

ژئودینامیک

نویسنده

محمد آریا نیش

استادیار دانشگاه پیام نور

زهره محمودپور



مؤسسه انتشارات امیرکبیر

تهران، ۱۳۹۱

سرشناسه: آریامنش، محمد، ۱۳۴۶-
عنوان و نام پدیدآور: ژئودینامیک/ نوشته محمد آریامنش، زهرا محمودپور.
مشخصات نشر: تهران: امیرکبیر، ۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری: ۵۱۲ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک: 978-964-00-1529-2

وضعیت فهرست‌نویسی: فیا.

یادداشت: واژه‌نامه.

یادداشت: کتابنامه

موضوع: ژئودینامیک.

شناسه افزوده: محمودپور، زهرا، ۱۳۶۳-

رده‌بندی کنگره: ۹۱۳۱۱ ز ۵۱۱/۱ QE

رده‌بندی دیویی: ۵۵۱/۳

شماره کتابشناسی ملی: ۲۹۱۳۰۶۰

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۰۰-۱۵۲۹-۲



مؤسسه انتشارات امیرکبیر

تهران: خیابان جمهوری اسلامی، میدان استقلال، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۴۱۹۱

ژئودینامیک

© حق چاپ: ۱۳۹۱، مؤسسه انتشارات امیرکبیر www.amirkabir.net

نوبت چاپ: اول

نویسندگان: دکتر محمد آریامنش، مهندس زهرا محمودپور

حروف متن: میترا ۱۳

چاپ و صحافی و لیتوگرافی: چاپخانه سپهر، تهران، خیابان ابن سینا (بهارستان)، شماره ۱۰۰

شمارگان: ۱۰۰۰

بها: ۱۴۰۰۰۰ ریال

همه حقوق محفوظ است. هر گونه نسخه‌برداری، اعم از زیراکس و بازنویسی، ذخیره کامپیوتری، اقتباس کلی و جزئی (به‌جز اقتباس جزئی در نقد و بررسی)، و اقتباس در گیومه در مستندنویسی، و مانند آنها بدون مجوز کتبی از ناشر ممنوع و از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری است.

فهرست مطالب

.....	سخن نویسندگان	۲۵
.....	جدول اختصارات	۲۷
.....	پیشگفتار کتاب	۲۹
.....	فصل اول: مفاهیم رفتاری خواص گرانرو - کشسانی	۳۳
.....	هدف‌ها	۳۴
.....	مفاهیم تازه	۳۴
.....	۱-۱- پیشگفتار	۳۵
.....	۱-۲- تنش‌های دوبعدی و سه بعدی	۳۵
.....	۱-۲-۲- تنش‌ها در فضای سه بعدی	۴۴
.....	۱-۲-۲-۱- فرمول‌های کوشی	۴۷
.....	۱-۲-۲-۲- محورهاى اصلی تنش	۵۰
.....	۱-۲-۳- تنش هشت وجهی	۵۲
.....	۳-۱- ویژگی‌های رفتاری وابسته به زمان	۵۳
.....	۳-۱-۱- رفتار کوتاه مدت و تأثیر زمان پایداری	۵۴
.....	۳-۱-۲- رفتار بلند مدت و تأثیر زمان پایداری	۵۴
.....	۴-۱- کشسانی و خمیرسانی در سنگ‌ها	۵۴
.....	۵-۱- مدل‌های رئولوژیکی (رفتار ساده)	۵۶
.....	۵-۱-۱- ماده کشسان کامل یا ماده هوکی	۵۷
.....	۵-۱-۲- ماده خمیرسان کامل	۵۸
.....	۵-۱-۳- ماده کشسان - خمیری کامل یا ماده سنت و نانت	۵۸
.....	۵-۱-۴- ماده گرانرو کامل یا ماده نیوتنی	۵۹
.....	۵-۱-۶- ماده فیرمو - گرانرو یا ماده کلون - ویگت	۶۴
.....	۶-۱- مدل‌های رئولوژیکی (رفتار پیچیده)	۶۵
.....	۶-۱-۱- مدل تعمیم یافته کلون	۶۵
.....	۶-۱-۲- مدل برگر	۶۶

۶۹	۷-۱. خزش
۷۰	۱-۷-۱. عوامل مؤثر بر خزش
۷۱	۲-۷-۱. بررسی منحنی تنش - کرنش - خزش
۷۲	۳-۷-۱. منحنی کرنش-زمان خزش
۷۳	۴-۷-۱. شناخت پدیده رئولوژی در پدیده خزش
۷۴	۸-۱. مدل های وابسته به زمان در سنگ های مجاله شونده
۷۵	۱-۸-۱. مدل کشسان - گرانبرو - خمیرسان
۷۷	۲-۸-۱. مدل گرانبرو - خمیرسان CVISC
۷۸	۳-۸-۱. مدل کشسان - گرانبرو - خمیرسان VIPLA
۸۱	۹-۱. ممان و معادلات بواسون
۹۰	۱۰-۱. بسط هارمونیک های کروی، حل های اسفروئیدی و توروئیدی
۹۳	۱-۱۰-۱. حل های اسفروئیدی برای حالت تراکم ناپذیر
۹۵	۲-۱۰-۱. حل های توروئیدی برای مواد تراکم ناپذیر
۱۰۰	خودآزمایی فصل ۱
۱۰۳	فصل دوم: نیروهای مؤثر بر تغییر شکل زمین و مدل های چند لایه ای
۱۰۴	هدف ها
۱۰۴	مفاهیم تازه
۱۰۵	۲-۱. پیشگفتار
۱۰۶	۲-۲. بارگذاری سطحی جرم نقطه ای
۱۱۸	۲-۳. نیروی کشند
۱۲۴	۲-۳-۱. پتانسیل کشند
۱۲۸	۲-۳-۲. اثرات نیروهای کشند
۱۳۱	۲-۴. روابط حاکم بر بارگذاری های سطحی
۱۳۱	۲-۵. زمان های معکوس آرمیدگی برای مدل های زمین تراکم ناپذیر
۱۳۹	۲-۶. بارگذاری زمین
۱۴۰	۲-۶-۱. قانون سنت - ونانت
۱۴۲	۲-۶-۲. طراحی تمرکز تنش
۱۴۲	۲-۶-۳. آزمایش بارگذاری
۱۴۶	۲-۷. بازگشت کشسان
۱۴۸	۲-۸. جابه جایی و آشفستگی در پتانسیل گرانشی
۱۵۰	۲-۸-۱. مؤلفه های افقی و قائم گرانش
۱۵۶	۲-۸-۲. تغییر پتانسیل و خطای بالآمدگی
۱۵۷	۲-۸-۳. مؤلفه قائم گرانش (مثال)
۱۶۰	۲-۸-۴. خطا در بالآمدگی (مثال)
۱۶۷	۲-۹. اعداد لاو

۱۷۱	۱۰-۲. روش تقریبی برای هماهنگ‌های درجه بالا.....
۱۸۳	۱۱-۲. مدل‌های تحلیلی برای زمین چند لایه‌ای گرانی - کشسان کروی یا کشسان.....
۱۹۲	۲-۱۱-۱. گرانیروی یکنواخت گوشته و لیتوسفر کشسان در زون فروورانش.....
۱۹۴	۲-۱۱-۲. گرانیروی یکنواخت گوشته و لیتوسفر کشسان بر روی سطح (غیر فروورانش).....
۲۰۶	۲-۱۱-۳. گرانیروی غیر یکنواخت گوشته و لیتوسفر کشسان.....
۲۱۶	۲-۱۱-۴. گرانیروی غیر یکنواخت گوشته و لیتوسفر گرانیرو - کشسان.....
۲۱۹	خودآزمایی فصل ۲.....
۲۲۲	فصل سوم: سرگردانی قطبی و $1/2$ ایجاد شده توسط بارگذاری ورقه‌های یخی.....
۲۲۳	هدف‌ها.....
۲۲۳	مفاهیم تازه.....
۲۲۴	۱-۳. پیشگفتار.....
۲۲۴	۲-۳. سرگردانی قطب واقعی (TPW).....
۲۲۷	۱-۲-۳. دیرینه مغناطیسی.....
۲۳۲	۲-۲-۳. شواهد سرگردانی قطبی.....
۲۳۵	۳-۲-۳. مسیر سرگردانی قطبی.....
۲۴۲	۳-۳. تعیین گرانیروی گوشته از داده‌های TPW و $1/2$
۲۴۴	۴-۳. گرانیروی گوشته.....
۲۴۹	۴-۳-۱. تغییرات عمقی گرانیروی گوشته دولایه‌ای.....
۲۵۶	۴-۳-۲. گرانیروی گوشته بالایی.....
۲۶۱	۵-۳. دوره‌های عصر یخبندان.....
۲۶۲	۳-۵-۱. دوره آب و هوایی.....
۲۶۲	۳-۵-۲. دوره گلوله برفی.....
۲۶۳	۳-۵-۳. دوره یخبندان شدید.....
۲۶۴	۳-۵-۴. آخرین پیشروی یخ.....
۲۶۷	۳-۶. اثرات تغییرات فازی در مقابل لایه‌بندی شیمیایی.....
۲۷۴	۳-۷. ارتباط بین گرانیروی گوشته و تباین چگالی.....
۲۸۰	خودآزمایی فصل ۳.....
۲۸۲	فصل چهارم: آشکار سازی میدان گرانی وابسته به زمان و تغییر جهانی.....
۲۸۳	هدف‌ها.....
۲۸۳	مفاهیم تازه.....
۲۸۴	۱-۴. پیشگفتار.....
۲۸۵	۲-۴. روش‌های دورسنجی ماهواره‌ای بر اساس لیزر (SLR).....
۲۸۷	۳-۴. کاربردهای دورسنجی ماهواره‌ای بر اساس لیزر (SLR).....
۲۸۹	۴-۴. بررسی تغییرات مؤلفه‌های طول موج بلند زمین‌وار توسط روش‌های SLR.....
۲۹۸	۵-۴. تعیین حرکت نسبی صفحات با لیزر.....

