوع P که فاصله بین آنها ۱۵ متر است استفاده شده است. طول هر رد در نگاشت‌های لرزه‌ای ۳ ثانیه و فاصله نمونه‌برداری زمانی ۲ میلی‌ثانیه است.

این کمربند دگرگونی از جنبه‌های متفاوت دارای اهمیت است. با توجه به گسترش وسیع ناحیه دگرگونی در کشور، شناخت رفتار لرزه‌ای این زون دگرگونی از یک سو می‌تواند علاوه بر افزایش اطلاعات محلی سنگ‌ها، اطلاعات وسیع ناحیه‌ای از سطح خارجی پوسته را افزایش دهد و از سوی دیگر مطالعه خصوصیات لرزه‌ای سنگ‌های این زون به دلیل گسترش روز افزون فعالیت‌های عمرانی، نظیر طرح انتقال آب سد زاینده‌رود به کاشان و پروژه‌های ملی دیگر، دارای اهمیت است. در این مطالعه سعی شده است تا رفتار لرزه‌ای و نحوه توزیع سرعت موج P در سنگ‌های دگرگونی ناحیه سد زاینده‌رود، که بدون لایه پوششی در سطح، رخنمون دارد، بررسی شود.

۲ موقعیت و زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه به وسعت حدود ۵ کیلومتر مربع در ۱۵۰ کیلومتری غرب اصفهان و در ۱۰ کیلومتری جنوب شرق روستای چادگان در منطقه تأسیسات سد زاینده‌رود واقع شده است. این منطقه به شدت تکتونیزه شده و تحت تأثیر تنش‌های زمین‌ساختی شدید قرار دارد. روند عمومی ساختارهای زمین‌ساختی از شمال غرب به جنوب شرق است و از روند عمومی زاگرس پیروی می‌کند (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). وقوع پدیده دگرگونی در توده‌های سنگی ناحیه، کاملاً گسترده و بارز است. عملکرد گسل‌های موازی با روند ساختارهای زمین‌ساختی در منطقه موجب قرار گرفتن قطعات سنگی متفاوت در کنار یکدیگر و در میان توده‌های سنگی دگرگونی شده است. زون‌های برشی و خرد شده ناشی از عملکرد فرایندهای دگرسانی و زمین‌ساختی، در منطقه گسترش دارد.

از نظر سنگ‌شناسی منطقه از مجموعه سنگ‌های دگرگونی و رسوبی تشکیل شده است. سنگ‌های دگرگونی ضعیف مانند اسلیت و فیلیت، سنگ‌های عمده منطقه را تشکیل می‌دهند و به میزان کم‌تری شیست نیز دیده می‌شود. وجود رگه‌هایی از تالک اسلیت و آپلیت و کوارتز هم درون این توده‌های سنگی مشاهده

۴ تحلیل داده‌ها

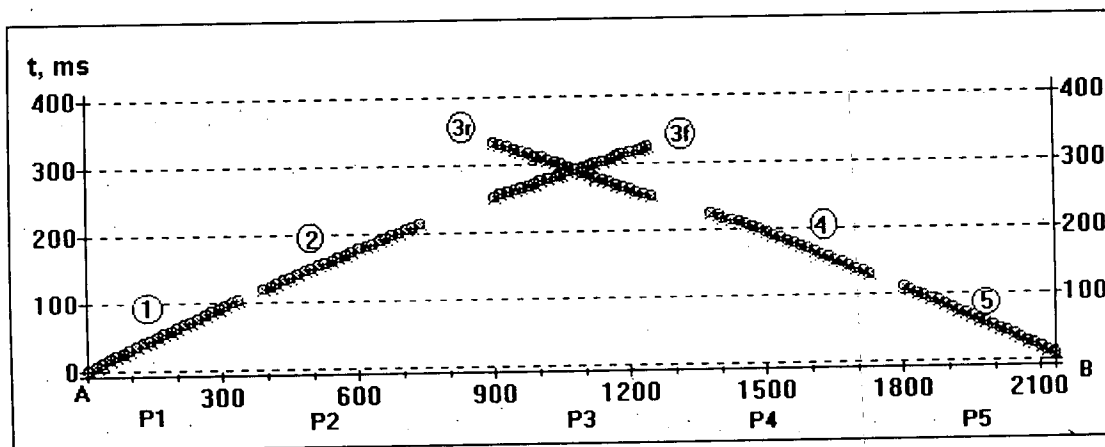
جهت (NW-SE) است و نشان می‌دهد که سنگ‌های دگرگونی منطقه مورد مطالعه عمدتاً در جهت قائم دارای غیر یکنواختی‌اند. برای حل وارون و تعیین روند تغییرات سرعت موج P با عمق، یکی از منحنی‌های مستقیم و یا وارون پروفیل بلند در شکل ۱ کافی است. در شکل ۲ نگاشت‌های لرزه‌ای وارون مربوط به پروفیل بلند آمده است.

