

آنالیز خطر آب گرفتگی سواحل بندر انزلی با توجه به احتمال توأم عوامل مؤثر

محمد الفته^۱، مهدی شفیعی فر^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

shafiee@modares.ac.ir

چکیده- جمعیت‌هایی که در نزدیکی خط ساحلی متمرکز هستند در برخی نواحی در معرض مخاطره‌هایی از طرف دریا مانند سیل ناحیه ساحلی قرار دارند. برای مقابله و برنامه‌ریزی در جهت کاهش خسارات، شناخت سازوکار و شدت این مخاطرات اهمیت دارد. از این نظر، آنالیز خطر آب گرفتگی ناحیه ساحلی از قدم‌های ابتدایی برای آمادگی در مقابل مخاطره مورد نظر است. آنالیز خطر آب گرفتگی ناحیه ساحلی با توجه به نوع ترکیب عوامل مؤثر به دو روش کلی آنالیز احتمال توأم و حالت غیر توأم قابل انجام است. در روش آنالیز احتمال توأم وابستگی بین عوامل مؤثر در نظر گرفته می‌شود. آنالیز خطر آب گرفتگی ناحیه مطالعه (شهر انزلی) در این تحقیق به هر دو روش انجام شده است. ناحیه مورد مطالعه دارای دو ویژگی می‌باشد که یکی عدم وجود جزر و مد و دیگری تغییرات در تراز متوسط آب دریای خزر می‌باشد. تغییرات تراز آب به سه بخش کوتاه مدت (مدتوفان)، میان مدت (فصلی) و طولانی مدت تقسیم شده و آنالیز احتمال توأم بین دو عامل مدتوفان و موج انجام شده است. برای این منظور از توابع مفصل استفاده شده است. این توابع، تابع توزیع احتمال توأم را با توجه به توابع حاشیه‌ای ارائه می‌کنند. از چهار توزیع Lognormal، Gumbel، Weibull و GEV به عنوان توزیع‌های حاشیه‌ای استفاده شده است. برازش به روش حداکثر بزرگ‌نمایی انجام شده و بهترین مدل با استفاده از معیار حداقل جذر میانگین مجذور خطا انتخاب شده و مقادیر تراز سطح آب و ارتفاع موج با دوره بازگشت ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰ سال محاسبه شده است. همچنین نمودارهای احتمال رخداد توأم موج و مدتوفان با دوره بازگشت‌های اشاره شده ارائه شده است. این مقادیر برای پریدهای متفاوت موج و ترکیب‌های مختلف موج و مدتوفان به روش ضرایب طیفی به ساحل منتقل شده‌اند. با محاسبه دو عامل خیزآب و بالاروی موج، با توجه به نقشه‌های هیدروگرافی و توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه، نقشه آب گرفتگی برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال ارائه شده است.

کلید واژگان: آنالیز خطر، آب گرفتگی، ساحل، خزر، انزلی.

۱- مقدمه

مناطق ساحلی معمولاً نسبت به مناطق دور از ساحل در جهان تراکم جمعیتی بالاتری دارند. جمعیت‌های ناحیه ساحلی که در نزدیکی خط ساحلی متمرکز هستند، در برخی مناطق در معرض خطرهایی مانند سیل ناحیه ساحلی و سونامی می‌باشند. این خطرها هر ساله در جهان خسارات اقتصادی، محیط زیستی و به ویژه انسانی ایجاد می‌کنند. شهرهای ساحلی در ایران نیز هر از چند گاهی دچار مخاطراتی شده‌اند که از آن جمله می‌توان به طوفان گنو اشاره کرد. این طوفان در تاریخ ۱۶/۳/۸۶ در جنوب و جنوب شرقی ایران رخ داد و خسارات بسیاری را در پی داشت. تغییرات کوتاه مدت تراز آب دریای خزر نیز در بسیاری از مناطق ساحلی این دریا مشکل‌ساز بوده است (زون ای، ۱۳۸۰). برای مثال می‌توان به طوفان ۱۳ نوامبر ۱۹۹۳ اشاره کرد که در طی آن نیروگاه نکا به دلیل بالا آمدگی بی‌سابقه آب دچار مشکل شد. در این تاریخ ایستگاه اندازه‌گیری سطح آب در بندر انزلی ۵۵ سانتی‌متر مدطوفان را نشان داده است (بابائی، ۱۳۷۶).

برنامه‌ریزی و اعمال روش‌های حفاظتی در مقابل هر خطری، نیازمند شناخت کافی از ماهیت و شدت خطر موردنظر می‌باشد. با توجه به این که مخاطرات پدیده‌هایی فیزیکی هستند، شدت آنها دارای ماهیتی تصادفی است. بنابراین برای بیان آن از مفهوم آمار و احتمال استفاده می‌شود. آنالیز خطر، روشی برای محاسبه شدت مخاطرات و بیان آن با استفاده از مفهوم احتمال و یا دوره بازگشت است. برای حفاظت در برابر هر نوع مخاطره طبیعی، آنالیز خطر از جمله قدم‌های ابتدایی برای شناخت آن مخاطره و شدت آن می‌باشد. از این‌رو آنالیز خطر آب گرفتگی نواحی ساحلی نیز از جمله قدم‌های اولیه و لازم برای حفاظت سواحل از این مخاطره طبیعی است. در آنالیز خطر، ترکیب عوامل به دو روش آنالیز تک متغیره و آنالیز احتمال توأم قابل انجام می‌باشد. در روش آنالیز تک متغیره، در صورت تعدد عوامل مؤثر وابسته، می‌توان از

وابستگی و اندرکنش عوامل صرف نظر کرد و نتایج را به صورت مستقیم جمع کرد. در آنالیز خطر آب گرفتگی ساحلی در این روش، معمولاً تنها عامل تراز سطح آب در نظر گرفته می‌شود (Haug and Xu, 2008)، (Rodriguez et al., 1999). در روش آنالیز احتمال توأم، وابستگی رخداد دو یا چند عامل مؤثر و اندرکنش بین عوامل را می‌توان در نظر گرفت. برای مثال Li and Song (2006) با استفاده از یک مدل نسل سوم موج و یک مدل سه بعدی جریان برای محاسبه تراز سطح آب و ترکیب این دو مدل، اقدام به شبیه‌سازی طوفان‌ها به مدت ۵۰ سال در منطقه هنگ‌کنگ نموده‌اند. سپس با استفاده از نتایج، آنالیز احتمال توأم دو عامل موج و تراز آب انجام شده است.

هرچند تحقیقات اندکی در سطح بین‌المللی در رابطه با بررسی توأم عوامل مؤثر در آب‌گرفتگی سواحل انجام شده است، ولی با توجه به متغیرها و پارامترهای متعدد مربوط به مناطق مختلف، لازم است تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود. تا جایی که نویسندگان مقاله حاضر بررسی نموده‌اند، تحقیق در زمینه آنالیز آب‌گرفتگی در سواحل کشور با روش احتمال توأم تاکنون انجام نشده است.

در تحقیق حاضر آنالیز خطر آب گرفتگی شهر انزلی به روش آنالیز احتمال توأم انجام شده است. برای این منظور داده‌های تغییرات تراز آب دریای خزر به سه مود تغییرات کوتاه مدت (مد طوفان)، میان مدت (فصلی) و طولانی مدت تقسیم شده است. عامل موج نیز به عنوان یکی از عوامل مؤثر در نظر گرفته شده است. به کمک روش آنالیز احتمال توأم، مقادیر احتمال توأم دو عامل موج و مدطوفان محاسبه شده و با انتقال به ساحل نقشه آب گرفتگی ناحیه مورد مطالعه رسم گردیده است.

۲- آب گرفتگی ناحیه ساحلی

آب گرفتگی ناحیه ساحلی یا همان سیل ناحیه ساحلی در اثر بالا آمدن تراز آب دریا و در نتیجه، زیر آب رفتن

هنگام وقوع مدطوفان با افزایش تراز آب سرعت آن افزایش یافته و اختلاف فازی با حالت طبیعی ایجاد خواهد شد. مدطوفان به صورت غیر خطی با این جزر و مد تغییر فاز یافته ترکیب شده و تراز نهایی حاصل خواهد شد (Wolf, 2009).