۳۹۸.....	۴-۵-۱. حرکت نسبی صفحات زمین.....
۳۰۰.....	۴-۵-۲. فتون فضایی برای تعیین سرعت نسبی صفحات زمین.....
۳۰۱.....	۴-۵-۳. استفاده از لیزر جهت اندازه‌گیری حرکت نسبی صفحات.....
۳۰۵.....	۴-۶-۱. ارتباط بین گرانشی و گوشته پایینی و عدم توازن جرم.....
۳۰۵.....	۴-۶-۲. توازن جرم و یا ایزوستازی.....
۳۰۶.....	خودآزمایی فصل ۴.....
۳۲۰.....	فصل پنجم: تغییرات ارتفاع سطح دریا.....
۳۲۲.....	هدف‌ها.....
۳۲۳.....	مفاهیم تازه.....
۳۲۴.....	۵-۱. پیشگفتار.....
۳۲۵.....	۵-۲. علت تغییرات ارتفاع سطح آب دریا.....
۳۲۶.....	۵-۳. تغییرات ارتفاع سطح دریا و بی‌هنجاری‌های گرانی و ژئوئید به علت دوران بین یخبندان.....
۳۲۷.....	۵-۳-۱. ارتفاع سطح دریا و ژئوئید.....
۳۳۱.....	۵-۳-۲. ارتفاع سطح دریا و بی‌هنجاری‌های گرانی.....
۳۳۵.....	۵-۴. نوسانات سطح دریا در دوران یخبندان و بعد از آن.....
۳۳۸.....	۵-۴-۱. ارتفاع سطح دریا در دوران کواترنری.....
۳۳۹.....	۵-۵. تغییر ارتفاع سطح دریا و تحول سواحل در هواشناسی میانی.....
۳۳۹.....	۵-۶. کاربرد مدل‌های ژئوفیزیکی در تغییرات ائوستازی.....
۳۴۰.....	۵-۷. نقش سرزمین‌های یخی در ارتفاع سطح آب در حال حاضر و آینده.....
۳۴۱.....	۵-۷-۱. پیش‌بینی آینده سرزمین‌های یخی و ارتفاع سطح آب دریا.....
۳۴۴.....	۵-۸. نوسانات ارتفاع سطح دریا در اثر تغییرات آب و هوایی.....
۳۴۴.....	۵-۸-۱. تغییر آب و هوا.....
۳۴۶.....	۵-۸-۲. تغییرات فشار هوا.....
۳۴۶.....	۵-۸-۳. تغییرات نیروی باد (طوفان‌ها).....
۳۴۷.....	۵-۸-۴. نوسان‌پذیری اقیانوس.....
۳۵۰.....	۵-۹. گازهای گلخانه‌ای.....
۳۵۱.....	۵-۱۰. فوران آتشفشانی.....
۳۵۳.....	۵-۱۱. نوسانات ارتفاع سطح دریا در اثر سرگردانی قطب‌ها.....
۳۵۸.....	۵-۱۲. نوسانات ارتفاع سطح دریا و پدیده‌های زمین‌ساخت.....
۳۵۹.....	۵-۱۲-۱. نوسانات ارتفاع سطح دریا در اثر رسوبگذاری کف دریا.....
۳۶۱.....	۵-۱۲-۲. ارتباط نوسانات سطح دریا و بازشدگی بستر اقیانوس‌ها.....
۳۶۳.....	۵-۱۲-۳. ارتباط نوسانات سطح دریا و زون فرورانش.....
۳۶۷.....	۵-۱۳. مطالعات خطوط ساحلی.....
۳۶۸.....	۵-۱۳-۱. ارتفاع نسبی سطح دریا، رخساره‌ها و توالی چین‌شاسی.....

۳۷۰	۵- ۱۳- ۲. تراز دریایی
۳۷۲	۵- ۱۴. تعیین مقدار تغییرات نسبی ارتفاع سطح دریاها
۳۷۵	خودآزمایی فصل ۵
۳۷۸	فصل ششم: زمین ساخت ورقه‌ای
۳۷۹	هدف‌ها
۳۷۹	مفاهیم تازه
۳۸۰	۶- ۱. پیشگفتار
۳۸۰	۶- ۲. لیتوسفر
۳۸۲	۶- ۳. تقسیم‌بندی کره زمین
۳۸۲	۶- ۳- ۱. تنوع مواد سازنده زمین
۳۸۳	۶- ۳- ۲. خواص فیزیکی
۳۸۵	۶- ۴. مشخصات لیتوسفر
۳۸۶	۶- ۵. امواج لرزه‌ای در زمین
۳۸۹	۶- ۶. انواع لیتوسفر
۳۸۹	۶- ۶- ۱. لیتوسفر اقیانوسی
۳۸۹	۶- ۶- ۲. لیتوسفر قاره‌ای
۳۸۹	۶- ۷. مرز ورقه‌ها
۳۹۰	۶- ۷- ۱. حاشیه واگرا
۳۹۳	۶- ۷- ۲. حاشیه همگرا
۳۹۷	۶- ۷- ۳. حاشیه ترادبسی
۳۹۸	۶- ۸. نواحی فرورانش
۳۹۸	۶- ۸- ۱. تقسیم‌بندی زون فرورانش
۴۰۰	۶- ۹. گسل‌های امتدادلفز
۴۰۱	۶- ۱۰. نقاط داغ و جریان‌های گوشته‌ای
۴۰۳	۶- ۱۱. قاره‌ها
۴۰۵	۶- ۱۲. اتصالات سه گانه
۴۰۷	۶- ۱۳. دوره ویلسون
۴۰۹	۶- ۱۴. برخورد قاره‌ها
۴۰۹	۶- ۱۴- ۱. زمین ساخت فعال و فرایندهای ساختاری درون قاره‌ای
۴۱۰	۶- ۱۴- ۲. حاشیه‌های همگرا
۴۱۶	۶- ۱۵. زمین ساخت ورقه‌ای فعال و رودخانه‌ها و دره‌ها
۴۱۷	۶- ۱۵- ۱. تغییرات دره‌ای
۴۱۹	۶- ۱۵- ۲. تغییرات رودخانه‌ای
۴۲۲	۶- ۱۵- ۳. نقش زمین ساخت ورقه‌ای در پیدایش سفره‌های زیرزمینی و آلودگی آنها
۴۲۴	۶- ۱۶. زمین ساخت فعال و زمین لرزه

۴۲۴	 ۱۷-۶. زمین ساخت فعال و سونامی
۴۲۵	 ۱۸-۶. زمین ساخت فعال و تشکیل مجمع الجزایر آتشفشانی
۴۲۵	 ۱۹-۶. زمین ساخت فعال و دره‌های کافتی قاره‌ای
۴۲۷	 ۲۰-۶. ساز و کار رانش
۴۲۷	 ۲۰-۱. نیروی گرانی
۴۲۷	 ۲۰-۲. کشیده شدن لبه‌های صفحات
۴۲۸	 ۲۰-۳. وضعیت حرارتی
۴۳۱	 ۲۱-۶. نیروهای رانش ورقه‌ها
۴۳۲	 ۲۳-۶. آتشفشان‌ها و جریان‌های گرمایی
۴۳۶	 ۲۲-۱. فوران‌های واکانیک‌ها
۴۳۶	 ۲۲-۲. فوران استرومبولی
۴۳۸	 ۶. خودآزمایی فصل
۴۴۲	 پیوست ۱: ماتریس اسفروئیدی اساسی در حوزه لاپلاس
۴۴۲	 ماتریس اسفروئیدی اساسی در حوزه لاپلاس
۴۴۳	 روش ماتریس توسعه دهنده
۴۴۴	 توسعه جواب‌های اسفروئیدی
۴۵۰	 توسعه جواب توروئیدی
۴۵۲	 پیوست ۲: درجات هارمونیک کروی
۴۵۲	 درجات هارمونیک کروی
۴۵۴	 سیستم مختصات کروی
۴۵۶	 هارمونیک‌های سطحی تسترال و سکتورال
۴۵۸	 پیوست ۳: پاسخنامه
۴۵۸	 پاسخنامه فصل ۱
۴۶۰	 پاسخنامه فصل ۲
۴۶۱	 پاسخنامه فصل ۳
۴۶۲	 پاسخنامه فصل ۴
۴۶۴	 پاسخنامه فصل ۵
۴۶۶	 پاسخنامه فصل ۶
۴۷۲	 منابع کلی کتاب
۴۸۰	 فهرست واژگان انگلیسی به فارسی
۴۹۶	 فهرست واژگان فارسی به انگلیسی

