

# اثر تنش برشی بر جدایش امواج برشی تحلیلی آزمایشگاهی

پژوهش‌نفت

سال هفدهم  
شماره ۱-۵۶  
صفحه ۹۲-۸۴

علی میناچی<sup>۱\*</sup>، روح‌اله کیمیایی فر<sup>۲</sup>، فریبرز طالبی<sup>۱</sup> و مجید نبی بیده‌ندی<sup>۲</sup>

۱- پژوهشگاه صنعت نفت

۲- مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

ali.masaghi@gmail.com

## مقدمه

ژئوفیزیک‌دانان اکتشافی در خلال چند دهه گذشته، در مورد ناهمسانگردی سرعتی، مطالعات فراوانی انجام داده‌اند؛ اما در چند سال گذشته رابطه این موضوع با اکتشاف و توسعه منابع هیدروکربنی باعث شده است تا اهتمام بیشتری برای شناخت موضوع گمارده شود. تأثیرات ناهمسانگردی بر داده‌های موج تراکمی، بسیار مشاهده شده است. اما این تأثیرات نوعاً چنان کوچک هستند که ارتباط دادن آن‌ها به وجود ناهمسانگردی در مرحله تفسیر ژئوفیزیکی و ارتباط آن‌ها با زمین‌شناسی، مشکل است. در مقابل در داده‌های موج برشی S، تأثیرات ناهمسانگردی سرعتی بسیار قابل توجه است. امواج برشی می‌توانند اطلاعات ترک‌های داخلی و نیز ساختار توزیع تنش را به سنگ‌های برجا منتقل کنند. چنین به نظر می‌رسد که در صورت وجود دانش و تکنولوژی کافی، با استفاده از امواج برشی بتوان اطلاعات مربوط به توزیع تنش و نیز ترک‌های موجود در سنگ را که در زمره اطلاعات پر اهمیت هستند به دست آورد.

در سال ۱۹۷۸، برای اولین بار به پیشنهاد کرامپین<sup>۱</sup> و همکاران، جدایش موج برشی بر روی زمین لرزه‌های کوچک

## چکیده

رفتار موج برشی در عبور از محیط ناهمسانگرد موضوعی است که به‌عنوان یکی از نمونه‌های بارز ناهمسانگردی سرعتی، ذهن پژوهشگران علوم زمین را به خود مشغول کرده است. پدیده جدایش امواج برشی که شاید بزرگ‌ترین نتیجه شناخته شده عبور موج برشی از هرگونه ناهمسانگردی باشد، می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی از ویژگی‌های ناهمسانگردی در اختیار محققین قرار دهد. در این مطالعه، تأثیر تنش برشی بر نحوه تغییر پارامترهای اصلی امواج برشی جدا شده، بررسی شده است و مقایسه‌ای نیز بین طیف دامنه و طیف فرکانسی موج سریع و موج کند در یک نمونه سنگ کربناته در آزمایشگاه و با استفاده از امواج فرا صوت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تنش برشی بر نمونه‌های سنگی، دامنه مؤلفه عمودی بر راستای تنش برشی قوی‌تر می‌شود و این مهم می‌تواند در تشخیص راستای ناهمسانگردی‌ها و با اطلاع از نوع ناهمسانگردی، اطلاعاتی از وضعیت تنش ناحیه را ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی، موج برشی، ناهمسانگردی جدایش

1. Crampin

امواج برشی انتشار می‌یابند که در جهت‌های طبیعی و ذاتی محیط، قطبی شده‌اند. این جهت‌ها عبارتند از جهت موازی ناهمسانگردی و نیز جهت عمود بر امتداد ناهمسانگردی. در این صورت، بردار موج اولیه موج برشی به صورت تجزیه به دو مؤلفه برداری دیگر نمایان می‌شود. مؤلفه اول در جهت موازی ناهمسانگردی قطبی شده است و مؤلفه دوم در جهت عمود بر راستای ناهمسانگردی می‌باشد.

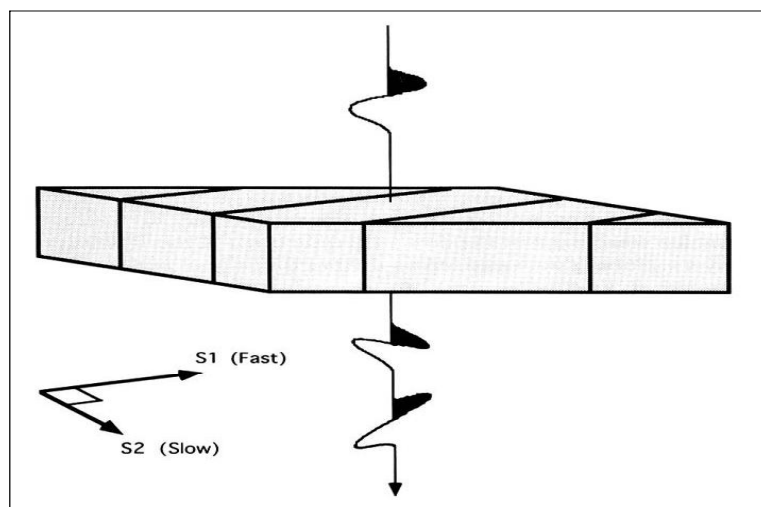
مؤلفه اول یعنی مؤلفه موازی ناهمسانگردی، سرعت بالاتری نسبت به دیگری دارد و لذا به آن موج سریع<sup>۲</sup> گفته می‌شود و به همین ترتیب به مؤلفه دوم یا مؤلفه عمودی، موج کند<sup>۳</sup> گفته می‌شود. به این اثر یعنی تجزیه موج برشی به دو مؤلفه عمود بر هم، جدایش امواج برشی<sup>۴</sup> نیز گفته می‌شود.