تأثیر متقابل امواج از یک طرف و مدطوفان و جزر و مد از طرف دیگر، به دو گروه قابل تقسیم است: ۱) اثر موج بر مدطوفان و ۲) اثر مدطوفان و جزر و مد بر موج. تأثیر موج بر مدطوفان شامل تغییر در پروفیل سطح آب و تنش‌های سطحی و تغییر در تنش بستر است. ایجاد مدطوفان متأثر از اندرکنش بین باد و تراز سطح آب است. این اندرکنش یا همان تنش وارد بر سطح آب از طرف باد تابعی از سرعت باد و زبری سطح آب است که به صورت ضریبی تجربی اعمال می‌شود. اغتشاشات سطح آب ناشی از امواج در تعیین این ضریب مؤثر می‌باشند (Geernaeri et al., 1986). از طرف دیگر، با توجه به این که امواج مدطوفان جزو امواج با طول موج طولانی هستند، تنش بستر در انتشار آن تأثیرگذار است. این تنش خود به وسیله اغتشاشات ناشی از امواج در لایه مرزی بستر تغییر می‌کند. این مسأله توسط Christoffersen and Jonsson, (1985) بررسی شده است. البته این اندرکنش در مناطقی مؤثر است که عمق آب به اندازه کافی کم باشد. از دیگر موارد تأثیر امواج بر مدطوفان می‌توان به تأثیر جریان ناشی از حرکت امواج اشاره کرد. این جریان وابسته به جهت آن باعث تغییر سرعت نسبی ذرات آب نسبت به باد و در نتیجه تغییر در تنش وارد از طرف باد بر سطح آب می‌شود.

تأثیر دو عامل مدطوفان و جزر و مد بر امواج در سه بخش تولید، انتشار و استهلاك امواج قابل بررسی است. این تغییرات به وسیله دو عامل تغییر در تراز آب و جریان ناشی از این دو عامل اعمال می‌شوند. همان طور که اشاره شد، وجود جریان باعث تغییر در اندرکنش بین باد و سطح آب می‌شود. این تغییر بر هردو عامل مدطوفان و موج تأثیرگذار است. همچنین وجود این جریان در انتشار

نواحی ساحلی رخ می‌دهد. بنابراین همه عواملی که در تغییرات تراز آب در ناحیه ساحلی نقش دارند، از عوامل مؤثر در آب‌گرفتگی ناحیه ساحلی محسوب می‌شوند. عوامل مؤثر در تغییر تراز آب و در نتیجه آب‌گرفتگی ناحیه ساحلی را می‌توان به صورت زیر نام برد (Williams, 1986):

- الف) مدطوفان^۱
- ب) جزر و مد نجومی
- ج) نوسانات عمومی
- د) سونامی^۲
- ه) اثرات اقلیمی
- و) امواج Seich
- ز) خیز آب موج^۳
- ح) بالاروی موج
- ط) عامل فرسایش

آب‌گرفتگی ناحیه ساحلی معمولاً حاصل اندرکنش بین عوامل مؤثر است که ممکن است در برخی نواحی عوامل دیگری مانند بارش باران، جریان رودخانه ای و غیره نیز مؤثر باشند. باتوجه به این که سه عامل موج، مدطوفان و جزر و مد نجومی از مهم‌ترین و عمومی‌ترین عوامل آب‌گرفتگی ساحلی هستند، وابستگی و اندرکنش بین این عوامل به صورت خلاصه بررسی می‌شوند.

وابستگی بین دو عامل موج و مدطوفان دارای دو منشاء می‌باشد. وابستگی اولیه بین این دو عامل به دلیل شرایط آب و هوایی است که باعث ایجاد مقادیر حداکثر این عوامل می‌شود. توضیح این که امواج شدید و مدطوفان، هردو متأثر از یک شرایط آب و هوایی طوفانی می‌باشند. بنابراین انتظار می‌رود که حداکثر این دو عامل به صورت هم‌زمان رخ دهند. منشاء دیگر وابستگی بین عوامل، تأثیر اندرکنش بین عوامل است که در ادامه به صورت خلاصه بررسی می‌شود.

تأثیر متقابل بین دو عامل جزر و مد و مدطوفان شامل تغییر فاز جزر و مدی به دلیل تغییر تراز آب و اندرکنش غیرخطی بین این دو عامل می‌باشد. سرعت حرکت موج جزر و مدی با جذر عمق آب رابطه مستقیم دارد. بنابراین

1. Storm Surge
2. Tsunami
- 3 Wave Set-up

در روش استفاده از توزیع‌های چند متغیره، آنالیز احتمال توأم بر اساس برآزش تابع احتمال چند بعدی به داده‌ها و انتخاب بهترین برآزش می‌باشد. در این حالت داده‌ها باید دارای یک نوع توزیع و همان توزیع دو جمله‌ای باشند. برای مثال در صورت استفاده از توزیع دو جمله‌ای نرمال، هر دو داده باید دارای توزیع نرمال باشند.

روش توزیع مجموع در مواردی قابل استفاده است که توزیع مربوط به مجموع دو توزیع مختلف مورد نظر است. برای مثال در محاسبه تراز سطح آب که شامل مجموع دو عامل مدطوفان و جزر و مد نجومی باشد، می‌توان از این روش استفاده کرد. اگر دو متغیر تصادفی X و Y مستقل باشند و $Z=X+Y$ ، توزیع احتمال متغیر Z با توجه به توزیع متغیرهای X و Y ، $f_X(x)$ و $f_Y(y)$ برابر $f_X * f_Y$ (کانولوشن) می‌باشد (Aas, et al., 2009). در محاسبه این رابطه فرض استقلال دو متغیر از هم در نظر گرفته شده است که استفاده از آن را محدود می‌سازد.

روش جدیدتر و با محدودیت کمتری که می‌توان در آنالیز احتمال توأم استفاده کرد، استفاده از توابع مفصل می‌باشد. در این روش تابعی به نام تابع مفصل تعریف می‌شود که این تابع ارتباطی بین توابع توزیع احتمال حاشیه‌ای و تابع توزیع احتمال توأم برقرار می‌کند. این روش محدودیت ذکر شده برای توابع توزیع احتمال چند جمله‌ای را ندارد و توابع توزیع حاشیه‌ای می‌توانند از هر نوعی باشند. توابع مفصل برای اولین بار توسط Sklar (1959) در قضیه مربوط به تابعی که توزیع‌های یک متغیره را به توزیع چند متغیره آنها پیوند می‌دهد، مطرح شده است. به صورت کلی، تابع مفصل C تابعی است که با رابطه زیر توزیع‌های حاشیه‌ای را به توزیع‌های دو جمله‌ای مرتبط می‌سازد (Aas, et al., 2009):

$$H(x_1, x_2) = C(u_1, u_2) = C(F(x_1), F(x_2)) \quad (1)$$

$$C(0, u_2) = C(u_1, 0) = 0 \quad (2)$$

$$C(u_1, 1) = u_1, \quad C(1, u_2) = u_2 \quad (3)$$

در این روابط $H(x_1, x_2)$ تابع چگالی احتمال توأم و $F(x_i)$

امواج تأثیرگذار می‌باشد. تأثیر جریان بر انتشار امواج (پدیده Doppler) شامل تغییر فرکانس، طول موج و جهت انتشار موج می‌باشد. همچنین پدیده‌های خزش، انکسار و شکست موج تابعی از عمق آب می‌باشند. بنابراین تغییر تراز سطح آب ناشی از مدطوفان و جزر و مد نجومی در انتشار امواج مؤثر خواهد بود. در مورد استهلاك امواج، تنش بستر و شکست موج دو عامل استهلاك هستند. تنش بستر تحت تأثیر جریان می‌باشد. همچنین شکست موج، همان طور که اشاره شد، تابعی از عمق آب است (Wolf, 2008).

برای در نظر گرفتن اندرکنش‌های ذکر شده و نزدیکی بیشتر به واقعیت، در اختیار داشتن داده‌های ترکیب عوامل مورد نظر لازم است. روش آنالیز احتمال توأم، این ترکیب‌ها را با دوره بازگشت مشخص با توجه به تاریخچه رخدادهای ارائه می‌کند.

۳- آنالیز خطر و مباحث آماری

آنالیز خطر یک مخاطره، محاسبه احتمال رخ دادن آن پدیده در یک بازه زمانی مشخص با توجه به داده‌ها می‌باشد. این داده‌ها ممکن است تاریخچه رخدادهای آن پدیده باشند و یا به وسیله مدل‌سازی و با استفاده از داده‌های عوامل مؤثر در آن پدیده حاصل شوند. باتوجه به اینکه پدیده‌های تصادفی توزیعی نزدیک به توزیع‌های شناخته شده دارند، برای محاسبه شدت رخداد پدیده‌ها در یک بازه زمانی مشخص، از توابع توزیع احتمال استفاده می‌شود. این توابع، با توجه به داده‌ها، رابطه‌ای بین شدت رخداد و احتمال رخداد برقرار می‌کنند. همان طور که اشاره شد، آنالیز خطر به صورت کلی به دو روش آنالیز تک متغیره و آنالیز احتمال چند متغیره قابل انجام است. در آنالیز احتمال چند متغیره می‌توان از روش‌هایی مانند مدل‌های احتمال چند متغیره، توزیع مجموع و یا توابع مفصل^۱ استفاده نمود.