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. مؤلفه‌های نیروی وارد بر سطح ۳۷
- شکل ۱-۲. تنش σ دارای بزرگی F/A بوده و زاویه θ زاویه سطح گسیختگی با افق است. ۳۸
- نیروی عمود (F_n) و موازی (F_t) با سطح MN ۳۸
- شکل ۱-۳. نمای شماتیک از تنش‌های اصلی و فرعی بر روی یک المان مکعبی ۳۹
- شکل ۱-۴. بیضوی تنش. ۴۰
- شکل ۱-۵. تبدیل تنش سه بعدی به دو بعدی برای استفاده از معادلات مثلثاتی ۴۱
- شکل ۱-۶. تجزیه تنش‌های عمودی و برشی به مؤلفه‌های آنها ۴۱
- شکل ۱-۷. نمودار موهر برای تنش. نقطه P معرف سطح شکست B ۴۳
- شکل ۱-۸. تنش بردار T_i که بر نقطه P بر روی المان سطح ۴۴
- شکل ۱-۹. اجزاء تانسور تنش σ_{ij} ۴۵
- شکل ۱-۱۰. مؤلفه‌های تجزیه بردار تنش T_i ۴۸
- شکل ۱-۱۱. نمایی از دایره‌های موهر تنش در حالت سه بعدی ۴۹
- شکل ۱-۱۲. صفحه هشت وجهی و تنش‌های نرمال و برشی هشت وجهی ۵۲
- شکل ۱-۱۳. الف) مدل مکانیکی رفتار ماده کشسان کامل، ب) منحنی تنش- کرنش ۵۷
- شکل ۱-۱۴. ماده خمیرسان کامل، الف) مدل مکانیکی، ب) منحنی تنش- کرنش ۵۸
- شکل ۱-۱۵. ماده کشسان- خمیری کامل، الف) مدل مکانیکی، ب) منحنی تنش- کرنش ۵۹
- شکل ۱-۱۶. ماده گرانبه کامل، الف) مدل مکانیکی، ب) منحنی کرنش- زمان ۶۰
- شکل ۱-۱۷. ماده ماکسولی، الف) مدل مکانیکی ب) منحنی کرنش- زمان تحت تنش ثابت ج) منحنی تنش- زمان تحت کرنش ثابت ۶۲
- شکل ۱-۱۸. ماده کلونی. الف) مدل مکانیکی، ب) منحنی کرنش- زمان تحت حذف تنش، ج) منحنی کرنش- زمان تحت تنش ثابت ۶۴
- شکل ۱-۱۹. مدل تعمیم یافته کلونین یا ناکامورا. الف) مدل مکانیکی، ب) منحنی کرنش- زمان ۶۶

- شکل ۱-۲۰. ماده برگر، الف) مدل مکانیکی، ب) منحنی کرنش-زمان. ۶۷
- شکل ۱-۲۱. الف) مدل واحدهای ماکسول. ۶۸
- شکل ۱-۲۲. مدل برگر تعمیم یافته. ۶۸
- شکل ۱-۲۳. مدل بینگهام. ۶۸
- شکل ۱-۲۴. سرعت خزش ثانویه در برابر اعمال نیرو بر سیلستون. ۶۹
- شکل ۱-۲۵. منحنی کرنش-زمان (خزش). ۷۰
- شکل ۱-۲۶. منحنی تنش-کرنش در فرایند خزش. ۷۱
- شکل ۱-۲۷. منحنی کرنش-زمان. ۷۲
- شکل ۱-۲۸. تصویر اتمیک جابه‌جاشدگی. ۷۳
- شکل ۱-۲۹. کرنش خرسی در عرض تنش منحرف شونده ثابت در بارگذاری و باربرداری. ۷۶
- شکل ۱-۳۰. مدل رئولوژیکی برای رفتارهای کشسان، خمیرسان، گرانرو-کشسان و گرانرو-خمیرسان و پارامترهای وابسته. ۷۶
- شکل ۱-۳۱. نمایش شماتیک از مدل CVISC، الف) رفتار انحرافی، ب) رفتار حجمی. ۷۷
- شکل ۱-۳۲. نمایش از مدل SHELVP در صفحه p-q. ۷۹
- شکل ۱-۳۳. نمایش شماتیک از صفحه اقیانوسی فرورانش توسط توپ پینگ پونگ. ۹۸
- شکل ۱-۳۴. شبیه‌سازی رفتار پوسته اقیانوسی در زمان‌های مختلف فرورانش. ۹۸
- شکل ۱-۳۵. ایجاد جریان‌های توروئیدی در صفحه فرورانش. ۹۹
- شکل ۱-۲. ۱. نمایش سه بعدی از سطح آرمیدگی حوزه تبدیل لاپلاس $hmv(s)$. ۱۰۸
- شکل ۲-۲. ۲. نمایش از لاپلاس سه قطبی در فضای صفحه S. ۱۱۰
- شکل ۲-۳. نمودارهای آرمیدگی برای ۴ مدل ارائه شده در متن. ۱۱۱
- شکل ۲-۴. پراکندگی نقاط (نقاط اطراف مربع) و انتخاب نقاط هم‌محلی. ۱۱۳
- شکل ۲-۵. نقاط مناسب برای استفاده از روش هم محلی در سه نقطه. ۱۱۳
- شکل ۲-۷. نمایش از عملگر کانولوشن در تلفیق دو تابع f و g. ۱۱۵
- شکل ۲-۸. مراحل ایجاد نیروی نقطه‌ای ضربه در مرحله ۲ در اثر برخورد دو جسم. ۱۱۶
- شکل ۲-۹. بخش گرانرو تابع گرین برای جابه‌جایی شعاعی در مدل زمین. ۱۱۷
- شکل ۲-۱۰. پاسخ مدل گرانرو-کشسان به بارگذاری کوه دریایی در زمان‌های مختلف. ۱۱۸
- شکل ۲-۱۱. قوانین کلر برای سیاره‌ها. ۱۲۰
- شکل ۲-۱۲. نیروهای کشندی وارد بر نقطه O بر روی سطح زمین از سوی ماه. ۱۲۱
- شکل ۲-۱۳. تغییرات وضعیت نیروی کشندی در ارتباط با جابه‌جایی ماه. ۱۲۲
- شکل ۲-۱۴. موقعیت ماه و خورشید نسبت به زمین و ارتباط آن با شدت نیروی کشندی (هاله‌های خاکستری رنگ). ۱۲۳
- شکل ۲-۱۵. حالات ایجاد برآمدگی حاصل از نیروی کشند ماه بر روی زمین. ۱۲۴
- شکل ۲-۱۶. نمایش از حرکت قمر به سمت سیاره خود و قرار گرفتن در محدوده حد روше آن و در نهایت متلاشی شدن آن. ۱۳۰

