

بسمه تعالی

دینامیک جزر و مد

تألیف:

دکتر سعید ملا اسماعیل پور

تابستان ۱۴۰۱

پیش‌گفتار

در میان سیارات منظومه شمسی، زمین تنها سیاره‌ای است که دارای حجم زیاد آب است، به‌طوری‌که، تقریباً سه چهارم سطح آن از آب پوشیده شده است. بیشتر مردم با تغییرات روزانه سطح آب دریاها به‌عنوان جز و مد آشنا هستند. انسان سال‌ها قبل از میلاد از جزر و مدها و جریانات آن بهره می‌گرفت. به‌طور نمونه، استفاده از جزر و مد و فناوری انرژی جزر و مدی سابقه‌ای طولانی دارد. سوابق به‌کارگیری این انرژی به‌وسیله آسیاب‌هایی که با قدرت جزر و مدی کار می‌کردند، در سواحل فرانسه، انگلستان و اسپانیا به ۱۱۰۰ سال قبل از میلاد می‌رسد. دریانوردان پیشین به دانستن نوسانات جزر و مدهای متناوب و اینکه کجا و چه زمانی می‌توان از آن استفاده کرد، یا چه زمانی با یک جریان جزر و مد قوی روبه‌رو خواهند شد، نیاز داشتند. از طرفی، جزر و مدها نقش بسیار مهمی در اطلاعات اقلیم جهانی و نیز اکوسیستم‌ها برای ساکنان نواحی اقیانوسی بازی می‌کنند. علاوه بر آن، در مقایسه با سایر منابع پاک نظیر باد، خورشید، زمین گرمایی و غیره، انرژی جزر و مدی را می‌توان برای قرن‌های متمادی از نظر زمانی و دامنه پیش‌بینی کرد. هر چند، مشکلات و سختی‌های زیادی برای گردآوری این منبع انرژی در مقایسه با سایر منابع انرژی وجود دارد.

انرژی جزر و مدی پاک، تمام نشدنی و تجدیدپذیر است. این ویژگی‌ها در آینده‌ای نزدیک آن را تبدیل به منبع مهمی از انرژی برای تولیدات جهانی خواهد نمود. زیرا نفت و ذغال سنگ با داشتن موادی چون سولفور، سبب انتشار گازهای گل‌خانه‌ای و به دنبال آن آلودگی‌های عظیم جوی خواهند شد. به همین علت، امروزه انرژی‌های پاک تجدیدپذیر جهت تولید انرژی الکتریکی، دانشمندان و مهندسان را به سمت و سوی بهره‌برداری از این منابع انرژی ترغیب نموده است. با تمام شدن ذخایر نفتی، انتشار گازهای گل‌خانه‌ای در اثر سوختن زغال‌سنگ، سوخت‌های فسیلی و نفتی دیگر و نیز انباشتگی پسماندهای هسته‌ای ناشی از رآکتورهای هسته‌ای، بشر را ناچار به جای‌گزینی هرچه بیشتر منابع انرژی سنتی با انرژی‌های تجدیدپذیر در آینده کرده است. از طرفی، همه این موارد مستلزم بالا بردن اطلاعات و شناخت هرچه بیشتر از این پدیده طبیعی می‌باشد. علاوه بر موارد بالا، امروزه جریان‌ها و جزر و مدها برای حفظ مسیر تغییرات در سطوح آب، کمک به پیش‌بینی یک تسونامی یا هر تحول ناگهانی و عمده دیگر مورد بررسی قرار گرفته و اندازه‌گیری می‌شوند.

علت تشکیل جزر و مد دریا به سبب نیروی گرانشی ماه و خورشید بر آب دریاهاست و چون ماه نسبت به خورشید بسیار به زمین نزدیک‌تر است، در مد آب دریا بسیار مؤثر است. نیروی گرانشی ماه بر زمین در بخش‌هایی از زمین که رو به ماه است، نسبت به بخش‌های دیگر بیشتر است. این نیرو سبب می‌شود که سطح جامد زمین نیز بالا و پایین شود. البته اثر نیروی گرانشی ماه بر سطح جامد زمین به قدری اندک است که محسوس نمی‌باشد. با وجود این، بخش‌هایی از آب اقیانوس‌ها در مقابل ماه قرار گرفته‌اند و چون آب مایع است، در جهت نیروی گرانشی ماه به بالا کشیده می‌شود. همچنان که زمین به دور محورش می‌چرخد، چون ماه نیز می‌گردد، برآمدگی آب نیز در همان مسیر وضعیت خود را حفظ می‌کند. وقتی که برآمدگی آب از مکان‌های خاصی می‌گذرد، سطح دریا بالا می‌آید و آن موقع است که مد تولید می‌شود. وقتی سطح آب پایین می‌آید، می‌گوییم جزر پدید آمده است.

در رابطه با جزر و مد کتاب‌های زیادی نوشته شده است، اما مباحث این کتاب به جزر و مدهای اقیانوسی و همچنین جزر و مد در تاریخ زمین‌شناسی می‌پردازد. از طرفی ما در این مجموعه جزر و مدها را در مقیاس جهانی، مقیاس اقیانوسی و مقیاس ساحلی بررسی می‌کنیم و همچنین نشان خواهیم داد که چگونه لایه‌های سنگ‌های رسوبی، چرخه‌های جزر و مدی قدیمی را در خود حفظ می‌کنند و چگونه جزر و مدها بینشی از فاصله زمین تا ماه در طول تاریخ زمین فراهم می‌سازند.

دکتر سعید ملا اسماعیل‌پور

فهرست مطالب

فصل اول	۸
مقدمه‌ای بر جزر و مدها	۸
۱-۱- مقدمه	۹
۱-۲- باورها و عقاید جزر و مدی در زمان باستان	۹
۱-۳- اهمیت مطالعه جزر و مد	۱۵
۱-۴- جزر و مد و علت تشکیل آن	۱۶
۱-۵- جریانات جزر و مدی	۱۹
۱-۶- مشخصات کلی یک موج اقیانوسی	۱۹
۱-۷- جزر و مدهای شدید و خفیف	۲۰
۱-۸- نیروهای کششی ماه و زمین	۲۳
۱-۹- نظریه تعادلی جزر و مد	۲۶
۱-۱۰- جزر و مد واقعی	۲۹
۱-۱۱- نظریه دینامیکی جزر و مدها	۳۰
۱-۱۱-۱- تأثیر عوامل مختلف بر رفتار جزر و مدها	۳۱
۱-۱۲- الگوهای جزر و مدی	۳۲
۱-۱۳- جزر و مد در خورها و خلیج‌ها	۳۵
۱-۱۴- جزر و مد در آب‌های کم‌عمق	۳۶
۱-۱۵- سواحل جزر و مدی	۳۶
۱-۱۶- رزونانس (تشدید) جزر و مدی	۳۸
۱-۱۷- پیش‌بینی جزر و مد و مأخذ جزر و مدی	۳۹
۱-۱۸- تسونامی	۴۲
۱-۱۹- جزر و مد شکافی (ریپ تاید)	۴۳
۱-۲۰- جزر و مد در دریای عمان	۴۴
۱-۲۱- جزر و مد در خلیج فارس	۴۵
۱-۲۲- جزایر جزر و مدی	۴۹
۱-۲۳- جزر و مدهای قرمز	۵۱
۱-۲۳-۱- جزر و مد قرمز چابهار	۵۳

فصل دوم	۵۴
جزر و مد در نگاشت سنگی	۵۴
۱-۲- مقدمه	۵۵
۲-۲- پیشینه مختصری از رسوب‌شناسی فیزیکی	۵۵
۲-۳- چرخه‌های جزر و مدی در نگاشت سنگی I: چرخه فراکشند-فروکشند و چرخه Neap-Spring-Neap در هومر، مینیسوتا	۵۶
۲-۴- چرخه‌های جزر و مدی در نگاشت سنگی II: سه چرخه قمری ماهانه، چرخه نیم‌سالانه و چرخه گره قمری	۶۴
۲-۵- محاسبه فاصله زمین تا ماه از چرخه‌های جزر و مدی محفوظ در نگاشت سنگی	۷۴
۲-۶- تاریخ سیستم زمین- ماه	۷۶
۲-۷- پایداری تکانه زاویه‌ای	۷۶
۲-۸- حد روشی (Roche)	۷۸
۲-۹- شواهد عقب‌نشینی ماه از نگاشت سنگی	۸۰
فصل سوم	۸۳
نیروهای جزر و مدی	۸۳
۱-۳- مقدمه	۸۴
۲-۳- قانون عمومی گرانش	۸۴
۳-۳- نیروی دیفرانسیل و نیروی مولد جزر و مدی	۸۵
۳-۴- آزمایش سقوط آزاد	۸۵
۳-۵- نیروهای مولد جزر و مدی ناشی از خورشید	۸۹
۳-۶- نیروهای جزر و مدی در یک نقطه دلخواه نزدیک زمین	۹۱
۳-۷- مؤلفه‌های افقی و قائم نیروی جزر و مدی	۹۲
۳-۸- تحریف استاتیکی سطح آب	۹۵
۳-۹- نیروهای جزر و مدی در زمین چرخان	۹۶
۳-۱۰- تابع پتانسیل نیروهای جزر و مدی	۹۷
۳-۱۱- نیروی پتانسیل ناشی از اختلاف بین نیروهای ماه و زمین	۹۹
۳-۱۲- توصیف ریاضی نوسانات واداشته	۱۰۰
۳-۱۳- نیروهای جزر و مدی در سیستم دو - جسم (محاسبه شتاب جزر و مدی)	۱۰۳
۳-۱۴- سیستم زمین- ماه: رویکرد برداری برای حالت کلی دو- جسم	۱۰۸

۱۱۰.....	۳-۱۵- سیستم زمین - ماه: بسط رویکرد برداری و بازگشت به مثال‌های سقوط آزاد
۱۱۸.....	۳-۱۶- انرژی جزر و مدی
۱۲۲.....	۳-۱۶-۱- انرژی پتانسیل
۱۲۲.....	۳-۱۶-۲- انرژی جنبشی
۱۲۳.....	۳-۱۷- جزر و مد تعادلی: رویکرد انرژی پتانسیل به سیستم زمین- ماه
۱۲۵.....	۳-۱۸- اثر جزر و مدی ناشی از خورشید
۱۳۱.....	۳-۱۹- اثرات چرخش زمین
۱۳۳.....	۳-۲۰- مقایسه با سیستم‌های دیگر دو جسمی: توپ‌ها بر روی میز گردان و اتم بور
۱۳۷.....	۳-۲۱- رفتار جزر و مد‌های اقیانوسی با استفاده از رویکرد هیدرودینامیکی
۱۳۷.....	۳-۲۲- نیروی دیفرانسیل در مقیاس جهانی
۱۳۷.....	۳-۲۳- جزر و مد در مقیاس اقیانوسی
۱۴۱.....	۳-۲۴- جزر و مد در مقیاس ساحلی
۱۴۳.....	۳-۲۴-۱- گمانه‌های جزر و مدی
۱۴۷.....	۳-۲۵- خلاصه و نتیجه‌گیری
۱۵۰.....	پیوست‌ها
۱۵۱.....	پیوست ۱
۱۵۱.....	مسئله سیستم یک - جسم برای محاسبه دوره تناوب (فرض؛ زمین ثابت و ماه حول آن می‌گردد).
۱۵۲.....	پیوست ۲
۱۵۲.....	مسئله سیستم دو - جسم، محاسبه دوره تناوب (زمین و ماه حول مرکز مشترک می‌گردند).
۱۵۵.....	پیوست ۳
۱۵۵.....	مشتقات معادله دلخواه: سری‌های تیلور برای چند تابع دلخواه
۱۵۷.....	پیوست ۴
۱۵۷.....	اثبات معادلات
۱۵۹.....	پیوست ۵
۱۵۹.....	اثبات معادله پتانسیل گرانشی (حالت سه بعدی)
۱۶۵.....	پیوست ۶
۱۶۵.....	مقادیر و نتایج عددی برای محاسبه جزر و مد‌ها
۱۷۰.....	پیوست ۷

۱۷۰.....	ثابت‌های نجومی
۱۷۱.....	فهرست منابع و مراجع
۱۷۷.....	فرهنگ لغات و اصطلاحات
۱۸۷.....	واژه‌نامه

فصل اول

مقدمه‌ای بر جزر و مدها

۱-۱- مقدمه

طبق تعریف، جزر و مد جابه‌جایی‌های قائم و متناوب آب موجود در سطح زمین می‌باشد. بیشتر مردم می‌دانند که جزر و مد در ارتباط با ماه و جاذبه است، اما تعداد کمی از آنها در رابطه با اینکه جزر و مد دو بار در روز اتفاق می‌افتد، دانش و اطلاعات کافی دارند. غالباً جزر و مدها آن گونه که باید مورد توجه و ارزش قرار نگرفته‌اند. یونانیان و رومیان باستان اصولاً به‌طور خاص علاقه‌ای به جزر و مد نداشتند. زیرا در دریای مدیترانه، جزر و مدها تقریباً غیرقابل مشاهده هستند. حتی اهمیت ندادن به جزر و مدها، منجر به از دست دادن بادبان‌های جنگی سزار در سواحل انگلیس شد. او به‌خاطر موانع جزر و مدی بازگشتی، آن گونه که باید نتوانست دشمنان خود را شکست دهد. اوایل، جزر و مدها با انواع و اقسام افسانه‌ها در بین مردم توجیه می‌گشتند. مثلاً، برخی جزر و مد را به نفس کشیدن یک نهنگ غول‌پیکر نسبت می‌دادند.

در اواخر قرن ۱۰ اعراب به‌طور اساسی، تلاش خود را برای ارتباط دادن زمان جزر و مدها به گردش ماه شروع کردند، اما یک توضیح علمی برای پدیده جزر و مد، توسط نیوتن و نظریه جهانی گرانشی او در سال ۱۶۸۷ منتشر گردید. او در اصول ریاضیات خود شرح داد که چگونه جزر و مدها از جاذبه گرانشی ماه و خورشید بر روی زمین به‌وجود می‌آیند. او همچنین نشان داد که در هر بار گردش ماه دو جزر و مد به‌وجود می‌آید، به همین دلیل جزر و مدهای حداقل و حداکثر رخ می‌دهند و نیز زمانی که ماه دورترین فاصله را از صفحه استوا دارد، جزر و مدهای روزانه، بزرگ‌ترین مقدار را دارند. به همین دلیل جزر و مدهای اعتدالی، در کل بزرگ‌تر از آنهایی هستند که در انقلابین رخ می‌دهند. بنابراین، نظریه گرانش نیوتن به‌عنوان پایه‌ای برای همه علوم جزر و مدی بنا گردید. قوانین حرکت و گرانش نیوتن در رابطه با جزر و مد و نیروهای کششی در بخش‌های بعد توضیح داده خواهد شد.

۱-۲- باورها و عقاید جزر و مدی در زمان باستان

پدیده جزر و مد مورد توجه ایرانیان باستان بوده است، چنان که در کتاب بندهش^۱ (ص ۷۴) آمده است که دو «باد» از پیش (جانب) ماه می‌وزد، یکی را «فرود آهَنج» (جزر) و دیگری را «برآهَنج» (مد) می‌خوانند. طبیعی دانان و جغرافی دانان دوره اسلامی نیز به سبب کنجکاو علمی و نیز تأثیر جزر و مد بر زندگی ساکنان شهرهای حاشیه دریاها و اقیانوس‌ها در قلمرو اسلامی، به این پدیده توجه داشته‌اند. عقاید دانشمندان مسلمان درباره جزر و مد تا حدود زیادی متأثر از نظرات جغرافی دانان، دریانوردان و اخترشناسان یونانی بوده است. بسیاری از طبیعی دانان و اخترشناسان یونانی به‌درستی آگاه بودند که جزر و مد عمدتاً ناشی از تأثیر ماه بر آب اقیانوس‌ها و دریاهاست.

اراتستن (منجم یونانی، ۱۹۲-۲۷۳ ق م) در توضیح نوسانات سطح آب دریاها، به‌ویژه در تنگه‌ها، اشاره کرده است که هنگام طلوع و غروب ماه، مد آغاز می‌شود و پس از گذر ماه از نصف‌النهار بالایی یا پایینی ناظر، پایان می‌یابد و جزر آغاز می‌شود.

^۱ بُنْدَهْشَن یا بُنْدَهْش نام کتابی است به پهلوی که تدوین نهایی آن در سده سوم هجری قمری انجام شده است، ولی اصل آن در اواخر دوره ساسانی تألیف شده است. نویسنده (تدوین کننده نهایی) آن «فَرْتَنَج»، فرزند «دادویه» نام داشت.

به نوشته سلوکوس (۲۸۰-۳۱۲ ق م) و ابرخس (منجم یونانی، نیمه قرن دوم پیش از میلاد) موقعیت ماه نسبت به خورشید (مقارنه، مقابله، تربیع) و موقعیت ناظر بر ارتفاع مد تأثیر دارد (رجوع کنید به د. اسلام، چاپ دوم، ذیل «المدّ و الجزر»).

به نقل ادریسی (متوفی ۵۶۰) ساطوطس (شاید منظور ساتوروس، حکیم یونانی و معلم طب جالینوس، باشد) عقیده داشت که امتلاء ماه (کامل شدن ماه) سبب (افزایش دامنه) جزر و مد می‌شود. برخی از یونانیان، عقایدی شبه علمی یا موهوم درباره جزر و مد داشتند، چنان که ثاوفرسطوس (۲۸۷-۳۲۳ ق م) وزیدن باد را منشأ جزر و مد می‌دانست (رجوع کنید به د. اسلام). ادریسی همچنین نقل کرده است که ارسطو (۳۲۲-۳۸۴ ق م) و ارشمیدس (۲۱۲-۲۸۷ ق م) خورشید را موجب حرکت بادهای و ایجاد جزر و مد می‌دانستند.

بومپونیوس ملا (۵ ق م، ۴۲ میلادی)، جغرافی‌دان اسپانیایی، اگرچه ماه را بر جزر و مد مؤثر می‌دانست، دو فرضیه دیگر را نیز مطرح کرد: جزر و مد نتیجه تنفس زمین یا تأثیر حفره‌های آن بر آب دریاهاست. در دوره اسلامی نیز نظریات مشابهی مطرح شد، می‌دانیم که حنین بن اسحاق اثری مستقل به نام کتاب «فی المدّ والجزر» داشته است (ابن ندیم).

طبیعی‌دانان و جغرافی‌دانان دوره اسلامی فرضیه‌های گوناگونی درباره منشأ جزر و مد مطرح کرده‌اند که بخش عمده‌ای از آنها را مسعودی (متوفی ۳۴۵ یا ۳۴۶) در «مروج الذهب» آورده است.

یعقوب بن اسحاق کندی (متوفی بین ۲۵۲-۲۶۰) و ابومعشر بلخی (متوفی ۲۷۲) از نخستین طبیعی‌دانان دوره اسلامی‌اند که به موضوع جزر و مد پرداخته‌اند. کندی در رساله «فی العلّة الفاعلة للمدّ و الجزر» ماه را مهم‌ترین علت جزر و مد و نور آن را موجب گرمی و انبساط آب دریاها (مد) دانسته است. وی در این رساله جزر و مد را بیشتر از دیدگاه فلسفی بررسی کرده است. بعدها کتاب کندی به اروپا رفت و رابرت گروستست، دانشمند انگلیسی در قرن هفتم/ سیزدهم از آن استفاده فراوان کرد.

ابومعشر بلخی با بررسی علمی و مفصل جزر و مد، بر این عقیده بود که جزر و مد نتیجه «کشش» ماه است. او تأثیر ماه را بر دریاها شبیه تأثیر «سنگ مغناطیس» بر آهن دانسته است که به دلیل طبعش آهن را جذب می‌کند. وی در فصل چهارم تا هشتم از قول (گفتار) سوم کتاب «المدخل الكبير الى علم احكام النجوم» جزر و مد و جزئیات آن را توضیح داده است. عنوان این پنج فصل، به ترتیب چنین است: درباره خاصیت دلالت ماه بر جزر و مد، درباره علت جزر و مد، درباره کاهش و افزایش (سطح) آب در جزر و مد، درباره اینکه ماه علت جزر و مد و سرما مخالف آن است، درباره اختلاف حالت‌های دریاها و ویژگی دریا‌هایی که در آنها جزر و مد مشاهده می‌شود و دریا‌هایی که این پدیده در آنها مشاهده نمی‌شود و درباره ویژگی تأثیر خورشید بر دریاها.

جاحظ دانشمند هم‌عصر ابومعشر، نیز در کتاب «التربیع و التدویر» یکی از فرضیه‌های پیدایش جزر و مد را خاصیت جذب ماه دانسته است. در دوره اسلامی افزون بر توصیف‌های علمی، برخی دلایل شبه علمی نیز برای جزر و مد مطرح کرده‌اند، چنان که برخی از طبیعی‌دانان دوره اسلامی از دیدگاه طبیعیات قدیم، ماه را بر جزر و مد مؤثر می‌دانستند. مثلاً، به نوشته مسعودی گروهی عقیده داشتند که ماه از جنس آب یا رطوبت

است و آب دریاها را مانند آبی که در دیگ جوش می‌آید و سر می‌رود، گرم و منبسط می‌کند. گروهی هم این نظریه را رد می‌کردند، زیرا به عقیده آنان حتی خورشید با آنکه از ماه گرم‌تر است، عامل جزر و مد نیست، بلکه درون زمین پیوسته بخارهایی به وجود می‌آید که با افزایش آنها آب دریاها دفع می‌شود و مد رخ می‌دهد و با کاهش آنها جزر رخ می‌دهد. به نظر برخی، هوای بالای دریا پیوسته به آب تبدیل می‌شود و با زیاد شدن آب دریا، مد رخ می‌دهد، سپس آب دریا تغییر و تنفس می‌کند و دوباره به هوا تبدیل می‌شود و این امر پیوسته ادامه دارد. هنگامی که ماه پُر می‌شود (هنگام بدر)، هوا بیشتر از معمول به آب تبدیل می‌گردد و درحقیقت مهتاب علت فزونی (دامنه جزر و) مد است، ولی علت اصلی آن نیست، چنان که ممکن است ماه در محاق^۱ باشد و جزر و مد رخ دهد.

ابومعشر (ص ۱۹۳-۱۹۶) نظر کسانی را که عقیده داشتند، جزر و مد به سبب تنفس دریاهاست با چهار دلیل رد کرده است؛ از جمله اینکه، اگر جزر و مد نتیجه تنفس دریا باشد، باید به صورت ثابت و منظم و بدون تغییر شدت رخ دهد، زیرا حالت «اشیاء» طبیعی تغییر نمی‌کند، در حالی که در مورد جزر و مد چنین نیست، از این گذشته دلیلی بر هماهنگی تنفس دریا با پدیدار شدن ماه، تغییرات ارتفاع و غروب آن وجود ندارد. از **ابن عباس** نقل شده که فرشته‌ای نگهبان دریاست؛ هنگامی که پایش را در آب بگذارد، مد و چون درآورد جزر می‌شود.

از قول **کعب الاحبار** نقل کرده‌اند که فرشته‌ای در پاسخ به سؤال خضر درباره علت جزر و مد گفته است که در دریا نهنگی وجود دارد که وقتی نفس می‌کشد، آب به درون شش او وارد و جزر می‌شود و در بازدم آب باز می‌گردد و مد رخ می‌دهد.