1. Copula Function

۳۷°۲۸' عرض شمالی قرار دارد. ارتفاع شهر از سطح آب-های آزاد از ۲۶- متر تا ۲۱- متر می‌باشد و بلندترین نقطه آن نسبت به سطح آب دریای خزر در حال حاضر دارای تراز حدود +۵ متر می‌باشد. جمعیت شهر انزلی حدود ۱۲۰/۰۰۰ نفر می‌باشد که در مساحتی در حدود ۴۹/۳ کیلومتر مربع ساکن می‌باشند. طول ساحل این شهر در حدود ۱۷ کیلومتر است.

۴-۲- داده‌های موجود

داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه مورد مطالعه شامل داده‌های تراز آب و ارتفاع موج می‌باشند. همچنین نقشه‌های توپوگرافی و هیدروگرافی ناحیه مورد مطالعه نیز در دسترس می‌باشند. از داده‌های ثبت شده تراز سطح آب از سال ۱۹۴۱ تا سال ۲۰۰۳ میلادی (سه نوبت در روز) استفاده شده است. این داده‌ها نسبت به صفر بندر انزلی توسط سازمان بنادر و دریانوردی اندازه‌گیری شده است که برابر ۲۶/۳۷- متر از سطح متوسط آب آزاد می‌باشد. تعداد این داده‌ها به صورت کلی حدود ۶۸۵۰ رکورد می‌باشد.

داده‌های مربوط به امواج نیز توسط سازمان بنادر و دریانوردی از سال ۱۹۹۳ تا سال ۲۰۰۳ ثبت شده است. این داده‌ها توسط بویه‌ای واقع در مختصات ۴۹°۳۰' طول شرقی و ۳۷°۳۷' عرض شمالی و در عمق ۱۱۸ متری اندازه‌گیری شده‌اند. این داده‌ها چهار نوبت در روز ثبت شده و شامل ارتفاع مشخصه موج H_s ، پریود پیک موج T_p و متوسط جهت انتشار امواج در طول مدت ثبت داده می‌باشند.

نقشه‌های توپوگرافی و هیدروگرافی منطقه مورد مطالعه نیز در دسترس می‌باشند. این نقشه‌ها از طول جغرافیایی ۴۹°۲۲'۳۰" تا ۴۹°۳۰'۰۰" و عرض جغرافیایی ۳۷°۲۲'۳۰" تا ۳۷°۴۰'۳۰" را پوشش می‌دهند. ناحیه مورد مطالعه دارای طول حدود ۱۱۰۰۰ متر و عرض ۲۷۰۰۰ متر است.

توابع چگالی احتمال حاشیه‌ای می‌باشند. انواع متفاوتی از توابع مفصل موجود می‌باشند که در یک دسته‌بندی کلی به سه دسته توابع مفصل درجه دوم، توابع مفصل درجه سوم و توابع مفصل ارشمیدسی قابل تقسیم هستند. توابع مفصل ارشمیدسی شامل خانواده بزرگتری از توابع مفصل می‌باشند و در کاربردهای مهندسی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Joe, 1997).

انواع مختلف این خانواده از توابع مفصل عبارتند از تابع مفصل گامبل-هاگارد^۱، علی-میکائیل-حق^۲، کلایتون^۳، جو^۴. در این تحقیق از سه تابع مفصل گامبل، فرانک و کلایتون استفاده شده است (Joe, 1997).

۴- منطقه مورد مطالعه

۴-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهر انزلی می‌باشد. این شهر در استان گیلان و در سواحل جنوب غربی دریای خزر واقع است (شکل ۱).



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه (شهر انزلی)

این شهر در مختصات جغرافیایی ۴۹°۲۸' طول شرقی و

1. Gumbel-Hougaard
2. Ali-Mikhail-Haq
3. Clayton
4. Joe

۵- تحلیل نتایج

۵-۱- تحلیل اولیه داده‌های تراز سطح آب

با بررسی داده‌های ثبت شده تراز سطح آب، سه مود تغییرات را می‌توان در آن مشاهده کرد که شامل: (۱) تغییرات کوتاه مدت (۲) تغییرات فصلی و (۳) تغییرات طولانی مدت می‌باشند. تغییرات کوتاه مدت در چندین ایستگاه از جمله بندر انزلی در طول سال ۱۳۷۳ توسط بابائی (۱۳۷۶) مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق فوق، با مقایسه داده‌های هواشناسی با تغییرات کوتاه مدت تراز آب، به مواردی اشاره شده است که علی‌رغم عدم وجود هیچ‌گونه باد ثبت شده، نوساناتی در تراز آب ثبت شده است. از این‌رو نتیجه‌گیری شده است که این نوسانات علاوه بر طوفان و خیزآب ناشی از باد، می‌توانند دارای عوامل دیگری مانند تغییرات در فشار هوا، نزولات جوی محلی و غیره باشند. این نوسانات در تحقیق حاضر مدطوفان در نظر گرفته می‌شوند (معادل کلمه لاتین Surge). برای جداسازی مد طوفان‌های ثبت شده از کل داده‌ها، این نوسانات برابر اختلاف تراز سطح آب در هر لحظه نسبت به تراز آب متوسط ماهیانه در نظر گرفته شده است (شکل ۲). تراز آب متوسط ماهیانه برای هر نقطه به روشی محاسبه شده است که آن نقطه، روز شانزدهم از ماه باشد. یعنی از تراز آب در ۱۵ روز قبل و

بعد از نقطه موردنظر متوسط‌گیری شده است:

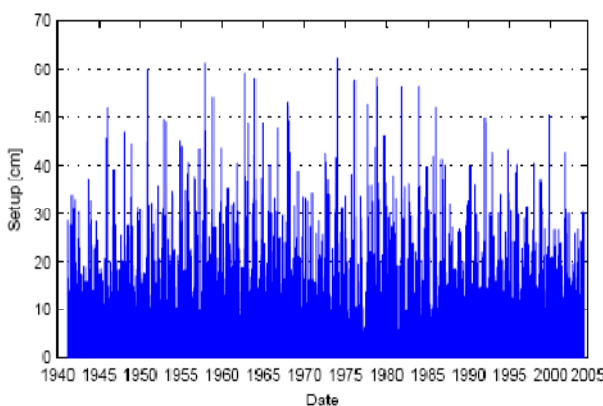
$$\bar{\eta}_S = \frac{1}{31} \sum_{i=-15}^{+15} \eta_i \quad (4)$$

$\bar{\eta}_S$ تراز متوسط ماهیانه و η_i تراز آب ثبت شده است. نوسانات به‌دست آمده شامل نوسانات مثبت و منفی می‌باشند که مقادیر مثبت آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود. پس از جداسازی نوسانات کوتاه مدت از داده‌ها، مقادیر حاصل بیانگر تغییرات متوسط ماهیانه تراز آب می‌باشد. این تغییرات دارای عواملی مانند تغییرات فصلی در تبخیر و آورد رودخانه‌ها می‌باشد. برای جداسازی این تغییرات از نوسانات متوسط سالیانه، مانند حالت قبل اقدام شده است. برای هر روز، متوسط سالیانه تراز آب محاسبه شده است. برای این منظور آن نقطه روز ۱۸۳ از سال فرض شده است و از ۱۸۲ روز قبل تا ۱۸۲ روز بعد از آن نقطه میانگین گرفته شده است:

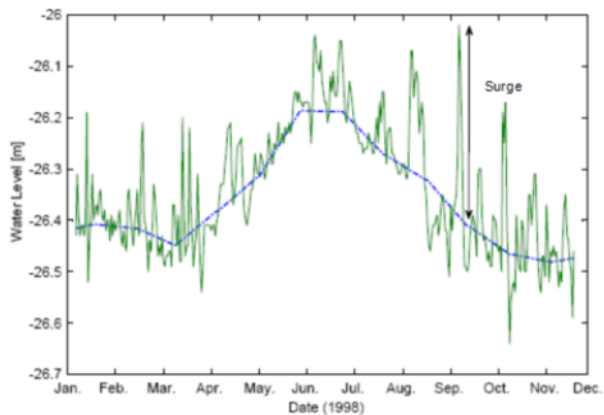
$$\bar{\eta}_y = \frac{1}{365} \sum_{i=-182}^{+182} \bar{\eta}_S \quad (5)$$

$\bar{\eta}_y$ تراز متوسط سالیانه می‌باشد.

