١١٤٨٠٦

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش دریا

عطف ← مدل‌سازی مد توفان برای دریای عمان در محیط GIS

استاد راهنما:

دکتر اسماعیل حسن‌زاده

استاد مشاور:

مهندس محمد اکبری‌نسب

پژوهشگر:

عطف ← بهمن افغان‌علوی

۱۳۸۸/۴/۶

تهیه مدارک

عطف ← بهمن ماه ۱۳۸۷

۱۱۴۸۰۶

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

شیوه نگارش پایان نامه
رعایت شده است.
تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش دریا آقای بهمن افغان علوی

تحت عنوان

مدل‌سازی مد توفان برای دریای عمان در محیط GIS

در تاریخ ۸۷/۱۱/۲۱ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر اسماعیل حسن‌زاده با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۲- استاد مشاور پایان نامه مهندس محمد اکبری‌نسب با مرتبه‌ی علمی مربی امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر فهیمه حسینی بالام با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر مهدی مومنی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

گروه فیزیک
University of Isfahan
Department of Physic

سپاسگزاری

پس از سپاس خدای تعالی که به این بنده، قدرت پیشروی در مسیر زندگی را عنایت کرده است، از تمام سرورانی که اینجانب را در انجام این تکلیف راهنمایی نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

از استاد راهنمای عزیزم جناب آقای دکتر اسماعیل حسن زاده برای راهنمایی ها و صبرشان در این مدت که دانشجوی ایشان بودم، سپاسگذاری می کنم.

جناب آقای محمد اکبری نسب، استاد مشاور این پایان نامه، در انجام این کار و حتی بیشتر از آن زحمات زیادی برای اینجانب متحمل شدند. برای این زحمات و اینکه مانند یک دوست در کنار من بودند، از ایشان تشکر می نمایم.

از استاد دیگر خود، خانم دکتر حسینی به خاطر کمک ها و بردباریشان در قبال خودم، سپاس فراوان دارم.

دوستان عزیزم، هم اتاقی ها و هم کلاسی ها، آقایان سجاد محسنی پور، محسن غلامی، بهنام علیزاده، محمدرضا لشکربلوکی، محمد اقبالی، علی دارابی، مرتضی عسکریان، محمدعلی محمدی، رضا موسوی، امیرحسین معماری، ابوالفضل رحیم، میثم مصلحی و خانم جورمهر که در این مدت از یاری رساندن به من دریغ نکردید، با حضور در کنارشان خستگی تحصیل و تحقیق به نشاط مبدل گشت، متشکرم و همیشه شما را به خاطر خواهم داشت.

در آخر باید گفت، آنچه همواره و در این مسیر مایه ی بقای امید و ایجاد تلاش در من شده، مساعدت و صبر پدر، مادر و خواهر عزیزم بوده است. خداوند پناه و یاور ایشان باشد.

بهمن افغان علوی- بهمن ۱۳۸۷

چکیده

در این تحقیق مدلی برای محاسبه تغییرات سطح تراز دریا و سرعت جریانات ناشی از پدیدهٔ مد توفان روی حوضه دریای عمان تهیه شده است. مدل طراحی شده قادر به اندازه گیری انرژی حاصل از این تغییرات نیز می‌باشد. این مدل به روش نیمه ضمنی تفاضل محدود و به صورت پیش‌رو – پس‌رو نوشته شده است. این مدل در دستگاه مختصات کارتزین طراحی شده است. شبکه مورد استفاده برای محاسبات شبکهٔ آرکاوای C می‌باشد. در این مدل اثر غیرخطی فرارفت، چسبندگی ادی و تنش کف خطی لحاظ شده است. در محاسبات از عمق اصلی حوضه استفاده شده است و مدل به صورت فشارگرا در نظر گرفته شده است. اعتبار مدل با نتایج مدل رود و کوپر سنجیده می‌شود. شرایط مرزی به کار رفته در این مدل با استناد به کار رود و کوپر به صورت شرط گرادیان در نظر گرفته شده است.

مدل با سه نوع تنش باد مختلف و برای زمان‌های متفاوت اجرا می‌شود و نتایج به دست آمده برای تغییرات سطح تراز آب و جریانات به صورت نمودارهای خطوط هم‌مقدار و برداری نمایش داده می‌شوند.

نتایج این محاسبه توسط یک برنامه رابط، که در طی همین تحقیق طراحی شده است، به نرم افزار ArcGIS انتقال داده می‌شود تا بتوان آنها را در قالب یک نقشهٔ GIS به نمایش در آورد. این برنامه امکان یک ارتباط متقابل را به کاربر می‌دهد. نمایش اطلاعات حاصل از اجرای مدل، در نرم افزار ArcGIS باعث می‌شود که بتوان از قابلیت‌های این نرم افزار برای جستجو و تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری سریع‌تر و بهتر بهره برد.