ابوریحان بیرونی نوشته است که عامه مردم هند اعتقاد دارند که جزر و مد به دلیل تنفس دریاست، چنان که به اعتقاد **مانی**، جزر و مد نتیجه تنفس شیطانی در دریاست، اما عالمان هند مراحل روزانه جزر و مد را مرتبط با طلوع و غروب ماه و تغییر ماهانه آن را به سبب فزونی و کاستی قرص ماه می‌دانند، بی‌آنکه از علت طبیعی این دو پدیده باخبر باشند.

به نوشته **مسعودی** گروهی عقیده داشتند که هیجان آب دریاها (= مد) مانند هیجان برخی مزاج‌هاست که به طبع تهییج و دوباره آرام می‌گردد و این امر پیوسته تکرار می‌شود. در «رسائل اخوان الصفا» آمده است که هیجان جو موجب هیجان دریاها و جزر و مد می‌گردد.

ابومعشر و کندی نیز مانند اراتستن به درستی آگاه بودند که به دلیل تأثیر ماه، در هر شبانه‌روز «دو بار مد» و «دو بار جزر» رخ می‌دهد و آن را مد روزانه نامیدند. به عقیده کندی، علت دو بار جزر و مد روزانه این است که تأثیر رسیدن ماه به هر وتدی متضاد وتد قبلی است. در نتیجه، رسیدن ماه به افق مشرق و مغرب (ابتدای مد)، مخالف وضعیت رسیدن ماه به نصف‌النهار بالایی و پایینی (ابتدای جزر) است.

ابومعشر بر مبنای طلوع و غروب ماه، چند رابطه ریاضی برای محاسبه زمان جزر و مد آورده است. وی برای پی بردن به شدت جزر و مد، هشت عامل بر شمرده است که شش مورد آن به ماه ارتباط دارد، از جمله بُعد (فاصله زاویه‌ای) ماه از خورشید، فاصله ماه با زمین و موقعیت ماه در بروج مختلف. وی طول شب و روز و

^۱ به سه شب آخر ماه قمری که در آن ماه باریک شده و روشنایی آن تقریباً محو می‌شود، محاق گفته می‌شود.

بادهای قوی را نیز بر جزر و مد مؤثر دانسته است. ابومعشر در توصیف جزر و مد روزانه به این نکته اشاره کرده است که به دلیل حرکت ماه در آسمان، زمان طلوع و غروب ماه (در نتیجه، زمان جزر و مد) تغییر می‌کند. از طرفی (به دلیل تفاوت طول جغرافیایی مکان‌های مختلف) ممکن است آغاز مد در مکانی، مقارن با آغاز جزر در مکانی دیگر باشد. هنگام مد، حرکت آب دریا از پایین به بالا و همراه با بادهای شدید است و هنگام جزر آب فروکش می‌کند و باد می‌ایستد؛ اما، در ساحل هنگام مد، آب ارتفاع می‌گیرد و جاری می‌شود و در جزر دوباره به دریا باز می‌گردد. تغییرات مدی را که با چرخه هلالی ماه مرتبط بود، مد شهری (ماهانه) می‌نامیدند. ابومعشر نوشته است که از اجتماع (مقایسه ماه با خورشید) تا تربیع اول، از قدرت مد کاسته می‌شود و دوباره تا بدر، افزایش و سپس تا تربیع دوم کاهش می‌یابد. همچنین می‌افزاید که قدرت مد در بدر بیشتر از مقارنه و در تربیع اول بیشتر از تربیع دوم است.

در دوره اسلامی، علاوه بر مد روزانه و ماهانه، دو نوع مد دیگر را نیز تعریف می‌کردند که به ماه ارتباطی نداشت: مد عَرَضی (فرعی) به معنای بالا آمدن آب رودها و نهرها، به دلیل ورود مواد یا آب به آنها، و مد سَنَوی (سالانه) که به بالا آمدن آب دریا در وقت محدود و معینی از سال به دلیل وزیدن باد گفته می‌شد. **کندی** دلیل پدید آمدن مد سالانه را تغییر موقعیت خورشید در آسمان دانسته است. به عقیده او اگر میل خورشید شمالی باشد، باد به سوی جنوب می‌وزد و بر عکس.

مسعودی در تأیید نظر **کندی** و **احمد بن طیب سرخسی** (متوفی ۲۸۶)، مبنی بر این که باد موجب حرکت (مد) آب دریاها می‌شود، به جزر و مد سالانه دریای فارس اشاره کرده است. علاوه بر این، ماجرای غرق شدن سگی را که خود در زیر امواج مد دریا در ۳۰۳ در کنبایت (کُمبایه) هند دیده، نقل نموده است. به عقیده ابومعشر، خورشید نیز بر امواج دریاها تأثیر می‌گذارد. منجمان و جغرافی‌دانان دوره اسلامی به تفاوت‌های جزر و مد در دریاهای مختلف توجه داشته‌اند، چنان‌که **ابومعشر** و **مسعودی** دریاها را به سه گروه با جزر و مد آشکار، ناآشکار یا اندک و بدون جزر و مد دسته‌بندی کرده‌اند. ابومعشر هر کدام از دریاهای با جزر و مد ناآشکار و بدون جزر و مد را نیز به سه زیرگروه دسته‌بندی کرده است. وی در توصیف دریاهایی با جزر و مد ناآشکار می‌نویسد که در دریاهای مرتبط با هم اگر آب دریای بالادست به سمت پایین دست حرکت کند، مد آشکار نمی‌شود، اما **ابن رشد** (متوفی ۵۹۵) این موضوع را علت همه جزر و مدها می‌داند.

جغرافی‌دانان دوره اسلامی دریاهای جزر و مددار را نام برده‌اند که برخی از آنها عبارتند از: دریای فارس، دریای هند (اقیانوس هند)، دریای چین (دریای جنوبی و شرقی چین که به اقیانوس آرام متصل می‌شود)، دریای میان قسطنطنیه و افرنج (دریای مرمره) و جزایر آنها، دریای حبش (دریای سرخ) و دریای محیط (اقیانوس اطلس).

به نوشته **ابن رسته** (قرن سوم) از بصره تا چین هفت دریاست که هر کدام جزر و مد خاصی دارند، جزر و مد برخی آشکارتر و برخی پوشیده‌تر است.

در متون جغرافیایی دوره اسلامی، گاهی توصیف‌های عجیب و متناقضی از جزر و مد دریاها دیده می‌شود. مثلاً، به گفته **ابن خردادبه** (متوفی ۳۰۰) در دریای فارس دو بار در سال مد رخ می‌دهد: یک بار در تابستان در شمال و شرق به مدت شش ماه و بار دیگر در زمستان در جنوب و غرب به مدت شش ماه (ص ۷۰). **مسعودی** (جلد ۱، صفحه ۱۳۴) نیز این مطلب را از قول ناخدایان و کشتی‌بانان سیرافی و عمانی نقل کرده و

افزوده که جزر و مد دریای فارس بیشتر در سحرگاهان است. برخلاف آنها، **ابن حوقل** (متوفی ۳۶۷؛ صفحه ۴۷)، **ابوالفداء** (متوفی ۷۳۲؛ صفحه ۲۳) و **ادریسی** (جلد ۱، صفحه ۹۲) نوشته‌اند که جزر و مد دریای فارس دو بار در هر شبانه‌روز است و آب در هنگام مد بیش از ده ذراع ارتفاع می‌گیرد و (در جزر) فرو می‌نشیند و باز می‌گردد (نیز رجوع کنید به حدود العالم، صفحه ۱۲).

حمدالله مستوفی (متوفی ۷۴۰) جزر و مد دریای محیط را یک بار در سال و به سبب آفتاب ذکر کرده است. به نظر وی، آب این دریا با افزایش ارتفاع خورشید به طرف مشرق و با کاهش ارتفاع به سوی مغرب می‌رود. **ادریسی** توصیف مشابهی برای دریای هند و چین آورده است. او اظهار داشته است که در دریای محیط در هر شبانه‌روز «دو بار مد» و «دو بار جزر» رخ می‌دهد و علت آن وزیدن باد به سبب تابش خورشید است. او همچنین ساعاتی از شبانه‌روز را برای جزر و مد دریای محیط مشخص کرده است (جلد ۱، صفحه ۹۳). در متون دوره اسلامی علاوه بر دریاها، از بندرها و شهرهای جزر و مددار نیز سخن به میان آمده و تأثیر جزر و مد بر زندگی مردم وصف شده است.

ابوریحان بیرونی (صفحات ۴۲۹-۴۳۱) ضمن توصیف موقعیت شهر سومنات (=خداوندگار ماه) در هند، می‌گوید که وجه تسمیه آن، این است که هر بار ماه طلوع و غروب می‌کند، آب دریا بالا می‌آید و محل را می‌پوشاند و پس از رسیدن ماه به نصف‌النهار، در ظهر و نیمه‌شب آب فرو می‌نشیند.

مقدسی در سده چهارم، جزر و مد را برای مردم بصره نعمت دانسته است، زیرا به سبب مد، در هر شبانه‌روز آب دو بار وارد نهرها می‌شود، باغ‌ها را سیراب و امکان حرکت کشتی‌ها را در رودخانه‌ها فراهم می‌کند و هنگام جزر آسیاب‌هایی که در دهانه نهرها کار گذاشته شده‌اند، به راه می‌افتند (صفحات ۱۲۴-۱۲۵؛ رجوع کنید به شهرمدان بن ابی‌الخیر، صفحه ۲۸۹). ظاهراً آسیاب‌های جزر و مدی ابتدا در دوره اسلامی در سواحل اسپانیا به کار رفتند و سپس در مناطق دیگر هم از آنها استفاده شد.

شاید عجیب به نظر برسد که بصره را منطقه‌ای جزر و مددار وصف کرده‌اند، اما به سبب رسوب‌گذاری رودخانه‌ها در طی هزار سال گذشته، امروزه بصره از ساحل خلیج فارس دور شده است (رجوع کنید به د. اسلام).

ابوالفداء (صفحه ۵۷) نیز مسیر جزر و مد را از رودهای ابله، معقل و دجله به طرف بصره توضیح داده است.

به نوشته **ادریسی** (جلد ۱، صفحه ۳۹۳)، در مسیر اهواز - عسکر مُکرم، آبراهه‌ای به طول سی میل^۱ (حدود ۵۰ کیلومتر) وجود داشت که در آغاز ماه‌های قمری به سبب مد و فزونی آب، قایق‌ها از آن عبور می‌کردند، ولی در هنگام جزر خشک می‌شد.

دمشقی (صفحه ۱۵۵) در توصیف شط‌العرب (اروند رود) نوشته است که هنگام مد، آب آن بالا می‌آید و به سوی شمال روان می‌شود و مردم زمین‌های خود را سیراب می‌کنند. این وضع، شش ساعت ادامه می‌یابد،

^۱ هر سه میل یک فرسخ شرعی است. فرسخ شرعی که قدمت بیشتری در ایران دارد، معادل ۵۱۶۰ ذرع معمولی بوده است و با توجه به اینکه هر ذرع معمولی معادل ۱۰۴ سانتی‌متر است، بنابراین یک فرسخ شرعی معادل ۵۳۶۶/۴ متر است که برای راحتی محاسبه یک فرسخ شرعی را برابر ۵۴۰۰ متر (پنج کیلومتر و چهارصد متر) می‌دانسته‌اند.

سپس مدت کوتاهی آب راکد می‌ماند و با جزر فرو می‌نشیند و جوی‌بارها خالی می‌شوند، تا بیش از شش ساعت نیز این چنین می‌گذرد و این وضع پیوسته ادامه دارد.

ابوالفداء (صفحه ۳۰۹) و **ابن حوقل** (صفحات ۴۶-۴۷) از ناحیه‌ای به نام عبادان (در جنوب شرقی آبادان کنونی) در حاشیه دریای فارس خبر داده‌اند که ساحل آن را با چوب‌هایی علامت گذاشته بودند و شب‌ها بر چوب‌ها آتش روشن می‌کردند. برج مراقبتی نیز در محل ساخته بودند تا دیده‌بان مانع از نزدیک شدن کشتی‌های بزرگ به ساحل شود، زیرا هنگام جزر کشتی‌ها به گل می‌نشستند.

ناصر خسرو نیز در سفرنامه‌اش (صفحه ۱۶۱) نوشته است که در هنگام مد، آب دیوار عبادان را فرا می‌گیرد و در جزر کمتر از دو فرسنگ دور می‌شود. از **ناصر خسرو** در خصوص جزر و مد صفت مد و جزر بصره و جوی‌های آن مطلبی به صورت زیر نقل شده است: «دریای عمان را عادت است که در شبانه‌روزی دوباره مد برآورد، چنان که مقدار ده گز آب ارتفاع گیرد و چون تمام ارتفاع گیرد، به تدریج جزر کند و فرونشستن گیرد تا ده دوازده گز، و آن ده گز که ذکر می‌رود، به بصره بر عمودی با دید آید که آن را قایم کرده باشند، یا به دیواری. والا اگر زمین هامون بود و نه بلندی بود، عظیم دور برود. چنان است که دجله و فرات که نرم می‌روند، چنان که بعضی مواضع محسوس نیست که به کدام طرف می‌روند. چون دریا مد کند، قرب چهل فرسنگ آب ایشان مد کند و چنان شوند که پندارند بازگشته است و به بالا می‌رود. اما به مواضع دیگر از کناره‌های دریا به نسبت بلندی و هامونی زمین باشد: هر کجا هامون باشد، بسیار آب بگیرد و هر جا بلند باشد کمتر بگیرد و این مد و جزر گویند تعلق به قمر دارد که به هر وقت قمر بر سمت رأس و رجل باشد و آن عاشر و رابع است، آب در غایت مد باشد و چون قمر بر دو افق یعنی افق مشرق و مغرب باشد غایت جزر باشد. دیگر آنکه چون قمر در اجتماع و استقبال شمس باشد، آب در زیادت باشد، یعنی مد در این اوقات بیشتر باشد و ارتفاع بیش گیرد، و چون در تربیعات باشد، آب در نقصان باشد. یعنی به وقت مد علوش چندان نباشد و ارتفاع نگیرد که به وقت اجتماع و استقبال بود و جزرش از آن فروتر نشیند که به وقت اجتماع و استقبال می‌نشست. پس بدین دلایل می‌گویند که تعلق این مد و جزر از قمر است، و الله تعالی اعلم.»

همچنین **ابوالفداء** (صفحه ۹۹) در وصف ناحیه قطیف در بحرین گفته است که هنگام مد آب به دیوار دور آن می‌رسید و کشتی‌ها به خور نزدیک آن وارد می‌شدند.

ابن حوقل (صفحه ۴۷) مناطق جزر و مدی شمال اندلس، در کنار دریای محیط را نام برده و از ناحیه‌ای به نام سَنْتَرَه خبر داده که مد آن، مانند بصره، به بیش از ده ذراع می‌رسیده است.

در تاریخ معاصر بنادر و شهرهای حاشیه خلیج فارس، توصیف‌های دقیق‌تری از تأثیر جزر و مد بر حرکت کشتی‌ها در نزدیکی بندرها، مسدود شدن برخی راه‌ها و جزیره شدن برخی خشکی‌ها به هنگام مد آمده است (رجوع کنید به کازرونی، صفحات ۳۴، ۴۵، ۵۳، ۷۷، ۱۰۲، ۱۰۷).

لوریمر حدود یک‌صد سال پیش در توصیف بندرعباس نوشته است که؛ آب هنگام مد در مقایسه با جزر حدود چهارصد متر در ساحل پیش‌روی می‌کند (جلد ۶، صفحه ۸). همچنین به نوشته وی، در ساحل شهر، اسکله‌ای به طول حدود ۹۰ متر و عرض ۱۸ متر قرار داشت که در هنگام جزر (کف آن) خشک بود، اما در هنگام مد، قایق‌ها حدود دو متر آب‌خور داشتند و انتهای اسکله به دریا می‌رسید.

بنابراین، دانشمندان زیادی در قدیم بر روی جزر و مد مطالعه و تحقیق کرده‌اند. ارسطو در سال ۳۵۰ قبل از میلاد به رابطه بین جزر و مد و ماه اشاره کرده است. نیوتن (۱۰۵۲-۱۶۴۲/۱۱۴۰-۱۷۲۷)، فیزیک‌دان مشهور انگلیسی، نخستین بار توصیف امروزی و دقیقی از جزر و مد عرضه کرد و نشان داد که جزر و مد ناشی از تأثیر گرانش ماه و خورشید بر زمین است (رجوع کنید به بیکر و فردریک، صفحه ۱۴۴). در دریاهای آزاد در هر شبانه‌روز «دو بار مد» و «دو بار جزر» رخ می‌دهد که براساس قانون عمومی گرانش نیوتن قابل محاسبه است (قانون گرانش، نه فقط در مورد ماه و زمین، بلکه درباره همه اجسام در عالم صادق است).

۱-۳- اهمیت مطالعه جزر و مد

اکنون می‌خواهیم ببینیم تلاش دانشمندان از قدیم تا به امروز برای پی بردن به راز جزر و مدها و امروزه نیز علت بررسی و تحقیقات بر روی این پدیده چیست. به‌طور کلی، آگاهی از زمان و ارتفاع جزر و مدها مهم بوده و سرعت و جهت جریانات جزر و مدی نیز برای بسیاری از کارها، به ویژه برای برخی از اشخاص بسیار حائز اهمیت است.

برخی از عوامل مهم مطالعه و شناخت جزر و مدها، عبارتند از:

(الف) پیمایش‌های هیدروگرافی، به‌منظور کاهش صدا در مأخذهای عمومی بسیار مهم است، چون نیروی دریایی قادر به دفاع از آب‌های سرزمین خود، بدون وجود نمودارها یا نقشه‌های دریایی دقیق نخواهد بود.

(ب) در کارهای دریانوردی، حمل و نقل دریایی، ناوبری، به ویژه در آب‌های ساحلی و خورها و دسترسی به بنادر. به‌طور نمونه، یکی از مزایای اطلاع از زمان جزر و مد این است که به کشتی‌ها کمک می‌کند تا بهتر و در زمان مناسب‌تر به بندر برسند. جزر و مد خصوصاً هنگام ورود کشتی‌ها به سواحل و مناطق کم‌عمق در جهت تعیین آب‌خور کشتی‌ها اهمیت فراوانی دارد. شایان ذکر است، بعضی مسائل آب و هوایی و نیز بعضی مسائل جغرافیایی می‌توانند زمان جزر و مد را تحت تأثیر قرار دهند.

(پ) در بندر و مهندسی سواحل و همچنین در ساخت سازه‌های دریایی و تأسیسات بندری، اطلاع از جزر و مد بسیار مهم است.

(ت) به‌طور کلی، برای اطلاع از زمان رفتن به ماهی‌گیری، قایق‌رانی و غیره: مثلاً زمانی که جزر و مد دریا اتفاق می‌افتد، بهتر است زمانی را برای ماهی‌گیری انتخاب کرد که آب به قول افراد محلی پُر باشد یا به عبارتی سطح دریا بالا باشد. به عبارتی، زمانی که آب دریا بالاست (زمان مد)، ماهی‌ها به سواحل دریا نزدیک می‌شوند و این زمان بهتری برای ماهی‌گیری نسبت به زمان جزر است. در هنگام جزر و مد، وقتی آب دریا به پایین می‌رود، قسمتی از دریا از آب خارج شده و سطح کف دریا نمایان می‌شود.

(ث) تأثیر در کیفیت موج‌سواری برای موج‌سواران و علاقه‌مندان به این رشته مفرح.

(ج) حفظ و بقای اکوسیستم ساحلی: جزر و مد موادی را در اقیانوس‌ها تولید می‌کند که به اکوسیستم‌های ساحلی اجازه رشد می‌دهد. حیواناتی نظیر خرچنگ‌ها، صدف‌ها، ستاره‌های دریایی، حلزون‌ها و غیره برای بقا در این محیط‌ها به جزر و مد متکی هستند. بدون اکوسیستم ساحلی، این می‌تواند اثرات مخربی برای سایر حیوانات خشکی و دریایی داشته باشد و منجر به انقراض دسته‌جمعی شود. همچنین جزر و مدهای شدید،

می‌توانند زندگی افراد نزدیک ساحل را به خطر انداخته و باعث زیر سیل بردن و تخریب ساختمان‌ها و اسکله‌ها گردد. از این‌رو، اکثر سازه‌ها و ساختمان‌ها فراتر از محدوده جزر و مدی معمولی ساخته می‌شوند. به‌طور کلی، موضوع جزر و مدها بحثی بسیار جامع و گسترده است. جزر و مد در رشته‌های مختلف علوم نظیر؛ نجوم، هیدرودینامیک، اقیانوس‌شناسی، اقلیم‌شناسی، ژئوفیزیک و رسوب‌شناسی بحث می‌گردد. جزر و مد در طول تاریخ زمین وجود داشته است. با استفاده از لایه‌های سنگ‌های رسوبی در تاریخ زمین‌شناسی و همچنین در نوشته‌های تاریخی توسط نویسندگان و دانشمندان آثار آن دیده می‌شود. جزر و مدها در زمین محدود به افت و خیز یا نوسان دریا نیستند، زمین و جو نیز جزر و مدها را تجربه می‌کنند. درک مکانیسم جزر و مد، انسان را قادر می‌سازد که درک بیشتری از واکنش زمین داشته باشد.

۴-۱- جزر و مد و علت تشکیل آن

اگر برای مدت طولانی و به دقت به دریا نگاه کنید، متوجه می‌شوید که سطح دریا ساعت به ساعت تغییر می‌کند. در طول یک روز، سطح دریا نسبت به نقطه‌ای از ساحل ممکن است، بین چند سانتی‌متر تا چند متر افزایش و کاهش یابد و این مقدار در نقاط مختلف جهان متفاوت است. افزایش و کاهش آهسته سطح دریا به دلیل جزر و مد است که نوع دیگری از موج در سطح دریاست. جزر و مد نتیجه مستقیم اثر گرانشی ماه و خورشید روی زمین است. تقریباً در تمام نقاط ساحلی دنیا جزر و مد به صورت دو بار مد (بالا آمدن آب دریا) و دو بار جزر (پایین آمدن آب دریا) وجود دارد.

به بالا آمدن آب و حرکت آن به سمت ساحل مد و به پایین رفتن آب و عقب‌نشینی آن از ساحل، جزر گفته می‌شود. هنگام مد آب به سمت ساحل پیش‌روی می‌کند و هنگام جزر به سمت دریا، یعنی به عقب رانده می‌شود.

همان‌طور که می‌دانیم مقدار نیروی گرانشی به فاصله دو جسم بستگی دارد. بنابراین در مورد ماه و زمین (همچنین خورشید و زمین) جاذبه ماه بر روی قسمتی از زمین که رو به ماه است، بیشتر از قسمت دیگر که در حدود ۱۲۸۰۰ کیلومتر (قطر زمین) دورتر است، می‌باشد. تفاوت این نیرو ناچیز و در حدود ۳ درصد است، اما همین مقدار اندک دارای اثری قابل توجه است.

اثر جاذبه گرانشی ماه بر آب‌های اقیانوس را می‌توان به این صورت شرح داد؛ ماه می‌کوشد هر چیزی که بر روی زمین قرار دارد را به‌سوی خود بکشد تا آن را به خودش نزدیک‌تر کند، اما زمین نیز قادر است همه چیز به جز آب‌ها را در خود نگه دارد. از آن جایی که آب‌ها همیشه در حال حرکت هستند، زمین نمی‌تواند آنها را نگه دارد و ماه قادر است، آب‌ها را به‌سوی خود بکشد. البته خورشید نیز باعث جزر و مد می‌گردد، اما به‌خاطر دوری خورشید از زمین، اثر خورشید در جزر و مد به تنهایی نسبت به اثر ماه، کمتر است. اگرچه خورشید ۳۷۵ برابر دورتر از ماه است، اما چون جرم آن حدود ۲۷ میلیون برابر جرم ماه است، تاثیر خورشید حدود ۴۶٪ تأثیر ماه است (منبع، وبسایت پرتال جامع انرژی).