- شکل ۲-۱۷. چرخش منحنی C حول نقطه ak ۱۳۵
- شکل ۲-۱۸. نمایی شماتیک از دیاگرام مدل‌های رتولوژیکی..... ۱۳۷
- شکل ۲-۱۹. زمان‌های آرمیدگی بر حسب سال بر اساس تابعی از درجات هارمونیک / و تغییرات گرانروی گوشته پایینی..... ۱۳۷
- شکل ۲-۲۰. زمان‌های آرمیدگی بر حسب سال بر اساس تابعی از درجات هارمونیک ۱ و تغییرات گرانروی گوشته پایینی..... ۱۳۹
- شکل ۲-۲۱. نمونه شماتیک از بارگذاری بر روی سطح..... ۱۴۰
- شکل ۲-۲۲. الف) بارگذاری به وسیله چند بار متمرکز و متقارن که تنها یک اثر قائم دارند. ب) بارگذاری استاتیک پیوسته..... ۱۴۱
- شکل ۲-۲۳. نتایج آزمایش بارگذاری در صحرا..... ۱۴۳
- شکل ۲-۲۴. عکس العمل لیتوسفر..... ۱۴۵
- شکل ۲-۲۵. مراحل ذخیره انرژی و آزاد شدن آن بر اساس تئوری بازگشت کشسان..... ۱۴۷
- شکل ۲-۲۶. تغییرات میدان گرانشی در اثر جابه‌جایی مواد مذاب..... ۱۴۹
- شکل ۲-۲۷. P_z و P_r ، نیروهای وار بر جرم نقطه‌ای گرانشی که در بالای یک نیم‌فضای کشسان..... ۱۵۱
- شکل ۲-۲۸. بردار شعاعی R ، از جرم نقطه‌ای واقع در $(c - o)$ در یک محیط نامحدود..... ۱۵۳
- شکل ۲-۲۹. سطح s یک گسل تراستی موازی با محور y و دارای زاویه شیب β ۱۵۸
- شکل ۲-۳۰. اعداد لاو نرمال شده برای کشسان باقی‌مانده..... ۱۸۰
- شکل ۲-۳۱. اعداد لاو نرمال شده برای سیال باقی‌مانده..... ۱۸۲
- شکل ۲-۳۲. نمایی الگویی از روند مدلسازی زمین..... ۱۸۲
- شکل ۲-۳۳. ریشه‌یابی به روش الگوریتم تصفیف..... ۱۸۸
- شکل ۲-۳۴. بزرگی تنش انحرافی محاسبه شده و کرنش طبیعی و چرخش یضی کرنش..... ۱۹۴
- شکل ۲-۳۵. سیر زمان گذرای عدد لاو k ۱۹۸
- شکل ۲-۳۶. مشابه شکل (۲-۳۵) تغییرات قائم عدد لاو h ۱۹۹
- شکل ۲-۳۷. مشابه شکل (۲-۳۵) برای تغییرات افقی عدد لاو l ۲۰۰
- شکل ۲-۳۸. مشابه با شکل (۲-۳۵) به جای بارگذاری هویساید از نیروی کشندی..... ۲۰۳
- شکل ۲-۳۹. مشابه شکل (۲-۳۸) برای عدد لاو h ۲۰۴
- شکل ۲-۴۰. مشابه شکل (۲-۳۸) برای عدد لاو l ۲۰۵
- شکل ۲-۴۱. پروفیل گرانروی غیر یکنواخت گوشته..... ۲۰۶
- شکل ۲-۴۲. مشابه شکل (۲-۳۵) با این تفاوت که در آن گرانروی گوشته غیر یکنواخت (مقطع در نظر گرفته شده در شکل (۲-۴۱)) است. (لیتوسفر مجدداً کشسان در نظر گرفته شده است)..... ۲۰۹
- شکل ۲-۴۳. مشابه شکل (۲-۴۲) با عدد لاو h ۲۱۰
- شکل ۲-۴۴. مشابه شکل (۲-۴۲) برای عدد لاو کشندی ۱ است..... ۲۱۱
- شکل ۲-۴۵. مشابه شکل (۲-۴۲) با این تفاوت که به جای نیروی هویساید از نیروی کشندی استفاده شده است (عدد لاو k است)..... ۲۱۳

- شکل ۲-۴۶. مشابه شکل (۲-۴۵) (عدد لاو h است). ۲۱۴.....
- شکل ۲-۴۷. مشابه شکل (۲-۴۵) (عدد لاو l است). ۲۱۵.....
- شکل ۲-۴۸. نظیر شکل (۲-۴۲) لیتوسفر با گرانیروی 10^{21} Pas، طبقه‌بندی چگالی بر اساس داده‌های PREM پذیرفته است. ۲۱۸.....
- شکل ۳-۱. قطب شمال (دیرینه مغناطیسی)، ϕp عرض جغرافیایی و ϕp طول جغرافیایی در شرق. ۲۲۵.....
- شکل ۳-۲. حرکت نسبی سه صفحه در جابه‌جایی‌های چرخشی زمین. ۲۲۶.....
- شکل ۳-۳. سیستم‌های مختلف قرارگیری کانی‌ها با جهت‌های مختلف حوزه‌های مغناطیسی. ۲۲۹.....
- شکل ۳-۴. نمایی از نحوه قرارگیری سیستم‌های مختلف تحت تأثیر حرارت تا نقطه کوری. ۲۳۰.....
- شکل ۳-۵. طرح نوارها در دو سوی محور پشته اقیانوسی. ۲۳۱.....
- شکل ۳-۶. محل قرارگیری لایه‌های جواتر پوسته در کنار لایه‌های قدیمی‌تر در اثر ساز و کار گسل امتدادلغز. ۲۳۲.....
- شکل ۳-۷. روش بازسازی وضعیت قاره‌ها در گذشته با استفاده از مطالعه دیرینه مغناطیسی. ۲۳۳.....
- شکل ۳-۸. تغییرات میل مغناطیسی با توجه به عرض جغرافیایی. ۲۳۴.....
- شکل ۳-۹. نحوه جابه‌جایی و حرکت هندوستان در ۲۰۰ میلیون سال گذشته. ۲۳۵.....
- شکل ۳-۱۰. مسیر سرگردانی قطبی اروپا و آمریکای شمالی. ۲۳۶.....
- شکل ۳-۱۱. نمایش برخی از پدیده‌های موجود در زمین با فرایندهای تکتونیکی مختلف. ۲۳۸.....
- شکل ۳-۱۲. مسیربایی سرگردانی قطبی با استفاده از مسیر نقاط داغ. ۲۳۹.....
- شکل ۳-۱۳. ورقه‌های یخی پلیستوسن و جهت تغییرات جاری دراز مدت برای محور چرخشی. ۲۴۱.....
- شکل ۳-۱۴. جهت سرگردانی قطبی واقعی در ارتباط با ورقه‌های لورن تاید و فنواسکاندیا. ۲۴۳.....
- شکل ۳-۱۵. نمایش سرعت سرگردانی قطبی حال حاضر به عنوان تابعی از گرانیروی گوشته پایینی برای دو مدل پنج لایه‌ای زمین. ۲۴۶.....
- شکل ۳-۱۶. نمایش سرعت سرگردانی قطبی حال حاضر به عنوان تابعی از گرانیروی گوشته پایینی برای متوسط حجمی زمین. ۲۴۷.....
- شکل ۳-۱۷. تغییر حال حاضر در شاخص شکل دینامیک غیرکشندی ΔJ_2 به عنوان تابعی از گرانیروی گوشته پایینی. ۲۴۹.....
- شکل ۳-۱۸. نمای شماتیک از گوشته دو لایه‌ای. ۲۵۰.....
- شکل ۳-۱۹. نمای شماتیک از مهمترین اجزاء درونی زمین. ۲۵۲.....
- شکل ۳-۲۰. اثر عمق مرز نشان دهنده اختلاف گرانیروی و مقادیر گرانیروی گوشته پایینی بر مقادیر حال حاضر TPW. ۲۵۳.....
- شکل ۳-۲۱. اثر عمق مرز نشان دهنده اختلاف گرانیروی به عنوان تابعی از گرانیروی گوشته پایینی بر تغییرات عددی حال حاضر ΔJ_2 . ۲۵۴.....
- شکل ۳-۲۲. تأثیر مقادیر متفاوت گرانیروی گوشته بالایی به عنوان تابعی از مقدار گرانیروی گوشته پایینی به سرگردانی قطبی حال حاضر. ۲۵۷.....
- شکل ۳-۲۳. تأثیر در نظر گرفتن مقادیر متفاوت برای گرانیروی گوشته بالایی به تغییرات عددی ΔJ_2 در

- حال حاضر به عنوان تابعی از مقدار گرانشی گوشته پایینی ۲۵۸
- شکل ۳-۲۴. تغییرات ایجاد شده در زاویه چرخش زمین که خود عاملی برای ایجاد عصر یخبندان محسوب می‌گردد ۲۶۴
- شکل ۳-۲۵. نمای شماتیک از شروع و پیشروی دوران یخبندان در زمین و ادامه آن بعد از دوران یخبندان ۲۶۷
- شکل ۳-۲۶. حمل مواد از ارتفاعات به سمت دشت در اثر فرسایش و ایجاد شرایط مساعد برای تغییر فاز در اعماق بیشتر ۲۶۸
- شکل ۳-۲۷. مرز تغییر فاز بین مواد ۲۶۹
- شکل ۳-۲۸. توزیع اسمالی دما نسبت به عمق در زیر پوسته اقیانوسی (O) و قاره‌ها (C) ۲۷۰
- شکل ۳-۲۹. شکل شماتیک از تبدیل اولیوین به اسپینل در حرارت و فشارهای بالا ۲۷۱
- شکل ۳-۳۰. تغییر ترکیب سیمیایی ایجاد شده در اعماق مختلف ایجاد شده ۲۷۲
- شکل ۳-۳۱. دمای محاسبه شده در لبه یک زون فروورانش ۲۷۴
- شکل ۳-۳۲. تغییرات چگالی به تناسب افزایش عمق در گوشته ۲۷۵
- شکل ۳-۳۳. الگوی لگاریتمی x^2 به صورت تابعی از گوشته بالایی و گوشته پایینی ۲۷۹
- شکل ۴-۱. نمونه‌ای از LAGEOS، کره‌ای به قطر ۶۰ سانتیمتر با ۴۲۶ قطعه الماس ۲۸۷
- شکل ۴-۲. استفاده از روش SLR در علوم و حوزه‌های مختلف ۲۸۸
- شکل ۴-۳. مشتق تحلیل آزمون کای (χ^2) نسبت به زمان برای زون‌های جدول (۴-۱) ۲۹۵
- شکل ۴-۴. مشتق تحلیل آزمون کای (χ^2) نسبت به زمان برای زون‌های اندازه‌گیری شده در جدول (۴-۲) و بر اساس پارامترهای گرانشی گوشته بالایی و ضخامت لیتوسفر، اندازه‌گیری شده است ۲۹۷
- شکل ۴-۵. تغییرات در مؤلفه‌های طول موج بلند زمین‌وار که توسط روش‌های SLR ۲۹۸
- شکل ۴-۶. نمایی از حرکت چرخشی صفحات زمین نسبت به قطب اول ۲۹۹
- شکل ۴-۷. نمایش سرعت حرکت ورقه‌ها ۳۰۰
- شکل ۴-۸. بازشدگی کف اقیانوس و یافتن سن و مسیر حرکت صفحات ۳۰۲
- شکل ۴-۹. حرکت صفحات پوسته زمین تحت اثر قطب مشترک ۳۰۲
- شکل ۴-۱۰. نمای شماتیک تشکیل جزایر آتشفشانی در راستای حرکت صفحات پوسته زمین ۳۰۳
- شکل ۴-۱۱. خمش ایجاد شده در مسیر تشکیل جزایر آتشفشانی امپور در هاوایی در اثر حرکت صفحه آرام در دو جهت متفاوت ۳۰۳
- شکل ۴-۱۲. پراکندگی گیرنده‌های امواج رادیویی بر روی زمین ۳۰۴
- شکل ۴-۱۳. اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط دو سیستم NUVEL، ماهواره‌های رادیویی و GPS ۳۰۴
- شکل ۴-۱۴. میانگین اندازه و مسیر حرکت نسبی صفحات زمین ۳۰۵
- شکل ۴-۱۵. جریان‌های شبیه‌سازی شده در گوشته در اثر گرانشی گوشته ۳۰۶
- شکل ۴-۱۶. نمایش فرضیه ایری و برات برای کوه‌ها و دشت‌ها ۳۰۷
- شکل ۴-۱۷. رفتار شماتیک پوسته زمین در بارگذاری سطحی ۳۰۸
- شکل ۴-۱۸. نمای شماتیک از نیروی وارده به سطح زمین و واکنش سطح زیرین آن ۳۰۹
- شکل ۴-۱۹. از تابعی است از گرانشی گوشته پایینی که در محدوده 10^{21} تا 10^{23} قرار دارد ۳۱۴