پدیده جدایش امواج برشی در واقع متأثر از ناهمسانگردی سنگ است که این ناهمسانگردی می‌تواند به دلایل مختلفی ایجاد شده باشد. به زبان دیگر جدایش امواج برشی فهم جدیدی از به تصویر درآوردن تغییر شکل دینامیک سنگ است. واضح است که این مسئله کاربرد فراوانی در استخراج نفت دارد. زیرا اگر اشراف کافی بر روی این مسئله وجود داشته باشد، می‌توان تغییرات مخزن را از روی تغییرات جدایش امواج برشی به تصویر کشید (شکل ۱).

تعریف شد [۱]. تقریباً در خلال ده سال بعد، یعنی تا سال ۱۹۸۶، پیشرفت‌هایی در مبانی نظری و محاسباتی این پدیده ارائه شد (کیت و کرامپین<sup>۱</sup>، ۱۹۷۷) و در طول سال‌های بعد از ۱۹۸۶، همگام با توسعه تکنولوژی مربوط به داده‌های رقومی و نیز در دسترس قرار گرفتن امکانات برداشت سه مؤلفه‌ای، فهم دقیق و مشاهده عمیق این موضوع امکان‌پذیر شد [۲]. جدایش موج برشی به صورت رسمی در سال ۱۹۹۰ در یک همایش علمی مورد بررسی قرار گرفت [۱۰-۳].

امواج برشی، بسته به جهت اصلی ارتعاش خود دسته‌بندی می‌شوند. امواجی را که جابه‌جایی ذرات در آن‌ها در صفحه عمودی حاوی نقاط منبع گیرنده و نقطه انعکاس صورت پذیرد،  $S_v$  می‌نامند و به امواجی که در صفحه عمودی بر صفحه تعریف شده و در بالا ارتعاش می‌کنند،  $S_H$  می‌گویند.

مشخصه‌های محیطی در انتشار امواج برشی بسیار تأثیرگذار می‌باشند. هندسه ترک‌ها و ریز درزه‌ها در لایه‌ها، درجه لایه بندی و جهت‌گیری ترجیحی مواد معدنی در یک واحد زمین شناسی، همگی از عوامل تأثیرگذاری هستند که درجه ناهمسانگردی یک محیط را تعریف می‌کنند و این به نوبه خود بر انتشار موج برشی در محیط تأثیرگذار است. در یک محیط ناهمسانگرد، تنها



شکل ۱- عبور موج برشی از یک لایه ناهمسانگرد و رخ دادن پدیده جدایش موج برشی (کرامپین ۱۹۸۴)

1. Keith and Crampin
2. Fast Wave
3. Slow Wave
4. Shear Wave Splitting

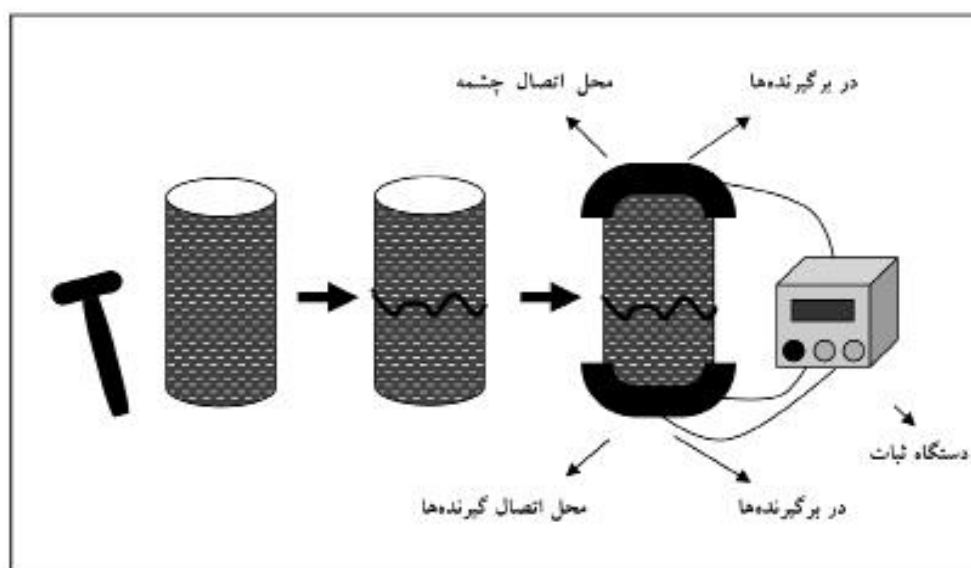
و امواج برشی جدا شده در لرزه‌شناسی، اکتشافی و زلزله شناسی معمولاً توسط دو عامل اساسی تعریف می‌شوند که عبارتند از زاویه چرخش و زمان تأخیر. در عملیات برداشت چند مؤلفه‌ای موج برشی، سیستم مختصات برداشت به وسیله واژه‌های جهت شعاعی، برای گیرنده‌های در راستای خطوط گیرنده<sup>۱</sup> و جهت عرضی برای گیرنده‌های در راستای خطوط چشمه<sup>۲</sup> تعریف می‌شود. در یک محیط حاوی شکست، موج سریع، عموماً در جهت راستای ترک‌ها قطبی می‌شود حال آنکه موج کند در جهت عمود بر راستای ذکر شده است. حال می‌توان زاویه چرخش را تعریف کرد. منظور از زاویه چرخش یا  $\theta$ ، زاویه بین جهت قطبش موج سریع و جهت شعاعی در دستگاه مختصات برداشت می‌باشد. تأخیر زمانی، برابر با اختلاف زمان رسید موج سریع و موج کند برای یک نقطه و در واقع برای یک گیرنده است [۱۱].