شایان ذکر است که جذر و مد تنها مخصوص دریاها نیست. دریاها فقط چون سیال هستند، راحت‌تر دچار جابه‌جایی می‌شوند. خشکی‌ها نیز تحت تاثیر گرانش ماه جابه‌جا می‌گردند، اما به آسانی حرکت آب‌ها دیده نمی‌شوند و ما نمی‌توانیم بالا و پایین رفتن کوه‌ها و دشت‌ها را در حد سانتی‌متر احساس کنیم. اما، اثرات ماه

بر روی اقیانوس‌ها را می‌توانیم ببینیم. آب دریا در تلاطم است و بسته به هر نیروی کوچکی از جاذبه گرانش ماه، آب سطح زمین که به طرف ماه است، بالا می‌آید. به همین ترتیب، در آن سمت زمین که در طرف مخالف ماه قرار دارد، این برآمدگی به دلیل حرکت ماه و زمین به وجود می‌آید. اگرچه می‌گوییم که ماه به دور زمین می‌گردد، اما در واقع، هر دو به دور نقطه‌ای که مرکز مشترک نامیده می‌شود، می‌گردند. از طرفی، اتمسفر زمین نیز می‌تواند در نتیجه این گرانش کیلومترها تغییر کند.

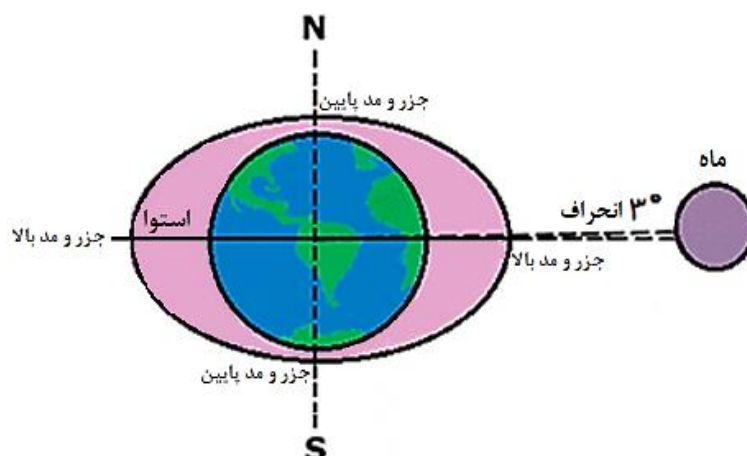
به هر حال، با بررسی دقیق جزر و مد و با توجه به شکل (۱-۲) معلوم شده است که برآمدگی آب اقیانوس‌ها دقیقاً در امتداد خط واصل ماه و زمین نیست، بلکه برآمدگی حدود ۳ درجه با این خط زاویه می‌سازد. دلیل وجود این زاویه، اثرات اصطکاک بین پوسته زمین با آب اقیانوس‌ها می‌باشد. به دلیل همین ۳ درجه، وضعیت جزر و مد با موقعیت ظاهری ماه تطابق کامل ندارد. برای نمونه در حالتی که ماه در بالای سر ناظر قرار دارد، بیشترین حالت مد نیست، بلکه چند دقیقه دیگر باید انتظار وقوع مد را داشت.

این ۳ درجه اختلاف دارای نتایج زیر است:

۱- یک برآیند نیرو با حرکت زمین به دور خود مخالفت می‌کند و در نتیجه سرعت چرخش زمین به دور خود به مرور زمان کاهش می‌یابد. بنابراین طول روز با آهنگ یک و نیم میلی‌ثانیه طی هر قرن افزایش می‌یابد. با بررسی لایه‌های زمین‌شناسی در بعضی از نقاط زمین آشکار شده است که در گذشته طول روز کوتاه‌تر بوده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند، در حدود نیم میلیارد سال پیش طول روز تنها ۲۲ ساعت بوده است. به همین ترتیب، در آینده نیز طول روز به مرور زمان بلندتر خواهد شد.

۲- یک نیروی برآیند موجب فشار رو به جلوی ماه در مدار می‌شود. در نتیجه این نیروی اضافی، ماه در هر قرن، حدود ۴ سانتی‌متر از زمین فاصله می‌گیرد (جالب توجه است که، در آینده زمانی فراخواهد رسید که زمینیان دیگر شاهد خورشیدگرفتگی کامل نخواهند بود).

دو فرآیند بالا یعنی کند شدن زمین و فاصله گرفتن ماه تا زمانی که دوره چرخش زمین به دور خود با دوره چرخش ماه به دور زمین برابر شود، ادامه خواهد داشت. محاسبات نشان می‌دهند، در چند میلیارد سال آینده، طول روز زمینی ۴۷ برابر مقدار فعلی شده و ماه نیز تا فاصله ۵۵۰۰۰۰ هزار کیلومتری از زمین فاصله خواهد گرفت. در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود که ماه با زمین قفل شده است. در آن زمان ماه، به‌طور ثابت در بالای زمین در مکانی از آسمان باقی خواهد ماند.



شکل ۱-۲- جزر و مد ناشی از گرانش ماه؛ در سمت رو به ماه مقدار جزر و مد بیشینه و در حالت قائم کمینه است.

جزر و مدی که به سبب نیروی گرانشی ماه در اقیانوس‌ها ایجاد می‌شود، بیش از یک متر ارتفاع ندارد. جزر و مدی که با ارتفاع بلند در سواحل دریاها ایجاد می‌شود، موج جزر و مدی است که گاهی بلندی آن تفاوت‌های بسیار در ایجاد جزر و مد دارند. برای مثال در مصب رودخانه‌ها که آب شکل قیفی دارد، مد بسیار شدید است. اگر خورشید و ماه در یک راستا باشند، نیروی گرانشی آنها به هم افزوده می‌شود و مد بسیار قوی ایجاد می‌شود که به آن مدهای جهنده نیز می‌گویند.

جزر و مدها امواج آب کم‌عمق محسوب می‌گردند. موج جزر و مدی یک موج پیش‌رونده با طول موج هزاران کیلومتر است که در سرتاسر اقیانوس حرکت می‌کند؛ اگرچه، این امواج نسبت به امواج پیش‌رونده ناشی از باد متفاوت می‌باشند. برآمدگی‌های جزر و مدی که به صورت امواج واداشته حرکت می‌کنند، سرعت‌شان با استفاده از عمق اقیانوس تعیین می‌گردد.

جزر و مدها همیشه نقش مهمی در امور بشر داشته‌اند. در مناطق ساحلی، فاصله زمانی بین دو مد کامل ۱۲ ساعت و ۲۵ دقیقه است. چون زمین می‌گردد، جزر و مد در هر جایی از اقیانوس پدید می‌آید و بعد از هر مد، جزر رخ می‌دهد که فاصله زمانی آنها از هم ۶ ساعت و ۱۳ دقیقه است. جزر و مد با نظم خاصی صورت می‌پذیرد، بدین ترتیب که آب دریا از پایین‌ترین حالت خود، به تدریج و پس از ۶ ساعت به بالاترین سطح خود می‌رسد و دوباره در ۶ ساعت بعدی به پایین‌ترین سطح می‌رسد.

با توجه به اینکه ماه در مدار خود در آسمان به سمت شرق حرکت می‌کند، هر روز در حدود ۵۰ دقیقه باید صبر کرد تا ماه از دید یک ناظر در یک مکان مشخص به موقعیت روز قبل خود برسد، بنابراین جزر و مد هر روز با حدود ۵۰ دقیقه تأخیر در هر مکان رخ می‌دهد. برای نمونه، اگر امروز مد در ساعت ۲ رخ دهد، فردا در ساعت ۲ و ۵۰ دقیقه رخ خواهد داد.

بنابراین، جزر و مدی که در سطح زمین شاهد آن هستیم، نتیجه اثر هم‌زمان نیروهای گرانشی ماه و خورشید است. در نتیجه چرخش ماه به دور زمین و تغییر موقعیت آن نسبت به خورشید در طول ماه و در ماه‌های مختلف شاهد حالت‌های مختلف بالا و پایین رفتن آب در ساحل هستیم.

۱-۵- جریانات جزر و مدی

بالا و پایین رفتن جزر و مد باعث ایجاد جریانات جزر و مدی می‌شود. این جریانات به صورت متناوب بوده و با وقوع جزر، آب دوباره به سمت دریا برمی‌گردد. بنابراین، تأثیر آنها می‌تواند موقتی یا دوره‌ای باشد. جریانات جزر و مدی را می‌توان توسط دستگاه‌های جریان‌سنجی اندازه‌گیری کرد، یا با استفاده از چترهای غوطه‌ور محاسبه نمود. در اقیانوس‌های باز، سرعت جریانات جزر و مدی به ندرت از سه کیلومتر در ساعت تجاوز می‌کند، اما در جاهایی که جریان کانالیزه می‌شود، مانند خلیج‌ها، تنگه‌های بین جزایر یا ورودی خورها و مرداب‌ها، جریانات جزر و مدی قوی‌تر شده و ممکن است به‌طور محلی سرعت آنها از بیست کیلومتر در ساعت نیز تجاوز کند. جریانات قوی‌تر جزر و مدی بیشتر به‌وسیلهٔ بالاترین جزر و مد مطلق ایجاد می‌شوند، زیرا حجم زیادی از آب جابه‌جا می‌شود. جریانات بسیار قوی‌تر در جاهایی ایجاد می‌شوند که دامنهٔ جزر و مدی زیاد است. در شمال غرب فرانسه و تنگهٔ آپسلی واقع در سواحل شمالی استرالیا، سرعت جریانات جزر و مدی به شانزده کیلومتر در ساعت می‌رسد.

آبشارهای جزر و مدی جزایر آرچی پلاز^۱ و ساحل کیمبرلی^۲ در شمال غرب استرالیا (به‌طور محلی بیش از ده متر) رخ می‌دهند. در این مناطق دامنهٔ جزر و مد بسیار بالاست. جریانات جزر و مدی تأثیر مستقیم و اندکی بر سواحل دریاها دارند، اما هنگامی که این جریانات از خورها و تنگه‌های باریک عبور می‌کنند، می‌توانند عامل فرسایش محسوب شوند. در ورودی خلیج واید در واشنگتن (شمال غرب آمریکا)، جریانات جزر و مدی قوی (تا ۳۴ کیلومتر در ساعت)، یک زبانهٔ ماسه‌ای در وست پوینت^۳ را برش داده و رسوبات حاصل را به شکل زبانهٔ دیگری با زاویهٔ قائم نسبت به نوار ساحلی ته‌نشین کرده است. چنین جریاناتی موجب توقف رسوب‌گذاری در برخی از زبانه‌های ماسه‌ای می‌شود. جریانات جزر و مدی به‌طور معمول، عامل فرسایش و رسوب‌گذاری در سواحل نیستند، اما این جریانات، رسوبات را در طول کرانهٔ نزدیک ساحل حمل کرده و در نهایت وارد سواحل ماسه‌ای می‌شوند. ممکن است امواجی که به‌طور مایل به ساحل می‌رسند؛ موجب تقویت یا تضعیف جریانات جزر و مدی شوند. در غیر این صورت، تأثیر جریانات جزر و مدی، تابعی از اثرات امواج در ناحیهٔ کرانهٔ نزدیک است. جریانات جزر و مد فرعی که به داخل و خارج خلیج‌های کوچک و خلیج‌های باریک جریان می‌یابند، می‌توانند مشابه آب‌های شکستی عمل کرده و موجب توقف حمل رسوبات در امتداد ساحل شوند.

۱-۶- مشخصات کلی یک موج اقیانوسی

قبل از ادامهٔ بحث در رابط با موج جزر و مدی، لازم است، برای یادآوری مشخصات کلی یک موج اقیانوسی و پارامترهای معرف آن را به‌خاطر بسپاریم. پارامترهایی که یک موج اقیانوسی را تعریف می‌کنند، مطابق (شکل ۱-۳) به شرح زیر می‌باشند:

- سطح ایستابی (تراز ساکن آب، SWL): خطی است که در آن، سطح آب اقیانوس صاف و بدون موج است.
- تاج موج: بالاترین قسمت موج بالای سطح تراز آب است.

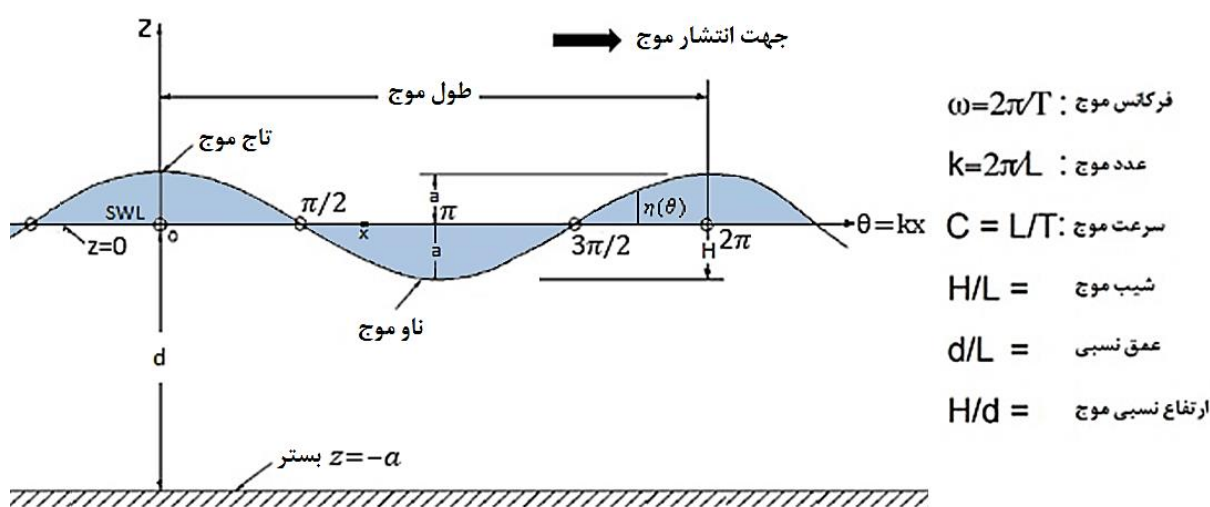
¹ Archipelago

² Kimberley

³ Westpoint

⁴ Sea Water Level

- ناو موج: پایین‌ترین قسمت موج زیر سطح تراز آب است.
- ارتفاع موج: به فاصله عمودی بین تاج و ناو موج، ارتفاع موج گفته می‌شود.
- طول موج: به فاصله افقی بین هر دو تاج یا هر دو ناو موج، طول موج گفته می‌شود.
- دوره (پریود) موج: مدت زمانی است که طول می‌کشد تا دو موج متوالی از یک نقطه خاص عبور کنند.
- فرکانس موج: به تعداد امواجی که از یک نقطه خاص در یک دوره زمانی معین عبور می‌کنند، فرکانس موج گفته می‌شود.
- دامنه موج: دامنه یک موج برابر است با نصف ارتفاع موج یا فاصله از تاج یا ناو تا خط تراز آب.
- عدد موج: به تعداد موج‌های موجود در واحد طول، عدد موج گفته می‌شود.
- شیب (تیزی) موج^۱ (Steepness): نسبت ارتفاع یک موج به طول آن را شیب یا تیزی موج می‌گویند.



شکل ۱-۳- مشخصات یک موج منفرد اقیانوس.

۷-۱- جزر و مدهای شدید و خفیف^۲

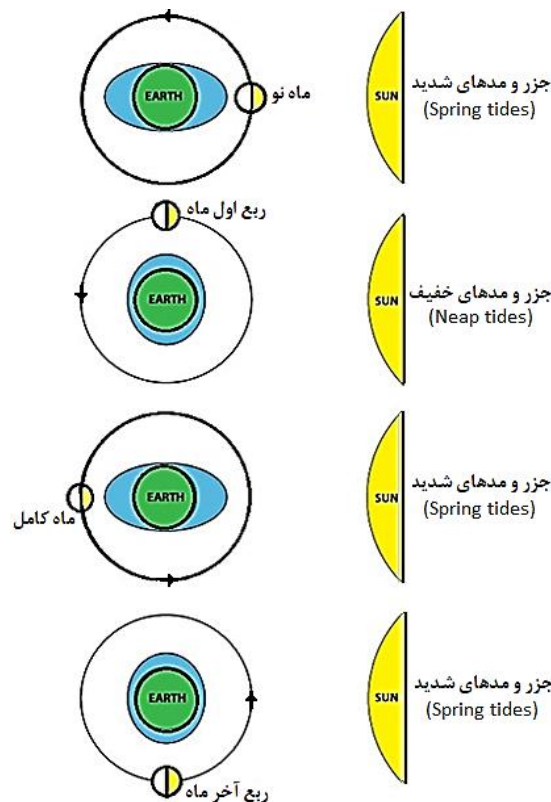
نمی‌توان گفت که در هر مکانی از زمین، جزر و مد واقعی مشابه جزر و مد تعادلی در آن مکان است. با این حال، بسیاری از ویژگی‌های این دو به جز اندازه و زمان با هم مشابه‌اند. در خلال جزر و مد شدید، آب بالا در نزدیک ظهر محلی یا نیمه شب محلی رخ می‌دهد و به‌خاطر تقویت این دو، بالاتر از دامنه متوسط می‌باشند، دو آب پایین نیز تقویت می‌شوند، اما در جهت‌های مخالف و پایین‌تر از دامنه متوسط هستند. نتیجه آن، یک دامنه بزرگ‌تر نسبت به دامنه متوسط جزر و مد نیم‌روزانه در جزر و مد شدید است. جزر و مدهای شدید با دامنه واقعی بزرگ، چند روز بعد از آن به‌دلیل اینرسی جرم آب و به فواصل هر دو هفته یک بار رخ می‌دهند.

همراه با ماه در ربع اول یا آخر آن، نیروی برخاسته از جزر و مدی آن تا حدی در تقابل با خورشید قرار می‌گیرد. بنابراین جزر و مدهای خفیف در روزی که آب‌های بالای خورشید و ماه در نزدیک‌ترین محل با سایر

^۱ معمولاً موجی با نسبت ۱:۲۵ تا ۱:۷ دارای شیب زیاد است و موجی با نسبت کمتر از ۱:۱۰۰ دارای شیب کم است.

^۲ Spring and neap tide

آب‌های پایین تلاقی می‌کنند، رخ می‌دهند. نتیجه، دامنه کوچک‌تر نسبت به دامنه متوسط جزر و مدهای خفیف است. جزر و مدهای خفیف با دامنه کوتاه تقریباً یک هفته بعد از جزر و مدهای شدید رخ می‌دهند. نیروهای مولد جزر و مدی خورشید گاهاً هم‌جهت یا در جهت‌های مخالف با نیروهای مولد جزر و مدی ماه عمل می‌کنند. در ماه‌های کامل و نو، خورشید و ماه با هم نیروی جزر و مدی بزرگی را ایجاد می‌کنند. به‌طور کلی، در اول و چهاردهم هر ماه قمری که ماه و خورشید، تقریباً در یک خط قرار می‌گیرند، اثرات گرانشی آنها با هم جمع می‌شود و جزر و مدها شدیدتر می‌شوند، در این جزر و مدها، آب در زمان جزر از حالت عادی پایین‌تر و در زمان مد هم از حالت عادی بالاتر خواهد آمد، این جزر و مدها به جزر و مدهای شدید (Spring Tides) مشهورند. از طرفی در زمان تربیع اول و تربیع دوم که ماه و خورشید، زاویه ۹۰ درجه می‌سازند، شدت جزر و مدها به حداقل خود می‌رسد، این جزر و مدها نیز به جزر و مدهای خفیف (Neap tides) مشهورند (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱- نمایش جزر و مدهای شدید (Spring tides) و خفیف (Neap tides)

نوسان (افت و خیز) جزر و مدهای اقیانوسی در نواحی ساحلی، نظیر نور ماه در آسمان امری طبیعی است (شکل ۵-۱ الف). ما هر روز در کنار دریا دو جزر و مد در فواصل مساوی می‌بینیم، بنابراین ممکن است چنین استنباط کنیم که زمین تحت دو «برآمدگی» آب در جهت‌های مخالف با زمین می‌چرخد (شکل ۵-۱ ب). به‌طور کلی، ممکن است انتظار داشته باشیم که برآمدگی در سمت رو به ماه باشد، چون به‌نظر می‌رسد که اقیانوس به سمت آن تغییر شکل داده و کشیده می‌شود و از این‌رو، محور بزرگ آن هم به سمت ماه خواهد بود (البته پوسته زمین هم در حدود صد بار ضعیف‌تر، دارای برآمدگی خواهد بود). اما چرا برآمدگی در طرف

مقابل دیگر زمین نیز به وجود می آید؟ یا به گفته دیگر، دلیل برآمدگی سطح آب دریاها در سمت دیگر (سمت مقابل) ماه چیست؟ و همچنین علت اینکه در هر منطقه، روزانه شاهد «دو بار جزر» و «دو بار مد» هستیم چیست؟ در ادامه مطالب و در طول این نوشته به پاسخ این پرسشها پرداخته خواهد شد.

اگر زمین و ماه بدون حرکت بودند، گرانش ماه موجب می شد که در سمتی از زمین که به ماه نزدیکتر بود، آب به حالت برآمده باشد. عملاً به دلیل چرخش زمین و ماه حول مرکز جرم مشترکشان و به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز، آب اقیانوسها به سمت خارج ماه زمین کشیده می شود. به عبارت دیگر، در عمل به دلیل تعادل دو عامل نیروی گرانشی ماه و نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش زمین و ماه حول مرکز جرم مشترکشان، شاهد دو جزر و مد هستیم. لازم به ذکر است ماه و زمین به دور یک مرکز جرم مشترک می چرخند، این مرکز مشترک تقریباً در فاصله ۱۷۲۰ کیلومتری سطح زمین واقع است. گردش زمین در این مدار کوچک است و این گردش مخالف گردش حول خورشید است.

توجه کنید که دامنه جزر و مدهای خورشیدی و قمری ترکیبی، به طور ناگهانی در جزر و مدهای شدید و خفیف تغییر نمی کنند. هرچند یک مدول سینوسی در پرپود نیم - ماه بین جزر و مدهای شدید و خفیف وجود دارد.