کلید واژه‌ها: مَد توفان، دریای عمان، مدل‌سازی، شبکه آرکاوای C، GIS

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: آشنایی با پدیدهٔ مد توفان

۱-۱- عوامل موثر در تغییر تراز آب دریا ۱

۱-۱-۱- جزرومدها ۲

۱-۱-۲- امواج بلند ناشی از باد ۲

۱-۱-۳- پدیده‌های ناگهانی ۳

۱-۲- پدیده مد توفان ۴

۱-۳- اهمیت بررسی مد توفان ۸

۱-۴- روش‌های پیش‌بینی مد توفان ۹

۱-۵- مطالعه چند مدل نوشته شده برای مد توفان ۱۰

۱-۶- مشخصات دریای عمان ۱۲

فصل دوم: معادلات حاکم و روش انتخاب شده برای محاسبات

۲-۱- معادلات حاکم ۱۴

۲-۲- روش محاسبه ۱۹

۲-۲-۱- روش‌های عددی ۲۰

۲-۲-۲- شبکه بندی ۲۱

۲-۲-۳- گسسته‌سازی معادلات ۲۵

۲-۲-۴- تبدیل گسسته‌سازی به‌صورت نیمه ضمنی ۳۲

۲-۲-۵- پایداری مدل ۳۲

۲-۲-۶- شرایط مرزی ۳۷

۲-۲-۷- شرایط اولیه ۳۸

۲-۲-۸- دسته بندی مدل‌های اقیانوسی ۳۹

فصل سوم: سیستم اطلاعات جغرافیایی و نمایش نتایج

۳-۱- معرفی سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS ۴۰

۳-۱-۱- عملکرد GIS ۴۱

۳-۱-۲- انواع داده‌ها در GIS ۴۲

عنوان | صفحه

۳-۱-۳- منابع اطلاعات جغرافیائی ۴۴
۳-۱-۴- مولفه‌های GIS ۴۴
۳-۱-۵- اهداف کلی GIS ۴۵
۳-۱-۶- کاربرد GIS در اقیانوس و اقیانوس شناسی ۴۶
۳-۱-۷- نرم افزار مورد استفاده ۴۷

فصل چهارم: جمع آوری داده‌ها و تهیه برنامه محاسباتی

۴-۱- آماده سازی نقشه مسطح از حوزه ۴۹
۴-۲- جمع آوری و آماده‌سازی داده‌های توپوگرافی بستر دریای عمان ۵۰
۴-۳- درون‌یابی داده‌های عمق ۵۱
۴-۴- تهیه برنامه محاسباتی ۵۲

فصل پنجم: اعتبار سنجی

۵-۱- نحوه آزمایش مدل ۵۵
۵-۲- نتایج آزمایش مدل ۶۲
۵-۲-۱- باد غربی ۶۳
۵-۲-۲- باد زنگی شکل ۶۴
۵-۲-۳- توفان متحرک ۶۵

فصل ششم: نتایج اجرای مدل روی حوضهٔ عمان

۶-۱- نحوهٔ انجام محاسبات و نتایج ۶۹
۶-۱-۱- باد یکنواخت غربی ۷۱
۶-۱-۲- باد منطقه‌ای ۸۲
۶-۱-۳- توفان متحرک ۸۷
۶-۲- اجرای مدل نوشته شده در ArcGIS ۹۳
۶-۲-۱ ارتباط موتور اجرای Matlab در محیط ArcGIS و ایجاد یک نوار ابزار ۹۳
۶-۲-۲- نمایش داده‌ها در ArcMap ۹۴
۶-۳- جمع بندی ۱۰۱
۶-۴- پیشنهادات ۱۰۳