- شکل ۴-۲۰. مقادیر x_2 برای ۱۱ به دست آمده از معادله (۴-۵)، به صورت تابعی از گرانش روی گوشته
 بالایی و پایینی ۳۱۷
- شکل ۴-۲۱. مقادیر x_2 برای ۱۱ نظیر شکل (۴-۲۰)، به همراه فرد از معادله (۴-۶). ستون‌های چپ و
 راست به ترتیب مشابه شکل (۴-۲۰) هستند ۳۱۸
- شکل ۴-۲۲. الگوی x_2 برای TPW ۳۱۹
- شکل ۵-۱. نمای شماتیک از سطح ژئوئید زمین ۳۲۸
- شکل ۵-۲. تغییرات سطح ژئوئید زمین بر اساس طول و عرض جغرافیایی ۳۲۹
- شکل ۵-۳. نرخ تغییرات ارتفاع سطح آب دریا در اثر آب شدن ورقه‌های یخی گرینلند ۳۳۱
- شکل ۵-۴. نمای شماتیک از وجود یک توده یخی در قطب جنوب که وزن آن، باعث فرو رفتن لیتوسفر
 و ایجاد گرانش منفی شده است ۳۳۱
- شکل ۵-۵. نمای شماتیک از توده‌های یخی و اثر آنها قبل و بعد از آب شدن یخ‌ها ۳۳۳
- شکل ۵-۶. ارتباط جزایر آتشفشانی و نوسانات نسبی ارتفاع سطح دریا ۳۳۵
- شکل ۵-۷. نرخ تغییرات ارتفاع سطح دریا در حال حاضر در نتیجه تکنیک فعال و GIA ۳۳۶
- شکل ۵-۸. بازتاب نور خورشید در دوران یخبندان و تقویت کاهش دما ۳۳۷
- شکل ۵-۹. متوسط دمای جهانی ارتفاع سطح دریا برای ۲۰۰۰ سال، منحنی خطچین و ممتد به ترتیب
 بر اساس افزایش نرخ دمایی ۲/۵٪ و ۱٪، رسم شده‌اند ۳۴۱
- شکل ۵-۱۰. پروفیل منطقه‌ای دمای متوسط سطح آب (SAT) و فشار سطح آب (Ps) برای افزایش ۱ و
 ۲/۵ درصدی گازهای گلخانه‌ای ۳۴۲
- شکل ۵-۱۱. متوسط تغییرات حجم یخ دریا و برف با استفاده از مدل‌سازی با فرض افزایش ۲/۵
 درصدی گاز CO_2 ۳۴۲
- شکل ۵-۱۲. اختلاف میزان بارندگی در سطح زمین بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۴۱۰۰ با فرض افزایش
 ۲/۵٪ افزایش CO_2 ۳۴۳
- شکل ۵-۱۳. اختلاف درجه شوری ارتفاع سطح آب دریا بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۴۱۰۰ با فرض افزایش
 ۲/۵٪ افزایش CO_2 ۳۴۴
- شکل ۵-۱۴. نمای شماتیک از تغییرات ارتفاع سطح دریا و تغییرات اقلیمی ۳۴۵
- شکل ۵-۱۵. الف) طیف شدت تغییرات ماهیانه ارتفاع سطح دریا در بوستون، ب) فشار هوا (مقیاس: ۱
 میلی‌بار معادل ۱ سانتی‌متر، ج) اثر تنش بادهای محلی (۱۹۷۵-۱۹۵۰) ۳۴۶
- شکل ۵-۱۶. نمایی از گردش تسمه اقیانوسی (ترموهالین) و همبستگی بین تغییرات آب و هوا ۳۴۷
- شکل ۵-۱۷. خطوط تراز رسم شده، سرعت جریان‌های خلیجی را در غرب اقیانوس اطلس، نشان می‌دهد ۳۴۸
- شکل ۵-۱۸. خطوط تراز چرخه چرخشی سالانه ارتفاع سطح دریای آتلانتیک شمالی ۳۴۹
- شکل ۵-۱۹. توپوگرافی ارتفاع سطح دریا در طول فصل بهار (آوریل تا ژوئن)، با این فرض که سرعت
 ژئواستراتیفیک صفر باشد، توسط ساندی (۱۹۷۹)، محاسبه شده است (مقادیر بر حسب سانتی‌متر بیان شده‌اند) ۳۴۹
- شکل ۵-۲۰. اختلاف توپوگرافی ارتفاع سطح دریا بین فصل بهار و تابستان که توسط ساندی (۱۹۷۹)
 محاسبه شده است ۳۵۰

- شکل ۵-۲۱. نوسانات دی‌اکسیدکربن طی ۵۰۰ میلیون سال اخیر..... ۳۵۱
- شکل ۵-۲۲. نوسانات دمای زمین طی ۵۰۰ میلیون سال اخیر..... ۳۵۱
- شکل ۵-۲۳. تغییرات جهانی آب اقیانوسی با استفاده از پدیده‌های مختلف..... ۳۵۲
- شکل ۵-۲۴. نوسانات ارتفاع سطح دریا و دریاچه‌های مختلف در بازه زمانی ۱۸۶۰-۱۹۸۰..... ۳۵۳
- شکل ۵-۲۵. متوسط جابه‌جایی قطب به سانتی‌متر، μ در راستای عمود بر گرینویچ و λ در راستای گرینویچ است..... ۳۵۴
- شکل ۵-۲۶. نمودار شماتیک اثر نیروی کوریولیس..... ۳۵۵
- شکل ۵-۲۷. مسیر جریان‌های اقیانوس یا تسمه اقیانوسی (هالین)..... ۳۵۶
- شکل ۵-۲۸. نوسانات ارتفاع سطح آب دریاها در اثر سرگردانی قطبی..... ۳۵۷
- شکل ۵-۲۹. نمایش ارتفاع نسبی سطح دریا در مقابل زمان در نیم‌عرض $(\theta = 45^\circ, \phi = 0^\circ)$ ، مطابق با $m = 1 \text{ Deg/Myr}$ و حرکت قطبی به سمت گرینویچ..... ۳۵۸
- شکل ۵-۳۰. نمایش وابستگی PSI (بر حسب mm/yr) به زمان..... ۳۵۸
- شکل ۵-۳۱. رسوبات کف دریا به وسیله پروفیل‌های برداشت لرزه‌ای، قابل بررسی هستند..... ۳۵۹
- شکل ۵-۳۲. بازتاب انعکاسی، نماینده کف دریا در زمان شکل‌گیری است..... ۳۶۰
- شکل ۵-۳۳. شکل شماتیک از تغییرات ارتفاع سطح دریا از میلیون‌ها سال قبل تا حال حاضر..... ۳۶۱
- شکل ۵-۳۴. نمایی شماتیک از ارتباط فرورانش کف دریا و بسته قاره‌ای با تغییرات ضخامت پوسته قاره‌ای و سن بازشدگی اقیانوس قدیمی..... ۳۶۱
- شکل ۵-۳۵. مقطع و مقدار پشته میان اقیانوسی، به نرخ گستردگی اقیانوس..... ۳۶۲
- شکل ۵-۳۶. برخورد صفحه‌ای بر روی ارتفاع سطح دریا اثر می‌گذارد (شکل‌های سمت چپ)..... ۳۶۴
- شکل ۵-۳۷. نمودارها نشان دهنده عوامل مؤثر بر سطح اقیانوس هستند..... ۳۶۶
- شکل ۵-۳۸. مدل سراسیمی پیش‌بوم پوسامتر و آلن (۱۹۹۳). نرخ حمله ورقه فرورونده..... ۳۶۷
- شکل ۵-۳۹. فرآیند تغییر شکل خط ساحلی..... ۳۶۹
- شکل ۵-۴۰. رخساره‌های حاصل از تراس‌های فرسایشی در امتداد ساحل..... ۳۷۰
- شکل ۵-۴۱. نوسانات ارتفاع سطح دریا در طول ۱۴۰۰۰ سال..... ۳۷۱
- شکل ۵-۴۲. شکل شماتیک از بالازدگی ساحلی و پدیدار شدن رخساره‌های ساحلی..... ۳۷۱
- شکل ۶-۱. نمایی از لایه‌های درونی زمین و جایگاه لیتوسفر و استنوسفر..... ۳۸۱
- شکل ۶-۲. مقطعی از لایه‌های زمین و نمایش نوع سنگ‌های موجود در لیتوسفر و گوشته..... ۳۸۲
- شکل ۶-۳. ساختمان بخش‌های فوقانی کره زمین..... ۳۸۳
- شکل ۶-۴. تقسیم‌بندی کره زمین بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی..... ۳۸۴
- شکل ۶-۵. قسمت‌های مختلف لایه‌های زمین..... ۳۸۴
- شکل ۶-۶. نمودار الف) رفتار چگالی لیتوسفر، ب) رفتار گرمایی لیتوسفر..... ۳۸۵
- شکل ۶-۷. مشخصات لیتوسفر در مرزبندی‌های گرمایی..... ۳۸۶
- شکل ۶-۸. نمایش کلی ساختمان لیتوسفر اقیانوسی..... ۳۸۸
- شکل ۶-۹. تغییرات سرعت امواج P و S در قسمت‌های فوقانی گوشته..... ۳۸۸