شکل ۴ نشان دهنده نوسانات فصلی تراز آب دریای خزر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نوسانات دارای ماهیتی نسبتاً هارمونیک با مقدار متوسط صفر می‌باشند.



شکل ۳ مقدار نوسانات کوتاه مدت (مد طوفان)



شکل ۲ جداسازی نوسانات کوتاه مدت از میانگین فصلی

صورت هم زمان رخ می‌دهند که این وابستگی در همه حالات یکسان نیست. بنابراین یک وابستگی نسبی بین این دو عامل مشاهده می‌شود. در این تحقیق با در نظر گرفتن احتمال رخداد توأم این دو عامل، این وابستگی نسبی در نظر گرفته شده است.

۳-۵- آنالیز خطر و مباحث آماری

آنالیز خطر ناحیه مورد مطالعه شامل آنالیز عامل تغییرات فصلی تراز آب از یک طرف و آنالیز احتمال توأم دو عامل موج و مدطوفان می‌باشد.

آنالیز احتمال این دو عامل به روش آنالیز احتمال توأم و با استفاده از توابع مفصل انجام شده است. توابع مفصل، تابع احتمال توأم دو عامل مورد نظر را با توجه به توابع چگالی احتمال حاشیه‌ای آنها ارائه می‌کنند. بنابراین اولین قدم محاسبه مناسب ترین توزیع مربوط به هر متغیر است. سپس با استفاده از توابع مفصل توزیع احتمال توأم موج و مدطوفان محاسبه می‌شود.

۳-۵-۱- برازش

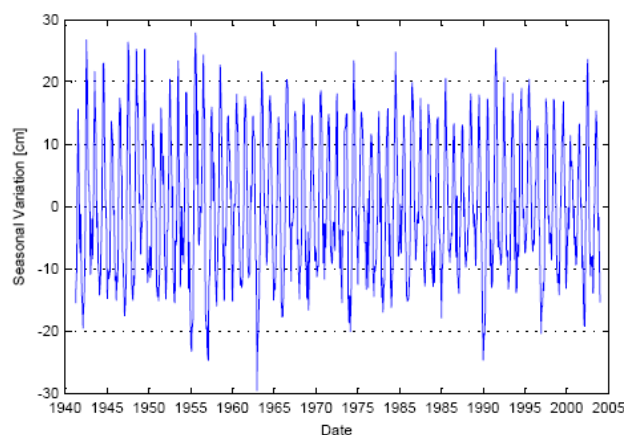
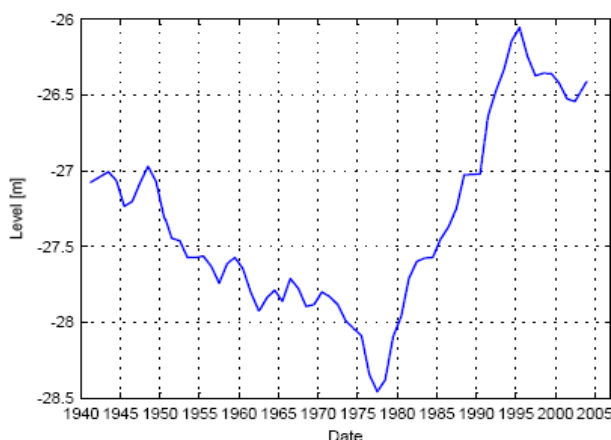
اولین قدم در آنالیز خطر و همچنین در روش تابع مفصل، برازش توابع توزیع احتمال حاشیه‌ای مربوط به هر متغیر می‌باشد.

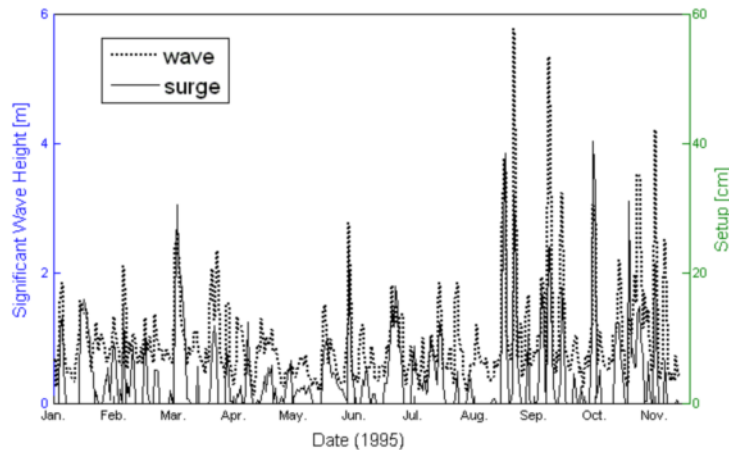
نتیجه حاصل از دو جداسازی بالا، تراز متوسط سالیانه دریای خزر می‌باشد که در شکل ۵ مشاهده می‌شود. این تغییرات دارای ماهیتی تصادفی، با توجه به تغییرات طولانی مدت عوامل مؤثر می‌باشند.

۲-۵- بررسی وابستگی بین عوامل مؤثر

همان طور که اشاره شد، عوامل مؤثر در افزایش تراز سطح آب ناحیه مورد مطالعه به دو قسمت تغییرات طولانی مدت تراز آب (شامل تغییرات سالیانه و فصلی) و تغییرات کوتاه مدت (مد طوفان و تغییرات ناشی از امواج) قابل تقسیم می‌باشند. عامل تغییرات طولانی مدت تعیین کننده تراز متوسط سطح آب در هنگام وقوع عوامل کوتاه مدت و در نتیجه آب گرفتگی ناحیه ساحلی است. دو عامل مد طوفان و موج، که همان عوامل کوتاه مدت هستند، باعث آب گرفتگی ناحیه ساحلی در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه می‌شوند که منظور از آب گرفتگی ناحیه ساحلی در این تحقیق می‌باشد. برای بررسی وابستگی بین رخداد این دو عامل، سری زمانی رخداد آنها برای یک بازه زمانی (سال ۱۹۹۵) بررسی می‌شود.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در بیشتر موارد در طول مدت اشاره شده، مقادیر حداکثر این دو عامل به





شکل ۶ سری زمانی وقوع دو عامل موج و مدطوفان

مستقل از دو عامل دیگر در نظر گرفته شود، از مقادیر حداکثر سالیانه کل این داده‌ها برای برازش استفاده شده است. همچنین داده‌های حداکثر سالیانه متوسط سالیانه تراز آب خزر برازش شده‌اند. برازش به روش حداکثر درست‌نمایی^۱ انجام شده است. روش حداکثر درست‌نمایی یکی از روش‌های تحلیلی برازش است و اساس آن محاسبه پارامترهای مدل به صورتی است که حداکثر درست‌نمایی برای داده‌های رخ داده حاصل شود. تابع درست‌نمایی برای محیط پیوسته به شکل رابطه (۶) نوشته می‌شود (Saltou, 1990).

$$L(a, b, \dots | x) = \prod_{i=1}^N f(x_i) \quad (6)$$

در این رابطه N تعداد رخدادها و $f(x)$ تابع توزیع احتمال مورد نظر است. با حداکثرسازی این تابع نسبت به پارامترهای آن یعنی a, b, \dots مقادیر این پارامترها حاصل خواهند شد. برای این منظور، از آنجا که تابع لگاریتم طبیعی تابعی صعودی است، برای سادگی و تبدیل شدن ضرب به جمع، اقدام به حداکثرسازی لگاریتم طبیعی تابع درست‌نمایی می‌شود:

$$LL(a, b, \dots | x) = \ln \left(\prod_{i=1}^N f(x_i) \right) = \sum_{i=1}^N \ln(f(x_i)) \quad (7)$$

در این تحقیق، با توجه به تحقیقات (Sobey 2005) چهار توزیع احتمال Gumbel, Weibull, Lognormal, و GEV به داده‌های مدطوفان، موج و تغییرات فصلی برازش شده است. همچنین توزیع Gumbel به مقادیر حداکثر سالیانه تراز آب برازش شده است. با توجه به این که توزیع مقادیر اکسترم متغیرها دارای اهمیت است، مدل‌ها به این مقادیر برازش می‌شوند (آنالیز مقدار حداکثر). در این حالت می‌توان داده‌های اکسترم را از بین بلوک‌هایی انتخاب کرد. برای مثال می‌توان از مقادیر حداکثر سالیانه استفاده نمود. در مورد دو عامل موج و مدطوفان با توجه به این که طول مدت ثبت داده‌های موج ۱۰ سال است، تنها می‌توان از ۱۰ سال از داده‌های مربوط به مدطوفان که در طول این مدت اندازه‌گیری شده است، استفاده کرد. با توجه به اینکه این مدت به اندازه کافی طولانی نیست، مقادیر حداکثر داده‌ها از بلوک‌های فصلی انتخاب شده‌اند. یعنی مدل‌های احتمالاتی به داده‌های مقادیر حداکثر مربوط به هر فصل برازش شده‌اند. در مورد داده‌های مدطوفان، با توجه به اینکه طول مدت ثبت داده‌ها ۶۰ سال است، یک بار نیز برازش به مقادیر حداکثر سالیانه کل داده‌ها انجام شده و نتایج مقایسه شده‌اند. با توجه به این که مقادیر حداکثر تغییرات فصلی تراز سطح آب می‌تواند

1. Maximum Likelihood Method (MLM)

سپس با توجه به رابطه (۱۰) مقدار RMSE محاسبه می‌شود:

$$MSE = E(x_c - x_0)^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i (x_c(i) - x_0(i))^2 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (10)$$

x_c مقدار محاسبه شده از مدل و x_0 مقدار مربوط به داده‌ها است.