عنوان صفحه

منابع و مآخذ..... ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ تصویر و نمایه‌ای از امواج دریا و دورآ ۳
شکل ۱-۲ امواج مد توفان ۴
شکل ۱-۳ موقعیت دریای عمان ۱۳
شکل ۲-۱ مدل آب کم عمق ۱۶
شکل ۲-۲ شبکه A ۲۲
شکل ۲-۳ شبکه B ۲۲
شکل ۲-۴ شبکه C ۲۲
شکل ۲-۵ شبکه D ۲۳
شکل ۲-۶ پنج روش از توزیع متغیرها در فضا ۲۳
شکل ۲-۷ طرح‌واره شبکه استفاده شده ۲۹
شکل ۲-۸ حداکثر و حداقل طول موج برای جمله‌های سری فوریه ۳۳
شکل ۲-۹ دسته بندی مدل‌های اقیانوسی ۳۹
شکل ۳-۱ نموداری از یک سیستم جغرافیایی ۴۲
شکل ۴-۱ شبکه بندی نقشه منطقه مورد مطالعه ۵۰
شکل ۴-۲ توپوگرافی بستر دریای عمان ۵۲
شکل ۴-۳ انطباق نقاط مرزی بر نقاط شبکه ۵۳
شکل ۵-۱ شبکه C روی حوزهٔ فرضی رود و کوپر ۵۶
شکل ۵-۲ الگوهای رود و کوپر برای تراز آب ۵۷
شکل ۵-۳ الگوهای رود و کوپر برای تراز آب در حوضه فرضی ۵۸
شکل ۵-۴ توفان متحرکِ شبیه‌سازی شده توسط رود و کوپر ۵۹
شکل ۵-۵ الگوهای رود و کوپر برای تراز آب در حوضه فرضی برای توفان متحرک ۶۱
شکل ۵-۶ شبکه‌بندی کارتزین برای آزمایش مدل ۶۲
شکل ۵-۷ باد غربی که با نزدیک شدن به مرز بالا از شدت آن کاسته می‌شود ۶۳
شکل ۵-۸ سطح تراز آب بعد از ۹۶ ساعت ۶۳
شکل ۵-۹ نمایش برداری تنش باد زنگوله‌ای شکل ۶۴
شکل ۵-۱۰ سطح تراز آب پس از ۴۸ ساعت وزش باد زنگوله‌ای شکل ۶۴
شکل ۵-۱۱ توفان پس از ۴۲ ساعت از شروع به وزیدن ۶۵

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۱۲ سطح تراز آب در اثر وزش توفان ۶۵
شکل ۵-۱۳ توفان پس از ۴۸ ساعت وزش..... ۶۶
شکل ۵-۱۴ سطح تراز آب دریا پس از ۴۸ ساعت..... ۶۶
شکل ۵-۱۵ توفان پس از ۶۰ ساعت ۶۷
شکل ۵-۱۶ سطح تراز آب در اثر توفان پس از ۶۰ ساعت..... ۶۷
شکل ۶-۱ تنش باد منطقه‌ای..... ۷۰
شکل ۶-۲ بردارهای سرعت برای باد یکنواخت غربی بعد از ۴۸ ساعت (عمق ثابت)..... ۷۱
شکل ۶-۳ خطوط جریان برای باد یکنواخت غربی بعد از ۴۸ ساعت (عمق ثابت)..... ۷۱
شکل ۶-۴ خطوط هم‌تراز سطح برای باد یکنواخت غربی بعد از ۴۸ ساعت (عمق ثابت) ۷۲
شکل ۶-۵ بردارهای سرعت برای باد یکنواخت غربی بعد از ۹۶ ساعت (عمق ثابت)..... ۷۲
شکل ۶-۶ خطوط جریان برای باد یکنواخت غربی بعد از ۹۶ ساعت (عمق ثابت)..... ۷۳
شکل ۶-۷ خطوط هم‌تراز سطح برای باد یکنواخت غربی بعد از ۹۶ ساعت (عمق ثابت)..... ۷۳
شکل۶-۸ خطوط هم‌تراز سطح برای باد یکنواخت غربی بعد از ۱۲۰ ساعت (عمق ثابت)..... ۷۴
شکل ۶-۹ بردارهای سرعت برای باد یکنواخت غربی بعد از ۴۸ ساعت..... ۷۴
شکل ۶-۱۰ خطوط جریان برای باد یکنواخت غربی بعد از ۴۸ ساعت..... ۷۵
شکل ۶-۱۱ خطوط هم‌تراز سطح برای باد یکنواخت غربی بعد از ۴۸ ساعت ۷۵
شکل ۶-۱۲ بردارهای سرعت برای باد یکنواخت غربی بعد از ۹۶ ساعت..... ۷۶
شکل ۶-۱۳ خطوط جریان برای باد یکنواخت غربی بعد از ۹۶ ساعت..... ۷۶
شکل ۶-۱۴ خطوط هم‌تراز سطح برای باد یکنواخت غربی بعد از ۹۶ ساعت..... ۷۷
شکل ۶-۱۵ خطوط هم‌تراز سطح برای باد یکنواخت غربی بعد از ۱۲۰ ساعت..... ۷۷
شکل ۶-۱۶ خطوط هم‌تراز سرعت افقی بعد از ۹۶ ساعت..... ۷۸
شکل ۶-۱۷ خطوط هم‌تراز سرعت افقی بعد از ۱۲۰ ساعت..... ۷۹
شکل ۶-۱۷ بردارهای سرعت برای باد منطقه‌ای بعد از ۴۸ ساعت (عمق ثابت)..... ۸۲
شکل ۶-۱۸ خطوط جریان برای باد منطقه‌ای بعد از ۴۸ ساعت (عمق ثابت)..... ۸۲
شکل ۶-۱۹ خطوط هم‌تراز سطح برای باد منطقه‌ای بعد از ۴۸ ساعت (عمق ثابت) ۸۳
شکل ۶-۲۰ بردارهای سرعت برای باد منطقه‌ای بعد از ۴۸ ساعت ۸۳
شکل ۶-۲۱ خطوط جریان برای باد منطقه‌ای بعد از ۴۸ ساعت..... ۸۴

