

info@fspress.net

## خواهران نباشد تن من مباد

### سخن نویسنده

امواج، آشفته‌گی‌های پی در پی هستند که در فضا و یا مواد از موقعیتی به موقعیت دیگر حرکت می‌کنند. در میان امواج مختلف، امواج مکانیکی، گروه بزرگی از امواج هستند که برای انتقال و حرکت آنها نیاز به یک محیط کشسان و تغییر شکل‌پذیر است.

پیرودان درونی و بیرونی همواره بخش‌های مختلف زمین را تحت تأثیر خود قرار داده و باعث تغییر شکل آنها شده و چین‌خوردگی‌ها، گسلش، زمین‌لرزه و فرایش کوه‌ها در اثر این گونه فشارها ایجاد می‌شود. چنانچه نیروهای وارده بر مواد، لایه‌ها و توده‌های مختلف در زمین حذف شوند، ممکن است برخی از تغییرات شکل‌های ایجاد شده در آنها ثابت بماند و برخی دیگر به حالت قبلی خود برگردد. این گونه مواد که پس از حذف نیرو به شکل قبلی خود برمی‌گردند مواد کشسان نام دارند. این تغییر شکل، باعث ایجاد امواج الاستیک یا کشسان می‌شوند. میزان الاستیسیته یا خاصیت کشسانی در مواد مختلف متفاوت است و هر کدام با روابطی مشخص می‌شوند که به ویژگی فیزیکی آنها بستگی دارد.

فراگیری روابط مذکور برای دانشجویان و پژوهشگران رشته ژئوفیزیک به ویژه گرایش‌های زلزله‌شناسی و لرزه‌شناسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل درس تنوری انتشار امواج الاستیک، از سوی شورای عالی برنامه‌ریزی درسی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در مقطع کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک تعریف شد و بنابراین دسترسی به این منبع درسی به زبان فارسی که همه عناوین مورد نظر را پوشش دهد بسیار ضروری است.

علی‌رغم اینکه در سال‌های اخیر، آموزش ژئوفیزیک در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی کشور گسترش یافته ولی هنوز منبع مستقل فارسی که به موضوع انتشار امواج الاستیک پرداخته و مورد استفاده قرار گرفته باشد، مشاهده نشده است. مراجعه مکرر دانشجویان، پژوهشگران و برخی از همکاران برای ارائه یک منبع درسی به زبان فارسی، مرا بر آن داشت تا در خصوص تألیف این کتاب اقدام کنم. فیش برداری این مجموعه علمی تا جمع‌بندی نهایی، حدود ۲ سال به طول انجامید.

ایمان دارم اگر همراهی خانواده و راهنمایی اساتید، همکاران پژوهشی و دوستان عزیزم نبود اتمام این کار به سختی ممکن می‌شد.

ابتدا لازم می‌دانم از همسر گرامی‌ام که همواره مشوق اصلی من در کارهای علمی بوده و همیشه نبود اینجانب در کنار فرزندانم را مدیریت نموده‌اند، تشکر نمایم. از فرزندان عزیزم فروغ و آثرینا که اوقات زیادی از زندگی خود را به من بخشیدند تا به امور پژوهشی برسم تشکر می‌کنم. از راهنمایی‌های پرفسور بهرام عکاشه که همواره پشتیبان عاطفی، معنوی، و علمی بوده‌اند صمیمانه سپاسگزارم. از دکتر مهدی زارع که نه تنها به عنوان استاد بلکه به عنوان یک دوست خوب صادقانه مرا همراهی نموده و ویراستاری علمی کتاب را تقبل نمودند تشکر می‌کنم. سرکار خنم مهندس سعیده احمدی که گام به گام در تهیه این نوشتار همراهی‌هم بودند و وقت زیادی را صرف کنترل فرمول‌ها و متن اصلی کتاب نمودند، شایسته سپاسگزاری می‌باشند. از سرکار خنم مهندس امیرا محمودپور که مرا در گزینش واژه‌های مناسب قارسی و انگلیسی همراهی نمودند تشکر می‌کنم. در خاتمه از انتشارات دانش‌های یادی که مسئولیت حروفچینی، صفحه‌آرایی و طراحی جلد را با ظرافت و دقت مورد انتظار به اینجانب رساندند، تقدیر و تشکر می‌کنم. ممکن است کاستی‌هایی هم در تهیه این نوشتار وجود داشته باشد که انشاءالله در ویرایش‌های بعدی اصلاح خواهد شد. به همین منظور انتقادات، پژوهشگران و دانشجویان عزیز تقاضا می‌کنم نظرات اصلاحی، انتقادات و پیشنهادات خود را برای بهبود چاپ بعدی این اثر به آدرس پست الکترونیکی اینجانب ([manesh.book@gmail.com](mailto:manesh.book@gmail.com)) ارسال فرمایند.