۵ تفسیر کمی داده‌ها و مدل سرعتی محیط

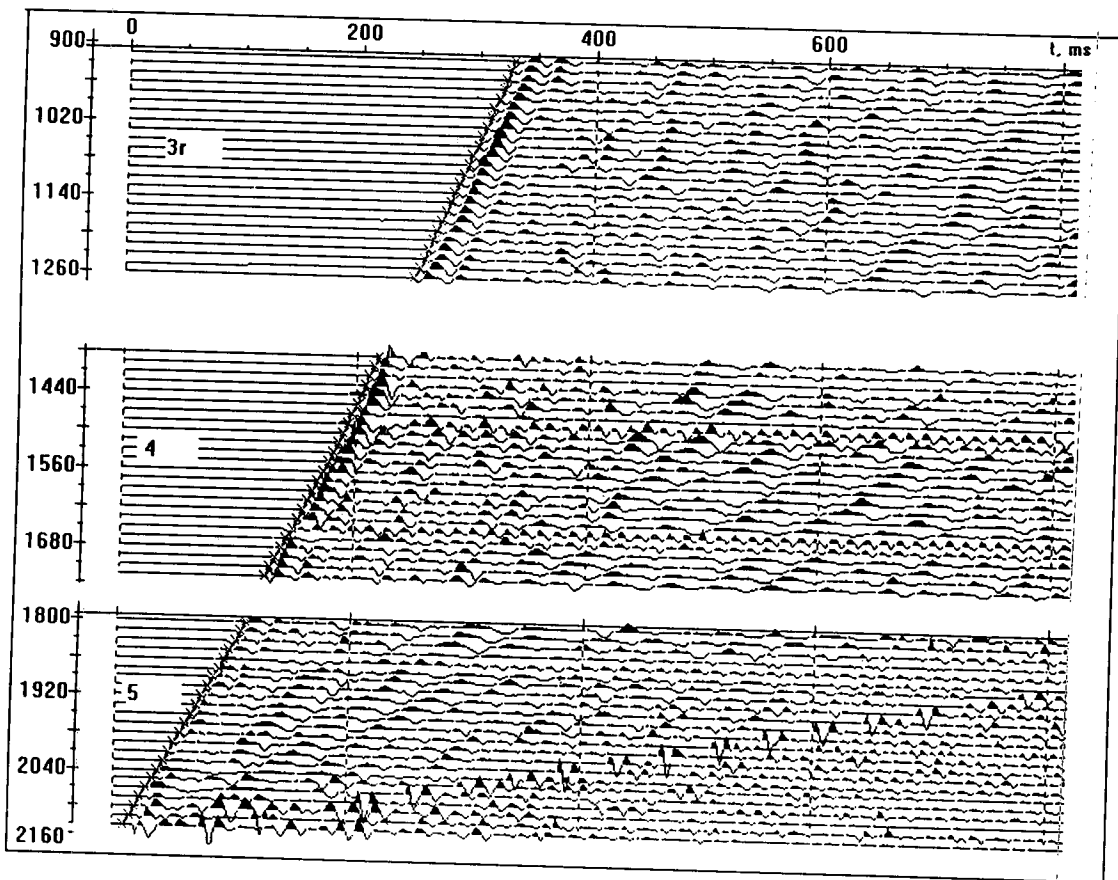
برای تعیین مدل سرعت در سنگ‌های دگرگونی منطقه، روش هرگلوئس - ویچرتس و چی بی شف (گارایونوف، ۱۹۹۲) برای حل وارون انتخاب شده است. زیرا منحنی‌های زمان-مسافت (شکل ۱) نشان می‌دهند که در سنگ‌های دگرگونی منطقه، سرعت موج P با عمق، به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. در این روش برای هر نقطه دلخواه x_n از منحنی زمان-مسافت، سرعت ظاهری v_n^* محاسبه شده که به عمق حداکثر نفوذ هر پرتو (z_m) تعلق دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$z_m(x_n) = \frac{\Delta x}{\pi} \sum_{x_1=0}^{x_1=x_n} \log \left[\frac{v^*(x_n)}{v^*(x_1)} + \sqrt{\left[\frac{v^*(x_n)}{v^*(x_1)} \right]^2 - 1} \right] \quad (1)$$