عنوان | صفحه

شکل ۶-۲۲ خطوط هم‌تراز سطح برای باد منطقه‌ای بعد از ۴۸ ساعت ۸۴
شکل ۶-۲۳ خطوط هم‌تراز سرعت افقی بعد از ۴۸ ساعت ۸۵
شکل ۶-۲۴ خطوط هم‌تراز سرعت عمودی بعد از ۴۸ ساعت ۸۵
شکل ۶-۲۵ بردارهای تنش باد در یک چرخند بعد از ۴۲ ساعت از شروع توفان ۸۷
شکل ۶-۲۶ بردارهای سرعت برای توفان متحرک بعد از ۴۲ ساعت (عمق ثابت) ۸۷
شکل ۶-۲۷ خطوط جریان برای توفان متحرک بعد از ۴۲ ساعت (عمق ثابت) ۸۸
شکل ۶-۲۸ خطوط هم‌تراز سطح برای توفان متحرک بعد از ۴۲ ساعت (عمق ثابت) ۸۸
شکل ۶-۲۹ بردارهای سرعت برای توفان متحرک بعد از ۴۲ ساعت ۸۹
شکل ۶-۳۰ خطوط جریان برای توفان متحرک بعد از ۴۲ ساعت ۸۹
شکل ۶-۳۱ خطوط هم‌تراز سطح برای توفان متحرک بعد از ۴۲ ساعت ۹۰
شکل ۶-۳۲ بردارهای سرعت برای توفان متحرک بعد از ۴۸ ساعت ۹۰
شکل ۶-۳۳ خطوط جریان برای توفان متحرک بعد از ۴۸ ساعت ۹۱
شکل ۶-۳۴ خطوط هم‌تراز سطح برای توفان متحرک بعد از ۴۸ ساعت ۹۱
شکل ۶-۳۵ نمایشی از نوار ابزار تهیه شده ۹۳
شکل ۶-۳۶ نقشه حوضه در ArcMap ۹۵
شکل ۶-۳۷ نمایی از فهرست لایه‌های موجود ۹۵
شکل ۶-۳۸ ابزار Identify ۹۶
شکل ۶-۳۹ نمایش عمق به صورت یک عارضه نقطه‌ای ۹۷
شکل ۶-۴۰ نمایش عمق به صورت خطوط هم مقدار ۹۷
شکل ۶-۴۱ نقشه رستری (DEM) از عمق ۹۸
شکل ۶-۴۲ شکل DEM برای تغییر سطح دریا بعد از ۱۲۰ ساعت وزش باد غربی روی حوضه ۹۸
شکل ۶-۴۳ خطوط هم مقدار سطح آب بعد ۱۲۰ ساعت باد غربی ۹۹
شکل ۶-۴۴ نمایش DEM برای سطح تراز آب بعد از اجرای برنامه با باد منطقه‌ای در ۴۸ ساعت ۹۹
شکل ۶-۴۵ نمایش خطوط هم‌مقدار سطح تراز آب بعد از اجرای برنامه با باد منطقه‌ای در ۴۸ ساعت ۱۰۰
شکل ۶-۴۶ نمایش خطوط هم‌مقدار و DEM برای سطح تراز آب برای توفان متحرک در ۴۸ ساعت ۱۰۰

فصل اول

آشنایی با پدیدهٔ مد توفان

۱-۱- عوامل موثر در تغییر تراز آب دریا

تراز آب در محیط‌های مختلف آبی، مانند اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها، خلیج‌ها، خورها، رودخانه‌ها، مناطق دور از ساحل و یا نزدیک به ساحل، به دلیل رخداد پدیده‌های مختلف به طور دائمی در حال تغییر است. این پدیده‌ها که اغلب ماهیت موجی دارند، تحت تأثیر عوامل گوناگون، متشکل از یک یا چند نیروی مولد (که منشأ نجومی، هواشناسی و زمین شناسی دارند)، یک یا چند نیروی تداوم بخش (مانند کشش سطحی، گرانی و کوریولیس)، یک یا چند نیروی بازدارنده (مانند اصطکاک کف، جانبی و درونی) و شرایط جغرافیایی حوضه (شامل شکل ساحل، توپوگرافی بستر و موقعیت جغرافیایی) شکل می‌گیرند.

در مطالعات تغییرات پایدار تراز آب، تغییرات تراز ناشی از امواج بلند (دارای طول موج بزرگ و دوره طولانی)، مانند امواج جزرومدی[1]، سونامی‌ها[2]، مد توفان‌ها[3] و امواجِ بلندِ ناشی از باد که دارای دوره و ارتفاع بیشتری هستند، مورد توجه قرار دارند و از تغییرات ناشی از امواج کوتاه صرف‌نظر می‌شود.