## روش کار

### مبانی تئوری آزمایش‌ها

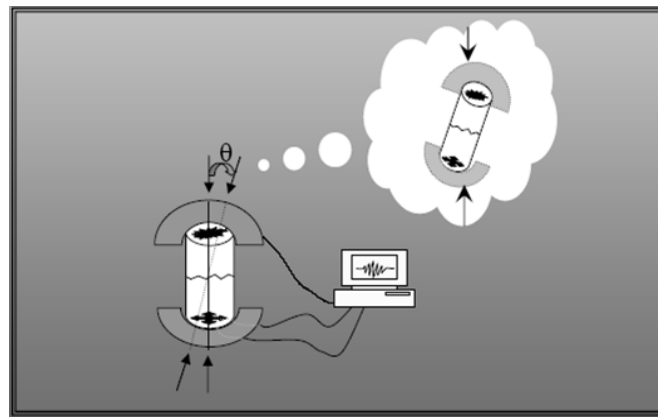
هدف از این پژوهش، بررسی اثر تنش برشی بر جدایش امواج برشی است. لذا نمونه به کار رفته بایستی تحت تأثیر تنش برشی واقع شود. از طرفی امواج برشی گذر کننده باید تحت تأثیر وجود یک ناهمسانگردی جدا شوند

لاجرم دچار پدیده جدایش می‌شود (شکل ۲). برای اعمال تنش برشی نیز نمونه به نحوی در درون دربرگیرنده‌ها قرار گرفت که تنش اعمال شده در راستای عمودی دارای یک مؤلفه برشی نیز باشد (شکل ۳). همانگونه که ملاحظه می‌شود به دلیل محدودیت‌های دستگاهی راستای اعمال تنش در امتداد قائم است و تنش اعمال شده دارای یک مؤلفه تراکمی و یک مؤلفه برشی است. هر چه زاویه محور استوانه‌ای شکل نمونه با امتداد قائم بیشتر باشد، مؤلفه تنش برشی بزرگتر خواهد بود (شکل ۴). در شکل ۲، محل قرار گرفتن چشمه و گیرنده‌ها مشخص شده است. چشمه موج برشی در یک سمت نمونه و گیرنده‌ها در سمت دیگر نمونه به صورتی قرار گرفته‌اند که

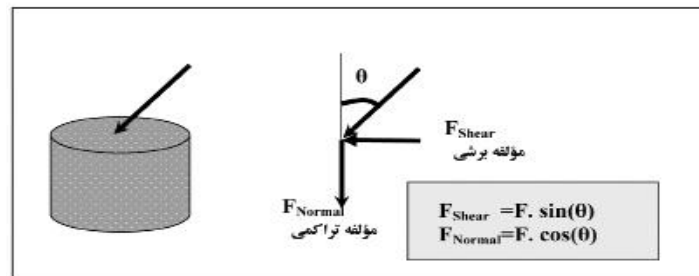


شکل ۲- آماده‌سازی نمونه برای انجام آزمایش

1. In-Line
2. Cross-Line



شکل ۳- نحوه اعمال تنش برشی به نمونه



شکل ۴- رابطه نیروی برشی و تراکمی با نیروی اعمال شده اولیه

به منظور تعیین دقیق زمان دریافت موج برشی طی یک سری آزمایش بر روی نمونه، زمان سیر موج در نمونه تعیین شد که در شکل ۵ آورده شده است.