با احترام

دکتر محمد آریامنش

۱۳۹۲

## فهرست مطالب

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| اختصارات .....                        | س  |
| مقدمه .....                           | ف  |
| فصل اول: تنش و کرنش .....             | ۱  |
| مدف‌ها .....                          | ۲  |
| راژه‌ها .....                         | ۲  |
| ۱-۱ پیش‌گفتار .....                   | ۳  |
| ۱-۲ تنش .....                         | ۳  |
| ۱-۲-۱ خصوصیات تنه‌های اصلی .....      | ۱۰ |
| ۱-۲-۲ تنش در فضا: مفاهیم جسم .....    | ۱۳ |
| ۱-۲-۲-۱ تنش یک محوره .....            | ۱۳ |
| ۱-۲-۲-۲ تنش دو محوره .....            | ۱۷ |
| ۱-۲-۲-۳ تنش سه محوره .....            | ۱۹ |
| ۱-۲-۳ بیضوی تنش .....                 | ۲۲ |
| ۱-۳ کرنش .....                        | ۲۳ |
| ۱-۳-۱ کرنش عمودی .....                | ۲۵ |
| ۱-۳-۲ کرنش برشی .....                 | ۲۶ |
| ۱-۳-۳ کرنش خطی .....                  | ۲۹ |
| ۱-۳-۴ کرنش مهندسی .....               | ۳۰ |
| ۱-۳-۵ کرنش حجمی .....                 | ۳۰ |
| ۱-۳-۶ نسبت کشیدگی .....               | ۳۰ |
| ۱-۳-۷ کرنش واقعی .....                | ۳۱ |
| ۱-۳-۸ کرنش گرین و کرنش آلامانسی ..... | ۳۲ |
| ۱-۳-۹ بیضوی کرنش .....                | ۳۲ |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| ۱-۳-۱۰. حالت‌های کرنش.....                                                 | ۳۳ |
| ۱-۳-۱۱. دایره‌ی موهر برای کرنش صفحه‌ای.....                                | ۳۶ |
| ۱-۳-۱۲. روابط تنش و کرنش.....                                              | ۳۷ |
| ۱-۳-۱۲-۱. مرحله‌ی کشسانی و قانون هوک.....                                  | ۳۷ |
| ۱-۳-۱۲-۲. مرحله‌ی خمیری.....                                               | ۳۸ |
| ۱-۳-۱۲-۳. مرحله‌ی گسیختگی.....                                             | ۳۸ |
| ۱-۳-۱۳. نمودار تنش-کرنش.....                                               | ۳۸ |
| ۱-۳-۱۴. ضریب کشسان.....                                                    | ۳۹ |
| ۱-۳-۱۴-۱. ضریب برشی یا سفتی.....                                           | ۴۰ |
| ۱-۳-۱۴. ضریب می، تراکم ناپذیری یا بالک.....                                | ۴۰ |
| ۱-۳-۱۴-۳. ضریب پواسون.....                                                 | ۴۱ |
| خودآزمایی.....                                                             | ۴۳ |
| فصل دوم: امواج کشسان.....                                                  | ۴۵ |
| اهداف.....                                                                 | ۴۶ |
| واژه‌های مهم.....                                                          | ۴۶ |
| ۱-۲. پیش‌گفتار.....                                                        | ۴۷ |
| ۲-۲. معادله‌ی موج برای محیط کشسان.....                                     | ۴۸ |
| ۲-۳. پتانسیل جابه‌جایی و حل معادله‌ی موج.....                              | ۶۱ |
| ۲-۳-۱. محاسبه‌ی جواب معادله‌ی موج همگن به روش دالامبر.....                 | ۶۳ |
| ۲-۳-۲. محاسبه‌ی جواب معادله‌ی موج همگن با استفاده از تبدیل فوریه.....      | ۷۲ |
| ۲-۳-۳. محاسبه‌ی جواب معادله‌ی موج همگن با استفاده از جدا کردن متغیرها..... | ۷۸ |
| ۲-۳-۴. محاسبه‌ی جواب معادله‌ی موج ناهمگن با استفاده از تابع گرین.....      | ۸۹ |
| ۲-۳-۵. محاسبه‌ی جواب معادله‌ی موج ناهمگن به روش دالامبر.....               | ۹۵ |
| ۲-۳-۶. محاسبه‌ی جواب معادله‌ی موج ناهمگن با استفاده از سری فوریه.....      | ۹۶ |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ۲-۳-۷. محاسبه‌ی جواب معادله‌ی موج ناهمگن با استفاده از جدا کردن متغیرها..... | ۹۸  |
| ۲-۳-۸. امواج طولی تخت.....                                                   | ۱۰۴ |
| ۲-۳-۹. امواج عرضی تخت.....                                                   | ۱۰۷ |
| ۲-۳-۱۰. امواج تخت هارمونیک.....                                              | ۱۰۹ |
| ۲-۴. معادله‌ی موج برای امواج کروی.....                                       | ۱۱۰ |
| ۲-۵. معادله‌ی موج برای امواج استوانه‌ای.....                                 | ۱۲۲ |
| خودآزمایی.....                                                               | ۱۲۸ |
| فصل سوم: امواج درونی، مرز دو محیط.....                                       | ۱۳۳ |
| اهداف.....                                                                   | ۱۳۴ |
| واژه‌های مهم.....                                                            | ۱۳۴ |
| ۳-۱. پیش‌گفتار.....                                                          | ۱۳۵ |
| ۳-۲. شکست و بازتاب و شرایط انزوی در حواف و فاصدهای مختلف.....                | ۱۳۶ |
| ۳-۲-۱. بازتاب امواج کشسان در یک سطح آزاد.....                                | ۱۴۵ |
| ۳-۲-۲. بازتاب و شکست موج کشسان از روی مرز بین دو محیط جامد.....              | ۱۵۶ |
| ۳-۲-۳. بازتاب و شکست موج کشسان از روی مرز بین دو محیط مایع.....              | ۱۶۵ |
| ۳-۲-۴. بازتاب کلی.....                                                       | ۱۷۰ |
| ۳-۳. انرژی امواج درونی.....                                                  | ۱۷۵ |
| ۳-۴. شدت امواج درونی.....                                                    | ۱۷۹ |
| ۳-۵. تقسیم انرژی در مرز دو محیط.....                                         | ۱۸۰ |
| خودآزمایی.....                                                               | ۱۸۳ |
| فصل چهارم: امواج سطحی.....                                                   | ۱۸۷ |
| اهداف.....                                                                   | ۱۸۸ |
| واژه‌های مهم.....                                                            | ۱۸۸ |
| ۴-۱. پیش‌گفتار.....                                                          | ۱۹۰ |