---

[1] Tidal waves
[2] Tsunami
[3] Storm surges

شکل و توپوگرافی بستر حوضه، نقش عمده‌ای را در شکل‌گیری پدیده‌های خاصِ ساحلی و تشدید تغییرات تراز آب در کنار ساحل، حوضه‌های باریک و یا تقریباً بسته مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و خلیج‌ها ایفا می‌کنند.

گاهی رخداد هم‌زمانِ چند پدیده موجب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در تراز آب می‌شود که این تغییرات را در مناطق آبی کم‌عمق و باریک نمی‌توان خطی در نظر گرفت.

با توجه به توضیحات فوق پدیده‌های مهمی که موجب تغییرات پایدار تراز آب می‌شوند را می‌توان به شرح زیر دسته بندی کرد:

۱-۱-۱- جزرومدها

الف) جزرومد هواشناسی: تراز آب در هر محل تحت تأثیر بلند مدتِ (اقلیمی) پارامترهای مختلف هواشناسی، ارتفاعِ میانگین ماهانه یا فصلیِ مثبت یا منفی نسبت به MSL[1] (سطح میانگین دریا)، که معمولاً آن را به عنوان سطح صفر ترازسنجی درنظر می‌گیرند، قرار دارد. این تغییر دارای دورهٔ سالانه است.

ب) جزر و مد نجومی: این تغییر در اثر نیروی گرانش ماه و خورشید ایجاد می‌شود و دارای مؤلفه‌های نوسانی زیادی است که مهمترین آنها مؤلفه نیم‌روزانهٔ قمری است. تغییرات جزرومدی از نوع امواج گرانیِ واداشته با طول موج بسیار بلند هستند که در نزدیکی سواحل معمولاً به صورت امواج کلوین[2] در می‌آیند. در حال حاضر پیش بینی این تغییرات به‌طور محلی به روش‌های مختلف و با دقت خوبی قابل انجام است.

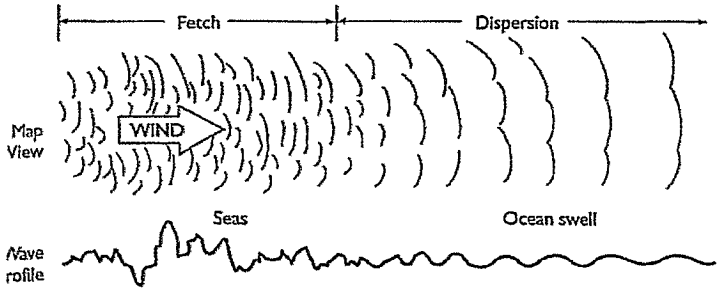
۱-۱-۲- امواج بلند ناشی از باد

این امواج به دو صورت دریا[3] و دورآ[4] وجود دارند و در هر دو حالت عامل اصلیِ به‌وجود آورندهٔ آنها باد و عامل تداوم بخش آنها گرانش است [King, 1968]. امواج در شکل دریا رشد پیدا می‌کنند و طول موج و ارتفاعشان زیاد می‌شود. اصولاً در محیط آب هر چه انرژی دریافتی توسط موج بیشتر شود، هر سه عاملِ طول موج، سرعت و ارتفاع موج افزایش می‌یابند. اما این افزایش تابع میدان باد، مدت وزش باد، سرعت باد و حالت

---

[1] Mean Sea Level
[2] Kelvin waves
[3] Sea
[4] Swell

اولیه دریا است و تا جایی ادامه می‌یابد که حالت تعادلی بین انرژی دریافتی و از دست رفته توسط موج برقرار شود. اما امواج در شکل دورآ، به دلیل خارج شدن از میدان باد و نداشتن منبع تغذیه و در نتیجهٔ تحلیل رفتن انرژی در حین انتشار دچار کاهش ارتفاع می‌شوند.



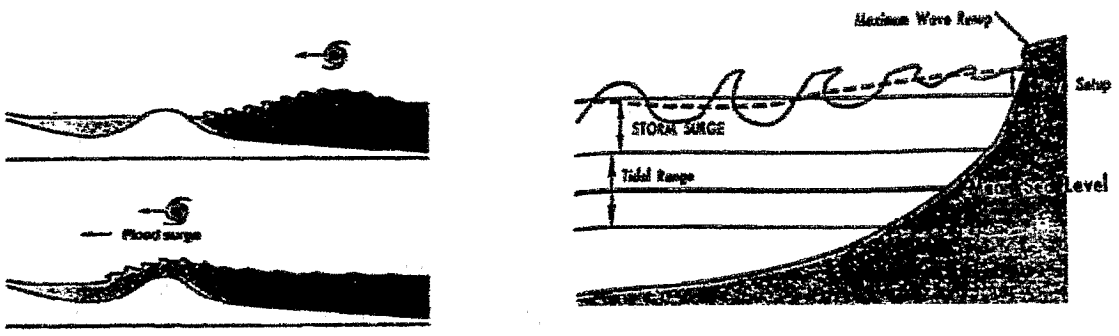
شکل ۱-۱ تصویر و نمایه‌ای از امواج دریا و دورآ

امواج درونی نیز در مرز بین دو لایه با چگالی متفاوت، توسط باد و عوامل ترمودینامیکی شکل می‌گیرند که سرعت کمتر و معمولاً ارتفاع کمتری نیز نسبت به امواج گرانیِ سطحی دارند.