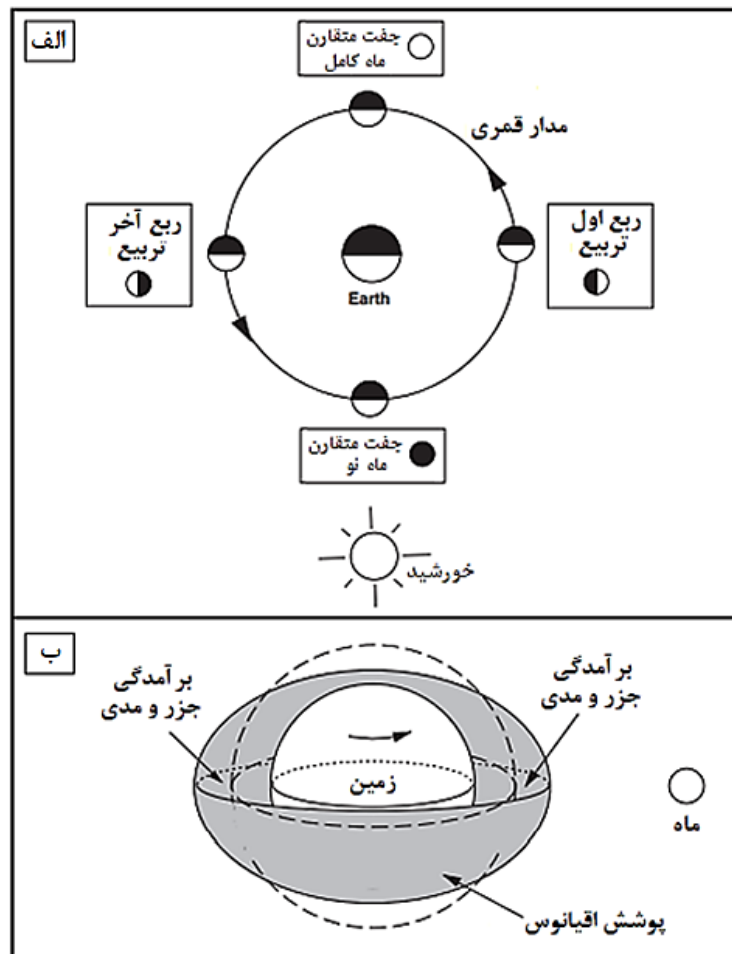
فاصله بین یک جزر و مد خفیف تا جزر و مد خفیف بعدی یا فاصله بین یک جزر و مد شدید تا جزر و مد شدید بعدی تقریباً ۱۴/۸ روز است. می توانیم این مقدار را به صورت زیر محاسبه و ثابت کنیم:

اگر سرعت زاویه ای زمین $\omega_e = 15/04 \text{ h}^{-1}$ ، سرعت زاویه ای خورشید $\omega_s = 0/041 \text{ h}^{-1}$ و سرعت زاویه ای ماه نیز $\omega_m = 0/549 \text{ h}^{-1}$ باشد، برای یک دور کامل ماه حول زمین (2T) داریم:

$$\dot{T} = 2T, \quad \dot{\omega} = \omega_m - \omega_s$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\dot{T}} \rightarrow \dot{T} = \frac{2\pi}{\omega_m - \omega_s} = \frac{360^\circ}{0.549 - 0.041} = 708 \rightarrow T = \frac{708.66}{2} \quad (1-1)$$

$$= 354.33h \rightarrow T \approx 14.8 \text{ day}$$



شکل ۱-۵- مقدمه‌ای بر جزر و مدها؛ الف) چرخه ماه: موقعیت ماه را در ۴ زمان مختلف و تصویر ماه را از زمین نشان می‌دهد (فاز قمری). در این شکل، اقران^۱ (یا مقارنه) یک اصطلاح کلی برای در یک ردیف قرار گرفتن ۳ جسم با هم است و تربیع^۲، نیز وقتی است که ۲ جسم با هم زاویه قائم می‌سازند. ب) از آنجایی که ماه هر روز ۲ نوسان جزر و مدی می‌بینیم، ممکن است چنین استنباط کنیم که زمین از میان دو برآمدگی آب در دو طرف مقابل آن می‌چرخد. در این شکل کره خط‌چین، پوشش اقیانوس بدون تغییر شکل آن را نشان می‌دهد.

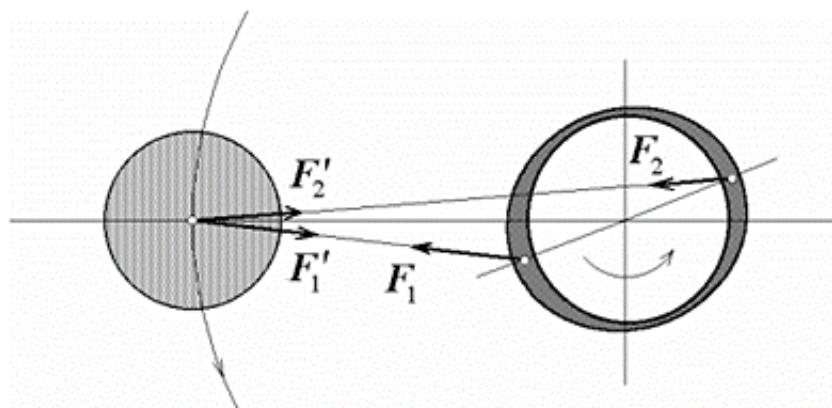
۱-۸- نیروهای کششی ماه و زمین

اگر فرض کنیم نیروهای گرانشی F_1 و F_2 (شکل ۱-۶) بر برآمدگی‌ها وارد می‌گردند، می‌توانیم نتیجه بگیریم که گشتاور تأخیری حول محور زمین که چرخش محوری را کند می‌کند، به‌خاطر جابه‌جایی‌های برآمدگی‌هایی است که در بالا به آن اشاره گردید و این جابه‌جایی‌ها، تقارن سیستم را با توجه به خط زمین-خورشید (زمین-ماه) بهم می‌زنند. هرچند، گشتاور کلی میدان گرانشی مرکزی خورشید (یا ماه) بر زمین اعمال می‌گردد و برآمدگی‌های پوسته مایع آن، نسبت به خورشید (یا ماه برای جزر و مدهای ناشی از ماه) صفر است. از این‌رو، تکانه زاویه‌ای کل سیستم پایسته می‌ماند و اصولاً باید در هر سیستم بسته‌ای نیز همین‌طور

¹ Syzygy

² quadrature

باشد. کاهش چرخش زمین به واسطه اصطکاک جزر و مدی، به این معنی است که تکانه مداری سیستم به آرامی و در خلال تکامل جزر و مدی افزایش می‌یابد و مدار زمین به تدریج توسعه می‌یابد.



شکل ۱-۶- برهم‌کنش گرانشی بین ماه و برآمدگی‌های جزر و مدی

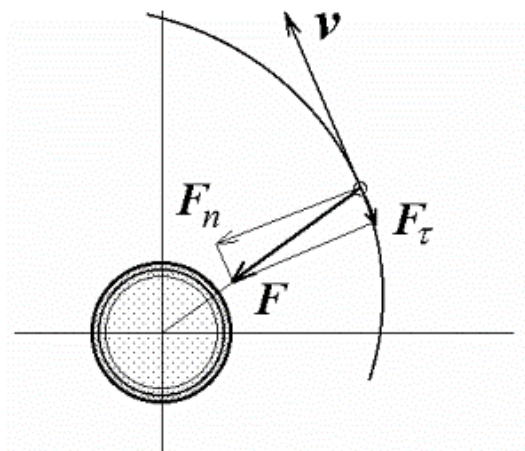
عدم تقارن (که در اثر اصطکاک جزر و مدی به وجود می‌آید) تأثیری بر پایداری تکانه زاویه‌ای ندارد، اگرچه آن باعث توزیع مجدد و کندی تکانه زاویه‌ای بین حرکت چرخشی و حرکت مداری می‌گردد. این انرژی مکانیکی اضافی و نیز انرژی مصرف شده از انرژی چرخش محوری گرفته می‌شود. این نتیجه در مورد توسعه یافتگی مدار ماه، از پایداری تکانه زاویه‌ای نشأت می‌گیرد که اغلب در نوشتجات با آن روبه‌رو می‌شویم. اگرچه کاملاً متقاعدکننده است، اما به هر حال آن مکانیسم واقعی را بدون توضیح کنار می‌گذارد. درک دلیل فیزیکی این پدیده، کمک می‌کند به اینکه نیروها را در نظر بگیریم.

اگر خاصیت نیروهای گرانشی $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ (شکل ۱-۶) که توسط برآمدگی‌های جزر و مدی زمین بر ماه اعمال می‌گردند و تأثیر آنها بر حرکت مداری ماه را در نظر بگیریم، به یک ویژگی عجیب و ظریف توجه داشته‌ایم که به نوبه خود بسیار جای بحث دارد. هنگامی که مدار توسعه می‌یابد، سرعت مداری ماه کاهش پیدا می‌کند. هرچند، تقارن پیکربندی پاسخ‌گوی این تکامل است، می‌توانیم نتیجه بگیریم که نیروی گرانشی حاصل که توسط برآمدگی‌های جزر و مدی بر ماه وارد می‌آید، به سمت جلو و در جهت حرکت مداری می‌باشد. چگونه این نیروی شتاب دهنده می‌تواند حرکت مداری را کند و پایین بیاورد. همه محققانی که در زمینه تکامل جزر و مدی تحقیق می‌کنند، این سؤال را بی‌پاسخ می‌گذارند. این وضعیت مشابه با پارادوکس وسیع و مشخص یک ماهواره زمینی در یک مدار دایروی است که به تدریج در جو رقیق بالایی فرود می‌آید: مستقیماً می‌توان پیش‌بینی نمود که دراگ^۱ جوی ضعیف باید ماهواره را به طور آهسته پایین بیاورد، اما در عوض، ماهواره به سرعتی می‌رسد که در نتیجه مدار آن، به تدریج کند می‌شود. به خاطر مقاومت هوا، ماهواره در جهت حرکت آن شتاب می‌گیرد و مثل این است که نیروی کندکننده مقاومت هوا، ماهواره را به سمت جلو می‌کشد. برای درک پایین آمدن سرعت ماه در خلال تکامل جزر و مدی، باید در نظر داشته باشیم که ماه به تدریج به خارج از زمین می‌چرخد و مدار آن به سمت بیرون پهن می‌گردد. به طوری که حرکت واقعی ماه در امتداد یک مارپیچ منبسط شده رخ می‌دهد. قسمتی از این مسیر (با یک انبساط بسیار زیاد به طور شماتیک در شکل

¹Drag

(۶-۱) نشان داده شده است). به‌خاطر این انبساط، خط قائم جهتش به‌سمت مرکز زمین نیست، بلکه نسبتاً اندکی در جلو مرکز قرار دارد. بنابراین کشش گرانشی اصلی F که توسط زمین بر ماه اعمال می‌گردد، یک مؤلفه مماسی F_τ گندکننده دارد که جهت آن به‌سمت عقب در امتداد مسیر است (شکل ۷-۱). این مؤلفه به لحاظ مقدار بزرگ‌تر از مؤلفه مماسی رو به جلوی F_1 و F_2 است (شکل ۶-۱ را ببینید) که توسط برآمدگی‌های جزر و مدی بر ماه وارد می‌گردد (البته این مؤلفه در شکل ۷-۱ نشان داده نشده است). از این‌رو کل شتاب مماسی ماه در خلاف جهت سرعت است.

به‌طور کلی، به‌منظور توضیح تکامل جزر و مدی، یعنی تقلیل چرخش و تغییرات قرنی مدارهای گرانشی اجسام سماوی زوج، لازم است هر دو تحریف دینامیکی شکل کروی گرانشی جسم (و اگر از پوسته مایع آن، باشد) تحت نیروهای جزر و مدی، و جابه‌جایی اضافی برآمدگی‌ها که ناشی از اصطکاک جزر و مدی است، در نظر گرفته شود. میدان گرانشی غیریکنواخت یک جسم در مداری حول جسم دیگر، شکل دوم را تحریف می‌سازد. اتلاف انرژی ذخیره شده در تحریف‌های جزر و مدی حاصله، باعث جفت شدگی (کوپل شدن) می‌گردد که باعث تغییرات قرنی در مدار و در چرخش‌های هر دو جسم می‌گردد. تأخیر چرخش محوری و تکامل مدار ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که چرخش محوری با گردش مداری متوسط هم‌زمان می‌گردد. این اثر برای درک تاریخ زمین و ماه امری حیاتی است. ماه همیشه وجه یکسانش را در برگشت به جلو حفظ می‌کند و زمین برای اثرات پیشین اصطکاک جزر و مدی در ماه سهیم می‌گردد.



شکل ۷-۱- نیروی کشش گرانشی (مرکزی) اصلی زمین که به ماه وارد می‌گردد.

اتلاف انرژی جزر و مدی در زمین باعث گند شدن چرخش محوری زمین می‌گردد. از طرفی، مدار ماه به‌تدریج بسط پیدا می‌کند. هر دو مشاهده جریانی در طول روز از ۰/۰۱۶ ثانیه در هر قرن و بازگشت ماه از ۳ تا ۴ سانتی‌متر در هر سال، در اثر نتایج جزر و مدهای برخاسته از ماه در زمین افزایش پیدا می‌کنند. بیلیون‌ها سال بعد، ماه از زمین دور خواهد شد که در این صورت مدت ماه با مدت روز برابر خواهد شد. تکامل جزر و مدی سیستم، هم‌زمان با چرخش محوری هر دو جسم مداری با گردش مداری‌شان پایان می‌پذیرد. طول روز و ماه در این وضعیت نهایی از چرخش منسجم تقریباً ۵۰ درصد روز خواهد شد. در نتیجه، براساس

پایستگی تکانه زاویه‌ای می‌توان آن را محاسبه نمود. به‌طور مشابه، اثرات جزر و مدی در زمین، چرخش محوری و گردش مداری آن را حول خورشید تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اتلاف جزر و مدی برای حالت‌های جریانی حاصل از چرخش محوری چند سیاره، حالت‌های چرخشی اکثر ماهواره‌های سیاره‌ای و چرخش‌ها و مدارهای ستاره‌های دوتایی نزدیک به هم در نظر گرفته می‌شود. به‌طور نمونه، همه ماهواره‌های سیاره‌ای نزدیک و بزرگ در منظومه شمسی (به جزهایپریون^۱ قمر زحل) که هم‌زمان با حرکت مداری‌شان می‌چرخند، قابل مشاهده هستند. سیاره دوردست پلوتون و ماهواره آن چارون در منظومه شمسی کوپل می‌گردند که به‌طور قطع به نقطه آخر می‌رسند که در آنجا تکامل جزر و مدی بیشتری به حالت رکود رسیده است. در این حالت، هم‌زمان با چرخش هر دو جسم توأم با حرکت مداری و محور چرخشی عمود بر صفحه مداری آن، مدار دایروی است. به‌طور مشابه، مشاهده می‌گردد که ستاره‌های دوتایی بسیار نزدیک دارای مدارهای دایروی و چرخش‌های هم‌زمان هستند و نمونه‌های بسیار زیادی از تکامل را تحت نیروهای جزر و مدی در جای دیگری در راه شیری فراهم می‌سازند.

نقش جزر و مدها در کیهان‌شناسی، نخست توسط جورج داروین^۲ منجم کشف گردید. وی نخستین کسی بود که تئوری تکامل فلکی، تحت اصطکاک جزر و مدی را توسعه داد.

۹-۱- نظریه تعادلی جزر و مد

نظریه تعادلی جزر و مد که بعضی مواقع تئوری جزر و مدهای استاتیک^۳ نیز گفته می‌شود، نظریه‌ای است که نخستین بار نیوتن در کتاب اصول^۴ خود از آن نام برده است. در این نظریه، نیوتن یک اقیانوس جهانی فرضی کاملاً پوشیده از آب (یعنی بدون خشکی) را فرض نمود که با نیروهای تولید کننده جزر و مد در تعادل استاتیک قرار دارد. دلیل محبوبیت نظریه تعادلی جزر و مد در بین محققان، مفهوم برآمدگی جزر و مدی است و در این تئوری توضیح برخی از پدیده‌های معروف جزر و مدی با تصاویر آسان و قابل فهم است.

در نظریه تعادلی جزر و مدها دو نکته اساسی به توضیح جزر و مدها کمک می‌کند:

(۱) نظریه تعادلی جزر و مد، قوانین کلی فیزیک را با فرض اینکه زمین پوشیده از آب باشد را مورد استفاده قرار می‌دهد. تئوری دینامیکی جزر و مدها، جزر و مدها را به آن صورتی که در جهان واقعی رخ می‌دهند و توسط جرم‌های زمینی، هندسه حوضه‌های اقیانوسی و چرخش زمین تغییر پیدا می‌کنند، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهد.

(۲) نظریه تعادلی جزر و مد، فرض می‌کند که زمین به‌طور کامل پوشیده از آب است و در این حالت زمین به دور خورشید می‌گردد. ماه در مدار زمین توسط نیروی گرانشی زمین حفظ می‌گردد. همچنین یک نیروی گریز از مرکز (FC) وجود دارد که ماه را به خارج از زمین می‌کشد و سعی در به چرخش درآوردن آن و پرتاب آن به فضا را دارد. زمین و ماه حول مرکز جرم مشترک سیستم زمین- ماه می‌چرخند؛ این سیستم در مدار توسط جاذبه گرانشی خورشید، در حالی که نیروی گریز از مرکز، مرکز جرم را به خارج از خورشید

¹ Hyperion

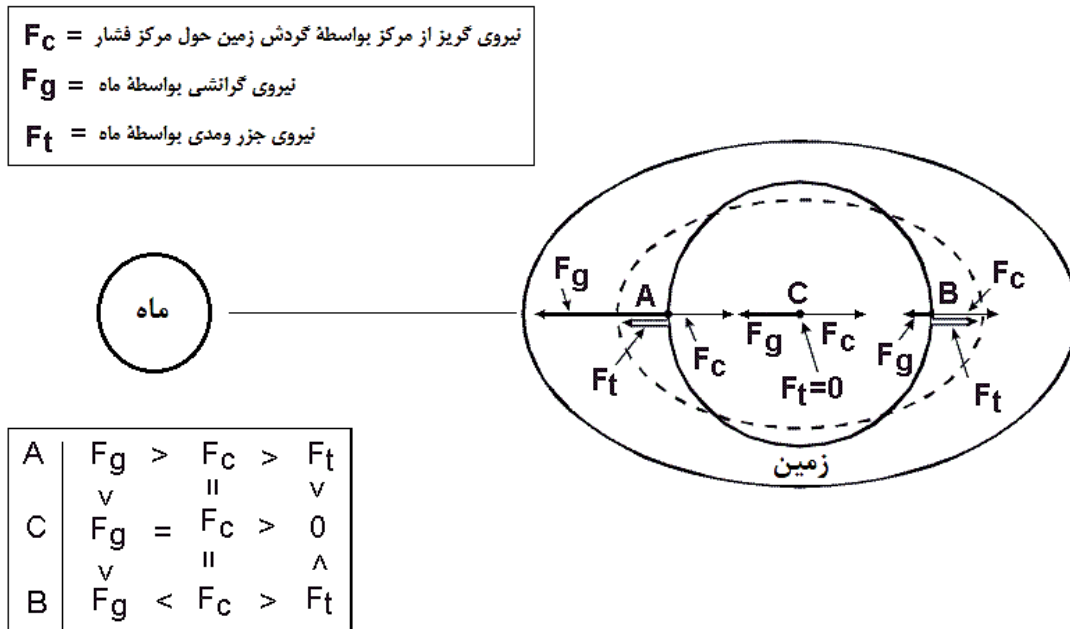
² George Darwin

³ Static

⁴ Principia

می‌کشد، حفظ می‌گردد. هر دو نیرو، هم گرانشی (F_g) و هم گریز از مرکز (F_c) برای برقراری تعادل در حفظ سیستم زمین - ماه در مدار آن سهیم‌اند (شکل ۸-۱).

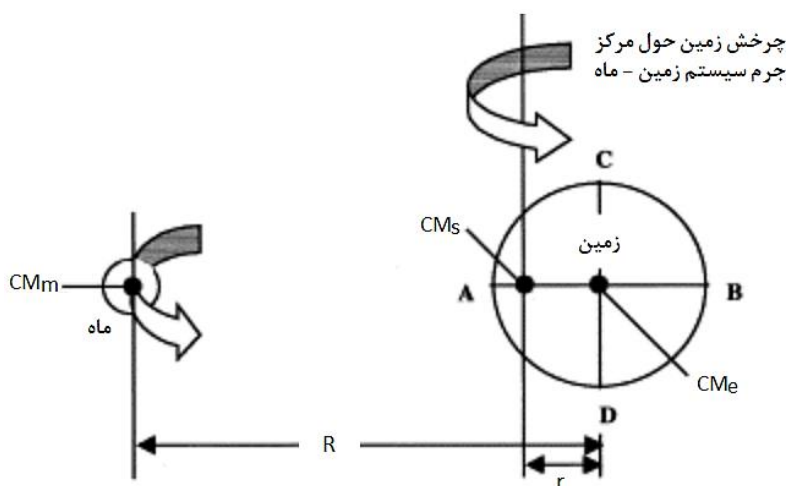
نظریه تعادلی جزر و مد، توصیفی جزئی از رفتار جزر و مد زمین را که به‌طور کامل و یکنواخت توسط آب پوشیده شده است، ارائه می‌دهد.



شکل ۸-۱- مقطع عرضی شمال- جنوب از مرکز زمین؛ در این شکل بیضی خط‌چین، نیم‌رخ را در کل کره نشان می‌دهد. فلش‌های F_c ، F_g و F_t به ترتیب نیروهای گریز از مرکز، گرانشی و جزر و مدی می‌باشند و بیضی پر رنگ بزرگ، اثر ناشی از آب‌های زمینی را نشان می‌دهد.

سیستم زمین- ماه را که مطابق شکل (۹-۱) حول مرکز جرم مشترک (CMs) می‌گردد، در نظر بگیرید. شعاع این گردش r است. تفکیک مرکز جرم زمین (C.Me) از مرکز جرم ماه (C.Mm) با R مشخص شده است.

اگر زمین خودش به تنهایی نمی‌چرخید، هر نقطه روی زمین یا داخل زمین به دور خود می‌چرخید. شعاع چرخش r و دوره چرخش برابر با دوره چرخش سیستم زمین- ماه خواهد بود. این منجر به شتابی به سمت مرکز محلی چرخش با مقدار $\omega = \frac{2\pi}{T}$ و با یکای (S^{-1}) خواهد شد که در اینجا T دوره چرخش برحسب ثانیه است. در مرکز زمین، شتاب گریز از مرکز، دقیقاً با شتاب گرانشی مطابقت دارد. در نقاط دیگر، هیچ تعادلی بین اثرات گرانشی و گریز از مرکز وجود ندارد. در نقطه B در شکل (۹-۱)، اثرات گریز از مرکز از جاذبه گرانشی ماه فراتر می‌رود. در واقع، در سطح زمین، جریان خالص آب از C و D به A و B وجود خواهد داشت. این اثر منجر به چرخه (سیکل) جزر و مدی ماه می‌شود.



شکل ۱-۹- طرحی از سیستم زمین- ماه؛ در این شکل C.Mm (مرکز جرم ماه)، C.Me (مرکز جرم زمین)، C.Ms (مرکز جرم سیستم زمین- ماه)، R (فاصله بین C.Mm و C.Me) و r (فاصله بین C.Me و C.Ms) می‌باشند.

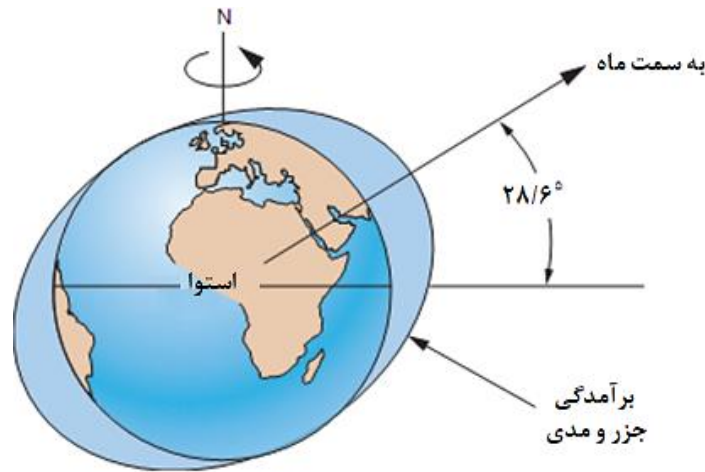
تئوری تعادل، ایجاد برآمدگی‌های جزر و مدی در سیال اطراف زمین را توضیح می‌دهد. زمین می‌چرخد، و دو برآمدگی جزر و مدی باید موقعیت خود را نسبت به ماه حفظ کنند. بنابراین، آنها باید با همان سرعت چرخش زمین به دور زمین بگردند. ماه هر $27/3$ روز یک بار به دور C.Ms در همان جهتی می‌چرخد که زمین نیز هر 24 ساعت یک بار به دور آن می‌چرخد. از آنجایی که چرخش‌ها در جهت مشابه هستند، اثر خالص این است که دوره چرخش زمین، نسبت به سیستم زمین- ماه، 24 ساعت و 50 دقیقه است. این توضیح می‌دهد که چرا جزر و مد هر روز تقریباً یک ساعت دیرتر رخ می‌دهد. در طول ماه قمری، که دوره چرخش ماه به دور زمین است، تغییراتی در تأثیر جزر و مد ماه وجود دارد. مدار ماه دایره‌ای نیست، بلکه به شکل بیضوی است و نیروهای تولید کننده جزر و مد، تقریباً 40 درصد در طول ماه تغییر می‌کنند. به طور مشابه، ماه به دور استوای زمین نمی‌چرخد. در عوض زاویه $28/6$ درجه بین استوا و صفحه مداری ماه وجود دارد که این نیز باعث تغییرات ماهانه می‌شود (شکل ۱-۱۰).