- ۴-۲. امواج سطحی ..... ۱۹۱
- ۴-۲-۱. امواج ریلی ..... ۱۹۶
- ۴-۲-۲. امواج لاول ..... ۲۱۰
- ۴-۲-۳. تشخیص موج‌های ریلی و لاول در لرزه‌نگاشت‌ها ..... ۲۱۷
- ۴-۳. پاشندگی امواج سطحی ..... ۲۱۸
- ۳-۱. سرعت فاز و سرعت گروه ..... ۲۳۱
- ۴-۲. مطالعات پاشندگی موج سطحی ..... ۲۴۱
- ۴-۴. مسائلی از مدهای نرمال ..... ۲۵۳
- ۴-۴-۱. مدی یک کره ..... ۲۵۸
- ۴-۴-۲. هارمونیک‌های سطحی ..... ۲۶۴
- ۴-۴-۳. مدهای پیچشی ..... ۲۶۹
- ۴-۴-۴. مدهای کروی ..... ۲۷۶
- ۴-۴-۵. مدها و امواج منتشر شده ..... ۲۸۰
- ۴-۴-۶. مدهای نرمال مشاهده شده ..... ۲۹۱
- ۴-۴-۷. لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی مد نرمال ..... ۲۹۳
- ۴-۴-۸. میرایی، شکافتگی و جفت‌شدگی مد ..... ۲۹۹
- خودآزمایی ..... ۳۰۹
- پیوست الف: سیستم‌های مختصات ..... ۳۱۵
- الف-۱. سیستم مختصات دکارتی ..... ۳۱۶
- الف-۱-۱. گرادیان در سیستم مختصات دکارتی ..... ۳۱۸
- الف-۱-۲. دیورژانس در سیستم مختصات دکارتی ..... ۳۱۸
- الف-۱-۳. لاپلاسین در سیستم مختصات دکارتی ..... ۳۱۹
- الف-۱-۴. کرل در سیستم مختصات دکارتی ..... ۳۱۹
- الف-۲. سیستم مختصات استوانه‌ای ..... ۳۲۰

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| الف - ۲ - ۱. گرادیان در سیستم مختصات استوانه‌ای.....                                                  | ۳۲۱ |
| الف - ۲ - ۲. دیورژانس در سیستم مختصات استوانه‌ای.....                                                 | ۳۲۱ |
| الف - ۲ - ۳. لاپلاسین در سیستم مختصات استوانه‌ای.....                                                 | ۳۲۱ |
| الف - ۲ - ۴. کرل در سیستم مختصات استوانه‌ای.....                                                      | ۳۲۵ |
| الف - ۳. سیستم مختصات کروی.....                                                                       | ۳۲۵ |
| الف - ۱ - ۱. گرادیان در سیستم مختصات کروی.....                                                        | ۳۲۶ |
| الف - ۲ - ۲. دیورژانس در سیستم مختصات کروی.....                                                       | ۳۲۷ |
| الف - ۳ - ۳. لاپلاسین در سیستم مختصات کروی.....                                                       | ۳۲۷ |
| الف - ۳ - ۴. کرل در سیستم مختصات کروی.....                                                            | ۳۲۷ |
| پیوست ب: اطلاعات عمومی.....                                                                           | ۳۲۹ |
| ب - ۱. اطلاعات کوشی.....                                                                              | ۳۳۰ |
| ب - ۲. روش مشخصه و معادلات مرتبه اول.....                                                             | ۳۳۳ |
| ب - ۳. معادلات هیپربولیک مرتبه دوم.....                                                               | ۳۳۵ |
| پیوست ج: سری، انتگرال و تبدیل فوریه، تابع پله‌ای، هویساید، توابع دلتای دیراک و کرونگر، تابع گرین..... | ۳۳۹ |
| ج - ۱. سری فوریه، انتگرال فوریه.....                                                                  | ۳۴۰ |
| ج - ۲. تبدیل فوریه.....                                                                               | ۳۴۴ |
| ج - ۳. تابع پله‌ای هویساید.....                                                                       | ۳۴۶ |
| ج - ۴. تابع دلتای دیراک.....                                                                          | ۳۴۶ |
| ج - ۵. تابع دلتای کرونگر.....                                                                         | ۳۴۶ |
| ج - ۶. تابع گرین.....                                                                                 | ۳۴۸ |
| پیوست د: پاسخ مسأله‌ها.....                                                                           | ۳۵۳ |
| پاسخ مسأله‌های فصل اول.....                                                                           | ۳۵۴ |
| پاسخ مسأله‌های فصل دوم.....                                                                           | ۳۵۶ |