۱-۱-۳- پدیده‌های ناگهانی

تغییرات تراز آب می‌تواند به واسطه برخی پدیده‌های غیرمنتظره و ناگهانی نیز رخ دهد. این تغییرات در خیلی از موارد باعث بروز سیل، صدمه دیدن تأسیسات بندری یا صنعتی کنار ساحل، از بین رفتن زمین‌های کشاورزی و از دست رفتن جان انسان‌ها می‌شود. آگاهی از این تغییرات علاوه بر کاهش خسارات جانی و مالی، در ساخت و ساز تأسیسات دریایی نیز نقش مهمی دارد. این پدیده ها عبارتند از :

الف) مد توفان: این تغییر در اثر تنش باد و کاهش فشار جو به هنگام گذر توفان از سطح آب بوجود می‌آید. خیزاب توفان تک موج بسیار بلندی است که با خود توفان حرکت کرده و به هنگام نزدیک شدن به ساحل، و تحت تأثیر قرار گرفتن توسط عوارض و پدیده‌های ساحلی، تشدید می‌شود و تغییرات شدیدی را در تراز آب به‌وجود می‌آورد.



شکل ۱-۲ امواج مد توفان

ب) خیزاب لرزه‌ای: این تغییر در اثر رخداد زمین لرزه در کف دریا و تنش ناشی از آن ایجاد می‌شود. این تنش موج بلندی تحت عنوان سونامی ایجاد می‌کند که با نزدیک شدن به ساحل، تحت تأثیر عوارض و پدیده‌های ساحلی قرار گرفته و تغییرات قابل ملاحظه‌ای را در تراز آب ایجاد می‌کند.

ج) تبخیر، بارش، سرمایش و گرمایش ناگهانی: این عوامل از طریق واگرایی باعث تغییر تراز آب به صورت مثبت یا منفی می‌شوند. اثر این عوامل در کانال‌ها و رودخانه‌ها بارزتر است و غالباً موجب طغیان آب در این حوضه‌ها و بروز سیل در سواحل می‌شوند.

۱-۲- پدیده مد توفان

وقتی یک جبهه هوای کم‌فشار از روی سطح دریا می‌گذرد، تغییر معینی در تراز دریا پدید می‌آید. این تغییر عمدتا به وسیله مکش آب دریا ناشی از افت فشار روی سطح دریا و نیز توسط جریان قوی آب دریا در جهت پایین دست باد حاصل می‌شود. چنین صعودی در تراز آب دریا همراه با پیشروی جبهه هوای کم‌فشار، نوعی امواج پیش‌روندهٔ واداشته را در ناحیه محصور نشده دریا به وجود می‌آورد. این مکش مستقل از عمق است ولی صعود تراز آب دریا بالای سطح ایستایی، که در اثر جریان به وجود آمده، به طور معکوس با عمق آب متناسب است. به همین دلیل ارتفاع مد توفان در آب کم عمق بیشتر است. به این ترتیب عوامل تولید مد توفان تغییرات فشار جو و بادهای همراه با اغتشاش جوی هستند [چگینی، ۱۳۷۷]. قسمت اصلی خیزاب توسط بردار حرکت چرخند در اقیانوس منتشر می‌شود که می‌توان آن را به صورت یک تک موج[1] در نظر گرفت.

[1] Solitary wave

چند تعریف از منابع مختلف برای پدیدهٔ مد توفان:

اثر باد و فشار جو بر روی سطح دریا به هنگام یک توفان منفرد است [Welander, 1961].

نشان دهنده عکس العمل اقیانوس در برابر اثرات بزرگ مقیاس باد و فشار جو است. این پدیده در مناطق ساحلی موجب افزایش ناگهانی تراز دریا نسبت به تراز جزرومدی پیش بینی شده در نظر گرفته می‌شود که توسط توفان‌های قوی به سمت ساحل ایجاد می‌شود (مد یا خیزاب در دریاهای باز نیز اتفاق می‌افتد). به این ترتیب، امواج کوتاه ناشی از باد و امواج دورآ با دوره چند ثانیه خود به خود حذف می‌شوند [Vreugdenhil, 1994].

مد توفان به افزایش در تراز آب توسط یک توفان شدید اطلاق می‌شود [چگینی، ۱۳۷۷].