شکل ۱ موقعیت پروفیل‌های P1 تا P5 و منحنی‌های مسافت-زمان مستقیم و وارون را در امتداد NW-SE در چارچوب یک پروفیل ترکیبی نشان می‌دهد. در این شکل منحنی‌های ۱، ۲ و ۳، منحنی‌های مسافت-زمان مستقیم از پروفیل‌های P1 تا P3 و منحنی‌های ۴، ۵ و ۶ نیز منحنی‌های مسافت-زمان وارون از پروفیل‌های P3 تا P5 هستند که به ترتیب از چشمه‌های انفجار در نقطه A و B حاصل شده‌اند. انحنای ملایم در این منحنی‌ها و دینامیک امواج ثبت شده در رسیده‌های اول نشان می‌دهد که این امواج از نوع شکست مرزی‌اند و به علت تغییرات پیوسته و گرادپانی خواص کشسانی سنگ‌های دگرگونی منطقه با عمق ایجاد شده است. منحنی‌ها نشان می‌دهند که سرعت انتشار موج P در سنگ‌های دگرگونی منطقه به تدریج با عمق افزایش می‌یابد و تا بیشترین عمق نفوذ پرتو در محدوده مورد مطالعه، مرز شکستی ناشی از تغییرات شدید سنگ‌شناختی مشاهده نمی‌شود. منحنی‌های زمان-مسافت در پروفیل بلند (NW-SE) شکل ۱ مقارن هستند و نشان می‌دهد که خواص کشسانی سنگ‌های دگرگونی منطقه در جهت (NW-SE) یکنواخت است و غیر یکنواختی عمده در جهت قائم به چشم می‌خورد. از نظر سینماتیکی و دینامیکی امواج ثبت شده در نگاشت‌های لرزه‌ای پروفیل‌هایی که عمود بر امتداد (NW-SE) اجرا شده‌اند همانند



شکل ۱. مجموعه منحنی‌های مسافت-زمان در امتداد پروفیل بلند.



شکل ۲. نگاشت‌های لرزه‌ای وارون در پروفیل‌های P3 تا P5.

در این رابطه، Δx ، فاصله بین ژئوفون‌های متوالی است. منحنی تغییرات سرعت موج P با عمق $v(z)$ برای هر زوج مدل سرعت در محیط دگرگونی مورد مطالعه بعد از حل وارون (شکل ۳) نشان می‌دهد که روند تغییرات سرعت موج P با عمق خطی افزایش می‌یابد و با اعمال رگرسیون خطی، تابع تغییرات آن با عمق به صورت زیر است:

$$v(z) = 3200 + 6/5 \cdot z \quad (2)$$

۶ بحث و بررسی تخلخل

نتایج مطالعات لرزه‌ای نشان می‌دهد که روند افزایش سرعت موج P در سنگ‌های دگرگونی منطقه با عمق، خطی و تابع تغییرات آن