مقدار احتمال رخداد داده ای خاص از سری داده‌ها از رابطه (۱۱) محاسبه شده است:

$$P = \frac{m}{N+1} \quad (11)$$

با مشتق‌گیری و محاسبه اکسترمم تابع فوق، پارامترهای مدل با حل دستگاه معادلات (۸) محاسبه خواهند شد:

$$\frac{\partial LL}{\partial a} = 0, \frac{\partial LL}{\partial b} = 0, \dots \Rightarrow a, b, \dots \quad (8)$$

نتایج برازش (پارامترهای محاسبه شده) در جدول ۱ ارائه شده است.

برای انتخاب بهترین برازش از روش جذر میانگین مجذور خطا استفاده شده است. در این روش احتمال رخداد داده‌ای خاص از سری داده‌ها محاسبه شده و با توجه به آن، مقدار مربوط به آن احتمال خاص از مدل محاسبه می‌شود.

جدول ۱ نتایج برازش‌ها

توزیع	PDF: f(x) CDF: F(x)	پارامترها				
		موج	مدتوفان ۱۰ سال داده	مدتوفان کل داده‌ها	تغییرات فصلی	تغییرات تراز متوسط سالیانه
GEV	$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[- \left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma} \right)^{-1-\frac{1}{\kappa}}$ $F(x) = \exp \left[- \left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]$	$\kappa = -0.026$ $\sigma = 0.915$ $\mu = 2.985$ $m = 3.49$ $s^2 = 1.29$	$\kappa = -0.011$ $\sigma = 6.73$ $\mu = 22.62$ $m = 26.43$ $s^2 = 72.56$	$\kappa = -0.252$ $\sigma = 9.216$ $\mu = 39.49$ $m = 26.43$ $s^2 = 72.56$	$\kappa = -0.033$ $\sigma = 3.363$ $\mu = 16.35$ $m = 18.18$ $s^2 = 17.12$	-
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(- \frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right)$ $F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp \left(- \frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) dx$	$\mu = 1.202$ $\sigma = 0.324$ $m = 3.51$ $s^2 = 1.36$	$\mu = 3.227$ $\sigma = 0.316$ $m = 26.49$ $s^2 = 73.71$	$\mu = 3.735$ $\sigma = 0.230$ $m = 26.49$ $s^2 = 73.71$	$\mu = 2.878$ $\sigma = 0.222$ $m = 18.22$ $s^2 = 1.358$	-
Weibull	$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a} \right)^{b-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{x}{a} \right)^b \right)$ $F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{a} \right)^b \right)$	$a = 3.904$ $b = 3.372$ $m = 3.51$ $s^2 = 1.32$	$a = 29.49$ $b = 3.28$ $m = 26.45$ $s^2 = 78.64$	$a = 46.88$ $b = 4.944$ $m = 26.45$ $s^2 = 78.64$	$a = 19.88$ $b = 4.682$ $m = 18.19$ $s^2 = 19.56$	-
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- \left(\frac{x-\beta}{\alpha} \right) - \exp \left(- \frac{x-\beta}{\alpha} \right) \right]$ $F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x-\beta}{\alpha} \right) \right]$	$\alpha = 0.906$ $\beta = 2.973$ $m = 3.50$ $s^2 = 1.35$	$\alpha = 8.523$ $\beta = 38.28$ $m = 26.42$ $s^2 = 74.98$	$\alpha = 5.514$ $\beta = 28.21$ $m = 26.42$ $s^2 = 74.98$	$\alpha = 3.323$ $\beta = 16.29$ $m = 18.2$ $s^2 = 18.16$	$\alpha = 0.496$ $\beta = 1.416$ $m = 1.70$ $s^2 = 0.405$
میانگین و واریانس محاسبه شده از داده‌ها		$m = 3.50$ $s^2 = 1.28$	$m = 26.47$ $s^2 = 73.08$	$m = 26.47$ $s^2 = 73.08$	$m = 18.21$ $s^2 = 16.80$	$m = 1.70$ $s^2 = 0.368$

آمده برای دوره بازگشت متفاوت بزرگتر است. این مسأله به دلیل رخ دادن مقادیر بزرگتری از مدطوفان در آن دوره زمانی نسبت به ۱۰ سال ۲۰۰۳-۱۹۹۳ می‌باشد. این اختلاف برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال ۱۸٪ است.

۵-۳-۲- آنالیز احتمال توأم

در این بخش، تابع توزیع احتمال توأم دو عامل موج و مدطوفان با استفاده از توابع مفصل و با استفاده از زوج داده های ثبت شده هم‌زمان این دو عامل محاسبه می‌شود. از سه نوع تابع مفصل از خانواده توابع مفصل ارشمیدسی استفاده شده است که عبارتند از: Gumbel، Clayton و Frank.

داده‌های زوج موج و مدطوفان، همان مقادیر حداکثرهای فصلی هستند که مقدار متغیر دیگر در آن لحظه به آن اضافه شده است. سپس با استفاده از تابع چگالی احتمال هر متغیر، $u_1 = F(x_1)$ و $u_2 = F(x_2)$ و محاسبه شده‌اند. توابع مفصل معرفی شده به روش حداکثر درست‌نمایی به این زوج داده‌ها برازش شده‌اند. جدول ۴ پارامتر محاسبه شده تابع مفصل را ارائه می‌کند.

در این رابطه m شماره داده مورد نظر در حالت داده‌های مرتب شده به صورت صعودی، N تعداد کل داده‌ها و P احتمال رخداد مقادیر بزرگتر از داده m ام می‌باشد. در جدول ۲ مقادیر جذر میانگین مجذور خطا برای توزیع‌های مختلف ارائه شده است.

با توجه به مقادیر RMSE در جدول ۲، بهترین مدل برازش شده به دو عامل موج و مدطوفان، مدل GEV و بهترین مدل برازش شده به داده‌های تغییرات فصلی تراز سطح آب مدل Weibull است. با توجه به مدل انتخاب شده، مقادیر موج، مدطوفان و تغییرات فصلی تراز آب با دوره بازگشت متفاوت محاسبه شده که در جدول ۳ مشاهده می‌شود. حداکثر ارتفاع موج ثبت شده ۵/۸ متر است.

همان طور که اشاره شد، داده‌های موج شامل ۱۰ سال اندازه‌گیری است و برای انجام آنالیز احتمال توأم، می‌توان از ۱۰ سال داده‌های مدطوفان استفاده کرد. به این دلیل برازش داده‌های مدطوفان در دو حالت ۱۰ سال و ۶۰ سال انجام شده است. در حالت ۶۰ سال که طول مدت اندازه‌گیری طولانی‌تر است، همان طور که مشاهده می‌شود دقت برازش بیشتر است و همچنین مقدار به‌دست

جدول ۲ مقادیر RMSE برای برازش‌های متفاوت

داده‌ها	RMSE			
	GEV	Lognormal	Weibull	Gumbel
مد طوفان برای کل مدت اندازه‌گیری	۱/۱۶	۱/۳۹	۱/۲۵	۱/۱۹
مد طوفان برای طول مدت ۱۰ سال	۱۰/۶	۱۰/۷۴	۱۰/۹۸	۱۱/۲۷
داده‌های موج	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۷

جدول ۳ مقادیر موج، مدطوفان و تغییرات فصلی تراز آب با دوره بازگشت ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰ سال

دوره بازگشت (سال)	مد طوفان با توجه به کل داده‌ها (cm)	مد طوفان با توجه به ۱۰ سال داده (cm)	موج (m)	تغییرات فصلی (cm)
۱۰۰	۶۵	۵۳	۷	۳۲
۵۰	۶۲	۴۸	۶/۴	۲۹
۲۰	۵۹	۴۲	۵/۶	۲۶

جدول ۴ پارامتر محاسبه شده توابع مفصل

	Frank	Gumbel	Clayton
پارامتر تابع مفصل θ	۳/۴۹۷۵	۱/۴۸۴۲	۰/۲۷۵۷

بازگشت‌های ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰ سال در شکل ۷ ارائه شده‌اند.