این پدیده اغلب به صورت اختلاف بین تراز آب دیده بانی شده و تراز آب در همان زمان و محل در غیاب توفان تعریف شده است. این اختلاف می‌تواند هم مثبت و هم منفی باشد [Nihoul, 1979].

در مجموع مد توفان تک موج بلندی است که در اثر تنش باد و تغییر فشار جو به هنگام گذر یک توفان از سطح آب ایجاد می‌شود. دورهٔ امواج مد توفان در حد چند روز و طول موج‌های آن از ده تا صد کیلومتر است. افزایش تراز آب را، که در اثر بادهای وزنده از سوی دریا به ساحل و کاهش فشار جو ایجاد می‌شود، خیزاب مثبت و کاهش تراز آب را که در اثر بادهای وزنده از سوی ساحل به دریا و افزایش فشار جو ایجاد می‌شود را خیزاب منفی می‌گویند.

مد توفان در هر دو حالتِ مثبت و منفی اثرات نامطلوب و گاهی مخرب را به دنبال دارد. این مدها موجب حرکت رسوبات دریا و تغییر شکل سواحل می‌شوند. خیزاب مثبت موجب هجوم آب به ساحل می‌شود و معمولاً کلمه مد توفان نیز به معنی خیزاب مثبت در نظر گرفته می‌شود.

موج مد توفان با خود توفان حرکت کرده و به ساحل می‌رسد و چون آثار آن در کنار ساحل بارز می‌شود، آن را یک پدیده ساحلی به شمار می‌آورند. بر خلاف امواج بلند مشابه مانند جزرومد و سونامی، مد توفان در مناطق آبی کوچک مانند خلیج‌ها، رودخانه‌ها و مناطق بسته مانند دریاچه‌ها نیز شکل می‌گیرد و خصوصیاتِ خیزاب ایجاد شده و عوارض ناشی از آن در هر محل به شدت تابع مشخصات محلی حوضه آبی و سواحل اطراف آن می‌باشد.

مد توفان در سه مرحله رخ می‌دهد [Nahid، 2006]:

۱- ظهور امواج اولیه[1]: افزایش تدریجی تراز دریا قبل از ورود توفان و وقوع خیزاب اصلی که به علت ورود امواج پیش قراولی که ناشی از باد منطقه نبوده و عمدتاً دورآ یا انتقال غیرخطی امواج بلند هستند، رخ می‌دهد.

۲- رخداد مد توفان[2]: افزایش ناگهانی و شدیدِ تراز دریا که با ورود توفان به منطقه و هجوم آب به ساحل ایجاد می‌شود.

۳- ظهور خیزاب‌های کوچک‌تر[3]: کاهش تدریجی تراز دریا پس از عبور توفان و وقوع خیزاب‌های اصلی که همراه با ایجاد شدن امواج بلندی با دوره‌ای کمتر از خود خیزاب اصلی است. این خیزاب‌های کوچک‌تر، که به علت ادامه نوسانات تراز دریا رخ می‌دهند، مانع از برگشت سریع دریا به حالت عادی هستند.

به عنوان مثال در یک توفان سیکلونی، انتقال اکمن موجب چرخش و واگرایی آب در سطح دریا می‌شود. این امر ابتدا باعث کاهش تراز آب شده و سپس برای جبران این کاهش، آبِ اعماق همگرا شده و تراز آب بالا می‌آید. در نتیجه این عمل، چرخش سیکلونی به تدریج تا عمق آب نفوذ می‌کند و تراز آب نیز همچنان افزایش می‌یابد، تا اینکه موج ایجاد شده تبدیل به موج خیزاب می‌شود.

در ضمنِ تشکیل موج خیزاب، انتشار یا انتقال غیرخطی امواج تولید شده به خارج از میدان باد، آنها را به امواج دورآ تبدیل می‌کند. این امواج در ضمن انتشار در آبِ عمیق دچار پاشندگی شده و بر اساس طول موج از یکدیگر جدا می شوند. ورود تدریجی امواج بلندتر به ساحل، که در نتیجه رشد امواج در موجگاه[4] و نزدیک شدن توفان به ساحل صورت می‌گیرد، موجب افزایش تدریجی تراز دریا قبل از ورود خیزاب شده و این مرحلهٔ اولیه است [Nahid, 2006].

همراه شدن دیگر پدیده های موج بلند مانند پدیده کشند با پدیده خیزاب نیز در تغییرات تراز حاصله اثر می‌گذارد و مخصوصاً هنگامی که این دو پدیده به صورت هم فاز عمل می‌کنند، موجب افزایش شدید تراز آب می‌شوند. ناهمواری سطح دریا که به واسطهٔ وجود امواج (دورآ، جزرومدی و ...) پدید می آید، باعث افزایش اصطکاک کف و ایجاد تغییرات غیرخطی تراز دریا می‌شود.