سرعت با عمق نشان می‌دهد که سنگ‌های منطقه تحت تأثیر عوامل دگرگونی (فشار و دما) که در جهت شبه قائم عمل نموده تشکیل شده‌اند. سنگ‌های دگرگونی منطقه دارای سنگ مادر پلیتی‌اند که از دگرگونی رس‌سنگ‌ها، شامل کانی‌های رسی، کوارتز و احتمالاً پلاژیوگلاز و یا کانی‌های دیگر تشکیل شده است. در اثر افزایش فشار و دما در فرایند دگرگونی ضعیف با تبدیل رس‌ها به کلریت، سنگ به اسلیت تبدیل شده است. با افزایش فشار و دما با عمق و تبدیل کلریت به سرسیت و مسکویت و احتمالاً کمی بیوتیت، سنگ به فیلیت تبدیل شده است. نتایج گمانه‌های حفاری تا عمق ۴۵۰ متری در محدوده تغییرات تدریجی، ساختار سنگ دگرگونی و فولیاسیون را تأیید می‌کند.

پت کی ویچ (۱۹۷۶) نتایج، حاصل از رابطه زمان متوسط را برای سنگ‌های دگرگونی، بسیار خوب ارزیابی می‌کند. برای تعیین میزان تخلخل در سنگ‌های دگرگونی منطقه، فرمول زمان متوسط را به صورت زیر می‌توان به کار برد:

$$\frac{1}{v_p} = \frac{k_p}{v_1} + \frac{1-k_p}{v_2} \quad (3)$$

که در آن v_p ، v_1 و v_2 به ترتیب سرعت موج طولی در سنگ دگرگونی منطقه، سیال و یا گاز موجود در خلل و فرج و ماتریکس هستند. k_p نیز در این رابطه ضریب تخلخل کل است. میزان سرعت موج P در کانی‌های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ در منطقه که به طور عمده کوارتز، مسکویت و بیوتیت‌اند، نزدیک است و به طور متوسط ۶۱۵۰ متر بر ثانیه از کتاب پتروفیزیک (دورتمن، ۱۹۸۴) تنظیم شده توسط بلیکوف و همکاران (۱۹۷۰) استخراج شده است.

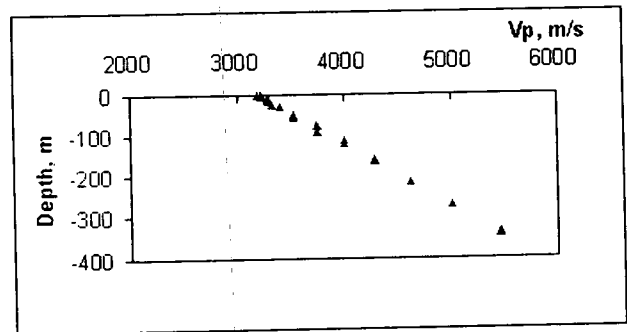
بر اساس گمانه‌های حفاری شده در منطقه، تا عمق ۴۵۰ متر وجود آب گزارش نشده است. از سوی دیگر نتایج لرزه‌نگاری نیز نشان می‌دهد که سرعت موج P با عمق به طور یکنواخت و پیوسته افزایش می‌یابد و افزایش ناگهانی در سرعت دیده نمی‌شود. بنابراین سنگ‌های دگرگونی منطقه خشک است. برای شرایط مشابه می‌توان سرعت پرکننده حفره‌ها (v_1) را ۳۵۰ متر بر ثانیه منظور نمود (بلیکوف و همکاران، ۱۹۷۰).

بنابراین برای تعیین نحوه توزیع میزان تخلخل در سنگ‌های دگرگونی منطقه عامل‌های زیر را در فرمول زمان متوسط (تبدیل یافته $k_p = f(v_p, v_1, v_2)$) جایگزین می‌کنیم:

$$z \quad v_p(z) = 3200 + 6/5 \cdot z$$

می‌کند، $v_1 = 350$ متر بر ثانیه و $v_2 = 6150$ متر بر ثانیه.