شایان ذکر است که حداکثر زاویه قمری ماهانه شمالی و جنوبی استوا از $18/3$ تا $28/6$ درجه در هر دوره اعتدالین $18/6$ ساله تغییر می‌کند. زاویه خورشیدی به طور فصلی از $23/5$ درجه در ماه ژوئن به $23/5$ - درجه در دسامبر تغییر می‌کند.

بنابراین اثر ترکیبی خورشید و ماه باعث افزایش اثر روزانه جزر و مدها خواهد شد، زمانی که میل ترکیبی آنها چه در جهت مشابه و چه در خلاف جهت هم، هر دو بزرگ باشند. بزرگ‌ترین اثرات روزانه زمانی رخ می‌دهند که ماه کامل باشد، در انقلابین (یعنی در ماه‌های ژوئن و دسامبر در نیم‌کره جنوبی).

به طور کلی، با چرخش ماه به دور زمین، زاویه آن نسبت به استوا کم و زیاد می‌شود. این به انحراف ماه معروف است. دو برآمدگی جزر و مدی، تغییرات انحراف ماه را دنبال می‌کنند و زوایای خود را نسبت به استوا افزایش یا کاهش می‌دهند. اگر زمین و ماه در یک راستا قرار گیرند، به طوری که ماه در شمال یا جنوب استوای زمین قرار بگیرد، یک برآمدگی جزر و مدی در نیم‌کره شمالی و یکی هم در نیم‌کره جنوبی به وجود می‌آید. یک نقطه در عرض‌های جغرافیایی میانه، از طریق تنها یک تاج و یک حوض در خلال هر روز جزر و مدی

عبور می‌کند. این نوع از جزر و مدهای روزانه، «جزر و مدهای انحرافی»^۱ نامیده می‌شوند، زیرا زمانی که ماه در بالا یا پایین استوا (و نه عمود بر آن) واقع می‌گردد، گفته می‌شود که ماه انحراف دارد. خورشید نیز جزر و مدهای انحرافی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۱-۱- حداکثر زاویه انحراف برآمدگی جزر و مدی نسبت به استوا: مرکز برآمدگی‌های جزر و مدی ممکن است در هر عرض جغرافیایی از استوا تا مقدار ۲۸/۶ درجه، در هر دو طرف استوا بسته به فصل سال (زاویه خورشیدی) و موقعیت ماه قرار گیرد.

۱-۱- جزر و مد واقعی

تاکنون ما به جزر و مدهایی اشاره کرده‌ایم که بر روی یک زمین فرضی کاملاً پوشیده از آب (بدون خشکی و قاره) بود و این پایه‌ای برای نظریه تعادلی جزر و مد است. نظریه تعادلی جزر و مد در نتیجه ارتفاع سطح دریا تعریف می‌شود و در صورتی که زمین پوشیده از آب و در یک چنین عمقی که در پاسخ به این نیروها آبی باشد، در تعادل با نیروهای جزر و مدی خواهد بود. در واقع این هیچ شباهتی با جزر و مدهای واقعی ندارد و نوساناتی که به وسیله آن پیش‌بینی می‌شوند، در مقایسه با جزر و مد مشاهده شده بسیار کوچک هستند. با این حال، این یک سیستم مرجع مهم برای تحلیل جزر و مد است.

از طرفی، تئوری دینامیکی / جزر و مد واقعی، جزر و مدها را به صورت یک موج واداشته، توسط نیروهای مولد جزر و مدی و افت و خیز در ساحل را به عنوان نتیجه‌ای از همگرایی و واگرایی جریان نشان می‌دهد. این تئوری محاسبات جریان‌ات جزر و مدی در اقیانوس و افت و خیز در سواحل را مجاز می‌دارد. با این حال، حوضه‌های اقیانوس واقعی، توپوگرافی بستر و ساحلی بسیار پیچیده دارند و به دست آوردن پاسخ‌های دقیق، به جز برای دریای باز غیرممکن است.

تئوری تعادلی که در بالا ذکر گردید، دو توصیف از برآمدگی را شرح می‌دهد، این برآمدگی‌ها حول زمین از شرق به غرب با میزان ثابتی حرکت می‌کنند و دامنه آنها در استوا ۰/۵ متر است و این به دقت آن چیزی نیست که با جزر و مدهای مشاهده‌ای اتفاق می‌افتد.

¹ Declination Tides

اما سؤال این است که چرا توضیح تئوری جزر و مدهای روزانه با مشاهدات سازگار نیست! علت اصلی این واکنش پیچیده به اعمال نیروهای جزر و مدی، این واقعیت است که زمین آب‌هایی را دربرگرفته است، این آب‌ها شامل اقیانوس‌ها، دریاها، خلیج‌ها و غیره با اندازه‌ها، شکل‌ها و عمق‌های مختلف می‌باشند. علاوه بر این، جابه‌جایی‌های آب توسط چرخش زمین تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین، اثر کوریولیس (که بعداً در مورد آن صحبت خواهیم کرد) باعث می‌شود که آب یک مسیر منحنی و خمیده داشته باشد.

۱-۱۱- نظریه دینامیکی جزر و مدها

موج طبیعی و نیروهای رانشی جزر و مدی

بیشتر محققان، مسائل جزر و مد را ساده نموده و تنها به نظریه‌ای که به اصطلاح نظریه استاتیکی جزر و مدها (یا نظریه تعادل) نامیده می‌شود، توجه می‌کنند. چون همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، در این نظریه سطح اقیانوس به صورت یک مایع بیضوی که در امتداد خط زمین - ماه (یا زمین - خورشید) کشیده می‌شود، رفتار می‌کند. چنان که این سطح همیشه تحت نیروی گرانش زمین و نیروهای جزر و مدی تولید شده، توسط ماه (خورشید) در تعادل می‌باشد. در این رویکرد، برآمدگی‌های جزر و مدی با محور زمین-ماه (یا زمین-خورشید) هم‌راستا می‌باشند. بنابراین در زمین چرخان، جابه‌جایی‌های آب بالا در موقعیت معلوم با اوج‌های بالاتر و پایین‌تر ماه (یا خورشید) باید هم‌زمان به وقوع بپیوندند. یعنی زمانی که ماه (یا خورشید) از بین سمت‌الرأس (اوج) و سمت‌القدم (حضیض) آن می‌گذرد. مشاهدات با این پیش‌بینی سازگار نیستند. در عوض، تقریباً عکس این حالت معمولاً مشاهده می‌گردد: جابه‌جایی‌های جزر و مد پایین تقریباً در اوج‌های ماه رخ می‌دهند. نظریه کامل جزر و مدها باید پاسخ دینامیکی اقیانوس را به نیروهای مولد مستقل از زمان داشته باشد. نظریه دینامیکی جزر و مدها^۱، جزر و مدها را به صورت یک حرکت واداشته^۱ حالت پایدار (تحت تغییر نیروهای جزر و مدی) یک سیستم دینامیکی (اقیانوس) مورد بحث قرار می‌دهد. یک چنین نظریه رشد تشدید یافته‌ای از دامنه حالت پایدار را در مواردی که پریود رانشی به پریود نوسانات طبیعی نزدیک می‌شود، پیش‌بینی می‌کند.

برای پرهیز از پیچیدگی‌های مربوط به ویژگی سه بُعدی مسأله و همچنین برای توضیح جنبه فیزیکی نظریه دینامیکی، با استفاده از ساده‌ترین مدل ممکن، تئوری (نظریه) ایری را در نظر می‌گیریم، آب در یک کانال عریض با عمق یکنواخت تمام زمین را در امتداد استوا حلقه می‌زند. فرض کنید سطح آب در این کانال به‌طور استاتیکی تحت نیروهای مولد جزر و مدی، تحریف (تغییر شکل) می‌یابد، به‌طوری‌که دو برآمدگی در دو طرف مقابل زمین تشکیل می‌گردد و شکل سطح را از دایره به بیضی تغییر می‌دهد. اگر نیروهای نگه‌دارنده، به‌طور ناگهانی حذف شوند، گرانش زمین برای تعادل آن، سطح تحریف شده را به حالت اول (شکل دایره) برمی‌گرداند. آب شروع به جریان نموده و برآمدگی‌ها ناپدید می‌گردند و بعد از یک دوره چارک، سطح آب به صورت دایره درمی‌آید. اما چون آب به حرکت خود ادامه می‌دهد، بعد از چارک بعدی، برآمدگی‌ها دوباره در نمایش موقعیت‌های جدید یک تحریف بیضوی از سطح در امتداد خط عمود بر خط تحریف اصلی ظاهر می‌گردند. سپس ماه خود آن را در حالت عکس تکرار می‌کند. این حرکت آب در کانال دایره‌ای یک موج

^۱ این تئوری ابتدا توسط لاپلاس ارائه گردید و سپس توسط ایری توسعه پیدا کرد.

سطحی ایستای گرانشی است که طول موج آن برابر نصف محیط زمین است. چنین حالتی از نوسان را می‌توان با استفاده از یک دوره طبیعی مشخص توصیف نمود. برهم‌نهی دو موج ایستای این چنینی که فازهایشان دارای اختلاف ۹۰ درجه بوده و محورهای بیضوی آنها با زاویه ۴۵ درجه از هم جدا می‌شوند، یک موج گردشی (انتقالی) با شکل ثابت بیضی و یک طول موج معادل نصف محیط زمین را تولید می‌کند. دو برآمدگی مقابل هم در سطح آب که با این موج حول زمین سیر می‌کنند، شکل و ارتفاع خود را حفظ می‌کنند.

یک نکته اساسی در شرح فاز حالت پایدار بین جابه‌جایی‌های جزر و مد بالا و نقطه اوج ماه (یا خورشید) ارتباط بین پریود طبیعی T_0 این موج گردشی و پریود T نیروهای محرک مولد جزر و مدی است. می‌توان T_0 زمان طی شده توسط موج سطحی گردشی را برای حرکت در امتداد نصف کره زمین تعیین نمود. در حالت حدی برای امواج بسیار بلند در سطح آب کم عمق ($h \gg \lambda$) سرعت موج توسط گرانش زمین (g) و عمق (h) تعیین می‌گردد و مستقل از طول موج λ است. از هیدرودینامیک می‌دانیم که این سرعت برابر $\sqrt{gh}$ می‌باشد. فرض می‌کنیم که مقدار متوسط h عمق اقیانوس $3/5$ کیلومتر است. طی یک پریود T_0 ، موج نصف محیط زمین (πr_0) را طی می‌کند. لذا $T_0 = \frac{\pi r_0}{\sqrt{gh}} \approx 30 h$ می‌باشد. بنابراین، تقریباً پریود خارجی محرک ۱۲ ساعته T کمتر از پریود طبیعی T_0 نوسان آزاد است. توجه کنید که این شکل سطحی موج است که حول زمین گردش می‌کند نه خود موج. نسبت به زمین نقاط در سطح اقیانوس، حرکات نوسانی را در مسیرهای بسته‌ای به نمایش می‌گذارند، که به‌طور قابل ملاحظه‌ای، به صورت افقی کشیده می‌شوند. به‌طور متوسط، آب در چارچوب زمین-مرکزی پایدار (ثابت) است.

برای حصول تصویر دینامیکی از جزر و مدها در زمین چرخان، باید چارچوب مرجعی را به کار ببریم که با زمین می‌چرخد. نسبت به این چارچوب، سیستم چهارقطبی نیروهای مولد جزر و مدی با موقعیت خورشید (یا ماه) کوپل می‌گردند و به صورت یک مجموعه می‌چرخند و این در حالی است که خورشید (یا ماه) در امتداد مسیر روزانه ظاهری آن حول زمین می‌گردد. این چرخش نیروها با سرعت زاویه‌ای Ω یعنی سرعت زاویه‌ای چرخش روزانه زمین انجام می‌گیرد (یا اختلاف بین Ω و سرعت زاویه‌ای ماه، در حرکت مداری آن برای جزر و مدهای ناشی از ماه). یک چنین چرخش صلب یکنواختی از سیستم بردارهای ثابت دوسویه می‌تواند به صورت برهم‌نهی دو سیستم چهارقطبی نوسانی از نیروها (با فرکانس $\omega = 2\Omega$) که نمی‌چرخند و محور آنها با یکدیگر زاویه ۴۵ درجه می‌سازند، نشان داده شود. در هر دو نقطه یکی از این نیروها در راستای قائم (جهت شعاعی) نوسان می‌کند، در حالی که نیروی دیگر، در راستای افقی (جهت مماسی) نوسان می‌کند. نوسانات این مؤلفه‌های متعامد در یک پریود چارک (ربع پریود) خارج از فاز رخ می‌دهند. در هر نقطه مشخص در صفحه استوا، بردار برآیند این نیروهای نوسانی متعامد دوسویه، نیرویی با مقدار ثابت تولید می‌کند که جهت این نیرو به‌طور یکنواخت، متعاقب حرکت ظاهری خورشید (یا ماه) و با سرعت زاویه‌ای $\omega = 2\Omega$ می‌چرخد، اما فازهای این بردارهای چرخان، برای نقاط مختلف زمین متفاوت است.

۱-۱۱-۱- تأثیر عوامل مختلف بر رفتار جزر و مدها

در حدود ۱۵۰ عامل وجود دارد که می‌تواند رفتار جزر و مدها را در امتداد هر ساحل یا حوضه اقیانوسی تحت تأثیر قرار دهد. بزرگ‌ترین تأثیرات بر جزر و مدها اثر کوریولیس، شکل زمین و عمق اقیانوس می‌باشند.

یک موج جزر و مدی ایده‌آل، در راستای زمین با سرعت 1600 km/h یا 1000 miles/h در استوا حرکت می‌کند. جزر و مد‌ها مثال فوق‌العاده‌ای از موج آب کم‌عمق می‌باشند. در آب کم‌عمق اصطکاک با کف اقیانوس، جزر و مد‌ها را با سرعت 700 km/h یا 435 miles/h کند می‌کند. فلات قاره‌ها جابه‌جایی‌های جزر و مدی را بیشتر محدود می‌کند.

به‌طور کلی، چندین عامل مهم وجود دارد که جابه‌جایی‌های آب در شرایط جزر و مد واقعی را تغییر می‌دهند، برخی از این عوامل به شرح زیر می‌باشند:

(الف) خورشید/ ماه: اثر گرانشی ماه بزرگ‌تر از خورشید است. چون ماه نسبت به خورشید به زمین نزدیک‌تر است، اما این اثر بعضی مواقع همراه با خورشید و بعضی مواقع در تقابل با آن، دامنه و زمان جزر و مد‌ها را تغییر می‌دهد.

(ب) جغرافیا: جرم‌های زمین به‌طور آشکار باعث ممانعت و نیز باعث انحراف جابه‌جایی آب در سطح زمین می‌شوند.

(پ) اصطکاک: اصطکاک، جابه‌جایی ذرات آب را در سطح زمین به تأخیر می‌اندازد (جابه‌جایی جزر و مد‌ها به تدریج باعث کند شدن سرعت دورانی زمین می‌گردد).

(ت) نوسان حوضه: تمام توده‌ها یا جرم‌های آبی، دارای دوره‌های طبیعی نوسانی مشخص با توجه به اندازه و شکل‌شان هستند. تمامی اقیانوس‌ها از تعدادی حوضه نوسانی ساخته شده‌اند. نوسانات حاصل در هر مکانی جابه‌جایی جزر و مدی یا شکل موج را بسته به درجه تشدید (رزونانس) با منحنی، جزر و مد نجومی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

(ث) مدارهای قمری و جهانی: شکل و صفحه مدار زمین، هر دو حول مدار خورشید و ماه به دور زمین، چنان می‌باشند که فاصله بین این توده‌ها و اثر گرانشی آنها برحسب چرخه‌های ماه، سال و حتی دوره‌های طولانی‌تر تغییر می‌کند.

(ج) مدار زمین: مدار زمین به شکل بیضی یا گلابی است، در نزدیک‌ترین نقطه خورشید، زمین به فاصله $91/3$ میلیون مایل و در دورترین نقطه به فاصله $94/5$ میلیون مایل از خورشید واقع است.

(ح) زاویه میل/ شیب زمین: این زاویه $27' 23''$ نسبت به قائم می‌باشد، از این‌رو، میل موقعیت نسبی خورشید و ماه طوری است که به‌نظر می‌رسد، حول زمین می‌چرخند (شایان ذکر است، استوای زمین نسبت به صفحه مدار زمین به دور خورشید، $23/45$ درجه کج می‌شود، بنابراین در زمان‌های مختلف سال که زمین به دور خورشید می‌چرخد، انحراف از $23/45$ درجه شمالی تا $23/45$ درجه جنوبی متغیر است. این باعث ایجاد فصول می‌شود).

(خ) مدار ماه: مدار زمین به صورت یک بیضی غیرمعمول است که دارای اوج و حضیض متغیر است.

۱-۱۲- الگوهای جزر و مدی

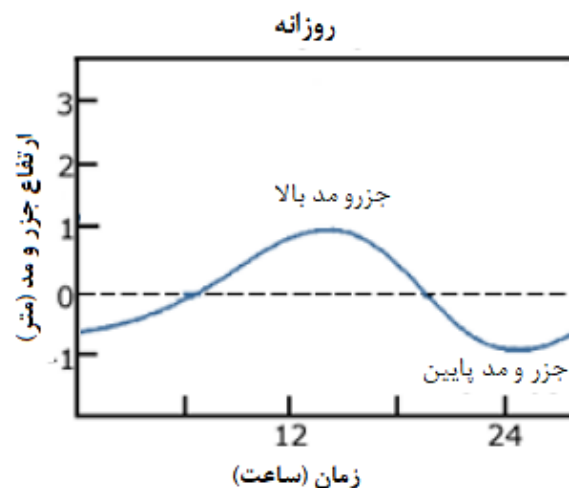
جزر و مد‌ها در قسمت‌های مختلف جهان به‌طور متفاوت رفتار می‌کنند. به‌طور کلی، با وجود متغیرهای زیادی که در تولید جزر و مد نقش دارند، قابل درک است که همه مکان‌های زمین دقیقاً شرایط جزر و مدی مشابهی را تجربه نمی‌کنند.

تقریباً در تمام نقاط ساحلی دنیا، جزر و مد به صورت دو بار مد (بالا آمدن آب) و دوبار جزر (پایین آمدن آب) رخ می‌دهد. مقدار اختلاف بالا و پایین آمدن آب، بین چند سانتی‌متر تا چند متر و در نقاط مختلف دنیا این مقدار متفاوت است. به‌طور نمونه، آفریقای جنوبی دارای سیستم جزر و مدی نسبتاً ساده با جزر و مدهای نیم‌روزانه و دامنه جزر و مدی نسبتاً کوچک است. استرالیا با این حال، شکل پیچیده‌ای از جزر و مد دارد، آن دارای طیف کاملی از رژیم‌های جزر و مدی است و دامنه جزر و مد از ۱ متر تا بیش از ۱۰ متر متغیر است. این به‌علت توپوگرافی ساحل و شکل بستر اقیانوس است که نقش مهمی را در تعیین الگوهای جزر و مدی در آن سرزمین ایفاء می‌کند. علاوه بر این، ما همچنین باید به عوامل غیرگرانشی (نظیر فصل‌ها و بادهای) که اغلب تأثیر زیادی بر رفتار تراز دریا دارند، توجه داشته باشیم که این می‌تواند پیچیدگی‌های بیشتری را به این وضعیت پیچیده اضافه کند.

به‌طور کلی، بسته به تعداد و ارتفاع نسبی چرخه‌های جزر و مدی در روز، سه طبقه‌بندی اصلی برای جزر و مد وجود دارد که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم:

الف) جزر و مدهای روزانه

برخی از نواحی ساحلی، الگوی منظمی از یک جزر و مد بالا و یک جزر و مد پایین را در هر روز تجربه می‌کنند که به جزر و مدهای روزانه معروفاند. بنابراین، جزر و مد روزانه فقط شامل یک جزر و مد کامل در روز است (شکل ۱-۱۱). این وضعیت عموماً در دریا‌های کم‌عمق داخلی نظیر خلیج مکزیک و در امتداد ساحل بخش‌هایی از جنوب‌شرقی آسیا وجود دارد و یک پریود جزر و مدی ۲۴ ساعت و ۵۰ دقیقه را به نمایش می‌گذارد.

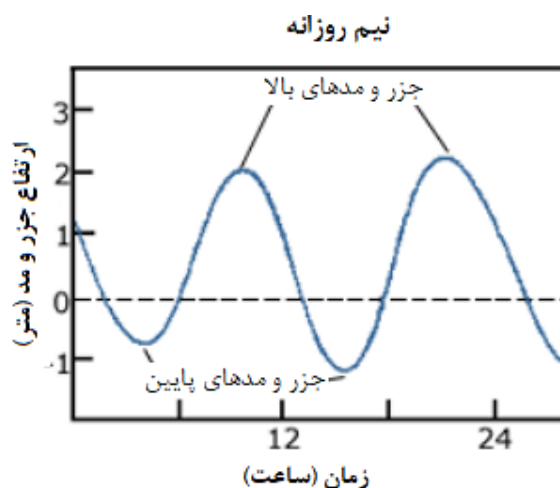


شکل ۱-۱۱- جزر و مد روزانه، با یک جزر و مد بالا و یک جزر و مد پایین در روز (منبع: NOAA).

ب) جزر و مدهای نیم‌روزانه

در جزر و مد نیم‌روزانه در هر روز، دو جزر و مد بالا و دو جزر و مد پایین رخ می‌دهد که به لحاظ ارتفاع جزر و مدی تقریباً برابر هستند (شکل ۱-۱۲). به‌عبارتی، یک چرخه جزر و مدی، نیمی از روز طول می‌کشد و دو چرخه کامل در روز وجود دارد و به‌طور متعاقب در روز دو بار تکرار می‌شود. این جزر و مدها معمولاً به همان تراز یکسان در جزر و مدهای بالا و پایین در روز می‌رسند و دارای پریود جزر و مدی ۱۲ ساعت و ۲۵

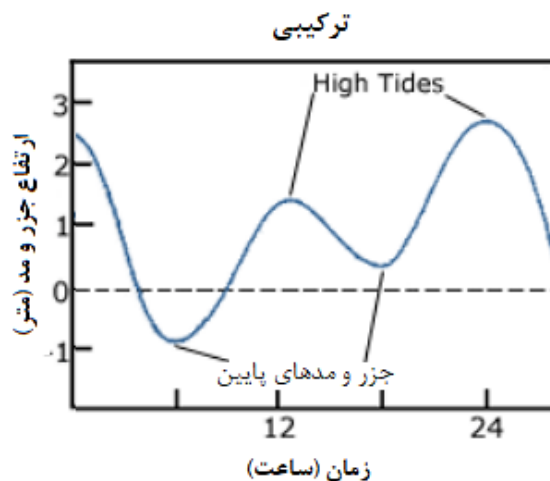
دقیقه می‌باشند. جزر و مد نیم‌روزانه، در محلی که مؤلفه‌های نیم‌روزانه قوی‌تر از مؤلفه‌های روزانه باشد، رخ می‌دهد. حالت عکس جایی رخ می‌دهد که جزر و مد روزانه باشد. اختلاف به آن اندازه که جزر و مد مختلط باشد نیست. جزر و مد نیم‌روزانه در بسیاری از مناطق جهان، نظیر ساحل اطلس ایالت متحده و همچنین در امتداد سواحل شرقی آمریکای شمالی و استرالیا، سواحل غربی آفریقا و بیشتر اروپا رایج است.