با نزدیک شدن میدان باد به ساحل، تغییرات تراز، ناشی از عبور موج خیزاب، به واسطه ظاهر شدن پدیده‌های ساحلی تشدید می‌گردند، مانند پدیده کاهش عمق[5] که موجب افزایش ارتفاع خیزاب می شود. وجود

---

[1] Forerunner
[2] Storm surge
[3] resurgence
[4] Fetch
[5] Shoaling

عوارض ساحلی مانند پیشروی خشکی در آب یا خلیج‌ها که موجب همگرایی یا واگرایی انرژی موج خیزاب می‌شوند و خیزاب ناشی از موج[۱] و بالا روی موج[۲] که در نتیجه شکست امواج کوتاه‌تر رخ می‌دهند و باعث انتقال انرژی، اندازه حرکت و حجم قابل ملاحظه آب به ساحل می شوند، می‌توانند از خیزابی که در آب عمیق و بدون باد قوی تشکیل شده و سپس به آب کم عمق کشیده شده است، خیزاب بزرگی بسازند.

اوج خیزاب توفان همواره نسبت به اوج توفان تأخیر زمانی دارد ولی این تأخیر در آب‌های کم‌عمق کمتر است. با رسیدن توفان به ساحل و سپس ورود موجِ خیرآب، افزایش تیز و ناگهانی در تراز آب رخ می‌دهد و این مرحله برکشند یا مَد توفان[۳] است.

پس از عبور توفان، در اثر دامنه نوسانات تراز دریا به علت عبور موج خیزاب، خیزاب‌هایی کوچکتر از خیزاب اصلی تولید می‌شوند که می‌توانند به اندازه خیزاب اصلی خطرناک باشند. این خیزاب‌ها مانع از برگشت سریع تراز دریا به حالت عادی می‌شوند و این مرحله خیزاب‌های کوچک‌تر[۴] است.

تخمین مسیر توفان به منظور تعیین محل ورود موج خیزاب به ساحل اهمیت دارد. توفان‌ها بر اساس مسیرشان به سه دسته تقسیم می‌شوند : توفانی که مسیر آن قائم بر ساحل باشد[۵] یا در طول ساحل حرکت کند[۶] و یا در نزدیکی ساحل تغییر مسیر دهد[۷].

عوامل مؤثر در خصوصیات مد توفان:

۱- مشخصه‌های توفان:

الف) سرعت، جهت، مدت و میدان وزش باد

ب) گرادیان فشار سیستم

ج) مسیر و سرعت حرکت سیستم توفان و فاصله آن تا ساحل

۲- حالت دریا:

الف) وضعیت جزرومدی

---

[1] Wave set up
[2] Wave run up
[3] Storm surge
[4] resurgences
[5] Landfall
[6] along shore
[7] recurving

ب) وجود امواج

ج) وجود عوامل واگرایی

۳- مشخصات حوضه:

الف) ابعاد، بسته، نیمه بسته یا باز بودن حوضه

ب) توپوگرافی بستر حوضه

ج) ارتفاع و شکل سواحل اطراف حوضه و عوارض ساحلی

بنابراین با توجه به تأثیر این عوامل بر خیزاب ایجاد شده، بسیاری از محققین مد توفان را به مفهوم تغییرات تراز آب به صورت مجموعی از این عوامل، به هنگام توفان، در نظر می‌گیرند و سعی می‌کنند برای تخمین هر چه دقیق‌تر تراز آب به هنگام توفان، این عوامل را تا حد ممکن در مدل‌های پیش بینی خود بگنجانند.

۱-۳- اهمیت بررسی مد توفان

توصیف و بررسی مد توفان بسیار مهم است چرا که این پدیده می‌تواند موجب خسارات زیادی به اقتصاد کشورهای ساحلی شود و همچنین این پدیده باعث مرگ انسان‌ها و تخریب ساختمان‌ها در مناطق ساحلی شود. به عنوان نمونه در سال ۱۹۹۱ در برمه در اثر بروز توفان‌های محلی شدید، اراضی وسیعی در ناحیه ساحلی این کشور زیر آب رفت و آمار کشته شدگان این حادثه تا ۱۳۸ هزار نفر گزارش شده است. این در حالی است که میلیون‌ها نفر بی‌خانمان شدند و زمین‌های کشاورزی بسیاری از بین رفتند.

از سوی دیگر، بهره گیری از سیستم‌های هشدار دهنده، با توجه به نبود اطلاعات زمان واقعی[1] از پارامترهای هواشناسی و همچنین عملکرد سریع پدیده به لحاظ زمانی چندان امکان پذیر نیست. با این وجود می‌توان با استفاده از ابزارهای موجود جهت تحلیل پدیده مد توفان و تخمین میزان خطر در مناطق ساحلی جهت آماده سازی و طراحی اقدامات پیشگیرانه، از میزان خطرات و خسارات احتمالی کاست.

[1] Real Time