شکل ۴ تغییرات میزان تخلخل را برحسب شدت دگرگونی از سطح به عمق نشان می‌دهد که با قرار دادن عامل‌های سرعت سنگ‌های منطقه در فرمول زمان متوسط، محاسبه شده است. براساس محاسبات انجام شده میزان تخلخل در سنگ‌های دگرگونی منطقه از سطح با تخلخل ۵/۵ در صد (اسلیت) به کم‌تر



شکل ۳. روند تغییرات سرعت موج P با عمق بعد از حل وارون.

تخلخل سنگ‌های دگرگونی منطقه مورد مطالعه ماهیت ساختی و بافتی دارند. در خصوص تخلخل ساختی می‌توان به تخلخل‌های مسدود محلی و تخلخل‌هایی که به صورت کانالی گسترش دارند و با ساخت سنگ مرتبط هستند اشاره کرد. در مورد تخلخل بافتی می‌توان به تخلخل صفحه‌ای در بین سطوح تورق و یا تخلخل ناشی از گسترش درزه‌ها در سنگ اشاره نمود. نتایج بررسی‌های تجربی روی مدل‌ها (ماگید، ۱۹۷۸) نشان داده است که تأثیر تخلخل ساختی بر سرعت امواج در سنگ بسیار کم و تأثیر تخلخل بافتی شدید است. از سوی دیگر میزان گرادیان سرعت که برای مجموعه سنگ‌های دگرگونی مشاهده شده است بین ۵ تا ۵ است (گاراینوف و همکاران، ۱۹۹۲). به نظر می‌رسد که میزان گرادیان سرعت در سنگ‌های دگرگونی منطقه (۶/۵) دارای بی‌هنجاری است.

منطقه در زون نا آرام و فعال تکتونیکی سنندج - سیرجان واقع شده است که فازهای تکتونیکی مهمی نیز در آن رخ داده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). شواهد صحرائی نیز نشان می‌دهد که منطقه به شدت تحت تأثیر تنش‌های زمین‌ساختی قرار دارد. این عوامل سبب شده است تا درزه‌ها و شکستگی‌ها در سنگ‌های دگرگونی منطقه گسترش یابد و تخلخل ثانویه و بافتی را افزایش دهد. در قسمت‌های سطحی‌تر، عوامل فرسایش و هوازدگی در طول زمان میزان تخلخل را افزایش داده و موجب افزایش گرادیان سرعت شده است.

میزان گرادیان سرعت در سنگ‌های دگرگونی ناحیه مورد مطالعه (محدوده سد زاینده‌رود) ناشی از عملکرد همزمان پدیده دگرگونی و فعالیت‌های زمین‌ساخت در منطقه است که موجب گسترش درزه‌ها و تخلخل ثانویه در سنگ شده است و به علت هوازگی از سطح، میزان گرادیان سرعت را با عمق افزایش داده است.

میزان سرعت موج P به‌طور پیوسته از سطح تا عمق به مقدار ۳۵۰ متر از ۳۲۰۰ تا ۵۴۷۵ متر بر ثانیه تغییر می‌کند که با شواهد سنگ‌شناختی و تغییر تدریجی وضعیت سنگ‌شناختی (اسلیت به شیست) همخوانی خوبی دارد.

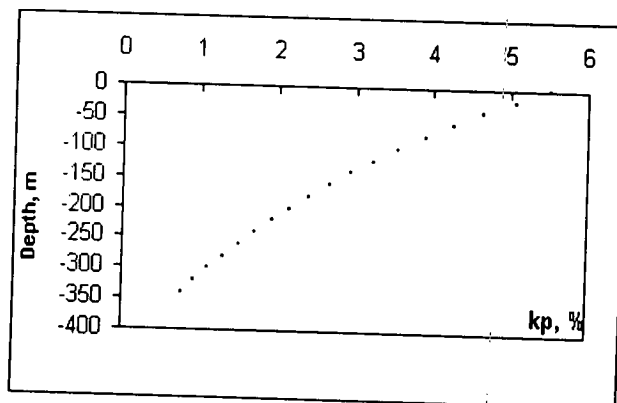
میزان تخلخل در سنگ‌های دگرگونی منطقه از سطح تا عمق ۳۵۰ متری از ۵/۵ تا کم‌تر از ۱ درصد (از اسلیت به شیست) تغییر می‌کند و بالا بودن میزان تخلخل در عمق‌های کم، نشان دهنده میزان هوازگی سطحی در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه بالا است.