|          |                                            |
|----------|--------------------------------------------|
| ۳۸۲..... | پاسخ مسأله‌های فصل سوم.....                |
| ۳۸۴..... | پاسخ مسأله‌های فصل چهارم.....              |
| ۳۸۵..... | نشانه‌های به کار گرفته شده در کتاب.....    |
| ۳۸۷..... | نماد واحدهای به کار گرفته شده در کتاب..... |
| ۳۸۹..... | واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی.....          |
| ۴۰۳..... | واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی.....          |
| ۴۱۷..... | بهرت راهنما.....                           |
| ۴۲۷..... | منابع.....                                 |

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. مفهوم تنش.  $\sigma$ ، تنش،  $F$ ، نیروی وارد بر سطح و  $A$ ، مساحت است. ۴
- شکل ۱-۲. نمایش شرط تعادل جسمی که تحت تأثیر نیروهای گوناگون، قرار گرفته است. ۶
- شکل ۱-۳. مؤلفه‌های تنش کلی.  $\sigma$ ، تنش عمودی و  $\tau$ ، تنش برشی؛ نامیده می‌شود. ۶
- شکل ۱-۴. مؤلفه‌های تنش در حالت کلی. ۸
- شکل ۱-۵. نمایش تنش‌های اصلی. ۹
- شکل ۱-۶. تنش‌های کششی، فشارشی و برشی. ۱۰
- شکل ۱-۷. تنش‌های اصلی. ۱۱
- شکل ۱-۸. تنش یک محوره. ۱۴
- شکل ۱-۹. محاسبه‌ی تنش در نواحی مختلف. ۱۴
- شکل ۱-۱۰. دایره‌ی موهر برای تنش یک محوره. ۱۶
- شکل ۱-۱۱. دایره‌ی موهر برای تنش دو محوره. ۱۸
- شکل ۱-۱۲. تنش سه محوره. ۱۹
- شکل ۱-۱۳. دایره‌ی موهر برای تنش سه محوره. ۲۰
- شکل ۱-۱۴. دایره‌ی موهر برای حالت‌های خاص تنش کششی و فشارشی. ۲۱
- شکل ۱-۱۵. نمایش بیضی و بیضوی تنش. ۲۲
- شکل ۱-۱۶. نمایش مفاهیم انتقال، چرخش، کرنش و اتساع. ۲۴
- شکل ۱-۱۷. نمایش کرنش عمودی و برشی. ۲۵
- شکل ۱-۱۸. کرنش برشی واقعی و کرنش برشی مهندسی. ۲۷
- شکل ۱-۱۹. نمایش مؤلفه‌های تانسور کرنش. ۲۹
- شکل ۱-۲۰. نمایش مفهوم کرنش خطی. ۲۹
- شکل ۱-۲۱. بیضوی کرنش. ۳۳
- شکل ۱-۲۲. حالت‌های مختلف کرنش همراه با بیضوی‌های کرنش مربوط به آن‌ها. ۳۴
- شکل ۱-۲۳. نمایش برش خالص. ۳۶

- شکل ۱-۲۴. دایره‌ی موهر برای کرنش صفحه‌ای..... ۳۶
- شکل ۱-۲۵. نمودار تنش - کرنش..... ۳۹
- شکل ۱-۲. نمایش موج و مشخصات آن..... ۴۹
- شکل ۲-۲. توزیع کشش کشسانی در یک المان مکعبی..... ۵۰
- شکل ۲-۳. نمایش خطوط مشخصه‌ی نقاط مختلف صفحه‌ی  $x, t$ ..... ۶۴
- شکل ۴-۴. تراجی چهارگانه‌ی مثال دوم که دارای مقادیر مختلف  $\phi, t$  هستند..... ۷۰
- شکل ۵-۴. نمایش مقدار  $\phi, t$  از مثال دوم در زمان‌های مختلف..... ۷۰
- شکل ۲-۲. حرکتی که در یک نقطه‌ی  $(x_0, t_0)$  در جواب دالامبر معادله‌ی موج..... ۷۱
- شکل ۲-۷. تاثیر نقطه‌ی  $x_0$  در روش حل معادله‌ی موج با استفاده از راه حل دالامبر..... ۷۲
- شکل ۲-۸. نمودار یک موج که با سرعت  $C$  در جهت مثبت محور طول‌ها حرکت می‌کند..... ۷۷
- شکل ۲-۹. رشته‌ای به طول  $L$  که بین دو نقطه‌ی  $x = 0$  و  $x = L$ ..... ۷۹
- شکل ۲-۱۰. نمایش نت پایه، هارمونیک اول و هارمونیک دوم..... ۸۶
- شکل ۲-۱۱. حرکت یک تپ زودگذر طولی در راستای محور  $x$ ..... ۱۰۵
- شکل ۲-۱۲. نمایش سه زوج موج سینوسی موج ایستاده‌ی تولیدشده به وسیله‌ی آن‌ها..... ۱۱۰
- شکل ۲-۱۳. نمایش یک موج کروی..... ۱۱۱
- شکل ۲-۱۴. تعدادی از توابع  $Plms$  به عنوان تابعی از  $x$  برای  $m$  و  $n$ های مختلف..... ۱۱۴
- شکل ۲-۱۵. تعدادی از توابع  $Qls$ ..... ۱۱۴
- شکل ۲-۱۶. تعدادی از توابع  $Plm(\cos\theta)$  به عنوان تابعی از  $x$  برای  $m$  و  $n$ های مختلف..... ۱۱۵
- شکل ۲-۱۷.  $yl(s)$  و  $jl(s)$  برای  $l = 0, 1, 2, 3$ ..... ۱۱۶
- شکل ۲-۱۸. نمایش انتشار یک موج استوانه‌ای..... ۱۲۲
- شکل ۲-۱۹. نمایش چند موج استوانه‌ای..... ۱۲۷
- شکل ۳-۱. نمایش شکل شماتیکی از امواج طولی و عرضی..... ۱۳۷
- شکل ۳-۲. نمایش ثبت امواج لرزه‌ای و توالی زمانی دریافت امواج حجمی و سطحی..... ۱۳۸