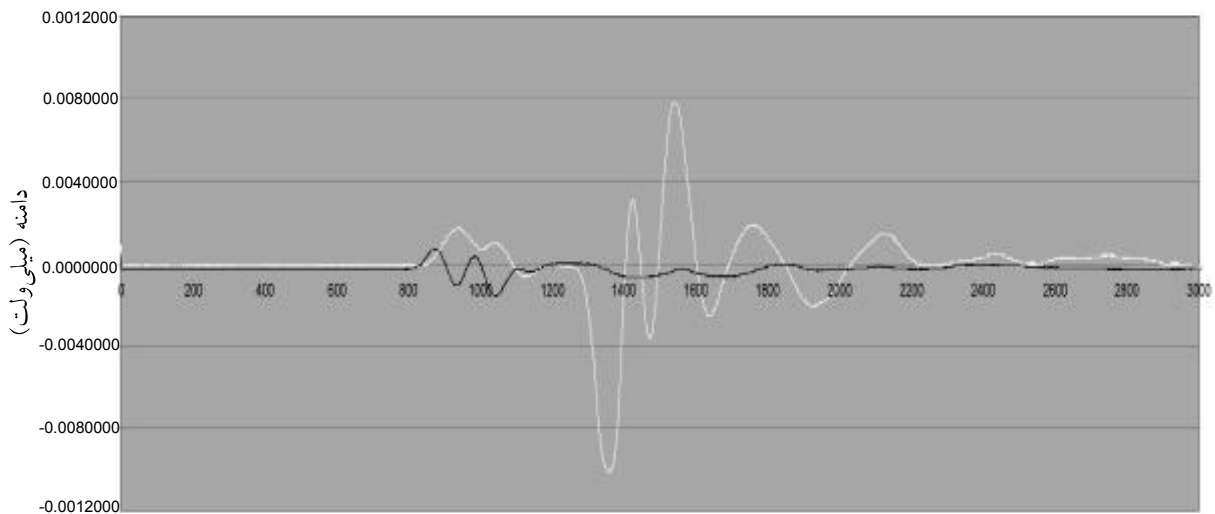
#### داده‌های اندازه‌گیری شده

اندازه‌گیری‌ها در حالات متفاوتی صورت گرفته است که عبارتند از اندازه‌گیری تحت تأثیر نیروی تنشی متفاوت و اندازه‌گیری تحت تأثیر زاویه اعمال نیروی تنشی متفاوت. این آزمایش بر روی نمونه مورد نظر با فشارهای ۱/۰، ۱، ۲ و ۳ مگا پاسکال و زوایای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه انجام گرفته است. هدف از این کار بررسی اثر تغییر تنش برشی بر پدیده جدایش موج برشی است. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار MATLAB تفکیک شدند و سپس نمایش اولیه آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار DADiSP صورت گرفت. بعد از این مرحله اقدامات بعدی مانند به دست آوردن طیف فرکانس انتخاب محلی قسمتی از داده‌ها به کمک امکانات موجود در نرم‌افزار DADiSP انجام گرفت. همچنین در پاره‌ای از موارد به منظور نمایش داده‌ها و مقایسه بین آن‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شده است.

یک گیرنده دارای جهت‌گیری موازی چشمه و دیگری دارای جهت‌گیری عمودی بر امتداد چشمه است. به گیرنده موازی چشمه، گیرنده یا مؤلفه موازی گفته می‌شود و بر همین اساس گیرنده دیگر را گیرنده عمودی یا مؤلفه عمودی می‌گوییم.

اگر نمونه انتخاب شده، نمونه‌ای همسانگرد بود، گیرنده عمودی نمی‌توانست هیچ سیگنالی را دریافت کند، اما در اینجا که یک ناهمسانگردی بر سنگ اعمال شده است (و خود سنگ نیز دارای ناهمگنی ذاتی نیز هست) بنا بر تئوری جدایش امواج برشی، گیرنده عمودی نیز دارای مؤلفه خواهد بود.

نکته مهم دیگر این است که به هر حال چشمه موج برشی نیز موج تراکمی تولید خواهد کرد و این موج تراکمی سریعتر از موج برشی حرکت می‌کند و این موضوع باعث می‌شود که گیرنده‌ها از ابتدا موج تراکمی را دریافت کنند و بایستی شناسایی موج برشی در سیگنال‌ها با دقت فراوان صورت پذیرد. شاید این نکته رهگشا باشد که موج برشی، دارای دامنه‌ای به صورت معمول بزرگتر و از فرکانسی پایین‌تر از موج تراکمی برخوردار است.



شکل ۵- مقایسه زمان رسید امواج برشی و تراکمی در نمونه کربناته (موج تراکمی شکل به رنگ تیره‌تر نمایش داده شده است) (محور قائم برحسب میلی‌ولت و محور افقی شماره نمونه می‌باشد).