۵-۳-۳- ضریب همبستگی

برای کمی‌سازی میزان وابستگی بین دو متغیر تصادفی X_1 و X_2 از ضرایب متفاوتی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به ضریب τ کندال، ضریب همبستگی اسپیرمن و ضریب همبستگی جینی اشاره کرد (امیدی، ۱۳۸۶). ضریب دیگری که وابستگی بین دو متغیر تصادفی را به صورت ضریبی بین منفی یک و یک بیان می‌کند، پارامتر χ است که در این تحقیق استفاده شده است. این ضریب به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Heffernan, 2000):

$$\chi = \lim_{Z \rightarrow Z^*} \Pr(Y > z | X > z) \quad (16)$$

در این رابطه z حد بالای توزیع‌های احتمال حاشیه‌ای مرتبط می‌باشد. مفهوم این رابطه احتمال بزرگ‌تر بودن متغیر X از مقدار حدی z است، در حالی که متغیر Y از مقدار z بزرگتر باشد. این رابطه با تغییر متغیر Y و X به $F(y)$ و $F(x)$ (توابع چگالی احتمال) و در نتیجه تبدیل z^* به 1 (حد بالا) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\chi = \lim_{u \rightarrow 1} \Pr(U > u | V > u) \quad (17)$$

$$U = F(y), \quad V = F(x), \quad u = F(z) \quad (18)$$

در شکل ۸ مقدار این ضریب بر حسب پارامتر u ارائه شده است. پارامتر u مقداری است که چگالی احتمال هریک از عوامل باید از آن بزرگتر باشند. پارامتر χ برای مقادیر اکسترمم دو عامل موج و مدطوفان به سمت ۰/۴ میل می‌کند. این مقدار نشان دهنده وابستگی نسبی بین این دو عامل می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود برای کل داده‌ها این ضریب برابر ۰/۶۵ است.

۶- انتقال به آب کم عمق و رسم نقشه آب گرفتگی

نتایج آنالیزهای آماری انجام شده با توجه به نقشه‌های هیدروگرافی و توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه به آب کم عمق منتقل شده و سپس با محاسبه دو عامل خیزآب و بالاروی موج، نقشه‌های آب گرفتگی ناحیه رسم شده‌اند.

بهترین برازش به روش RMSE انتخاب شده است. برای این منظور احتمال توأم رخداد موج و مدطوفان از داده‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$H(x_{1i}, x_{2i}) = P(X_1 \leq x_{1i}, X_2 \leq x_{2i}) = \frac{\text{No.of}(x_{1j} \leq x_{1i}, \text{and } x_{2j} \leq x_{2i}) - 0.44}{n + 0.22} \quad (12)$$

در این رابطه n تعداد کل داده‌ها است. سپس مقدار زوج رخداد از معکوس تابع چگالی احتمال توأم محاسبه شده است. با توجه به دو بعدی بودن تابع مفصل مقادیر معکوس تابع چگالی احتمال توأم زوج‌های متفاوتی از مدطوفان و موج می‌باشند. برای محاسبه RMSE در حالت دوبعدی، زوجی انتخاب شده است که کوچکترین خطا را برای آن رویداد مورد نظر ایجاد کند. با توجه به این توضیحات، مقدار RMSE برای هر تابع محاسبه شده که در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۵ مقدار RMSE برای توابع مفصل مختلف

	Frank	Gumbel	Clayton
RMSE	۴/۵۰۲	۲/۴۹۶	۶/۴۴۷

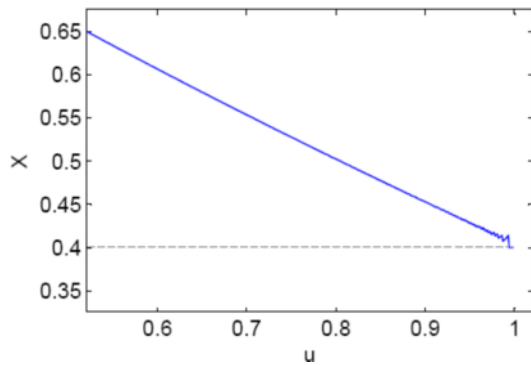
با توجه به مقادیر خطا در جدول ۵، تابع مفصل Gumbel بهترین برازش است. بنابراین تابع احتمال توأم دو عامل موج و مدطوفان به صورت زیر می‌باشد:

$$H(x_1, x_2) = \exp \left[- \left((-\ln u_1)^{1.4842} + (-\ln u_2)^{1.4842} \right)^{0.6738} \right] \quad (13)$$

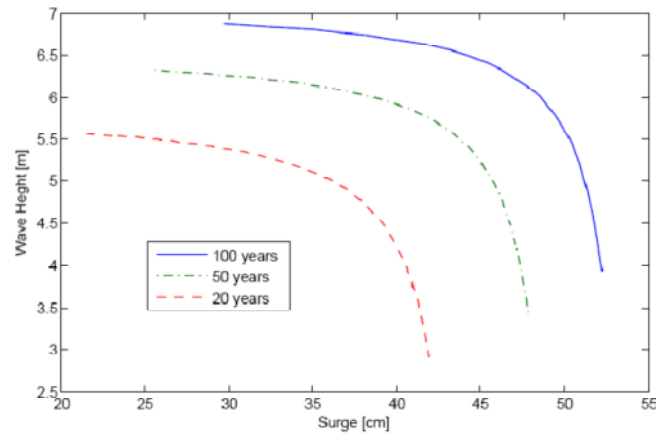
$$u_1 = F(x_1) = \exp \left[- \left(1 - 0.0107 \frac{(x_1 - 22.617)}{6.73} \right)^{\frac{1}{0.0107}} \right] \quad (14)$$

$$u_2 = F(x_2) = \exp \left[- \left(1 - 0.0261 \frac{(x_2 - 2.985)}{0.915} \right)^{\frac{1}{0.0261}} \right] \quad (15)$$

نتایج حاصل از آنالیز احتمال توأم دو عامل موج و مدطوفان به صورت نمودار ترکیب این دو عامل با دوره بازگشت مشخص می‌باشد. این نمودارها برای دوره



شکل ۸ مقدار پارامتر X برای مقادیر u



شکل ۷ نمودار احتمال توأم دو عامل موج و مدطوفان برای دوره بازگشت‌های ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰ سال

می‌شوند. در این تحقیق با توجه به شکل بستر، دو عامل خزش و انکسار موج در نظر گرفته شده است. از طیف جهتی موج استفاده شده است. طیف جهتی امواج، از حاصل ضرب طیف موج در تابع جهتی موج حاصل می‌شود:

$$S(f, \theta) = S(f) \cdot G(f, \theta) \quad (19)$$

جدول ۳ مشخصات امواج آب عمیق منتقل شده به ساحل

H_s [m]		T_p [sec]		Direction ^o
۷/۰۰	۹	۱۰	۱۱	۱۵-۴۰
۶/۹۰	۹	۱۰	۱۱	
۶/۴۰	۹	۱۰	۱۱	
۶/۳۰	۹	۱۰	۱۱	
۶/۱۰	۹	۱۰	۱۱	
۵/۶۰	۹	۱۰	۱۱	
۵/۵۵	۹	۱۰	۱۱	
۵/۵۰	۹	۱۰	۱۱	
۴/۷۰	۸	۹	۱۱	۲۰-۵۵
۴/۰۰	۸	۹	۱۱	
۳/۴۰	۶	۸	۱۰	۲۰-۳۲
۳/۰۰	۶	۸	۱۰	

مشخصات موج، شامل ارتفاع مشخصه موج (H_s)، پریود پیک موج (T_p) و متوسط جهت انتشار موج برای بازه‌های اندازه‌گیری می‌باشند. ارتفاع مشخصه موج با توجه به تحلیل‌های آماری مشخص است. از نمودارهای احتمال توأم دو عامل مدطوفان و ارتفاع موج، سه نقطه برای انتقال به آب کم عمق انتخاب شده‌اند. پریود موج و جهت انتشار موج مربوط به هر ارتفاع موج از داده‌های ثبت شده استخراج شده‌اند. برای مثال برای موج با ارتفاع ۵ تا ۶ متر، کوچک‌ترین پریود ثبت شده ۹/۲۵ و بزرگ‌ترین آن ۱۰/۲۵ ثانیه می‌باشند. بنابراین امواج در این محدوده ارتفاعی، با پریود ۹، ۱۰ و ۱۱ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. در مورد جهت انتشار امواج نیز روش مشابه اتخاذ شده است. برای مثال امواج در همین محدوده ارتفاع، دارای جهت انتشار بین ۱۷/۶۱ تا ۳۸/۴۱ درجه نسبت به شمال می‌باشند. بنابراین این محدوده امواج در جهت‌های ۱۵-۴۰ درجه به ساحل منتقل شده است. مشخصات امواج آب عمیق منتقل شده در جدول ۴ ارائه شده است.