- شکل ۳-۳. الف) وجود تنش‌های عمودی و برشی ب) پیوستگی تنش‌های عمودی و برشی ... ۱۴۲
- شکل ۳-۴. نمایش تنش فشاری وارد بر یک مرز تخت. .... ۱۴۴
- شکل ۳-۵. بازتاب یک موج طولی از روی سطح آزاد. .... ۱۵۰
- شکل ۳-۶. دامنه‌ی امواج طولی و عرضی بازتابی. .... ۱۵۳
- شکل ۳-۷. بازتاب موج عرضی از روی سطح آزاد. .... ۱۵۵
- شکل ۳-۸. بازتاب و شکست یک موج طولی پس از برخورد با یک مرز تخت. .... ۱۵۹
- شکل ۳-۹. رتاب و شکست موج عرضی از روی یک مرز تخت. .... ۱۶۴
- شکل ۴-۱. نحوه‌ی انتشار راج لرزه‌ای پس از وقوع زمین‌لرزه. .... ۱۹۲
- شکل ۴-۲. نمایش نحوه‌ی انتشار امواج سطحی در یک صفحه‌ی قائم. .... ۱۹۴
- شکل ۴-۳. نمایش شرایط حاکم بر انتشار امواج گوشته‌ای ریلی و لاول. .... ۱۹۵
- شکل ۴-۴. نمونه‌ای شماتیک از نحوه‌ی انتشار امواج ریلی. .... ۱۹۷
- شکل ۴-۵. نمایش موج طولی محو شو (P<sub>h</sub>) که در فصل مشترک. .... ۱۹۸
- شکل ۴-۶. نمایش وجود انرژی P و SV انتشار یافته به طور افقی در سطح آزاد. .... ۱۹۹
- شکل ۴-۷. نمایش سرعت موج ریلی. .... ۲۰۴
- شکل ۴-۸. تغییرات مؤلفه‌های جابه‌جایی. .... ۲۰۷
- شکل ۴-۹. نمایش مؤلفه‌های افقی و عمودی حرکت زمین به هنگام انتشار امواج ریلی. .... ۲۰۸
- شکل ۴-۱۰. نمایش تغییر نحوه‌ی انتشار امواج ریلی با پیش‌روی در عمق. .... ۲۰۹
- شکل ۴-۱۱. نمایش نحوه‌ی انتشار امواج سطحی لاول. .... ۲۱۱
- شکل ۴-۱۲. نمایش نحوه‌ی تشکیل موج لاول. .... ۲۱۳
- شکل ۴-۱۳. لرزه‌نگار سه مؤلفه‌ای ایستگاه برکلی برای یک زلزله. .... ۲۱۸
- شکل ۴-۱۴. نمایش تغییر سرعت امواج آب با تغییر طول موج یا فرکانس آنها در اقیانوس. .... ۲۱۹
- شکل ۴-۱۵. نمایش تداخل سازنده‌ی امواج SH و تشکیل امواج لاول. .... ۲۲۰
- شکل ۴-۱۶. جواب‌های گرافیکی باشندگی امواج لاول در لایه‌ی واقع بر یک نیم فضا. .... ۲۲۴