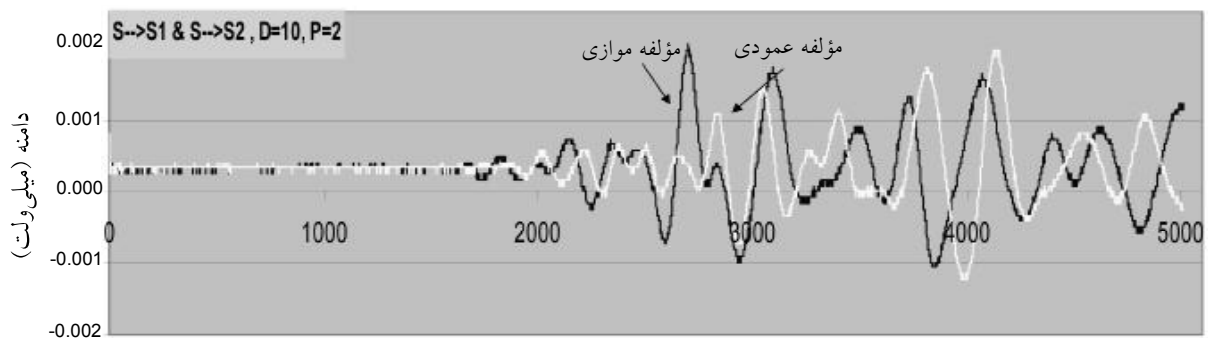
## نتایج و بحث

### جدایش موج برشی در داده‌های اندازه‌گیری شده

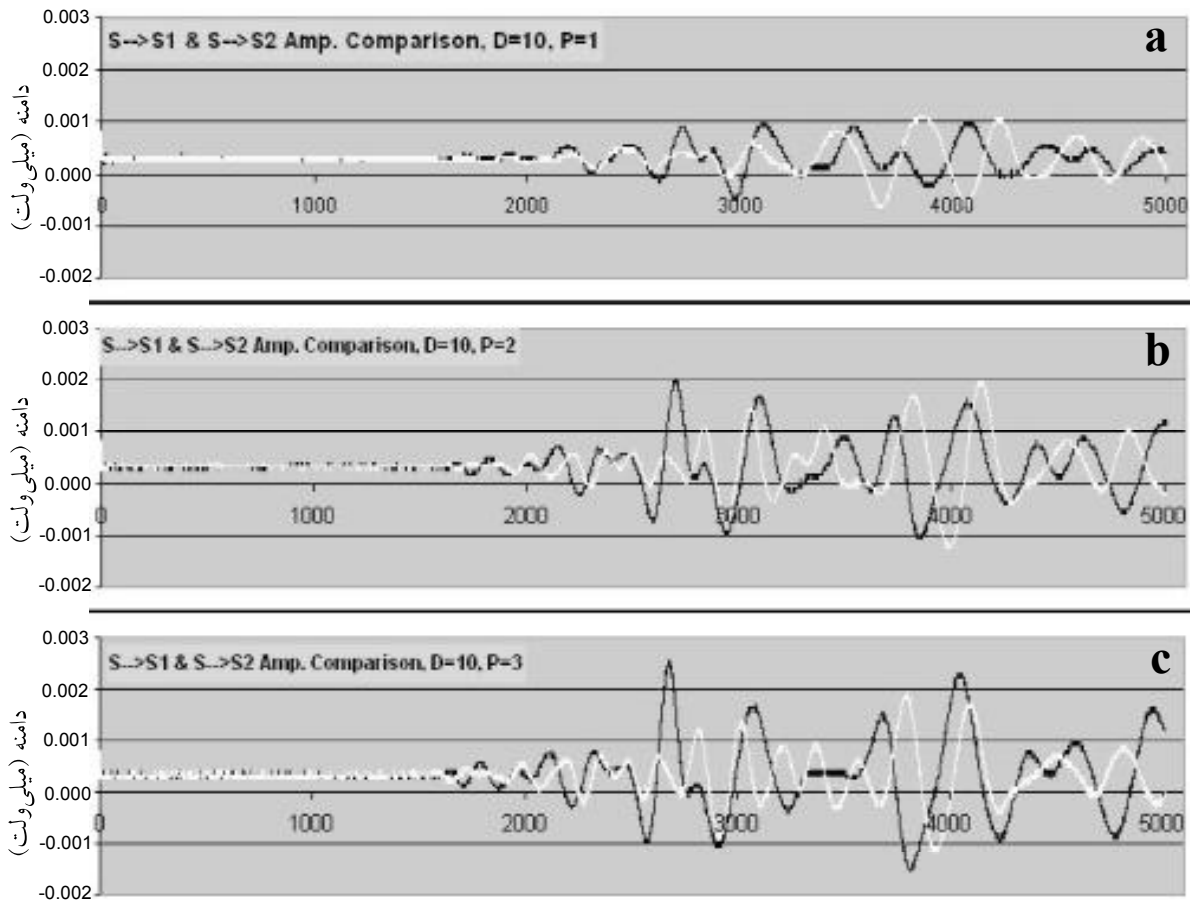
برای بررسی جدایش موج برشی با بهره‌گیری از داده‌های دریافت شده توسط دو گیرنده موج برشی که عمود بر یکدیگر قرار گرفته بودند، پتانسیل ردیابی این اثر به وجود می‌آید. در شکل ۶، داده‌های اندازه‌گیری شده درحالتی که تنش برشی تحت زاویه ۱۰ درجه و فشار ۲ مگاپاسکال اعمال شده را نشان می‌دهد. موج برشی درگیرنده عمودی، دیرتر از گیرنده موازی و در ابتدای هر سیگنال، ابتدا موج تراکمی دریافت شده است. همان‌طور که در شکل نیز پیداست، موج برشی در یک محیط با دو سرعت متفاوت حرکت کرده است.

### دامنه امواج جدا شده

دامنه مؤلفه عمودی و موازی تحت فشارهای متفاوت در شکل ۷ نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که افزایش فشار موجب می‌شود که دامنه سیگنال مربوط به گیرنده عمودی، اختلاف بیشتری با دامنه مؤلفه موازی داشته باشد. چنانچه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در فشار ۱ مگاپاسکال دامنه دو سیگنال در بازه‌های زمانی یکسان، اختلاف کمی دارند. در فشار ۲ مگاپاسکال، دامنه مؤلفه عمودی اگرچه یک افزایش در مقدار خود نشان می‌دهد اما نسبت به فشار ۱ مگاپاسکال اختلاف بیشتری با مؤلفه موازی پیدا کرده است. در فشار ۳ مگاپاسکال، اختلاف این دو مؤلفه به وضوح زیادتر شده است. افزایش دامنه



شکل ۶- جدایش موج برشی تحت زاویه تنش ۱۰ درجه و فشار ۲ مگاپاسکال، مقایسه‌ای بین زمان رسید موج برشی در مؤلفه عمودی و موازی بیانگر جدایش موج برشی می‌باشد. نگاشت تیره رنگ مربوط به مؤلفه موازی و نگاشت روشن رنگ مربوط به مؤلفه عمودی است. (فرکانس برحسب کیلو هرتز و دامنه سیگنال‌ها نیز برحسب میلی‌ولت اندازه‌گیری شده است)



شکل ۷- مقایسه دامنه مؤلفه عمودی و موازی تحت فشارهای متفاوت، نگاشت تیره رنگ معرف مؤلفه موازی است. (a) نگاشت مؤلفه موازی و عمودی در زاویه اعمال فشار ۱۰ درجه و فشار ۱ مگاپاسکال، (b) نگاشت مؤلفه موازی و عمودی در زاویه اعمال فشار ۱۰ درجه و فشار ۲ مگاپاسکال، (c) نگاشت مؤلفه موازی و عمودی در زاویه اعمال فشار ۱۰ درجه و فشار ۳ مگاپاسکال. (محور قائم برحسب میلی‌ولت و محور افقی شماره نمونه می‌باشد).