تشکر و قدردانی

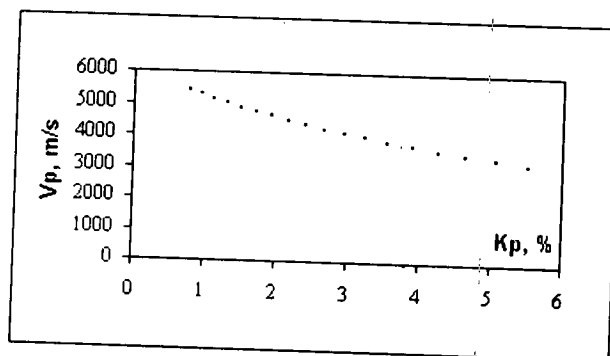
بدین‌وسیله نگارنده از جناب آقای دکتر فریبرز مسعودی و دکتر بهزاد مهرابی به خاطر مشاوره علمی و همچنین داوران محترمی که مقاله حاضر را مطالعه کرده‌اند و با نظرات خود آن را پررنگ نموده‌اند و همچنین آقای مهندس بابک ابراهیمی که اطلاعات حفاری منطقه را در اختیار اینجانب قرار داده‌اند تشکر و قدردانی می‌نماید.

منابع

جواهریان، ع. و نبی‌بهدندی، م، ۱۳۷۲، اثر تخلخل بر سرعت موج تراکمی در ماسه سنگ‌ها و مقایسه روابط سرعت با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی: ن. فیزیک زمین و فضا، ۲۰ (۱)، ۱۱-۳۱.
درویش‌زاده، ع، ۱۳۷۰، زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیر کبیر.



شکل ۴. تغییرات میزان تخلخل با عمق در سنگ‌های دگرگونی منطقه.



شکل ۵. تغییرات میزان تخلخل با سرعت موج P در سنگ‌های دگرگونی منطقه.

از ۱ درصد در عمق ۳۵۰ متری (در شیست) کاهش می‌یابد. در شکل ۵ تغییرات میزان تخلخل در سنگ‌های دگرگونی منطقه با سرعت موج P آمده است. این نمودار نشان می‌دهد بین تخلخل و سرعت موج P رابطه عکس وجود دارد به طوری که با کاهش تخلخل از ۵/۵ درصد به حدود کم‌تر از ۱ درصد، میزان سرعت از ۳۲۰۰ متر بر ثانیه به ۵۴۷۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد.

۷ نتیجه‌گیری

در سنگ‌های دگرگونی منطقه سد زاینده‌رود، تابع تغییرات سرعت موج P با عمق خطی است و برای محدوده عمقی مورد مطالعه (از صفر تا ۳۵۰ متری) از رابطه $v(z) = 3200 + 6/5 \cdot z$ تبعیت می‌کند. میزان گرادیان سرعت با عمق مثبت و برابر ۶/۵ (ثانیه/۱) است.

- Belikov, B. P., Aleksandrov, K. S. and Ryzhova, T. V., 1970, Elastic properties of rock-forming minerals and rocks. Moscow, Nauka.
- Dortman, N. B., 1984, Physical properties of rocks and mineral deposits (Petrophysics), A Geophysicist's Handbook. Moscow, Nedra.
- Garainov, N. N., 1992, Application of seismoacoustic methods in Hydrogeology and Engineering Geology, Moscow, Nedra.
- Magid, M. S., 1978, Physical properties of minerals and rocks, Given high thermodynamic parameters. Baky, ELM.
- Petkevich, G. I., 1990, The acoustic characteristic of geological media. Kiev, Naukova Domka, 1976.
- Potapov, O. A. Interpretation of seismicData. Handbook, Moscow, Nedra.
- Wyllie, J. R. M., Gregory, A. R. and Gardner, L. W., 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics, **21**, 41-70.