- شکل ۴-۱۷. نمایش منحنی‌های پاشندگی امواج لاو..... ۲۲۷
- شکل ۴-۱۸. نمایش تغییرات جابه‌جایی ناشی از امواج لاو درون لایه‌ی سطحی..... ۲۲۹
- شکل ۴-۱۹. نمایش دو موج سینوسی و مجموع آن‌ها..... ۲۳۲
- شکل ۴-۲۰. نمایش موج حامل..... ۲۳۵
- شکل ۴-۲۱. نمایش وابستگی جابه‌جایی موج هارمونیک به زمان و مکان..... ۲۳۸
- شکل ۴-۲۲. نمایش منحنی‌های پاشندگی پایه برای امواج لاو و ریلی..... ۲۴۱
- شکل ۴-۲۲. نمایش سرعت فاز و گروه برای مد پایه‌ی موج لاو..... ۲۴۲
- شکل ۴-۲۳. نمایش پاشندگی برای اولین لایه‌های اولیه بر روی یک لرزه‌نگاشت..... ۲۴۳
- شکل ۴-۲۵. نمایش پاشندگی سرعت گروه موج لاو..... ۲۴۴
- شکل ۴-۲۶. مطالعه‌ی سرعت گروه موج ریلی..... ۲۴۶
- شکل ۴-۲۷. کاربرد داده‌های حاصل از سرعت فاز موج ریلی..... ۲۴۹
- شکل ۴-۲۸. الف. نمایش نتایج پاشندگی سرعت فاز موج ریلی ب. ساختار سرعت موج عرضی حاصل از مشاهدات..... ۲۵۳
- شکل ۴-۲۹. نمایش هندسه‌ی مختصات کروی برای مدای نرمال..... ۲۶۱
- شکل ۴-۳۰. طیف دامنه‌ی مؤلفه‌ی شعاعی یک لرزه‌نگاشت..... ۲۶۲
- شکل ۴-۳۱. نمونه‌ای از چند جمله‌ای‌های لژاندر در بازه‌ی  $[-\pi, \pi]$ ..... ۲۶۶
- شکل ۴-۳۲. نمایش چند هارمونیک کروی..... ۲۶۸
- شکل ۴-۳۳. جابه‌جایی متناسب با مد پیچشی  $OT_{20}$ ..... ۲۷۳
- شکل ۴-۳۴. نمونه‌هایی از جابه‌جایی‌های چند مد پیچشی..... ۲۷۴
- شکل ۴-۳۵. نمونه‌هایی از جابه‌جایی‌ها برای چند مد کروی..... ۲۷۸
- شکل ۴-۳۶. چگالی انرژی فشاری و برشی..... ۲۸۰
- شکل ۴-۳۷. نمایش هم‌ارزی امواج سطحی و مدهای نرمال..... ۲۸۲
- شکل ۴-۳۸. نمایش توابع ویژه‌ی شعاعی (قائم) برای مدهای مختلف..... ۲۸۴

- شکل ۴-۳۹. نمایش نمودار مرتبه‌ی زاویه‌ای-فرکانس (باشندگی) برای مدهای پیچشی ..... ۲۸۶
- شکل ۴-۴۰. نمایش نمودار مرتبه‌ی زاویه‌ای-فرکانس (باشندگی) برای مدهای کروی ..... ۲۸۹
- شکل ۴-۴۱. لرزه‌نگاشت مصنوعی موج حجمی با استفاده از مدهای نرمال پیچشی ..... ۲۹۷
- شکل ۴-۴۲. مدل‌سازی داده با لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی مد نرمال ..... ۲۹۸
- شکل ۴-۴۳. لرزه‌نگاشت مصنوعی موج عرضی که در عمق‌های مختلف ..... ۲۹۸
- شکل ۴-۴۴. طیف داده‌های مشاهده‌ای و مصنوعی ..... ۳۰۰
- شکل ۴-۴۵. نمایش طیف دامنه برای ۹ خط واحد ..... ۳۰۲
- شکل ۴-۴۶. نمایش عملگر نیروی کوریولیس ..... ۳۰۳
- شکل ۴-۴۷. نمایش نمودار شکافتگی برای مد  $OS2$  ..... ۳۰۴
- شکل ۴-۴۸. نمایش سه دید عمده‌ی پدید آمدن شکافتگی مد ..... ۳۰۵
- شکل ۴-۴۹. نمایش مؤلفه‌ی قائم‌ماده‌های مشاهده‌شده و مصنوعی زلزله‌ی گینه‌نو ..... ۳۰۷
- شکل الف-۱. سیستم مختصات دکارتی ..... ۳۱۶
- شکل الف-۲. سیستم مختصات استوانه‌ای ..... ۳۲۰
- شکل الف-۳. سیستم مختصات کروی ..... ۳۲۶
- شکل ب-۱. سطح  $\Gamma$  که اطلاعات کوشی را نشان می‌دهد ..... ۳۳۱
- شکل ب-۲. منحنی داده‌های اولیه‌ی  $\Gamma$  و مشخصه‌های خط جریان ..... ۳۳۴
- شکل د-۱. قمرودار مشخصه‌های (معادله‌ی د-۱) ..... ۳۵۷
- شکل د-۲. جواب‌های  $u(x,t)$  برای  $t = 0, 1, 12, 32$  ..... ۳۶۱
- شکل د-۳. تمامی سه بعدی از جواب‌های  $u(x,t)$  برای  $t = 0, 1, 12, 32$  ..... ۳۶۱
- شکل د-۴. جواب‌های  $u(x,t)$  برای  $t = 0, 1, 12, 32$  ..... ۳۶۶
- شکل د-۵. مشخصه‌های مهم  $x \pm t = \pm 1, \pm 2$  ..... ۳۷۰
- شکل د-۶. جواب‌های  $u(x,t)$  برای  $t = 0, 1, 2, 3$  ..... ۳۷۰

شکل د-۷. نواحی شش گانه‌ی جواب خودآزمایی (۱۱) که مقدار  $u(x, t)$  در آن‌ها با یکدیگر، متفاوت است. .... ۳۷۲