این مسئله در مورد هر دو مؤلفه صادق است. اما به نظر می‌رسد که برای مؤلفه عمودی شدت بیشتری دارد.

#### تحلیل فرکانسی امواج جدا شده

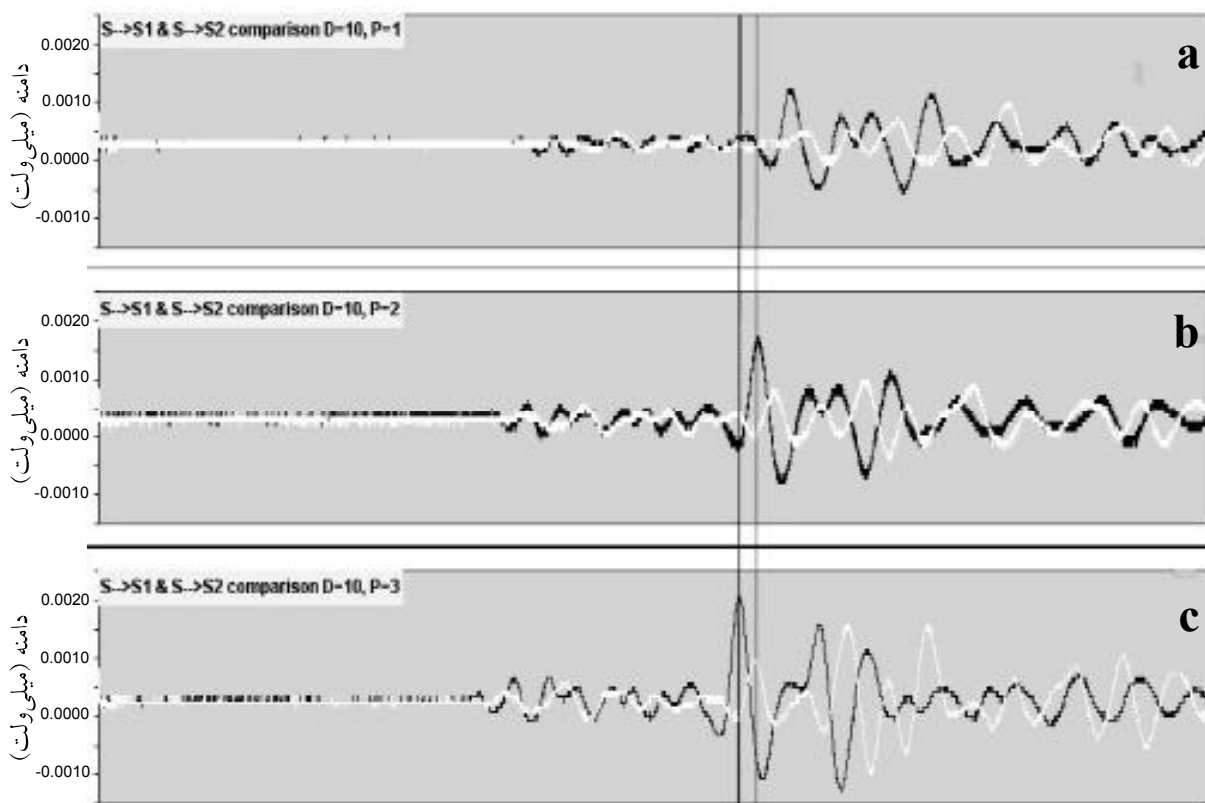
در شکل ۹، طیف فرکانسی در فشارهای متفاوت و زاویه اعمال فشار ۱۰ درجه نمایش داده شده است. هر شکل از سه قسمت (ستون) تشکیل شده است که معرف اعمال فشارهای متفاوت می‌باشد. در ردیف اول هر ستون، طیف مربوط به سیگنال مؤلفه موازی به تصویر کشیده شده است. در ردیف دوم، طیف فرکانسی مربوط به مؤلفه عمودی و در ردیف سوم، تفاضل طیف مؤلفه عمودی از طیف مؤلفه موازی به‌دست آورده شده است که به منظور مقایسه دامنه طیف در گستره فرکانسی سیگنال استفاده می‌شود.

مؤلفه‌ها با افزایش فشار، امری قابل قبول است، زیرا میزان تنش اعمال شده بیشتر است و این موضوع در هر دو مؤلفه قابل ردیابی است.