شکل ۱-۱۲- جزر و مد نیم‌روزانه، با دو جزر و مد بالا و دو جزر و مد پایین در روز
(با ارتفاعات جزر و مدی برابر)، (منبع؛ NOAA)

پ) جزر و مدهای ترکیبی (مختلط)

جزر و مدهای ترکیبی (مختلط) که به آنها «جزر و مدهای نیم‌روزانه ترکیبی» نیز گفته می‌شود، دارای دو جزر و مد بالا و دو جزر و مد پایین در روز می‌باشند، اما ارتفاع هر جزر و مد با هم متفاوت است. یعنی دو جزر و مد بالا نظیر دو جزر و مد پایین ارتفاعات متفاوتی دارند (شکل ۱-۱۳). تفاوت این ارتفاعات، ممکن است در نتیجه گردش آمفیدرامیک، زاویه ماه، یا متغیرهای دیگر باشد. این نوع جزر و مدها در امتداد سواحل اقیانوس آرام آمریکای شمالی یافت می‌شود.



شکل ۱-۱۳- جزر و مد ترکیبی (مختلط)، با دو جزر و مد بالا و دو جزر و مد در روز
(با ارتفاعات جزر و مدی متفاوت)، (منبع: NOAA)

توضیحات بیشتر در رابطه با جزر و مد، در مقیاس اقیانوسی و همچنین الگوهای جزر و مدی در اقیانوس در بخش ۳-۲۳ آورده شده است.

۱-۱۳- جزر و مد در خورها و خلیج‌ها

جزر و مد در خورها، به دلیل تأثیر عوامل هندسی به مراتب پیچیده‌تر از دریاهای باز است. پدیده‌هایی نظیر انعکاس امواج جزر و مدی، سی‌شی (seiche)، اصطکاک بستر و تأثیر نیروی کوریولیس، باعث تغییرات عمده در تراز سطح آب می‌گردند، به‌طوری‌که تغییرات تراز جزر و مد در خور ممکن است تا چند برابر تغییرات جزر و مد در دریای باز برسد (کرمی خانیکی و ضیاییان، ۱۳۹۰).

همان‌طور که جزر و مدها در امتداد خط ساحلی بالا می‌آیند، وارد خلیج‌ها، لنگرگاه‌ها و خورها می‌گردند و تا موقعی که بلندی آنها اجازه بدهد، در داخل زمین عبور می‌کنند، این نقطه، هد^۱ (رأس) آب جزر و مدی نامیده می‌شود. زمان جزر و مد بالا به‌طور تصاعدی به تأخیر می‌افتد که باید آن را به جاهای دورتر زمینی حرکت دهد. وقتی جزر و مدها وارد آب‌های ساحلی می‌گردند، به‌وسیله انعکاس با امواجی که وجود دارند، تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

در شرایط خاص، تداخل سازنده می‌تواند ناشی از جزر و مدهایی با بالا و پایین‌های بسیار زیاد باشد. یک مثال کلاسیک از تداخل سازنده، خلیج فاندی در نوآسکوشیا (Nova Scotia) کانادا است. این خلیج به داخل اقیانوس اطلس باز می‌شود و به دو شاخه باریک به طول ۲۵۸ کیلومتر (۱۶۰ مایل) به داخل زمین توسعه پیدا کرده و به سمت شمال خم می‌گردد. به‌علت طول زیاد آن، زمان آن را برای رسیدن جزر و مد مجاب می‌سازد که هد آب جزر و مدی تقریباً مساوی با پیرو جزر و مدی آن باشد. این نیروها به تدریج آب جزر و مدی را در انتهای شمالی خلیج افزایش می‌دهند. توأم با انرژی بسیار زیاد ناشی از اثر کوریولیس (خمیدگی‌های خلیج به سمت راست)، طی جزر و مدهای حداکثر (Spring tides)، خلیج فاندی بلندترین دامنه‌های جزر و مدی را در جهان دریافت می‌کند. این نوع تداخل سازنده، همچنین می‌تواند به صورت جریان جزر و مدی به داخل یک مصب (خور) و برخلاف جریان خروجی اتفاق بیفتد. امواج ایستا که بعضاً گمانه‌های جزر و مدی نامیده می‌شوند، تشکیل می‌گردند و به طرف بالادست تا ارتفاع چندین متر پیش‌روی می‌کنند. به‌علت اثر اصطکاک، زمانی که موج جزر و مدی به آب کم‌عمق نزدیک می‌شود و آب در اثر نیرو جریان می‌یابد، یک جریان معکوس در داخل و خارج گذرگاه‌های محصور تشکیل می‌گردد. جریان معکوس (برگشتی) مربوط به ناوگان‌ها و به‌واسطه سرعت بالای آنهاست که به ۴۴ کیلومتر در ساعت (۲۸ مایل) بین جزایر ساحلی کلمبیای انگلیس می‌رسد.

۱-۱۴- جزر و مد در آب‌های کم‌عمق

جزر و مدها با توجه به امواج بلند مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. حتی در اقیانوس‌های باز، آنها دارای طول موج‌های بسیار بلندتری نسبت به عمق آب می‌باشند. هنگامی که جزر و مد در آب کم‌عمق انتشار می‌یابد، شکل موجی آن از حالت سینوسی خارج می‌شود. در آب‌های کم‌عمق فلات قاره، همان‌طور که دامنه شکل موج، بخش قابل توجهی از عمق آب می‌شود، تاج‌های آنها شکل گرفته و دامنه جزر و مد افزایش پیدا می‌کند. با این حال در همان موقع، اصطکاک بستر رفته رفته انرژی جزر و مدی را کاهش داده و این حسیض را به تأخیر انداخته و دامنه را کاهش می‌دهد. توپوگرافی نامنظم ساحلی، تصویر و حل‌های دقیق ریاضی را بیشتر مشکل می‌کنند. جزر و مد در اقیانوس‌های آزاد نسبت به جزر و مدهای ساحلی، معمولاً دامنه بسیار کوتاه‌تری دارند.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این تا حدی، تحت تأثیر عوامل بازتاب و تشدید (رزونانس) است، اما در کل، ناشی از کم‌عمقی آب است. وقتی موج در آب کم‌عمق منتشر می‌گردد، سرعت موج آن کاهش یافته و انرژی موجود بین دو قله هر دو به عمق کوچک‌تر و طول موج کوتاه‌تر متراکم می‌گردند و بر این اساس، ارتفاع جزر و مدی و شدت جریان جزر و مدی افزایش می‌یابند.

اگر علاوه بر این، جزر و مد به داخل یک شاخه منتشر گردد که پهنای آن بیشتر به سمت رأس آن کاهش یابد، انرژی موج در این صورت به لحاظ جانبی بیشتر متراکم می‌گردد. این اثر باریک‌شدگی نامیده می‌شود و این باعث می‌شود که ارتفاع جزر و مدی افزایش پیدا کند.

گمانه جزر و مدی، حالت فوق‌العاده‌ای از اثرات آب کم‌عمق است. این معمولاً در جزر و مدهای شدید آب پایین و زمانی که جزر و مدی با دامنه بزرگ به داخل رودخانه یا خوری با بستر با شیب تند، باریک می‌شود، اتفاق می‌افتد.

گاهی اوقات جبهه جزر و مد برخاسته به بالای یک رودخانه، به صورت گمانه منتشر می‌گردد. یک دیواره آب چرخان و در حال چرخش، به سمت بالای رودخانه پیش‌روی می‌کند که بی‌شباهت با موج دورآی^۱ در حال شکست که به طرف ساحل می‌رود، نیست.

ایجاد گمانه (نقب)، مستلزم خیزش زیاد جزر و مد در دهانه رودخانه و چند نوار شنی، یا محدودیت‌های دیگر در محل ورود، برای ممانعت از پیش‌روی اولیه جزر و مد و یک بستر رودخانه‌ای با شیب ملایم و کم‌عمق است. می‌توان گفت که آب نمی‌تواند به‌طور یکنواخت در مناطق وسیع کم‌عمق برای تطابق با افزایش سریع در ورودی پخش گردد. اصطکاک در پایه جبهه پیش‌رونده، همراه با مقاومت ناشی از جریان فروکش نهایی که رودخانه را ترک می‌کند، باعث می‌شود که رأس جبهه پیش‌رو به سمت جلو خیز بردارد، گاهی اوقات گمانه‌ها ظاهر یک آبشار سیار را دارند.

۱-۱۵- سواحل جزر و مدی

تأثیر جزر و مد بر سواحل به دامنه آن بستگی دارد. در سواحل با دامنه جزر و مد بالا و بسیار بالا، امواج به‌طور ساده و متناوب به نوار ساحلی می‌رسند. در بسیاری از چرخه‌های جزر و مدی، فعالیت امواج تا ناحیه

¹ Swell

پس کرانه متوقف می‌شود. به دلیل محدود بودن دوره فعالیت مؤثر امواج، جورشدهی سواحل ماسه‌ای ضعیف است (کیدسون^۱، ۱۹۶۰). فعالیت کم امواج مانع از ایجاد دریابار^۲ می‌شود. با این وجود، ممکن است پرتگاه‌هایی در سنگ‌های سست و رسوبات منفصل (مانند مواد یخ رفتی یا مرداب‌های نمکی) ایجاد شود، مانند بخش‌هایی از خلیج فاندی و خورهای با دامنه جزر و مد وسیع. معمولاً در چنین مکان‌هایی سواحل شنی در سطح جزر و مد بالا تشکیل می‌شوند و شکل نیم‌رخ ساحل ماسه‌ای، جورشدهی رسوبات آن و رانش امتداد ساحلی رسوبات، همگی به وسیله توزیع عمودی انرژی امواج به هنگام بالا و پایین رفتن جزر و مد، کند می‌شود. بنابراین اثر امواج در خطوط ساحلی واقع در ناحیه جزر و مدی، گذرا می‌باشد. احتمالاً اثر امواج در بالاتر از سطح جزر و مد متوسط خیلی زیاد است و به طرف خطوط ساحلی واقع در محدوده جزر و مد بالا بسیار تأثیرگذار می‌شود. به ویژه هنگامی که امواج توفانی هم‌زمان با بالا آمدگی سطح دریا باشد (ترن‌هیل^۳، ۱۹۸۷).

جریان‌ات جزر و مدی در شکل‌دهی به توپوگرافی ناحیه جزر و مدی نقش مهمی دارند. این نوع مورفولوژی را می‌توان تحت عنوان ناحیه جزر و مدی در ارتباط با رژیم جریان جزر و مدی، نیم‌رخ متقاطع را توسعه می‌دهد، مانند خلیج وسترن پرت^۴ در استرالیا. تشخیص بین مورفولوژی حاصل از امواج و جزر و مد مشکل است. اشکال موجود در سواحل ریز جزر و مدی، کاملاً شبیه به سواحل با حاکمیت امواج هستند. اما به طور معمول، در سواحل جزر و مدی فعالیت امواج نیز مشاهده می‌شود (حتی اگر آثار آن به هنگام بالا و پایین رفتن جزر و مد تعدیل شود).

تالاب‌های نمکی، جنگل‌های مانگرو و سواحل پوشیده از چمن، اغلب نشان دهنده حاکمیت جزر و مد می‌باشند، اما معمولاً امواج کناره آنها را فرسایش داده و موجب انتقال رسوب به هنگام مد به داخل آنها می‌شود. به هنگام وقوع جزر، جریان‌ات قوی داخل تالاب‌ها و مانگروها به سمت ساحل حرکت کرده و در رودخانه‌های جزر و مدی جاری می‌شوند. ممکن است در کف خلیج‌های با جزر و مد بسیار بالا، مورفولوژی کاملاً جزر و مدی وجود داشته باشد. مانند خلیج فاندی. هرچند که به هنگام وقوع جزر و مد، فعالیت امواج در شکل‌دهی به اشکال کم‌عمق و رپل‌ها^۵ (حرکات موجی‌وار) شرکت می‌کند. جایی که طول بادگیر کمتر باشد یا امواج توسط تپه‌های دریایی و نقاط کم‌عمق دریا تضعیف می‌شوند، آثار امواج کاهش می‌یابد.

با توجه به مشکل بودن تشخیص محیط‌های جزر و مدی، برای بررسی تغییرات دامنه جزر و مدی و سرعت جریان‌ات جزر و مدی در دوره‌های گذشته، باید از شاخص توالی رسوبی این مناطق استفاده کرد (هینتون^۶، ۱۹۹۸).

تالاب‌های نمکی گسترده، در سواحل کم انرژی دارای دامنه جزر و مدی بالا و بسیار بالا تشکیل می‌شوند، مانند خلیج بریگ‌واتر^۷ در کانال بریستول و در سواحل خلیج مونت سنت میشل در شمال غرب فرانسه، باتلاق‌های وسیع داخل جنگل‌های مانگرو تحت شرایط مشابهی در عرض‌های پایین تشکیل می‌شوند، مانند

¹ Kidson

^۲ ساحل دریا، نواحی ساحلی، زمینی که در کنار دریا قرار دارد.

³ Trenhaile

⁴ Western perth

⁵ Ripple

⁶ Hinton

⁷ Bridgwater Bay

سواحل خلیج‌ها و خورهای واقع در شمال استرالیا، جایی که دامنه جزر و مد بالاست. برعکس، در سواحل با دامنه جزر و مدی پایین، انرژی امواج در یک ناحیه باریک عمودی متمرکز می‌شود و موجب فرسایش پای صخره‌ها شده و مانع از توسعه مرداب‌های نمکی و باتلاق‌های مانگرو می‌شود. مورفولوژی ساحل شنی، جابه‌جایی رسوبات و توپوگرافی بستر کرانه نزدیک، در چنین مکان‌هایی تحت حاکمیت امواج قرار دارند. تغییر سطح آب دریا می‌تواند جزر و مد را تعدیل کند. اگر سطح آب دریا بالا بیاید، احتمال دارد که دامنه جزر و مد نوار ساحلی اقیانوس‌های جهانی اندکی افزایش یابد. این بالاآمدگی، زمانی که دامنه جزر و مد با تغییرات ساحلی و پیکربندی ناحیه کرانه نزدیک تطبیق گردد، تعدیل خواهد شد. اگر سطح آب دریا پایین رود، ممکن است دامنه جزر و مد کاهش یابد، مگر در جایی که شکل کلی ساحل، حاصل افزایش محلی آن بوده باشد (اریک برد، ۱۹۹۶).

۱-۱۶- رزونانس (تشدید) جزر و مدی

در اقیانوس‌شناسی، رزونانس جزر و مدی زمانی رخ می‌دهد که جزر و مد یکی از حالت‌های تشدید اقیانوس را برانگیزد. این اثر زمانی که فلات قاره در حدود یک چهارم طول موج عرض دارد، بسیار چشمگیر است. موج جزر و مدی فرودی با انعکاس بین ساحل و لبه فلات قاره تقویت شده، در نتیجه دامنه جزر و مدی بسیار بالاتری در ساحل ایجاد می‌شود.

نمونه‌های معروف رزونانس جزر و مدی را می‌توان در خلیج فاندی و در کانال بریستول یافت. مناطق کمتر شناخته شده از این منظر نیز خلیج لیف^۱، بندر خلیج آنگاوا^۲ در نزدیکی ورودی تنگه هادسن^۳ (کانادا) که جزر و مدهای مشابه جزر و مدهای خلیج فاندی دارند، را می‌توان نام برد. سایر مناطق تشدیدکننده با جزر و مد بزرگ، شامل فلات پاتاگونیا^۴ و در فلات قاره شمال غربی استرالیا است. بسیاری از مناطق تشدیدکننده، مسئول بخش بزرگی از مقدار کل انرژی جزر و مدی پخش شده در اقیانوس‌ها می‌باشد (اجبرت^۵، ۲۰۰۱). توده‌های مختلف آب، دوره‌های نوسان طبیعی مجزایی دارند و این پاسخ آنها را به نیروی جزر و مدی تحت تأثیر قرار می‌دهد. رزونانس‌ها جریانات جزر و مدی قوی ایجاد می‌کنند.

افزایش سرعت امواج بلند در اقیانوس عمیق به این معنی است که طول موج جزر و مد در آنجا از مرتبه ۱۰۰۰۰ کیلومتر است. از آنجایی که حوضه‌های اقیانوسی اندازه مشابهی (به لحاظ مرتبه) دارند، لذا پتانسیل تشدید شدن (رزونانس) را نیز دارند. در عمل مشاهده رزونانس‌های اقیانوس عمیق دشوار است، شاید به این دلیل است که اقیانوس عمیق انرژی جزر و مدی را خیلی سریع به فلات قاره‌های تشدیدکننده از دست می‌دهد. اقیانوس آرام به‌طور کلی، یک دوره نوسان طبیعی در حدود ۲۵ ساعته دارد که باعث تشدید مؤلفه‌های روزانه نیروهای جزر و مدی می‌گردد، بنابراین جزر و مدها در آنجا تمایل به روزانه شدن دارند. دوره نوسان

¹ Leaf bay

² Ungava bay

³ Hudson Strait

⁴ Patagonian

⁵ Egbert

طبیعی اقیانوس اطلس در حدود ۱۲/۵ ساعت است که آن را برای مؤلفه‌های نیم‌روزانه نیروهای ناشی از جزر و مد مشدد می‌سازد. بنابراین جزر و مدها در آن اقیانوس عمدتاً نیم‌روزانه هستند. جزر و مدهایی که در اقیانوس آرام مشاهده می‌شوند، به‌طور کلی ویژگی‌های بسیار روزانه‌ای تری نسبت به جزر و مدهای اقیانوس اطلس دارند. همچنین دریاهایی وجود دارند که دارای دوره نوسان طبیعی هستند که باعث می‌گردد، آنها به نیروهای روزانه یا نیم‌روزانه پاسخ ندهند. این‌ها به آب‌های غیر جزر و مدی معروفاند. نمونه‌های خوبی از آب‌های غیر جزر و مدی؛ آب‌های مدیترانه شرقی، دریاهای بالتیک، دریای سیاه و دریای خزر می‌باشند.

۱-۱۷- پیش‌بینی جزر و مد و مأخذ جزر و مدی

ثابت مستمر و طولانی یا حداقل هر ساعت تراز آب در یک مکان دریایی معین، برای پیش‌بینی آتی جزر و مد ضروری می‌باشد. اصولاً برای مد نظر داشتن حدود تغییرات پیوندهای مؤلفه جزر و مدی، طول مدت آمارگیری و ثبت ایده‌آل حدود ۱۹ سال می‌باشد. با این حال، ثبت آماری کوتاه‌تر از ۳۷۰ روز، می‌تواند برای پیش‌بینی جزر و مد به کار رفته و مفید باشد. ارتفاع لحظه‌ای جزر و مد بالای یک مأخذ و مبنای انتخابی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = A + \sum_{i=1}^N A_i \cos\left(\frac{2\pi t}{T_i} + \Delta_i\right) \quad (2-1)$$

در این رابطه، A فاصله قائم از مبنای انتخابی تا MSL و همچنین A_i ، T_i و Δ_i به ترتیب دامنه، پریود و زاویه فاز مؤلفه خاص (به‌طور نمونه؛ M_2 و K_1)، t زمان منقضی شده و N تعداد مؤلفه‌های جزر و مدی مورد استفاده می‌باشند. اگرچه هشت مؤلفه M_2 ، S_2 ، N_2 ، K_2 ، K_1 ، O_1 ، P_1 ، M_f برای تحلیل جزر و مد در اکثر سواحل آمریکا کافی است، سرویس ملی اقیانوس‌شناسی اداره بازرگانی آمریکا، ۳۷ مؤلفه خیلی مهم را در انجام تحلیل فوق در نظر می‌گیرد. پس مقدار جزر و مد اندازه‌گیری شده در یک محل مشخص با انجام یک آنالیز هارمونیک تحلیل می‌گردد تا برای هر مؤلفه با پریود T_i مقدار A_i و Δ_i تعیین شود. یک بار که مقادیر A_i و Δ_i برای هر مؤلفه در محل مشخص تعیین گردید، رابطه (۲-۱) جهت پیش‌بینی آتی ترازهای جزر و مدی در آن محل می‌تواند استفاده گردد. هرگونه تغییری در منطقه ساحلی که بر انتشار موج جزر و مدی در محل مورد نظر مؤثر باشد، احتمالاً بر مقادیر A_i و Δ_i برای آن محل که از طریق تجربی تعیین شده‌اند، اثر خواهد گذاشت.

سرویس ملی اقیانوس‌شناسی اداره بازرگانی آمریکا، پیش‌بینی جزر و مد برای تعداد زیادی از نقاط منتخب خطوط ساحلی دنیا را به‌طور سالیانه منتشر می‌کند. ترازهای جزر و مدی پیش‌بینی شده، برحسب تراز و زمان پیش‌بینی شده روزانه برای یک‌سال در چند ایستگاه اصلی ارائه می‌شوند. اصلاحات لازم در مورد این مقادیر برای محل‌های دریایی مجاور به‌طور متعدد انجام و نتایج به صورت جدول ارائه می‌گردد. البته این ترازها مربوط به جزر و مد نجومی است و شامل اثرات آب و هوایی که ممکن است در هر لحظه فعال شوند، نمی‌شود.

چون عمق آب‌های ساحلی برای ناوبری مهم است، لذا یک مبنای میانگین آب-پایین اتخاذ می‌گردد. اعماق آب از این تراز اندازه‌گیری می‌شوند و در نقشه‌های (چارت) ناوبری ثبت می‌گردند. نقطه مبنای آب پایین معمولاً در تراز متوسط آب پایین برقرار می‌گردد و مبنای صفر یا مبنای جزر و مدی در این نقطه اتخاذ می‌گردد. در نواحی جزر و مدی ترکیبی، آب پایین متوسط به‌عنوان مبنای جزر و مدی استفاده می‌گردد. گاهی اوقات، تراز جزر و مدی پایین، ممکن است در زیر مقدار متوسط، به‌عنوان مبنای جزر و مدی استفاده گردد و یک جزر و مد منفی تولید می‌کند.

به‌طور کلی، در سیستم جزر و مد یکنواخت (روزانه و نیم‌روزانه)، بزرگ‌ترین ارتفاعی که جزر و مد در هر روز به آن می‌رسد به آب بالا و پایین‌ترین نیز به آب پایین معروف است. در یک سیستم مرکب، آن به آب بالای بالاتر و آب بالای پایین‌تر و آب‌های پایین بالاتر و آب‌های پایین پایین‌تر اشاره می‌کند. مشاهدات جزر و مدی که در یک دوره زمانی انجام می‌گیرند، برای محاسبه میانگین ترازهای جزر و مدی متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرند.