شکل د-۸. فازهای گوناگون دو مد نرمال اول ( $k = 1, 2, \gamma k = 1$ ). خطوط پیوسته، فقط مربوط به  $\cos(2k - 12/\pi x)$  هستند. .... ۳۷۴

شکل د-۹. مسیر عبور موج مورد نظر در مسأله‌ی ۱۸ از فصل سوم. .... ۳۸۲

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱. واحدهای مختلف تنش و روش تبدیل آن‌ها به یکدیگر..... ۵
- جدول ۱-۲. روابط تبدیل ضرایب کشسان به یکدیگر در مواد جامد و همسانگرد..... ۴۲
- جدول ۴-۱. چند نمونه از منابع داخلی و خارجی تولیدکننده‌ی امواج لرزه‌ای..... ۲۵۴
- جدول ۴-۲. چند مد پیچشی و کروی..... ۲۹۳

www.ketab.ir



[www.ketab.ir](http://www.ketab.ir)

اختصارات

|                                                 |              |                                                |
|-------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------|
| <i>Initial Value Problem</i>                    | <i>IVP</i>   | مسأله‌ی مقدار اولیه                            |
| <i>Partial Differential Equation</i>            | <i>PDE</i>   | معادلات دیفرانسیل جزئی                         |
| <i>Ordinary Differential Equation</i>           | <i>ODE</i>   | معادلات دیفرانسیل معمولی                       |
| <i>Boundary Conditions</i>                      | <i>BCs</i>   | شرایط مرز                                      |
| <i>Initial Conditions</i>                       | <i>ICs</i>   | شرایط اول                                      |
| <i>Preliminary Reference Earth Model</i>        | <i>PREM</i>  | مدل یک بعدی نمایش دهنده‌ی خصوصیات متوسط زمین   |
| <i>Core Mantle Boundary</i>                     | <i>CMB</i>   | مرز هسته - گوشته                               |
| <i>Diffracted</i>                               | <i>diff</i>  | موج شکستی                                      |
| <i>Spherical Non-Rotating Elastic Isotropic</i> | <i>SNREI</i> | زمین کروی، متفارن، بدون چرخش، کشسان و همسانگرد |

[www.ketab.ir](http://www.ketab.ir)

## مقدمه

کره‌ی زمین، حجم ناهمگن و ناهمسانگردی است که در برابر نیروهای مختلفی که بر آن وارد می‌شود، دو رفتار کاملاً متفاوت از خود به نمایش می‌گذارد. زمین در مقابل نیروهای کوچک و زودگذر مانند انواع انفجارهای زیرزمینی و لغزش‌های ناگهانی و کم‌قدرت در سطح گسل‌ها، رفتار کشسان و در برابر نیروهای پر قدرت و طولانی‌مدت، رفتار غیر کشسان دارد. بر این اساس، می‌توان دید که به هنگام وقوع زلزله، می‌توان این حجم غول‌پیکر را در حکم یک زنگوله‌ی بزرگ کشسان فرض کرد که با انتشار امواج لرزه‌ای حاصل از زلزله، شروع به نوسان می‌نماید.

لازم به ذکر است که یکی از تقسیم‌بندی‌هایی که برای موج صورت پذیرفته است، آن را به دو دسته‌ی مکانیکی و الکترواستاتیکی تقسیم‌بندی نموده‌اند و در این میان، امواج لرزه‌ای که مسبب به لرزش در آمدن زمین هستند، در دسته‌ی مکانیکی جای می‌گیرند. یکی از تفاوت‌های مهم این دو دسته موج، آن است که امواج الکترواستاتیکی در محیط‌های مادی و غیر مادی، منتشر می‌گردند؛ اما امواج مکانیکی تنها در محیط‌هایی که تغییر شکل پذیر یا کشسان هستند، انتشار می‌یابند و با ایجاد تغییر شکل کشسان در چنین محیطی، در مسیر خود به پیش می‌روند و درست به همین دلیل، با عنوان امواج کشسان نیز شناخته می‌شوند.

امواج کشسان انواع مختلفی دارند و یکی از آن‌ها که اهمیت غیر قابل انکاری در زندگی انسان دارد، با نام امواج لرزه‌ای خوانده می‌شود که خود به دو دسته‌ی امواج لرزه‌ای سطحی تقسیم می‌گردد. باید توجه داشته باشیم که انتشار امواج لرزه‌ای حاصل از زمین‌لرزه در اصل به عنوان یک محیط تقریباً کشسان، علاوه بر این که با انتقال انرژی عظیم زلزله، می‌تواند موجب ایجاد خرابی‌های فراوان در سطح زمین و به خصوص در سازه‌های بشری شود، قادر است به عنوان ابزاری منحصربه‌فرد، نقش مهمی در شناسایی ساختار زیر زمین که به صورت طبیعی برای انسان غیر قابل مشاهده می‌باشد، ایفا نماید. بر همین اساس، دیری است که علم لرزه‌شناسی به منظور مطالعه‌ی نحوه‌ی ایجاد و انتشار امواج لرزه‌ای، به وجود آمده و با انجام پژوهش‌های فراوان از سوی دانشمندان کشورهای گوناگون، رشد زایدالوصفی نموده است؛ به گونه‌ای که امروزه چه با