انتقال امواج به آب کم عمق به روش ضرایب طیفی انجام شده است (Goda, 1985). در این روش ضرایب مربوط به عوامل مؤثر در ارتفاع موج شامل ضریب خزش، انکسار و یا تفرق موج با توجه به طیف موج محاسبه

در این رابطه f_p فرکانس پیک است که از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود:

$$f_p = \frac{1}{1.05T_{1/3}} \quad (24)$$

S_{max} تابعی از سرعت باد تولید کننده موج است. این ضریب برای کاربردهای مهندسی برای آب عمیق به صورت زیر می‌باشد (Goda, 1985):

- i) Wind Wave: $S_{max}=10$
- ii) Swell with short decay distance (with relatively large wave steepness) $S_{max}=25$
- iii) Swell with long decay distance (with relatively small wave steepness) $S_{max}=75$

مقدار این ضریب در این تحقیق برای آب عمیق برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است (فرض می‌شود امواج دوراً می‌باشند). مقدار این ضریب با کاهش عمق آب افزایش پیدا می‌کند. شکل ۹ ارتباط این ضریب با عمق آب را نشان می‌دهد.

در شکل ۹ L_0 ارتفاع موج آب عمیق و α_0 جهت انتشار موج می‌باشند. همان طور که اشاره شد دو عامل خزش و انکسار در انتقال موج به آب کم عمق در نظر گرفته شده است.

در این رابطه $S(f, \theta)$ طیف جهتی موج، $S(f)$ طیف موج و $G(f, \theta)$ تابع جهتی می‌باشند. از طیف موج JONSWAP در این تحقیق استفاده شده است (Goda, 1985):

$$S(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \dots \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]$$

$$\alpha = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (20)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f \geq f_p \end{cases}$$

$$\gamma = 3.3$$

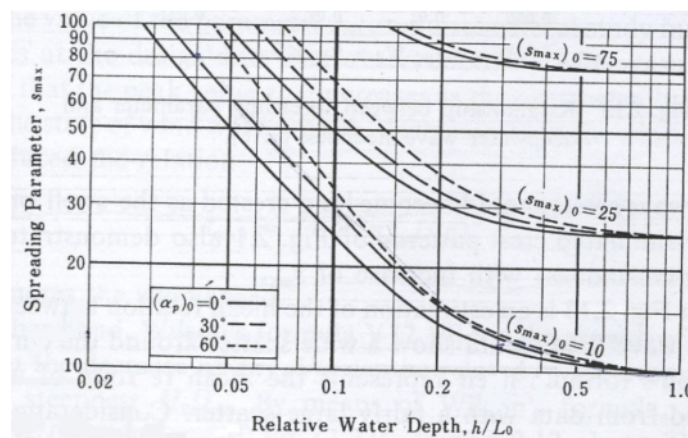
در این رابطه H ارتفاع موج، f فرکانس موج، f_p فرکانس پیک موج و T_p پریود پیک موج می‌باشند. همچنین از طیف جهتی Mitsuyasu استفاده شده است که به صورت زیر می‌باشد (Goda, 1985):

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (21)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (22)$$

در این روابط θ جهت انتشار موج و S ضریبی وابسته به فرکانس موج می‌باشد. این ضریب توسط Goda and Suzuki (1985) به صورت زیر تعریف شده است:

$$S = \begin{cases} S_{max} \cdot (f/f_p)^5 & f \leq f_p \\ S_{max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & f \geq f_p \end{cases} \quad (23)$$



شکل ۹ تغییرات S_{max} با توجه به عمق (Goda, 1985)

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \theta) \quad (31)$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H'_o / L_o)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)\} \quad (32)$$

در این روابط θ شیب بستر، H'_o ارتفاع موج آب عمیق، K_r ضریب انکسار و $H_{1/3}$ ارتفاع مشخصه موج است. بستر از آب عمیق تا ساحل به ۹۱ بخش تقسیم شده است و برای هر عمق با استفاده از روابط بالا ارتفاع مشخصه موج با توجه به شرایط آب عمیق و بستر محاسبه شده است. همان طور که اشاره شد خیزآب و بالاروی موج دو عامل مؤثر در آب گرفتگی ناحیه ساحلی است که در ناحیه مورد مطالعه بررسی شده است. خیزآب موج با توجه به تنش تششی از رابطه زیر محاسبه شده است (CEM, 2006):

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho g d} \frac{dS_{xx}}{dx} \quad (33)$$

که در آن $\bar{\eta}$ تراز متوسط آب و S_{xx} مؤلفه عمود بر ساحل تنش تششی است.

با تبدیل dx به Δx و محاسبه مشخصات موج برای هر عمق، مقدار $d\eta$ و در نتیجه مقدار η قابل محاسبه می‌باشد. برای امواج نامنظم طبق Goda (1985) از \bar{H} به جای H استفاده شده است.

بالاروی موج در این تحقیق با توجه به پارامتر ممان موج محاسبه شده است (Hughes, 2004). پارامتر ممان موج از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$M_F(x, t) = \int_{-h}^{\eta(x)} (P_d + \rho u^2) dz \quad (34)$$

که در آن P_d فشار دینامیکی موج در عمق Z ، ρ جرم مخصوص آب و u سرعت افقی ذرات آب در عمق Z است. رابطه بین پارامتر ممان موج و مقدار بالاروی موج به شکل رابطه (۳۵) است.

$$\frac{R}{h} = CF(\alpha) \left[\frac{M_F}{\rho g h^2} \right]^{0.5} \quad (35)$$

در رابطه فوق C ضریب ثابت و $F(\alpha)$ تابعی از شیب ساحل یا سازه است. برای امواج نامنظم این ضرایب برای $R_{12\%}$ برابرند با:

مقدار ضرایب خزش و انکسار موج برای امواج نامنظم با توجه به طیف جهتی موج توسط Goda (1985) به صورت رابطه (۲۵) ارائه شده است:

$$(K_r)_{eff} = (K_s)_{eff} = \quad (25)$$

$$\left[\frac{1}{m_{so}} \int_0^{\theta_{\max}} \int_{\theta_{\min}}^{\infty} S(f, \theta) \cdot K_s^2(f) \cdot K_r^2(f, \theta) \cdot d\theta \cdot df \right]^{1/2}$$

در این روابط K_s و K_r ضرایب خزش و انکسار موج در حالت امواج منظم می‌باشند. در این تحقیق این ضرایب از روابط موج خطی محاسبه شده است. مقدار ضریب m_{so} برای هر یک از ضرایب از روابط زیر محاسبه می‌شود (Goda, 1985):

برای محاسبه ضریب انکسار:

$$m_{so} = \int_0^{\theta_{\max}} \int_{\theta_{\min}}^{\infty} S(f, \theta) \cdot K_s^2(f) \cdot d\theta \cdot df \quad (26)$$

برای محاسبه ضریب خزش:

$$m_{so} = \int_0^{\theta_{\max}} \int_{\theta_{\min}}^{\infty} S(f, \theta) \cdot K_r^2(f, \theta) \cdot d\theta \cdot df \quad (27)$$

ارتفاع امواج با توجه به روابط اشاره شده در هر عمق قابل محاسبه می‌باشد. برای در نظر گرفتن پدیده شکست مربوط به امواج نامنظم روش تحلیلی مورد استفاده در این تحقیق روش معرفی شده در Goda (1985) می‌باشد. در این روش مقدار ارتفاع موج در ناحیه شکست به صورت ضریبی از ارتفاع موج معادل آب عمیق، طول موج آب عمیق و شیب بستر به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$H_{1/3} = K_s H'_o \quad : h/L_o \geq 0.2$$

$$H_{1/3} =$$

$$\min\{\beta_o \cdot H'_o + \beta_1 \cdot h, \beta_{\max} \cdot H'_o, 1.8 K_s \cdot H'_o\} : h/L_o < 0.2 \quad (28)$$

در این روابط h عمق آب و L_o طول موج آب عمیق است. H'_o ارتفاع موج معادل آب عمیق است که برای هر عمق از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Goda, 1985):

$$H'_o = K_r \cdot (H_{1/3})_o, \quad T_{1/3} = (T_{1/3})_o \quad (29)$$

ضرایب β_o ، β_1 و β_{\max} از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\beta_o = 0.028(H'_o / L_o)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta) \quad (30)$$

پدیده شکست تابعی از عمق آب می‌باشد و بنابراین مقدار بالاروی امواج مشابه می‌باشد.