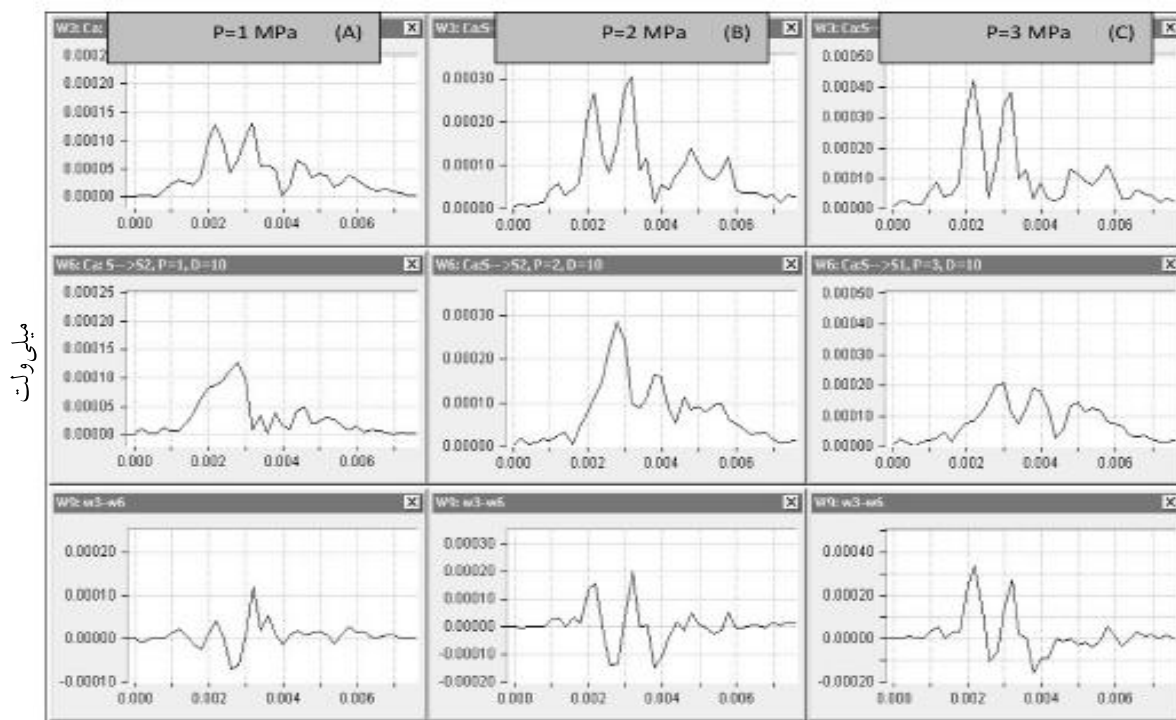
#### سرعت امواج جدا شده

شکل ۸، سیگنال‌های مؤلفه‌های عمودی و موازی را برای حالتی که فشار متغیر و زاویه ثابت باشد نمایش می‌دهد. دو خط عمودی رسم شده مانند مقیاسی در این شکل، زمان تقریبی رسیدن موج برشی به گیرنده‌های موازی (خط تیره) و عمودی (خط روشن) را در فشار ۳ مگا پاسکال نشان می‌دهد. ملاحظه می‌کنیم که با کاهش فشار، کمی فاصله بین زمان رسیدن موج برشی و خط مقیاس به‌وجود می‌آید که با کاهش فشار، این فاصله افزایش یافته است.





شکل ۸- مقایسه سرعت امواج جدا شده در فشارهای متفاوت در نمونه کربناته (نگاشت تیره رنگ معرف مؤلفه موازی است). زاویه اعمال فشار ۱۰ درجه و (a) فشار ۱ مگاپاسکال، (b) فشار ۲ مگاپاسکال، (c) فشار ۳ مگاپاسکال (محور قائم برحسب میلی‌ولت و محور افقی شماره نمونه می‌باشد).



فرکانس (مگاهرتز)

شکل ۹- طیف فرکانسی در زاویه اعمال فشار ۱۰ درجه، از سمت چپ ستون اول به ترتیب مربوط به مؤلفه عمودی و موازی و تفاضل آن‌ها در فشار ۱ مگاپاسکال است، ستون دوم به ترتیب مربوط به مؤلفه عمودی و موازی و تفاضل آن‌ها در فشار ۲ مگاپاسکال است و ستون سوم به ترتیب مربوط به داده‌های مؤلفه‌های عمودی و موازی و تفاضل آن‌ها در فشار ۳ مگاپاسکال است.

### نتیجه‌گیری

به منظور استفاده صحیح و درست از اطلاعات موج برشی بایستی افزایش کافی بر رفتارهای آن خصوصاً تغییرات جدایش موج برشی وجود داشته باشد به همین دلیل به عنوان یک عامل تعیین کننده، مقایسه اثر تنش برشی بر جدایش موج برشی، انجام شد. نمونه کربناته به کار گرفته شده، از مخازن هیدروکربنی ایران استخراج شده است. به نظر می‌رسد با افزایش تنش برشی، مشخصات مؤلفه عمودی نمونه مورد آزمایش به عنوان شاخص جدایش موج برشی دچار تغییراتی می‌شود که این تغییرات به شرح زیر است:

- طیف فرکانس مؤلفه عمودی دامنه کوچکتری نسبت به مؤلفه موازی دارد و با افزایش تنش برشی اختلاف آن‌ها بیشتر می‌شود.

- با افزایش تنش برشی، سرعت مؤلفه عمودی و موازی تقریباً به صورت یکسان افزایش می‌یابند.

- دامنه مؤلفه موازی و عمودی با افزایش تنش برشی، بزرگتر می‌شوند اما افزایش تنش برشی موجب ازدیاد اختلاف بین دامنه مؤلفه عمودی و موازی می‌شود.