استفاده از امواج لرزه‌ای طبیعی که به وسیله‌ی زلزله‌ها پدید می‌آیند و چه با کمک امواج لرزه‌ای مصنوعی که در سطح یا عمق زمین تولید و منتشر می‌شوند، می‌توان ساختارهای سطحی و عمقی زمین را مورد کنکاش قرار داد. پیشرفت علوم یاد شده به حدی است که با مطالعه‌ی چگونگی انتشار امواج لرزه‌ای، می‌توان ساختار قسمت‌های بسیار عمیق گوشته و هسته‌ی زمین را شناسایی کرد، به اطلاعات جامعی در مورد مواد تشکیل‌دهنده و ویژگی‌هایی همچون ناهمگنی و ناهمبندی آن‌ها دست یافت. بدین ترتیب پرواضح است که اولین گام به منظور شناخت رفتار قسمت‌های مختلف زمین به هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ، جلوگیری از وارد آمدن خسارات ناشی از زمین‌لرزه‌ها و نیز مطالعه‌ی ساختمان زمین برای اکتشاف منابع زیرزمینی و غیره؛ بررسی سیارات است. امواج یاد شده و شرایط حاکم بر آن‌ها به هنگام انتشار در محیط‌های متفاوت می‌باشد. بر این مبنا، کتاب متلفی به زبان فارسی و غیر آن، در زمینه‌ی لرزه‌شناسی به رشته‌ی تحریر در آمده است که با استفاده از هر یک، می‌توان اطلاعات مفیدی در زمینه‌ی امواج کشسان و انتشار آن‌ها به دست آورد. به واسطه وجود تابه حال، کتاب جامعی به زبان فارسی که به طور اختصاصی به موضوع یاد شده پرداخته باشد، نوشته نشده است. با توجه به این اصل، نگارنده تصمیم به نگارش کتاب حاضر نموده که بر اساس سرفصل‌های مصوب شورای برنامه‌ریزی درسی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در چهار فصل، تهیه شده است.

فصل اول کتاب حاضر به تنش، کرنش و ارتباط بین آن‌ها اختصاص داده شده است؛ چرا که همان‌طور که گفته شد امواج کشسان با به وجود آوردن تغییرات در محیط‌های مادی، منتشر می‌شوند و برای بررسی انتشار این امواج، لازم است ابتدا به خوبی با خواص ایجادکننده‌ی تغییر شکل مذکور آشنا شویم.

پس از آگاهی از موضوعات یاد شده در فصل اول، می‌توانیم به معرفی کامل امواج کشسان و بررسی انواع مهم آن که در مبحث مورد توجه در این کتاب؛ یعنی لرزه‌شناسی و زلزله‌شناسی، نقش مهمی دارند، بپردازیم و مشخصات، چگونگی انتشار و نیز معادلات امواج کشسان را مورد مطالعه قرار دهیم. این موضوع به همراه روش‌های گوناگونی که برای به دست آوردن جواب معادله‌ی موج پیشنهاد گردیده، در فصل دوم گنجانده شده است. نکته‌ی قابل تأمل در این فصل

آن است که مثال‌های متعدد بیان شده، در زمینه‌ی حل معادله‌ی موج که در متن کتاب و نیز در خودآزمایی انتهای فصل قابل مشاهده هستند، می‌توانند به عنوان ابزاری قابل توجه برای یادگیری کامل نحوه‌ی حل معادله‌ی موج به شمار آیند که در اختیار خوانندگان محترم قرار داده شده است. فصل سوم کتاب بر مبنای مفاهیم تئوری ذکر شده در فصل‌های اول و دوم شکل گرفته است و آغازی برای معرفی کامل امواج لرزه‌ای در این کتاب، به حساب می‌آید؛ چراکه با توجه به اهمیت امواج لرزه‌ای، خصوصیات این دسته از امواج در دو فصل، بررسی شده و فصل سوم خصوصیات اولین دسته از امواج لرزه‌ای که با نام امواج درونی یا حجمی شناخته می‌شوند را به بحث گذاشته است. خصوصیتی که در این فصل مورد مطالعه قرار می‌گیرد شامل نحوه‌ی انتشار امواج درونی در محیط‌های مادی معادن و زمین اقرزی و شدت آن‌ها می‌باشد.

آشنایی با دسته‌ی اول امواج لرزه‌ای در فصل سوم، بستر مناسبی را برای پرداختن به دسته‌ی دوم این امواج که با نام امواج سطحی شناخته می‌شوند، فراهم می‌آورد. بر همین اساس در فصل چهارم، ضمن مطالعه‌ی تفصیلی ماهیت امواج سطحی و نحوه‌ی شکل‌گیری و محیط انتشار آن‌ها که مهم‌ترین نقش را در خرابی‌های به بار آمده از زلزله بر عهده دارند، به بررسی خصوصیات کاربردی این دسته از امواج به منظور شناسایی ساختمان درونی زمین، خواهیم پرداخت. بخش قابل ملاحظه‌ای از این فصل، به مدهای نرسال و نوسانات آزاد زمین، اختصاص یافته است که با وجود اهمیت فراوان در مدل‌سازی ساختمان زمین، تا کنون کم‌تر در منابع آرس به نگارش درآمده در زمینه‌ی امواج کشسان، مورد توجه قرار گرفته‌اند.