- شکل ۶- ۱۰. نمای شماتیک از تقسیم‌بندی مرز صفحات بر اساس نوع حرکت آنها، الف) واگرا، ب) همگرا، ج) ترادیدی..... ۳۹۰
- شکل ۶- ۱۱. نمای شماتیک از ریف‌ت زون‌های اقیانوسی با نرخ گستردگی متفاوت..... ۳۹۱
- شکل ۶- ۱۲. نمایی شماتیک از نرخ‌های متفاوت گسترش کف اقیانوسی؛ الف) نرخ سرعت بسیار زیاد، ب) نرخ سرعت کم..... ۳۹۲
- شکل ۶- ۱۳. نمای از بازشدگی اقیانوسی در دریای ژاپن..... ۳۹۲
- شکل ۶- ۱۴. حاشیه همگرای اقیانوسی - اقیانوسی..... ۳۹۳
- شکل ۶- ۱۵. حاشیه همگرای اقیانوسی - قاره‌ای..... ۳۹۴
- شکل ۶- ۱۶. نقشه پراکندگی عمیق‌ترین گودال‌ها در اقیانوس..... ۳۹۴
- شکل ۶- ۱۷. حاشیه همگرای اقیانوسی - قاره‌ای..... ۳۹۵
- شکل ۶- ۱۸. حاشیه همگرای قاره‌ای - قاره‌ای..... ۳۹۵
- شکل ۶- ۱۹. مراحل برخورد دو قاره به یکدیگر..... ۳۹۶
- شکل ۶- ۲۰. نمایی از تشکیل رشته کوه همالیا در اثر برخورد قاره هند به ورقه اوراسیا..... ۳۹۷
- شکل ۶- ۲۱. پراکندگی مرزها در پوسته زمین..... ۳۹۷
- شکل ۶- ۲۲. خصوصیات فیزیکی در زون فرونشانی..... ۳۹۹
- شکل ۶- ۲۳. نمای شماتیک از گسل‌های امتداد لغز..... ۴۰۰
- شکل ۶- ۲۴. ساز و کار کار گسل‌های امتداد لغز در اقیانوس..... ۴۰۰
- شکل ۶- ۲۵. نقشه نمایش دهنده ساختارهای اصلی جنوب آسیا..... ۴۰۱
- شکل ۶- ۲۶. پراکندگی نقاط داغ در زمین..... ۴۰۲
- شکل ۶- ۲۷. نقاط داغ به صورت کمائی یا نیم‌دایره در جزایر هاوایی..... ۴۰۲
- شکل ۶- ۲۸. جایگاه اولیه و حال حاضر قاره‌ها..... ۴۰۴
- شکل ۶- ۲۹. نمونه شماتیک از پیوند سه‌گانه پایدار..... ۴۰۵
- شکل ۶- ۳۰. نمونه شماتیک از پیوند سه‌گانه ناپایدار..... ۴۰۶
- شکل ۶- ۳۱. نقشه شماتیک از مهمترین پیوند سه‌گانه..... ۴۰۷
- شکل ۶- ۳۲. مراحل چرخه ویلسون..... ۴۰۸
- شکل ۶- ۳۳. مراحل چرخه تشکیل ابر قاره..... ۴۰۹
- شکل ۶- ۳۴. نقشه سه بعدی یک زون انباشت که به صورت عمود بر محور کافتش..... ۴۱۰
- شکل ۶- ۳۵. انواع مختلف کمان جزایر و نواحی پس کمان..... ۴۱۳
- شکل ۶- ۳۶. مراحل برخورد قاره- قاره..... ۴۱۵
- شکل ۶- ۳۷. نقشه ساخت‌های اصلی در شرق مدیترانه، نمایش دهنده نحوه فشرده شدن و گریز جانبی ترکیه به سمت غرب در اثر حرکت به سمت شمال ورقه عربستان است..... ۴۱۶
- شکل ۶- ۳۸. عوامل کنترل کننده شکل هندسی، جریان و فرایندهای نهشته‌گذاری..... ۴۱۷
- شکل ۶- ۳۹. الف) مراحل اثر زمین‌ساخت فعال بر دره‌ها، ب) شکل سه بعدی اثر..... ۴۱۸
- شکل ۶- ۴۰. ترتیب ایجاد اقیانوس‌ها از قاره‌های قدیمی یا قاره‌های تحت تنش شدید..... ۴۱۸

- شکل ۶-۴۱. رودخانه ماری در جنوب ولز استرالیا..... ۴۱۹
- شکل ۶-۴۲. اثر زمین‌ساخت فعال بر زهکشی رودخانه‌ها..... ۴۲۰
- شکل ۶-۴۳. نمونه‌هایی از انواع کانال‌های آبرفتی با بارهای همراه..... ۴۲۱
- شکل ۶-۴۴. ارتباط بین شیب کف دره و حرکت موج رودخانه..... ۴۲۱
- شکل ۶-۴۵. اثر زمین‌ساخت بر رودخانه برای هر قسمت، ارتباط بین حرکت موج و شیب رسوب‌گذاری بعد از اعمال نیرو، نشان داده شده است..... ۴۲۲
- شکل ۶-۴۶. نمونه‌ای از چرخه آب در محدوده‌های کارستی..... ۴۲۳
- شکل ۶-۴۷. شکل شماتیک از چگونگی تشکیل مجمع‌الجزایر آتشفشانی..... ۴۲۶
- شکل ۶-۴۸. شکل شماتیک از چگونگی تشکیل دره‌های کافی..... ۴۲۶
- شکل ۶-۴۹. سلسله‌های همرفتی موجود در استنوسفر که باعث حرکت صفحات می‌شود..... ۴۲۸
- شکل ۶-۵۰. انواع روش‌های انتقال حرارت..... ۴۳۰
- شکل ۶-۵۱. چهار مکانیسم اصلی، در حرکت ورقه‌های لیتوسفر..... ۴۳۲
- شکل ۶-۵۲. نقشه پراکندگی آتشفشان‌های زمین..... ۴۳۳
- شکل ۶-۵۳. سیستم کافت قاره‌ای در شرق آفریقا..... ۴۳۴
- شکل ۶-۵۴. تشکیل مجمع‌الجزایر امپرو در اقیانوس آرام ناشی از نقاط داغ..... ۴۳۴
- شکل ۶-۵۵. آتشفشان‌های ناشی از بازسازی سیر اقیانوسی..... ۴۳۵
- شکل ۶-۵۶. آتشفشان‌های ناشی از زون‌های فروانش..... ۴۳۵
- شکل ۶-۵۷. انواع مختلف فوران آتشفشان‌ها..... ۴۳۷