پیشگویی‌های جزر و مدی براساس اندازه‌گیری‌های بالای ثبت شده ناشی از ثبت‌های گذشته است، از این‌رو برای پیش‌بینی آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما به‌علت تمامی ترکیبات پیچیده احتمالی، پیش‌بینی جزر و مدهای زمینی از اطلاعات فرآیند فیزیکی و ثبت تاریخی مشکل است. با ترکیبی از اندازه‌گیری‌های واقعی محلی همراه با داده‌های نجومی مشخص، هنوز هم دانشمندان می‌توانند پیش‌بینی‌های بسیار دقیقی از جزر و مدها داشته باشند. ایستگاه‌های جزر و مدسنجی در بسیاری از موقعیت‌های ساحلی نصب می‌گردند که نوسان آب‌های اقیانوسی را دنبال می‌کنند. برای دوره ۱۸/۶ ساله میل ماه، حداقل به ۱۹ سال ثبت جزر و مد نیاز است. جداول جزر و مدی به‌طور سالانه توسط سازمان ملی اقیانوسی و جوی منتشر می‌گردند و تاریخ، زمان، فازهای ماه و ترازهای آبی و اقیانوسی را برای جزر و مدهای بالا و پایین در بسیار از موقعیت‌ها در امتداد ساحل و زمین و در برخی خلیج‌ها و خورها برای هد آب جزر و مدی فراهم می‌سازند. بنابراین، ارتفاع آب و خشکی در مناطق ساحلی نسبت به مأخذ جزر و مدی متنوع در مناطق مختلف جهان و برای اهداف گوناگون تعیین می‌شوند. برخی از این مأخذها به شرح زیر می‌باشند:

- بالاترین جزر و مد نجومی (HAT)
- پایین‌ترین جزر و مد نجومی (LAT)
- تراز میانگین دریا (MSL): ارتفاع متوسط همه ترازهای جزر و مدی (معمولاً در یک مبنای ساعتی) در یک مدت ۱۹ ساله.
- مأخذ ملی ژئودتیک قائم (NGVD): میانگین تراز دریا تعیین شده از ۱۹ سال اطلاعات میانگین‌گیری شده از ۲۶ ایستگاه سواحل آمریکای شمالی در سال ۱۹۲۹.
- جزر میانگین (MLW): میانگین حسابی در ۱۹ سال از همه ترازهای پائین آب (یعنی نقاط پائین در دوره جزر و مدی).
- متوسط تراز بالای جزر و مدی (MHW)
- میانگین کوتاه‌ترین جزرها (MLLW): میانگین حسابی در ۱۹ سال در مورد فقط تراز پایین‌تر هر جفت از ترازهای پایین آب در جزر و مد ترکیبی (مختلط).

- میانگین بلندترین مدها (MHHW)

- میانگین تراز جزر و مدی (MTL): تراز واقع در وسط MLW و MHW.

تراز دریا معمولاً در سواحل اقیانوس آرام نسبت به سواحل اقیانوس اطلس بالاتر بوده و در هر دو ساحل، تراز آب در شمال بالاتر از جنوب می‌باشد. همچنین، با گذشت زمان، بالآمدگی تراز دریا و همچنین بالارفتگی و فرونشینی خشکی‌های ساحل باعث MSL واقعی شده که از یک محل به محل دیگر با گذشت زمان تغییر می‌کند. بنابراین، NGVD به‌عنوان مبنای ثابت تراز میانگین دریا تلقی می‌گردد. MSL هم زمان در هر محل مشخص، احتمالاً از NGVD متفاوت خواهد بود. در سال ۱۹۸۸، NGVD مورد بررسی بیشتر قرار گرفت تا ثقل‌سنجی و سایر مسائل غیرعادی در تعیین مأخذ قائم آمریکای شمالی لحاظ شوند (NAVD88). MLW و MLLW به‌عنوان مأخذ اصلی برای دریانوردی و اهداف مربوط ارائه می‌شوند. به‌طوری‌که عمق‌های مبنا برای این مأخذ، در طول یک دوره جزر و مدی حداقل باشد. ارتفاع خشکی‌ها معمولاً بر مبنای NGVD سنجیده می‌شوند، در حالی که عمق‌های نقشه‌های هیدروگرافی دریایی ممکن است بر مبنای MLW یا MLLW باشند. این حالت در ترکیب اطلاعات توپوگرافی و هیدروگرافی باید با احتیاط استفاده گردد. فاصله قائم بین NGVD و MLLW با توجه به محل و زمان متغیر خواهد بود.

حدود تغییرات جزر و مد میانگین برای تعدادی از محل‌های ساحلی در آمریکای شمالی در جدول (۱-۱) ارائه شده است. حدود تغییرات جزر و مدی، میانگین اختلاف بین MLW و MHW برای جزر و مدهای نیم‌روزانه و روزانه و بین MLLW و MHHW برای جزر و مد ترکیبی (مختلط) می‌باشد.

جدول ۱-۱- تغییرات جزر و مد میانگین برای سواحل منتخب (سورسن، ۱۹۹۷)

نام محل	میانگین محدوده جزر و مدی
Grand Manan Island, New Brunswick	5.24
Burntcoat Head, Nova Scotia	11.70
Boston, MA	2.90
Provincetown, MA	2.77
Sandy Hook, NJ	1.42
Cape May, NJ	1.46
Trenton, NJ	2.46
Ocean City, MD	1.07
Duck, NC	1.00
Folly Island, SC	1.58
Savannah River Entrance, GA	2.10
Cape Canaveral, FL	1.07
Key West, FL	0.40
Pensacola, FL	0.40
Mobile, AL	0.46
Galveston, TX	0.43
La Jolla, CA	1.13
San Francisco, CA	1.25
Crescent City, CA	1.55
Columbia River Entrance, OR	1.71
Juneau, AK	4.18

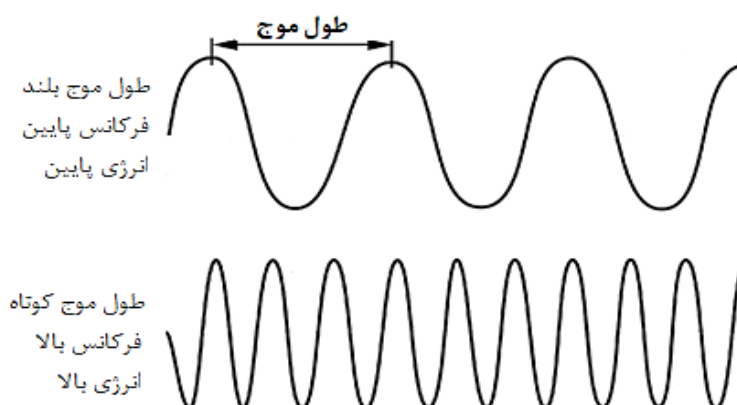
Anchorage, AK	7.89
Honolulu, HI	0.40

۱۸-۱- تسونامی

در اغلب موارد، اصطلاح «موج جزر و مد» به‌طور اشتباه برای تسونامی استفاده می‌شود. باید توجه نمود که این استفاده کاملاً نادرست است، زیرا تسونامی هیچ ارتباطی با جزر و مد ندارد. موج جزر و مدی در واقع، یک موج آب کم‌عمق است که به‌طور منظم تکرار می‌شود و در اثر تأثیرات برهم‌کنش‌های گرانشی بین خورشید، ماه و زمین بر اقیانوس ایجاد می‌شود.

کلمه تسونامی (Tsunami) از کلمات ژاپنی Tsu (بندر) و nami (امواج) تشکیل شده است. تسونامی یکی از بلایای طبیعی بوده و مجموعه‌ای از امواج بسیار بلند است که باعث لرزش شدید آب دریا می‌شود. برخلاف امواج معمولی اقیانوس که توسط باد ایجاد می‌شوند، یا جزر و مد که توسط کشش گرانشی ماه و خورشید ایجاد می‌شوند، تسونامی با جابه‌جایی آب توسط یک واقعه بزرگ ایجاد می‌شود و برخلاف امواج معمولی، تسونامی امواج آبی با طول موج بسیار بلند هستند و انرژی ناشی از آن نه روی سطح آب، بلکه از میان آب حرکت می‌کند. برای مقایسه در شکل (۱-۱۴) دو موج با طول موج‌های بلند و کوتاه با هم نشان داده شده‌اند.

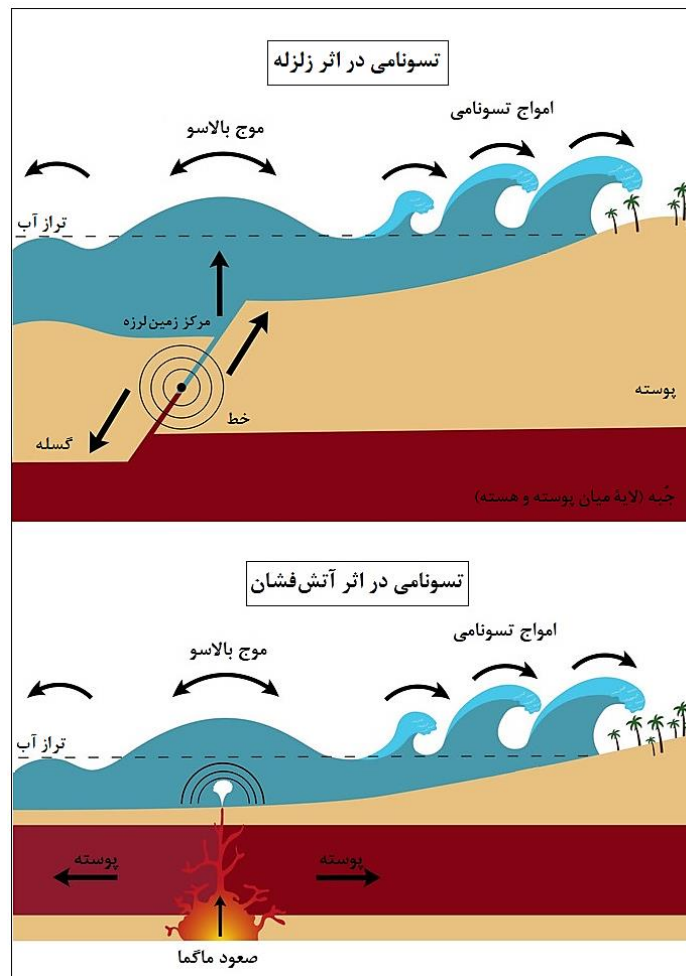
تسونامی زمانی شروع می‌شود که حجم عظیمی از آب به سرعت مرتفع گردد. این حرکت سریع می‌تواند، در نتیجه یک زلزله زیرآبی یا بر اثر لغزیدن صخره‌ها، رانش زمین، یا یک انفجار آتشفشانی یا هر واقعه دیگری که انرژی زیادی دارد، ایجاد شود (شکل ۱-۱۵).



شکل ۱-۱۴- مقایسه دو موج با طول موج‌های بلند و کوتاه.

تسونامی‌ها اغلب به صورت رشته‌های طغیانی قدرتمند و سریع آب (و نه به صورت یک موج منفرد غول‌آسا) ظاهر می‌شوند که به‌خصوص باعث تخریب ساحل می‌شود. قطار موج تسونامی، پس از حرکت به صورت رشته‌ای از امواج در فواصل طولانی، خود را به ساحل می‌کوبد. حتی در جایی که آب عمیق است، مثلاً ۳ مایل، طول موج معمولاً قابل قیاس بوده و باعث می‌شود، مانند یک موج آب کم‌عمق رفتار کنند. از این عمق می‌توان تخمین زد که تسونامی سرعت متوسطی در حدود ۵۰۰ مایل بر ساعت دارد و زمانی که به

ساحل نزدیک می‌شود، تلاطم کوچک، اما تقریباً غیرقابل آشکاری به سرعت رشد می‌کند که باعث ایجاد خسارت فاجعه‌بار و تلفات بسیار می‌گردد.



شکل ۱-۱۵- وقوع تسونامی در اثر زلزله و آتش‌فشان.

۱۹-۱- جزر و مد شکافی (ریپ تاید)^۱

جزر و مد شکافی (یا ریپ تاید)، یک جریان جزر و مدی فراساحلی و قوی از آب داخل خورها و سایر مناطق جزر و مدی محصور شده است. ریپ تاید ها همچنین در نواحی ورودی تنگ و باریک خلیج ها و تالاب ها که هیچ موجی در نزدیکی این ورودی وجود ندارد، رخ می‌دهند. در طول جزر و مدهای ضعیف، آب برای مدت کوتاهی بی حرکت است تا زمانی که سیل یا خیزش جزر و مد شروع به هل دادن آب دریا به سمت خشکی از طریق ورودی کند. به عبارتی، وقتی جزر و مد اتفاق می‌افتد، برون شارش آب به شدت از طریق یک ورودی به سمت دریا جریان می‌یابد. طی نوسان این جزر و مدها، ریپ تاید می‌تواند انسان را به آن سوی ساحل بکشد. به طور نمونه، جزر و مد فروکشند در ورودی شاینکوک^۲ در ساوتهمپتون نیویورک، به بیش از ۳۰۰ متری (۹۸۰ فوت) فراساحل گسترش یافته است. به همین دلیل، جزر و مدهای شکافی (ریپ تاید ها) معمولاً قوی تر

^۱ Rip Tide

^۲ Shinnecock Inlet

از جریانات شکافی (ریپ) هستند. این جریانات قوی و معکوس توسط مهندسان ساحلی، جت‌های فراکشند جت‌های فروکشند یا جت‌های جزر و مدی نیز نامیده می‌شوند، زیرا آنها مقادیر زیادی ماسه را به بیرون منتقل می‌کنند و در نتیجه، توده‌های شنی را در اقیانوس یا خلیج در خارج از کانال ورودی انباشته می‌کنند. اصطلاح «جت فروکشند» برای جریان جزر و مدی که از منطقه جزر و مدی محصور خارج می‌شود، و «جت فراکشند» برای جریان جزر و مدی که به آن ناحیه وارد می‌شود، اطلاق می‌گردد.

جریان شکافی که معمولاً به اشتباه جزر و مد شکافی یا ریپ تاید گفته می‌شود، در واقع یک کانال قوی از آب است که از نزدیک ساحل به سمت دریا جریان می‌یابد. این جریان به‌طور نوعی دارای سرعت 0.5 متر بر ثانیه ($1-2$ فوت بر ثانیه) است و می‌تواند تا 2.5 متر بر ثانیه نیز برسد که سریع‌تر از هر انسان شناگری است. این جریانات می‌توانند در هر ساحلی با امواج شکسته، از جمله اقیانوس‌ها، دریاها و حتی دریاچه‌های بزرگ رخ دهند.

بنابراین، جریانات ریپ با جزر و مدهای ریپ تفاوت دارند. نوع خاصی از جریان مرتبط با جزر و مد ممکن است، شامل هر دو جریان جزر و مدی فراکشند و فروکشند باشد که در اثر ورود و خروج جزر و مد از طریق ورودی‌ها و دهانه مصب‌ها، بندرها و غیره ایجاد می‌شود. این جریان‌ها حتی ممکن است باعث مرگ و میر ناشی از غرق شدن شوند، اما جریانات جزر و مدی یا جت‌های جزر و مدی پدیده‌هایی جدا و متمایز از جریانات ریپ هستند (شکل ۱-۱۶).



شکل ۱-۱۶- جریان شکافی (ریپ)

۲۰-۱- جزر و مد دریای عمان

جزر و مد دریای عمان نامنظم است و از شرق به غرب افزایش می‌یابد. در بخش شرقی حدود 2 متر و در دهانه تنگه هرمز به حدود 3.5 متر می‌رسد. سرعت جزر و مد در حاشیه شمالی دریای عمان به حدود 2 گره دریایی (تقریباً 1 متر بر ثانیه) می‌رسد.

۱-۲۱- جزر و مد در خلیج فارس

الگوی جریان کلی خلیج فارس، یک گردش پادساعت گرد است که نیروهای جزر و مدی، تنش باد و گرما آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با وجود اینکه در خلیج فارس، نیروی جزر و مدی بیشترین سهم را در مقادیر سرعت جریان ایفا می‌کند، ولی در بلندمدت دو نیروی دیگر بیشتر تأثیرگذار هستند (ماه‌پیکر و خلیل‌آبادی، ۱۳۹۸).

جزر و مد در دریای عمان و خلیج فارس نامنظم است و آب حالت مد از دریای عربی تأمین می‌شود. نوع جزر و مد در خلیج فارس با جزر و مد موجود در تنگه هرمز که با آب‌های باز و عمیق دریای عمان در ارتباط است، هم‌خوانی دارد. جزر و مدهای دریای عمان با دریای عربی هم‌نوسان می‌باشند و از آنجایی که تنگه هرمز به آب‌های عمیق دریای عمان متصل است، لذا نوسانات جزر و مدی دریای عمان و دریای عربی سبب تشدید یا کاهش نوسانات جزر و مدی در تنگه هرمز می‌گردند. در نتیجه، نوسانات جزر و مدی تنگه هرمز، بر روی نوسانات آب خلیج فارس تأثیر می‌گذارد.

به‌طور کلی، میانگین دامنه جزر و مد در خلیج فارس ۱/۵ متر است که در نواحی تنگه هرمز و شمال جزیره قشم به ۲/۵ تا ۳ متر و در کانال ابوموسی به ۴ متر نیز می‌رسد. جزر و مدهای کوتاه کرانه‌های خلیج فارس، تقریباً به موازات محور خلیج فارس صورت می‌گیرد و سرعت آن در حدود ۵۰ سانتی‌متر در دقیقه و تا حد ۴ متر، بالاتر از خط میناست و تلاطم آن در عمیق‌ترین نقاط خلیج فارس نیز بی‌اثر نیست (ماه‌پیکر و خلیل‌آبادی، ۱۳۹۸).

جریانات جزر و مدی در خلیج فارس در حالت کلی، در زمان مد در جهات غربی و شمال‌غربی جاری هستند و در حالت جزر معکوس می‌گردند. این مطلب بیانگر وجود جزر و مدی است که باعث حرکت آب به طرف سواحل ایران و عربستان سعودی می‌گردد. همچنین ارتفاع جزر و مدی از وسط خلیج به طرف ساحل کاهش پیدا می‌کند. با وجود آنکه دامنه جزر و مدی در خلیج فارس وسیع است، اما سهم قابل توجهی در گردش خلیج فارس ندارد. انرژی جریان جزر و مدی با دوره متوسط بیشتر از ۲۴ ساعت، قابل صرف‌نظر کردن است، لذا در مقیاس‌های کوچک با مقیاس طول افقی کمتر از ۲۴ ساعت، در جریانات گردشی خلیج فارس اهمیت دارد.

ماهیت جزر و مد در خلیج فارس پیچیده بوده و افزایش تشدید نوسانات جزر و مدی می‌تواند در آن رخ دهد (ملاسماعیل‌پور، ۱۴۰۱). جزر و مد در خلیج فارس ترکیبی است و الگوی اصلی از نیم‌روزانه به روزانه تغییر می‌کند (رینولدز، ۱۹۹۳). به عبارتی، خلیج فارس هم دارای نوسانات جزر و مدی روزانه و هم نیم‌روزانه است که در اثر انتشار انرژی جزر و مدی دریای عمان از طریق تنگه هرمز به خلیج فارس وارد می‌شود (هانتز، ۱۹۸۲).

مؤلفه‌های نیم‌روزانه، دارای ۲ نقطه آمفیدرامیک در دو انتهای شمال‌غربی و جنوبی خلیج فارس می‌باشد. مؤلفه‌های روزانه دارای یک نقطه آمفیدرامیک در مرکز خلیج فارس، نزدیک بحرین می‌باشد (هانتز، ۱۹۸۲). مؤلفه‌های جزر و مدی اصلی روزانه و نیم‌روزانه در خلیج فارس O_1 , K_1 , S_2 , M_2 می‌باشند (نجفی، ۱۹۹۷). محدوده جزر و مدی خلیج فارس بزرگ است. این محدوده در رأس خلیج ۳ متر و در جاهای دیگر حدود ۱ متر است (لهر، ۱۹۸۴). دینامیک جزر و مدی خلیج فارس در مدل‌های هیدرودینامیکی مختلف مطالعه

شده‌اند (تریپکا ۱۹۶۸، لاندنر و همکاران ۱۹۸۲، بشیر و همکاران ۱۹۸۹، پروتور و همکاران ۱۹۹۴، نجفی ۱۹۹۱، توبنر و همکارانش ۱۹۹۹). بسیاری از این مدل‌ها از معادلات اندازه حرکت میانگین‌گیری شده عمقی، در سیستم مختصات دکارتی یا کروی استفاده می‌کنند.

وجود اطلاعات جزر و مدی در خلیج فارس، براساس نمودارهای نیروی دریایی است که از ۸۰ مکان مشاهداتی در سواحل و تعداد کمی در خلیج فارس ایجاد شده است.

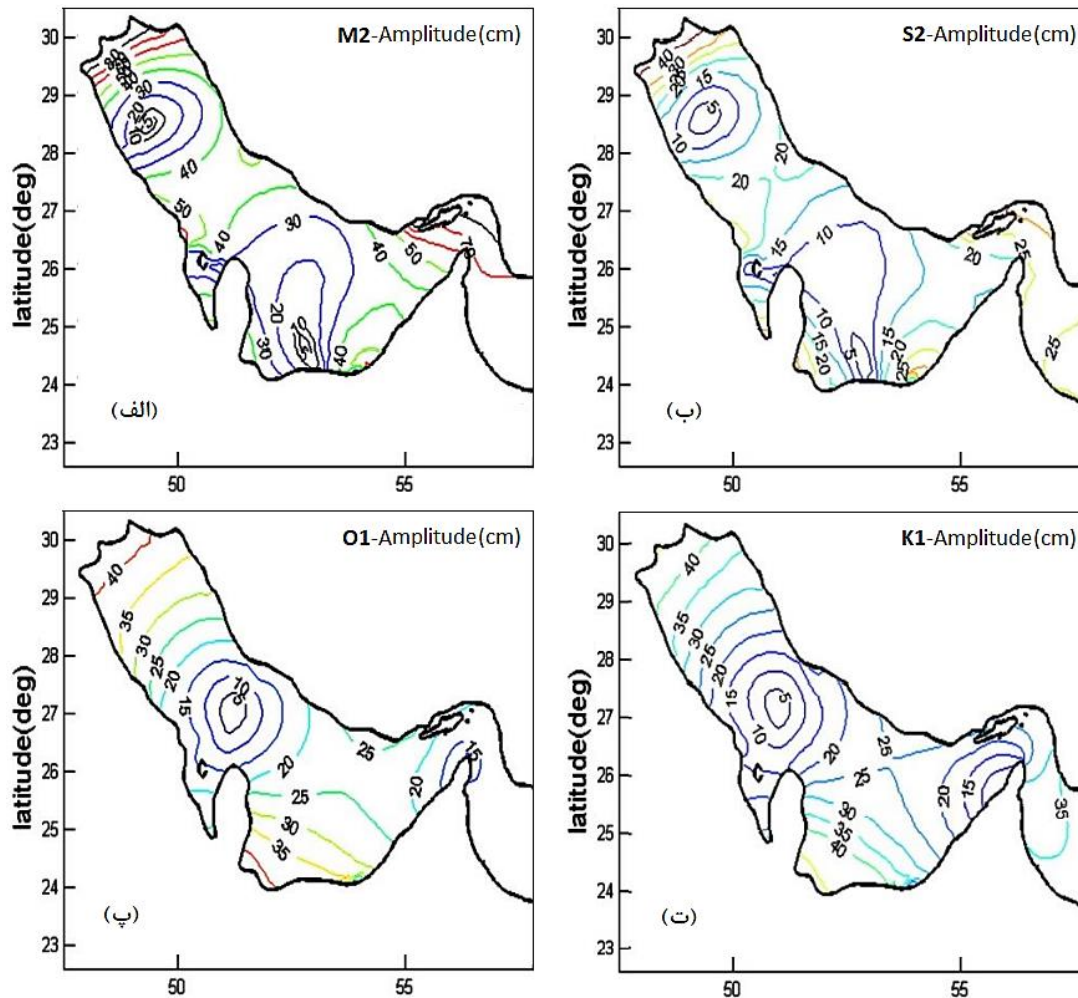
مؤلفه جزر و مدی M_2 دارای دو نقطه آمفیدرامیک در خلیج فارس است. سیگنال جزر و مدی M_2 در تمام نقاط خلیج فارس دارای دامنه ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر است. در رأس خلیج فارس و تنگه هرمز به بیشینه ۸۰ تا ۹۰ سانتی‌متر می‌رسد.