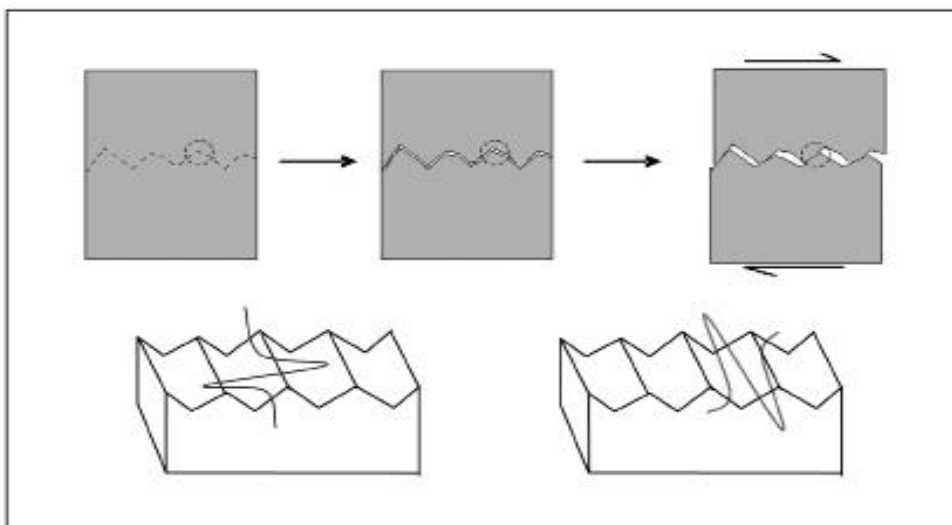
این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش تنش برشی، جدایش بیشتری بین مولفه‌های افقی و قائم در یک محیط ناهمسانگرد معین (شکاف ایجاد شده در این آزمایش) صورت می‌گیرد. با تسری این شیوه آزمایشگاهی در مقیاس ناحیه‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که اگر در یک محیط، جهت تنش‌های اعمالی منطقه مشخص باشد ( $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$ ) و مولفه برشی محاسبه

به طور مشخص می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فشار در مؤلفه موازی و عمودی، دامنه فرکانس بیشینه بیشتر می‌شود. نتیجه دیگر این است که طیف مؤلفه عمودی همواره دامنه کوچکتری نسبت به مؤلفه موازی دارد به خصوص اینکه با افزایش فشار، میزان تفاوت افزایش پیدا می‌کند.

### توجیه رفتار موج سریع و کند در سطح شکست

در سطح شکست، تنش برشی، مقداری فضای خالی یا بازشدگی در بعضی نقاط به وجود می‌آورد که این مسئله خود سبب به وجود آمدن نقاطی می‌شود که فشردگی بیشتری نسبت به سایر نقاط دارند.

به نظر می‌رسد هنگامی که این توالی نقاط بهم فشرده و از هم فاصله گرفته در مسیر عبور موج قرار می‌گیرند، مؤلفه موازی موج برشی در هنگام عبور، به دلیل اینکه موازی این توالی نقاط می‌باشد اثر چندانی بر مؤلفه‌های فرکانسی خود احساس نمی‌کند. اما مؤلفه عمودی درست برعکس مؤلفه موازی در هنگام عبور، به دلیل اینکه بعضی از طول موج‌هایش به ناچار عمود بر درزه‌ها و شکاف‌ها حرکت می‌کنند، مؤلفه‌های خود را از دست می‌دهد. افزایش دامنه امواج نیز به دلیل فشردگی به وجود آمده می‌باشد که در بعضی از نقاط ایجاد شده است. سرعت سیر امواج نیز به این دلیل افزایش پیدا می‌کند که افزایش تنش برشی خود سبب فشرده‌تر شدن و چگال‌تر شدن مسیر عبور موج بوده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- تأثیر تنش برشی و هندسه شکست بر جدایش امواج برشی



و تحلیل و تفسیر مولفه‌های جدایش یافته موج برشی، می‌توان تخمینی از بیضوی تنش منطقه داشت.

#### علائم و نشانه‌ها

زاویه چرخش:  $\theta$

تأخیر زمانی:  $\Delta$

تنش:  $\sigma$

شود (بیضوی تنش منطقه رسم شود) از روی داده‌های موج برشی حاصل از لرزه نگاری، چند مولفه سطحی و یا OBC و یا VSP و تفسیر و تحلیل این داده‌ها و بررسی میزان جدایش و ویژگی‌های مولفه‌های موج برشی، می‌توان راستای ناهمسانگردی غالب منطقه (گسل، درز و شکاف و...) که عامل اصلی این جدایش‌ها می‌باشند را تخمین زد. عکس این موضوع نیز صادق است، به این معنی که با شناختی کافی از راستای ناهمسانگردی غالب منطقه

#### منابع

- [1] Crampin S., "A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media: Wave motion", Vol. 3, pp. 343-391, 1981.
- [2] Crampin S., "Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic", *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol. 53, pp. 467-496, 1978.
- [3] Crampin S., "A review of the effects of anisotropic layering on the propagation of seismic waves", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 49, pp. 9-27, 1977a.
- [4] Keith C.M. & Crampin S., "Seismic body waves in anisotropic refraction at a plane interface", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 49, pp. 181-208, 1977a.
- [5] Keith C.M. & Crampin S., "Seismic body waves in anisotropic media: propagation through a layer", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 49, pp. 209-223, 1977b.
- [6] Keith C.M. & Crampin S., "Seismic body waves in anisotropic media: synthetic seismograms", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 49, pp. 225-243, 1977b.
- [7] Crampin S., "Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 53, pp. 467-496, 1978.
- [8] Crampin S. & McGonigle R., "The variation of delays in stress-induced polarization anomalies", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 64, pp. 115-131, 1981.
- [9] Crampin S. & Yedlin M., "Shear-wave singularities of wave propagation in anisotropic media", *J. Geophys.*, Vol. 49, pp. 43-46, 1981.
- [10] Crampin S., Evans R., Doyle M., & Davis J.P., "Comments on papers about shear-wave splitting in dilatancy-induced anisotropy by I. N. Gupta & by A. Ryall & W. U. Savage", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, pp. 375-377, 1981.
- [11] Mavko G., Mukerji T. & Dvorki J., *The Rock Physics Handbook: Tools for seismic Analysis in Porous Media*, Cambridge University Press, 2003.