www.ketab.ir

فهرست جداول

جدول ۱-۱. گرانروی‌های مواد مختلف	۵۹
جدول ۱-۲. مدل‌های رئولوژیک خزش	۷۴
جدول ۱-۳. مدل‌های رئولوژیکی برای سنگ‌های مختلف	۸۰
جدول ۱-۲. توابع لژاندر همراه	۱۲۶
جدول ۲-۲. پارامترهای تباین مرزی ثابت مدل ۵ لایه‌ای زمین. r فاصله از مرکز زمین، μ چگالی لایه‌ها و μ صلیبیت است.	۱۹۵
جدول ۲-۳. پارامترهای مدل ۵ لایه‌ای زمین با استفاده از روش متوسط‌گیری حجم. r فاصله از مرکز زمین، μ چگالی لایه‌ها و μ صلیبیت است.	۱۹۵
جدول ۳-۱. خصوصیات مدل ۳۱ لایه‌ای زمین. r فاصله از مرکز زمین، μ چگالی لایه و μ صلیبیت لایه است.	۲۴۸
جدول ۴-۱. رانه تخمین زده شده توسط مؤلفان مختلف برای زون‌های درجه زوج (واحد سال/°) ۲۹۳(۱۰ ^{۱۱})	۲۹۳
جدول ۴-۲. رانه تخمین زده شده توسط مؤلفان مختلف برای زون‌های درجه فرد (واحد سال/°) ۲۹۳(۱۰ ^{۱۱})	۲۹۳
جدول ۴-۳. ویژگی‌های ماهواره‌های مورد استفاده برای تحلیل‌های روش SLR	۲۹۴
جدول ۵-۱. تغییرات توده‌های یخی زمین در دهه‌های مختلف (واحد آنها mm/yr)	۳۴۰
جدول ۵-۲. برخی از ساز و کارهای ساده که منجر به تغییرات ارتفاع سطح دریا می‌شود.	۳۷۴
جدول ۶-۱. ویژگی‌های فیزیکی و سرعت امواج در لایه‌های مختلف لیتوسفر	۳۸۸

www.ketab.ir

سخن نویسندگان

زمین از بدو پیدایش، تحولات زیادی را پشت سر گذاشته و با وجود پیشرفت‌های چشمگیر دانش بشر، هنوز ناشناخته‌های متعددی از این سیاره پویا، در پیش روی انسان قرار دارد. اگر چه زمین قدرت نورافشانی همانند ستارگان را ندارد ولی کنش‌های درونی آن توانسته است این سیاره خاموش را در ردیف مخلوقات پر جنب و جوش پرندگان جهان قرار دهد. زمین‌لرزه، آتشفشان، گسلش، زمین‌لغزش و زمین‌نشست از جمله پدیده‌هایی است که آرامش را از این شبه کره‌ی اسرارآمیز سلب نموده و شگفتی‌هایی متعددی از آن را به جای گذاشته است. معادن زیرزمینی متعدد، مخازن عظیم نفتی، سفره‌های آب زیرزمینی، کوه‌های سر به فلک کشیده، دشت‌های وسیع، اقیانوس‌های بیکران و جنگل‌های انبوه همه و همه ناشی از پویایی این جزء از عالم هستی است. گاهی این زیستگاه طبیعی، در برابر چرخش روزگار، انقباض و انبساط از خود نشان داده و لایه‌های زیرزمینی به شدت چین‌خورده‌ای را شکل داده که پیدایش آنها باور نکردنی است که بیش‌تر از واقعیت به نقاشی‌های دست ساخته انسان شبیه‌اند. این شگفتی‌ها نیازمند کنکاشی دقیق می‌باشند و به همین دلیل، پردازش این عجایب طبیعت، بخشی از علوم روز دنیا را به خود اختصاص داده است. ماجرای پویایی زمین و تحولات ناشی از آن یکی از جذاب‌ترین موضوعات علم ژئوفیزیک به نام ژئودینامیک است.

ژئو در زبان پارسی به معنی زمین و دینامیک نیز، پویایی نام گرفته است. تحلیل وقایع کنش‌زای زمین از اصولی‌ترین مباحثی است که دانشجویان، پژوهشگران و اساتید رشته‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، معدن، عمران، محیط‌زیست و جغرافیای طبیعی به آن نیازمند هستند. اگرچه امروزه، موضوع ژئودینامیک یکی از مباحث اصلی دروس تخصصی دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی بسیاری از گرایش‌های علوم زمین در نظر گرفته شده ولی با

این وجود هنوز کتاب مستقلی که عناوین مورد نیاز را به طور جامع به زبان پارسی تشریح نماید و ارتباط ریاضی این پدیده‌ها را به خوبی ارائه کند منتشر نشده است.

در نگارش این اثر، سعی شده تا ضمن رعایت سرفصل‌های مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، مباحث پیچیده ژئودینامیک، به زبان علمی، شیوا و بر اساس جدیدترین مطالب روز دنیا ارائه شوند، امید آنکه مورد توجه و استفاده علاقه‌مندان گرامی قرار گیرد.

در تهیه این اثر تشویق اساتید ارجمندی از جمله جناب آقای پروفسور بهرام عکاشه نقش مؤثری داشت که سپاس و سنایش قلبی خود را تقدیم ایشان می‌نماییم. همچنین بر خود لازم می‌دانیم تا از سنایت ویژه مدیریت محترم مؤسسه انتشارات امیرکبیر و همچنین توجه خاص جناب آقای دکتر کریمی معاون محترم علمی و فرهنگی انتشارات امیرکبیر و همکاران بخش‌های فنی و اجرایی مؤسسه مذکور که در تصویب و روند چاپ و نشر این کتاب کمال همکاری و مساعدت را نمودند تشکر و قدردانی نماییم.

نهایتاً از همراهی سرکار خانم مهندس سعیده احمدی که در تهیه و فیش‌برداری مطالب همکاری بی‌شائبه‌ای داشتند سپاسگزاری می‌شود.

با وجود تلاش وافر در چینش مطالب، بدون شک کاستی‌هایی نیز به‌جای مانده، که اطمینان داریم با دریافت نظرات ارزشمند شما از راه پست الکترونیکی aryamanesh.book@gmail.com در ویرایش‌های آتی، برطرف خواهند شد.

با احترام و سنایش

دکتر محمد آریامنش استادیار ژئوفیزیک دانشگاه پیام نور تهران

مهندس زهرا محمودپور کارشناس ارشد مهندسی معدن

(تهران، تابستان ۱۳۹۱ هجری خورشیدی)

جدول اختصارات

اختصارات	معادل انگلیسی
APW	Appearance Polar Wander
CMB	Core Mantle Boundary
CVISC	Visco elastic-Plastic Model
DORRIS	Doppler Orbitography And Radio Positioning Integrated System
GEOS	Geodetic Earth Orbiting Satellite
GIA	Glacial Isostatic Adjustment
GPS	Global Positioning System
LB	Lower Boundary
LLN	Load Love Number
LUMB	Lithosphere- Upper Mantel Boundary
NM	New Model
NMA	Normal Mode Analysis
OM	Old Model
PNT	Prime Number Theorem
PRARE	Precise Range and Rang-Rate Equipment
PREM	Preliminary References Earth Model
RSL	Relative sea level

اختصارات	معادل انگلیسی
SHELVIP	Elastic-Plastic Visco plastic Model
SLR	Satellite Laser Ranging
TPW	True Polar Wander
Tr	Time Relaxation
UB	Upper Boundary
VIPLA	Elastic-Visco plastic Model
VLBI	Very Long Baseline Interferometry

پیشگفتار کتاب

هدف ژئوفیزیک و کاربرد آن در زمین عبارت است از تعیین ترکیب و رفتارهای درونی و بیرونی زمین. ژئوفیزیک تا به امروز پیشرفت‌های چشم‌گیر و شگرفی داشته است. به طوری که امکان آگاهی از همه زمینه‌های آن برای یک شخص مقدور نمی‌باشد.

ژئودینامیک در حقیقت شاخه‌ای از ژئوفیزیک است که در ارتباط با پویایی زمین مباحثی را ارائه می‌نماید. زمین از بدو پیدایش (۴/۶ میلیارد سال قبل) تا به حال همواره در حال تغییر و تحول بوده است. این تغییرات ناشی از دو فرآیند درونی و بیرونی زمین می‌باشد. بنابراین تا زمانی که این فرآیندها حضور دارند، پویایی (دینامیک) زمین نیز متبعر به تغییر شکل سطح آن خواهد شد.

در فرآیندهای بیرونی، زمین در معرض فرسایش ناشی از هوازدگی (هر عاملی که باعث خرد شدن و شکستن سنگ‌ها شود، با هوازدگی فیزیکی یا شیمیایی بیان می‌شود)، فرسایش توسط آب‌های جاری، فرسایش و رسوبگذاری در اقیانوس‌ها و دریاها، فرسایش و رسوبگذاری توسط یخچال‌ها و بادهای و غیره قرار دارد. همه این عوامل سبب ایجاد تغییرات محلی و سراسری بر روی سطح زمین می‌شوند. اما فرآیندهای مهم‌تر، فرآیندهای درونی هستند. این فرآیندها از آن جهت که سبب تغییرات شدید و سراسری هستند حائز اهمیت می‌باشند. این فرآیندها به عوامل تکتونیکی موسومند و باعث ایجاد پدیده‌هایی نظیر تغییر شکل پوسته (زمین‌ساخت فعال)، فعالیت‌های ماگمایی، دگرگونی، زلزله، سیل و بسیاری موارد دیگر می‌شوند.