سیگنال‌های S_2 دارای دو نقطه آمفیدرامیک در خلیج فارس هستند. دامنه این مؤلفه جزر و مدی تقریباً ۳۰ درصد دامنه M_2 است و بیشترین دامنه آنها در رأس خلیج فارس و در تنگه هرمز می‌باشد.

مؤلفه O_1 دارای یک نقطه آمفیدرامیک به طرف شمال بحرین است و بیشترین دامنه آن ۳۰ سانتی‌متر و در رأس خلیج فارس می‌باشد.

مؤلفه K_1 دارای یک نقطه آمفیدرامیک به طرف شمال بحرین است و بیشترین دامنه آن ۵۰ سانتی‌متر و در رأس خلیج فارس می‌باشد.

در شکل (۱-۱۷) خطوط هم‌دامنه، برای ۴ مؤلفه جزر و مدی نشان داده شده است. مطابق اطلاعاتی که این نقشه‌ها ارائه می‌دهند، برای مؤلفه‌های نیم‌روزانه هر کدام دو نقطه آمفیدرامیک و برای مؤلفه‌های روزانه هر کدام یک نقطه آمفیدرامیک در خلیج فارس مشاهده می‌شود (اکبری و همکاران، ۱۳۹۶).



شکل ۱-۱۷- نقشه خطوط هم‌دامنه (برحسب سانتی‌متر) برای مؤلفه‌های جزر و مدی: الف) M2، ب) S2، پ) O1 و ت) K1 در خلیج فارس (اکبری و همکاران، ۱۳۹۶).

در جدول (۱-۳) هشت مؤلفه اصلی جزر و مدی با علامت، پریود (دوره تناوب)، اندازه نسبی تقریبی (وابسته به محل) و شرح آنها آورده شده است. مؤلفه‌ها به روش‌های مختلف در هر محل دریایی طبقه‌بندی شده و توسط هیدروگرافی محل، اصطکاک بستر، تشدید و عوامل دیگر تحت تأثیر قرار گرفته و جزر و مد محلی تولید می‌شود.

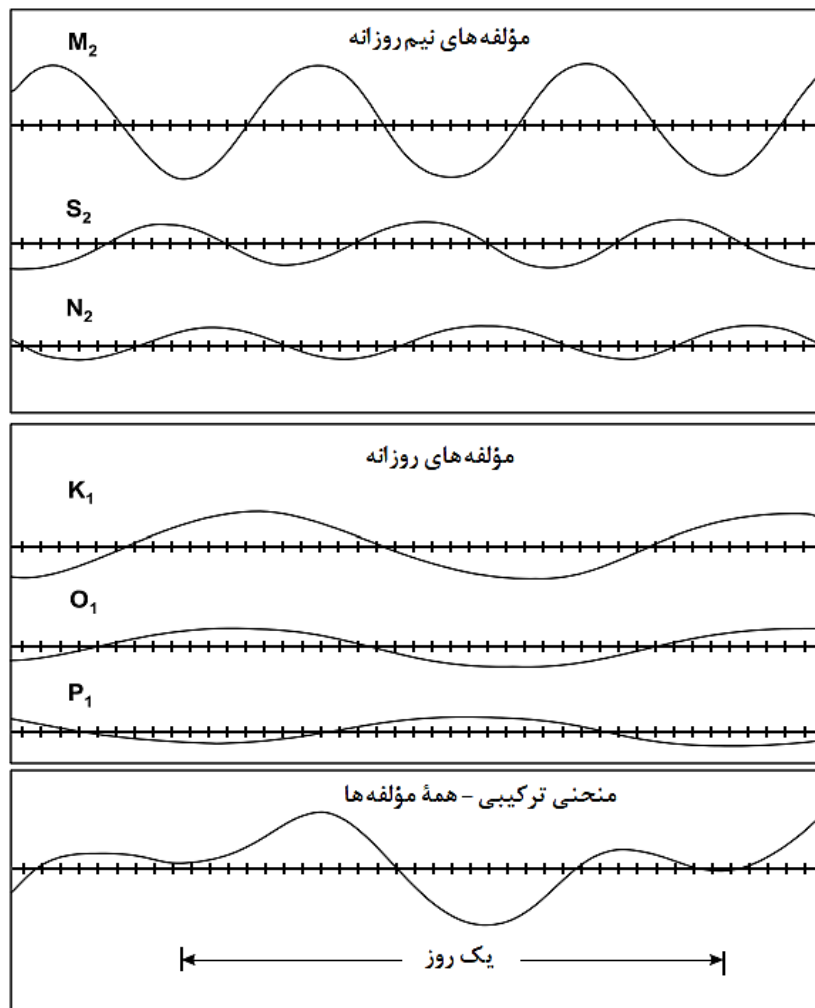
تفاوت بین سیگنال جزر و مد نجومی و اندازه‌گیری سطح آب به‌طور کلی، به اثرات شرایط آب و هوایی محلی مربوط می‌گردد. با این حال، در مکان‌های مختلف مؤلفه‌های مختلف غالب هستند، هر مکان با مکان دیگر متفاوت است، و مقادیر اندازه نسبی جدول (۱-۲) نباید بدون توجه به این عامل مورد استفاده قرار گیرند.

جدول ۱-۲- مؤلفه‌های جزر و مدی با دوره‌های روزانه، نیم‌روزانه و با دوره طولانی (شورمن^۱، ۱۹۴۱)

علامت	پریود (ساعت)	اندازه نسبی	شرح
مؤلفه‌های نیم‌روزانه			
M_2	۱۲/۴۲	۱۰۰/۰	مؤلفه اصلی قمری
S_2	۱۲/۰۰	۴۶/۶	مؤلفه اصلی خورشیدی
N_2	۱۲/۶۶	۱۹/۱	مؤلفه قمری ناشی از تغییرات ماهانه فاصله ماه از زمین
K_2	۱۱/۹۷	۱۲/۷	مؤلفه خورشیدی-قمری ناشی از تغییرات در زاویه انحراف خورشید و ماه در تمام مدت سیکل‌های مداری آنها
مؤلفه‌های نیم‌روزانه			
K_1	۲۳/۹۳	۵۸/۴	با O_1 و P_1 فرض شده برای عدم تسائی روزانه قمری و خورشیدی
O_1	۲۵/۸۲	۴۱/۵	مؤلفه اصلی روزانه قمری
P_1	۲۴/۰۷	۱۹/۳	مؤلفه اصلی روزانه خورشیدی
Q_1	۲۶/۸۷	۸	مؤلفه قمری ناشی از تغییرات ماهانه فاصله ماه از زمین
دوره (پریود) طولانی			
M_f	۳۲۷/۸۶	۱۷/۲	مؤلفه دوهفتگی قمری
M_m	۶۶۱/۳	۹	مؤلفه ماهانه قمری
S_{sa}	۴۳۸۳	۸	مؤلفه نیم سالانه خورشیدی
S_a	۸۷۶۶	۱	مؤلفه سالانه خورشیدی

شکل (۱۸-۱) نمایش مؤلفه‌های هارمونیک اصلی جزر و مدها، دوره‌ها و اندازه‌های نسبی مؤلفه‌های تشکیل دهنده موجود در جدول (۲-۱) می‌باشند.

¹ Schureman



شکل ۱-۱۸- مؤلفه‌های هارمونیک اصلی جزر و مدی؛ دوره‌ها و اندازه‌های نسبی مؤلفه‌های تشکیل دهنده موجود در جدول (۳-۳) می‌باشند. شکل پایین به‌طور کیفی، نتیجه مجموع مؤلفه‌های تشکیل دهنده برای بازسازی مؤلفه جزر و مدی نجومی اندازه‌گیری‌های سطح آب می‌باشد (منبع؛ اداره ملی اقیانوسی و جوی Noaa, ۲۰۰۰).

۱-۲۲- جزایر جزر و مدی^۱

جزیره جزر و مد، زمینی است که به‌وسیله یک بزرگراه طبیعی یا ساخت بشر به زمین متصل می‌شود و در جزر و مد قرار می‌گیرد و در هنگام جزر و مد غرق می‌شود. جزایر جزر و مدی، امروزه برای تفریح و تماشای این پدیده جالب طبیعی، مکان‌هایی بسیار جذاب برای گردشگران و علاقه‌مندان فراهم می‌سازد. در قدیم، به‌دلیل عجایب در جزایر جزر و مدی، بسیاری از این مکان‌ها محل پرستش مذهبی بوده‌اند. در کشور ما ایران نیز جزایر ناز که در استان هرمزگان و در حدود ۳۵ کیلومتری جنوب جزیره قشم قرار دارند، در میان دیگر سواحل نیلگون خلیج فارس و دریای عمان می‌درخشند. این جزیره، یکی از مکان‌های جالب برای دیدن جزر و مد دریا بوده و از جمله عجایب هفت‌گانه سحرآمیز منطقه قشم محسوب می‌شود. وجود سواحل سنگی و آب بسیار زلال و زیبا و شفاف آن به زیبایی‌های این جزیره جزر و مدی افزوده است (شکل ۱-۱).

¹ Tidal island

به‌طور کلی، جزایر جزر و مدی جزایری هستند که به سرزمین‌های اصلی متصل بوده و در زمانی که آب در پایین‌ترین سطح خود قرار دارد، می‌توان با پیاده به آنها دسترسی داشت. اما در زمانی که سطح آب در بالاترین حالت خود قرار می‌گیرد، این مکان‌ها از سرزمین اصلی خود جدا شده و به یک جزیره واقعی تبدیل می‌شوند. جزایر جزر و مدی گاهی اوقات به‌وسیله جاده به سرزمین اصلی متصل شده و بازدیدکنندگان می‌توانند از آن جاده عبور کنند، البته می‌توانند با قایق نیز به آن دسترسی داشته باشند. بنابراین در زمانی که قصد سفر به این جزایر را دارید، حتماً باید نوع جزر یا مد آب را بررسی کنید، در غیر این صورت امکان دارد، به درون آب بیافتید. بنابراین، نکته‌ای که در مورد جزایر جزر و مدی باید به آن توجه داشت، این است که اغلب این جزایر در طول شبانه‌روز تنها ساعاتی امکان دسترسی به سرزمین اصلی را از طریق خشکی دارند و در سایر مواقع فقط می‌توان به‌وسیله قایق به آنها رسید. شاید این احساسی ترسناک را ایجاد نماید که مسیری که با آن به این جزیره آمده‌اید، اکنون در زیر چند متر آب قرار گرفته است.

جزایر جزر و مدی در نقاط مختلف جهان یافت می‌شوند. از مهم‌ترین جزایر جزر و مدی جهان می‌توان جزایر زیر را برشمرد؛ جزیره انوشیما^۱ (با محیط ۴ کیلومتری که در دهانه رودخانه کاتاسه^۲ قرار دارد و به خلیج ساگامی^۳ در ژاپن می‌ریزد)، ایلان تیورام^۴ (در لاک مویدارت (Loch Moidart) واقع در کشور اسکاتلند)، لیندیسفارن^۵ (یا جزیره مقدس در سواحل شمال شرقی انگلستان)، کونانگ یوان^۶ (واقع در سواحل شمال غربی کوتاهو (Ko Taho))، حاجی علی دارگاه^۷ (واقع در سواحل بمبئی هند)، جیندو و مودو^۸ (دو جزیره واقع در جنوب غربی کره جنوبی)، اسوتی استفان^۹ (در غرب مونته نگرو واقع در بودوا ریورا (Budva Riviera))، مونت سنت میشل^{۱۰} (واقع در سواحل شمالی منطقه نورماندی فرانسه).

¹ Enoshima

² Katase

³ Sagami

⁴ Eilean Tioram

⁵ Lindisfarne

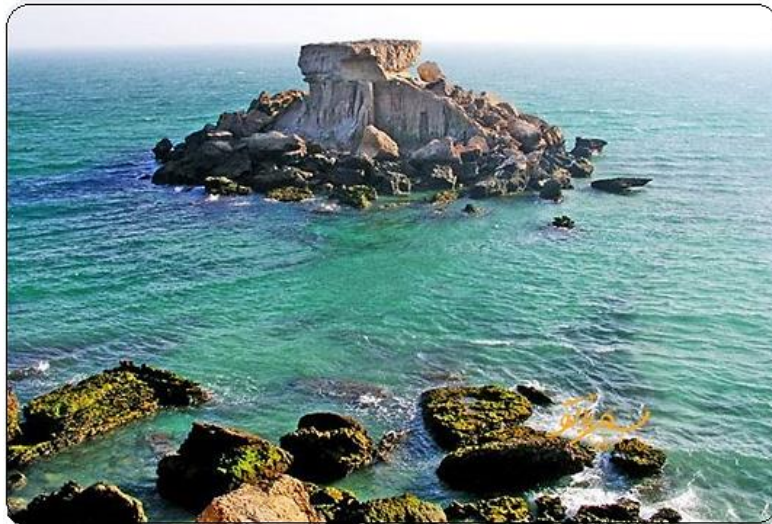
⁶ Ko Nang Yuan

⁷ Haji Ali Dragah

⁸ Jindo and Modo

⁹ Sveti Stefan

¹⁰ Mont Saint-Michel



شکل ۱-۱- جزیره ناز، یکی از مناطق دیدنی و نمونه‌ای از یک جزیره جزر و مدی واقع در جزیره قشم.

۱-۲۳- جزر و مد‌های قرمز^۱

به ساده‌ترین عبارت، جزر و مد قرمز یک شکوفه فیتوپلانکتون است. فیتوپلانکتون‌ها (شکل ۱-۱۹) گیاهان تک سلولی میکروسکوپی هستند که به‌طور طبیعی در آب‌های ساحلی رخ می‌دهند. یک شکوفه زمانی رخ می‌دهد که یک گونه خاص فیتوپلانکتونی به سرعت تولید مثل کرده و در هر گالن آب میلیون‌ها یاخته (سلول) به‌وجود می‌آورد. البته تمامی گونه‌های فیتوپلانکتون شکوفه‌های مرئی تولید نمی‌کنند. جزر و مد‌های قرمز توسط گروه خاصی از فیتوپلانکتون ایجاد می‌گردند که تاژکدارها^۲ نامیده می‌شوند که به‌نظر می‌رسد، آب‌های گرم‌تر و آرام‌تر را ترجیح می‌دهند.

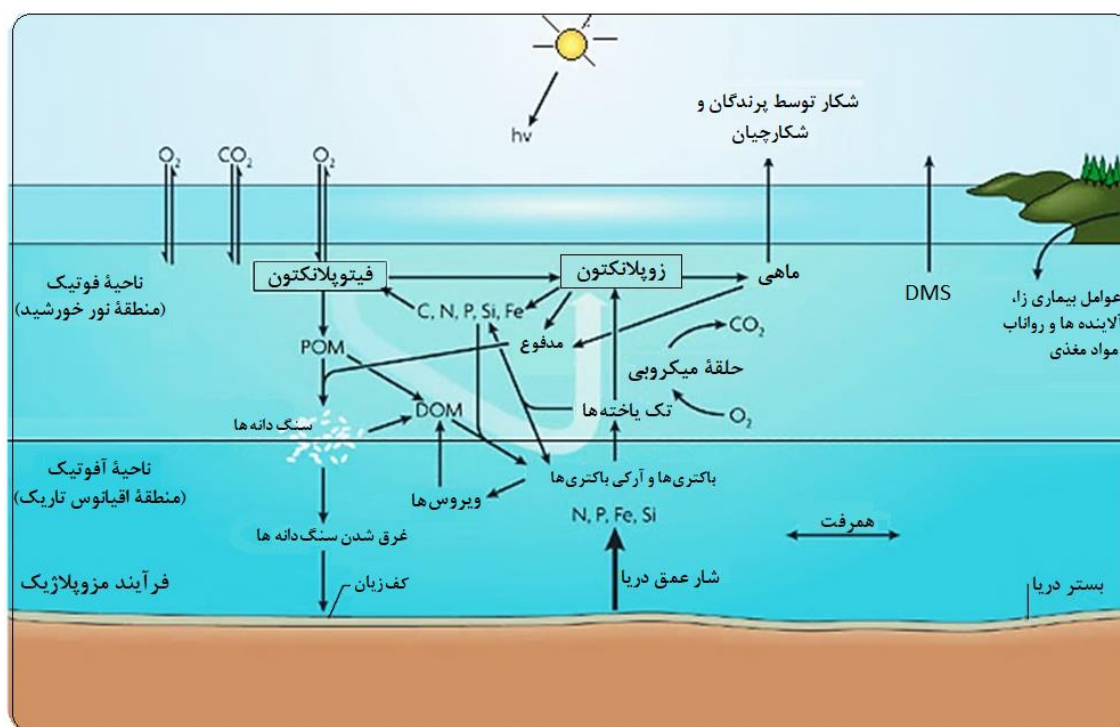
در کالیفرنیا عمده جزر و مد‌های قرمز، فقط به‌وسیله گونه‌هایی از جانوران که سم‌های کشنده‌ای تولید می‌کنند، نظیر اسید دومیک^۳ و سم‌های کشنده حاصل از حلزون‌ها به‌وجود نمی‌آیند. متأسفانه برخی مواقع، شکوفه‌های فیتوپلانکتون توسط مولدهای سمی تشکیل می‌گردند. بنابراین بهتر است مواظب بود و تا زمانی که در این زمینه شناخت و آگاهی کم هست، باید فرض نمود که این شکوفه‌ها سمی هستند.

لازم به ذکر است که سم‌های خطرناک، در این زمینه می‌توانند در انواع مختلفی از غذاهای دریایی (نظیر صدف‌های دریایی و خوراکی، خرچنگ‌ها و غیره) وجود داشته باشند، حتی اگر یک شکوفه مرئی نیز رخ نداده باشد.

^۱ Red Tides

^۲ Dinoflagellates

^۳ Domoic acid



شکل ۱-۱۹- طبقه‌بندی دریا از منظر حضور فیتوپلانکتون در آب‌های ساحلی.

علت قرمزی رنگ جزر و مدها را می‌توان بدین صورت شرح داد؛ یاخته‌های فیتوپلانکتون که باعث جزر و مد قرمز می‌گردند، رنگ‌دانه‌هایی را برای به دام انداختن نور خورشید که برای تغذیه، رشد و تولید مثل لازم است، دربر می‌گیرند. زمانی که میلیون‌ها یاخته در هر گالن آب در امتداد ساحل متمرکز می‌گردند، این رنگ‌دانه‌ها، یک رنگ مایل به سرخی را بیرون می‌دهند. اگر با میکروسکوپ تنها به یکی از این یاخته‌ها با دقت نگاه کنید، ممکن است در واقع یک رنگ طلایی-قهوه‌ای به‌نظر برسد. برخی تاژکدارها همچنین می‌توانند با استفاده از واکنش شیمیایی در یاخته، نور تولید کنند. بنابراین، یک شکوفه می‌تواند، به‌طور واقعی امواج اقیانوس را روشن کند. البته شایان ذکر است، جزر و مدهای قرمز، در واقع می‌توانند رنگ‌های متنوعی داشته باشند، از قهوه‌ای تا قرمز بسیار تند، تا قرمز روشن و حتی در برخی قسمت‌های جهان می‌توانند رنگ زرد داشته باشند. رنگ یک شکوفه بستگی به گونه‌های فیتوپلانکتون موجود و همچنین عوامل دیگری نظیر شدت روشنایی و زاویه تابش خورشید در آب دارد.

جزر و مدهای قرمز می‌توانند روزها تا ماه‌ها طول بکشند. مدت زمانی که یک شکوفه پلانکتون ادامه پیدا می‌کند، بستگی به عوامل زیادی، نظیر مغذی‌های موجود و نور خورشید، دمای آب، تغییرات در باد یا شرایط موج، هم‌آوری با گونه‌های دیگر و تغذیه به‌وسیله زوپلانکتون‌ها و ماهی‌های کوچک دارد.

در رابطه با زمان و مکان وقوع جزر و مدهای قرمز می‌توان گفت، جزر و مدهای قرمز در همه نواحی جهان، از نواحی مدارگان تا آلاسکا رخ می‌دهند. متداول‌ترین مشاهدات جزر و مدهای قرمز در کالیفرنیا بین شهرهای سانتا باربارا^۱ و سن دیگو^۲ می‌باشد. عمده جزر و مدهای قرمز در کالیفرنیا بین اوایل بهار (فوریه،

^۱ Santa Barbara

^۲ San Diego

مارس) و اواخر تابستان (اوت، سپتامبر) رخ می‌دهند. در ایران نیز معروف‌ترین جزر و مد قرمز در چابهار رخ می‌دهد که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم.

۱-۲۳-۱- جزر و مد قرمز چابهار

جزر و مد قرمز چابهار از جمله دیدنی‌های چابهار در ساحل دریای عمان است. به ویژه تالاب صورتی در درهٔ لیپار اوج زیبایی این پدیده در شهرستان چابهار واقع در استان سیستان و بلوچستان می‌باشد. این تالاب صورتی رنگ، در تنگه و دره‌ای صخره‌ای مشرف به کوه، در مسیر جادهٔ ساحلی چابهار به گواتر در ساحل دریای عمان (۱۵ کیلومتری شرق چابهار در نزدیکی روستای رمین و در مسیر جادهٔ ساحلی چابهار-گواتر) واقع شده است.

جزر و مد سرخ یا صورتی رنگی که در این تالاب رخ می‌دهد، آن را از زیباترین دیدنی‌های چابهار ساخته است. در واقع، نحوهٔ اکوسیستم تالاب در چابهار به صورت جزر و مد قرمز انجام می‌شود. رنگ قرمز این پدیده محصول فعالیت پلانکتون‌های گیاهی این منطقه است. فراوانی مواد آلی و معدنی به همراه جریان‌های دریایی حاصل از توفان‌های مونسون که از طریق رودخانه و خورهای متصل به خلیج به این حوزه وارد می‌شوند، باعث افزایش پلانکتون‌ها و در نتیجهٔ این پدیدهٔ منحصر به فرد اقیانوسی می‌شود.

دیدن جزر و مد قرمز در این تالاب بسیاری از گردشگران را به این منطقه می‌آورد. بهترین زمان برای دیدن تالاب لیپار و جزر و مد در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین است، چون در این فصول فعالیت پلانکتون‌های گیاهی به حداکثر می‌رسد. آب تالاب به شدت شور است و محلی‌ها صدف و نمک آن را جمع‌آوری کرده و می‌فروشند. باید مواظب بود که با ماشین به سمت تالاب نروید، چون حالت باتلاقی داشته و در آن گیر می‌کنید. شایان ذکر است که حدود ۸۵ نوع ماهی، ۶۴ گونه از نرم‌تنان، ۳۱ گونه پلانکتون جانوری، ۴۶ گونه جلبک و ۲۴ گونه سخت پوست در این تالاب زندگی می‌کنند.