بنابراین ژئودینامیک یک علم جامع و کامل در ارتباط با رفتارها و واکنش‌های زمین در مقابل نیروها و فرآیندهای مختلف خواهد بود. علاوه بر موارد یاد شده که بیشتر جنبه زمین‌شناسی این علم را در بردارند، ژئودینامیک به نحوه اندازه‌گیری و استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی نظیر دورسنجی و استفاده از ماهواره‌ها برای کشف و بررسی این موارد و در نهایت مدل‌سازی

پدیده‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی نیز می‌پردازد. در این راستا، در این کتاب سعی داریم تا خوانندگان را با علم ژئودینامیک (پویایی زمین)، فرایندهای مهم که در طول زمان سبب تغییر شکل‌های پوسته زمین می‌شوند و نیز روش‌های ریاضی لازم برای حل برخی از مسائل مرتبط با تغییرات زمین که به وسیله فرایندهای مختلف زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی پدید می‌آیند و رئولوژی (علم جریان مواد) زمین را درگیر می‌کنند، آشنا سازیم. این هدف زمانی محقق خواهد شد که در ابتدا خواننده با مباحثی چون فرایندهای کلی مرتبط با تغییرات زمین، رفتار زمین تغییر شکل نیافته و بدون بارگذاری، چرخش‌های دینامیکی، نحوه پاسخ زمین به آشفتگی‌های ناشی از بارگذاری سطحی و درونی نظیر زمین‌لرزه‌های مرتبط با گسل‌های لرزه‌ای در لیتوسفر زمین و موارد دیگر آشنا شود.

پس از آن نیازمند آن هستیم که خواننده را با راه‌حل مسائلی که در تغییر شکل مواد مختلف (به خصوص موادی نظیر مواد گرانرو-کشسان و ماکسولی که رفتاری مشابه با زمین دارند) نقش دارند، آشنا نماییم. در پی آن نیازمندیم، بدانیم که هر کدام از فرایندهای نام برده چه آثاری را به دنبال خواهند داشت. مثلاً باید بدانیم که چرخش‌های دینامیکی منجر به تغییرات ارتفاع سطح دریا می‌شوند و این تغییرات خود عاملی برای ایجاد تغییرات دیگری نظیر جابه‌جایی بارگذاری‌های انجام شده بر روی سطح زمین و غیره خواهند شد.

بنابراین هدف بالاتر علم ژئودینامیک، یافتن ریشه اصلی و ارزیابی تغییرات زمین است که در نهایت به وسیله آن می‌توان یک سیستم منسجم از رفتارهای زمین را معرفی کرد که منجر به ایجاد بسیاری از پدیده‌های آن نظیر سیل، زلزله، آشفشان و موارد دیگری می‌شوند که بر روی زندگی انسان تأثیر بسیار زیادی دارند.

از ارتباط قوی که بین مدل‌سازی ریاضی و پدیده‌های فیزیکی و روابط حاکم بر میدان گرانشی زمین که وابسته به زمان هستند و اجزاء استاتیکی که در طول موج‌های کوتاه و بلند وجود دارند، و به وسیله علم ژئودزی بررسی می‌شوند، می‌توان تغییرات پوسته زمین را مشخص نمود. بر این اساس می‌توان گفت که ژئودینامیک از علم ژئوفیزیک و ژئودزی مشتق شده است و در حقیقت با استفاده از آن می‌توان چشم‌اندازی به فیزیک درونی زمین و تغییرات سطحی با منشأ درونی و بیرونی و همچنین استفاده از تکنیک‌های مختلف جهت بررسی تغییراتی که در سیاره ما رخ می‌دهد و منشأ بیشتر آنها در رئولوژی گوشته است، باز نمود. بنابراین، این مطالب ابزاری است برای درک بهتر فرایندهایی که وابسته به عمق و تغییرات گوشته هستند.

در مجموع و با اهدافی که ذکر شد، این کتاب بر اساس سرفصل‌های دروس مصوب شورای برنامه‌ریزی، آموزشی دانشگاه تهران تألیف شده است و سعی شده که مطالب هر فصل بر اساس

آخرین مقالات و کتب مرتبط با آن باشد. بر این اساس کتاب ژئودینامیک در شش فصل تنظیم شده و آنچه در این فصول می‌خوانیم به شرح ذیل است:

در فصل اول: به دلیل اهمیت موضوع، آثار تنش و کرنش در همه پدیده‌های ایجاد شده در زمین در دو مبحث جداگانه به صورت دو بُعدی و سه بُعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه همین فصل به دلیل ضرورت شناسایی رفتار زمین در مقابل تنش‌ها و نیروهای وارده از علم رئولوژی که در واقع علم مرتبط با تغییر شکل مواد است، صحبت به میان آمده و سعی شده است که انواع رئولوژی مواد به طور مختصر و کلی بیان گردد. سپس از پرکاربردترین معادلات دیفرانسیلی سخن به میان آمده است که برای مدل‌سازی زمین مورد نیاز خواهند بود. در این فصل با فرض بر کروی بودن زمین و تشکیل آن از مواد تراکم‌ناپذیر، به بررسی بسط‌های هارمونیک و استفاده از حل‌های اسفروئیدی و توروئیدی برای مواد تراکم‌ناپذیر پرداخته شده است.

در فصل دوم: به بررسی نیروهای اثرکننده بر زمین که شامل نیروهای داخلی و خارجی زمین هستند و آثار و تغییرات ناشی از اعمال آنها بر پوسته پرداخته شده است. تغییرات پوسته زمین به صورت تغییرات گرانشی نمایان می‌شود. بنابراین در ادامه این فصل به تحلیل پاسخ زمین به این تغییرات که با نام اعداد لاو شناخته می‌شوند، پرداخته‌ایم. در نهایت با در نظر گرفتن حالات مختلف گوشته و لیتوسفر، رفتار زمین در درجات هارمونیک مختلف مدل‌سازی شده است.

در فصل سوم: نیروهای اثرکننده را از جهت بارگذاری مورد بررسی قرار داده‌ایم، در این فصل منشأ تمامی این تغییرات گوشته در نظر گرفته شده است و نیروهای اصلی اثرگذار بر روی آن یعنی: سرگردانی قطبی، تغییرات بارگذاری حاصل از دوره‌های یخبندان و بعد از آن تحلیل شده و در نهایت تغییرات عمقی گرانشی گوشته که حاصل از TPW، عصر یخبندان و دوره‌های بعد از آن می‌باشد و همچنین تغییرات چگالی متناسب با عمق، توضیح داده شده است.

در فصل چهارم: بخش ژئودزی علم ژئودینامیک توضیح داده شده است. در این فصل از روش‌های مهم سنجش از دور که شامل روش SLR یا فاصله‌یابی با استفاده از لیزر و ارتباط آن با تغییرات گرانشی زمین می‌باشد، صحبت شده است. در این فصل به دلیل ویژگی‌های شاخص روش SLR مبنی بر اندازه‌گیری مؤلفه قائم تغییر شکل‌ها و تغییرات جرمی که به شناسایی و اندازه‌گیری میزان انباشته شدن رسوبات و پایین رفتن حوضه‌های دریایی در اثر بارگذاری آنها، کمک شایانی می‌کند، در مورد روش SLR توضیح داده شده است. همچنین از آنجا که در این فصل بیشتر مباحث ویژه گرانی مد نظر می‌باشد، از توازن جرم و ایزوستازی نیز مطالبی ارائه گردیده است.

در فصل پنجم کتاب به مهمترین اثر دینامیک چرخشی زمین یعنی تغییرات ارتفاع سطح دریا پرداخته شده است. در این فصل سعی کرده‌ایم تا علاوه بر بررسی عوامل مؤثر در ایجاد این نوع

تغییرات که می‌تواند منشأ درونی و یا بیرونی داشته باشد، میزان نوسانات ارتفاع سطح دریا در گذشته، حال و آینده را نیز که خود یکی از عوامل مؤثر در تغییرات لیتوسفر است، بررسی نماییم. به دلیل اهمیت موضوع استفاده از خطوط ساحلی برای مطالعه تغییرات ارتفاع سطح دریا، پایان فصل حاضر به این موضوع اختصاصی داده شده است.

در فصل ششم و آخرین فصل از این کتاب، به مهمترین مبحث ژئودینامیک یعنی زمین‌ساخت ورقه‌ای پرداخته شده است. دلیل اهمیت این موضوع آن است که بسیاری از تغییر شکل‌های ایجاد شده و پویایی زمین در ارتباط با زمین‌ساخت ورقه‌ای می‌باشد. در این فصل ابتدا به صورت اجمالی شرایط حاکم بر لایه‌های مختلف زمین شرح داده شده است، سپس به خواص فیزیکی هر یک پرداخته و اثرات هر کدام را توضیح داده‌ایم. در ادامه این فصل از مرزهای هر کدام از ورقه‌های لیتوسفر و نحوه حرکت آنها نسبت به یکدیگر و آثار آنها، مطالبی گفته شده است. سپس از موتورهای حرکتی این ورقه‌ها صحبت نموده‌ایم و در پایان فصل نیز درباره مهمترین پدیده‌های ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساخت بر روی زمین مطالبی ارائه شده است.