با محاسبه مقادیر خیزآب و بالاروی موج، مقدار تراز آب نهایی از مجموع این دو عامل و تراز آب مربوط به هر دوره بازگشت محاسبه می‌شود. در مورد آنالیز احتمال توأم که سه نقطه از نمودار برداشت شد، حداکثر تراز آب مربوط به حداکثر آن سه مورد می‌باشد. نتایج محاسبه شده در جداول ۶ تا ۹ مشاهده می‌شوند. همچنین تراز نهایی نسبت به تراز -۲۶ متر که تراز پایه آب در نقشه‌های توپوگرافی است ارائه شده است.

For $1/4 < \tan(\alpha) < 1$ and $H_{mo}/L_p < 0.0225$:
 $C = 1.75$
 $F(\alpha) = 1 - \exp(-1.3 \cot(\alpha))$ (۳۶)

For $1/30 < \tan(\alpha) < 2/3$ and $H_{mo}/L_p > 0.0225$:
 $C = 4.4$
 $F(\alpha) = \tan 0.7(\alpha)$ (۳۷)

به صورت کلی ۳۸ ترکیب شرایط آب عمیق به ساحل منتقل شده است. جدول ۵ نتایج مربوط به ارتفاع خیزآب موج و بالاروی موج را برای هر حالت ارائه می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر بالاروی موج برای مقادیر مختلف ارتفاع موج آب عمیق مشابه و یا بسیار نزدیک است. این شباهت به دلیل محدود شدن ارتفاع موج با توجه به عمق آب می‌باشد. توضیح این که ارتفاع موج با ورود به آب کم عمق و ناحیه شکست، تحت

جدول ۴ مقادیر خیزآب و بالاروی موج برای امواج با ارتفاع و پریود متفاوت

H _s [m]	Wave Setup [m] for T _p [sec]					Wave Runup [m] for T _p [sec]				
	۶	۸	۹	۱۰	۱۱	۶	۸	۹	۱۰	۱۱
۷/۰۰	-	-	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۶	-	-	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸
۶/۹۰	-	-	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۶	-	-	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸
۶/۴۰	-	-	۰/۵	۰/۵۳	۰/۵۶	-	-	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸
۶/۳۰	-	-	۰/۵	۰/۵۳	۰/۵۵	-	-	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸
۶/۱۰	-	-	۰/۴۹	۰/۵۲	۰/۵۴	-	-	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸
۵۰/۶۰	-	-	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۵۰	-	-	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۸
۵/۵۵	-	-	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۵۰	-	-	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۸
۵/۵۰	-	-	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۵۰	-	-	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۸
۴/۷۰	-	۰/۳۸	۰/۴	۰/۴۲	۰/۴۴	-	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۷
۴/۰۰	-	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۳۹	-	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۵۷
۳/۴۰	۰/۲۵	۰/۲۹	-	۰/۳۳	-	۰/۵۶	۰/۵۶	-	۰/۵۷	-
۳/۰۰	۰/۲۳	۰/۲۶	-	۰/۳۰	-	۰/۵۵	۰/۵۶	-	۰/۵۶	-

جدول ۵ مقادیر تراز نهایی آب در حالت آنالیز احتمال غیر توأم برای دوره بازگشت ۱۰۰، ۵۰ و ۲۰ سال

دوره بازگشت	تراز متوسط سالیانه [m]	تغییرات فصلی [m]	مدتوفان [m]	خیزآب موج [m]	بالاروی موج [m]	تراز نهایی [m]	تراز نهایی نسبت به -26[m]
۱۰۰	-۲۵/۳	۰/۳۲	۰/۶۵	۰/۶	۰/۵۸	-۲۳/۱۵	۲/۸۵
۵۰	-۲۵/۶۵	۰/۲۹	۰/۶۲	۰/۵۶	۰/۵۸	-۲۳/۶	۲/۴
۲۰	-۲۶/۱۱	۰/۲۶	۰/۵۹	۰/۵	۰/۵۸	-۲۴/۱۸	۰/۸۲

جدول ۶ مقادیر تراز نهایی آب در حالت آنالیز احتمال توأم برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال

دوره بازگشت	تراز متوسط سالیانه [m]	تغییرات فصلی [m]	مدت طوفان [m]	خیز آب موج [m]	بالاروی موج [m]	تراز نهایی [m]	تراز نهایی نسبت به -26[m]
۱۰۰	-۲۵/۳	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۶	۰/۵۸	-۲۳/۵	۲/۵
			۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۵۸	-۲۳/۳۸	۲/۶۲
			۰/۵۲	۰/۳۹	۰/۵۷	-۲۳/۵	۲/۵

جدول ۷ مقادیر تراز نهایی آب در حالت آنالیز احتمال توأم برای دوره بازگشت ۵۰ سال

دوره بازگشت	تراز متوسط سالیانه [m]	تغییرات فصلی [m]	مدت طوفان [m]	خیز آب موج [m]	بالاروی موج [m]	تراز نهایی [m]	تراز نهایی نسبت به -26[m]
۵۰	-۲۵/۶۵	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۵۵	۰/۵۸	-۲۳/۹۷	۲/۰۳
			۰/۴۴	۰/۵۰	۰/۵۸	-۲۳/۸۴	۲/۱۶
			۰/۴۸	۰/۳۳	۰/۵۷	۲۳/۹۸	۲/۰۲

جدول ۸ مقادیر تراز نهایی آب در حالت آنالیز احتمال توأم برای دوره بازگشت ۲۰ سال

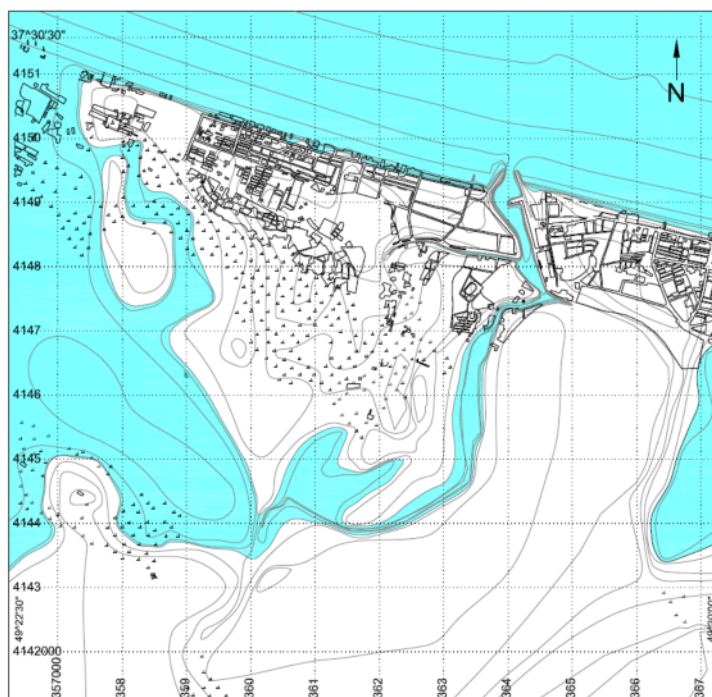
دوره بازگشت	تراز متوسط سالیانه [m]	تغییرات فصلی [m]	مدت طوفان [m]	خیز آب موج [m]	بالاروی موج [m]	تراز نهایی [m]	تراز نهایی نسبت به -26[m]
۲۰	-۲۶/۱۱	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۵۰	۰/۵۸	-۲۴/۵۵	۱/۴۵
			۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۵۷	-۲۴/۴۶	۱/۵۴
			۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۵۷	-۲۴/۵۳	۱/۴۷

است و مطالعه موردی در سواحل شهر انزلی با این رویکرد انجام شده است. عوامل محلی مخصوص به این ناحیه نظر گرفته شده و وابستگی بین عامل مدطوفان و موج در لحاظ شده است. سپس نتایج حاصل از آنالیزهای آماری به آب کم عمق منتقل شده است و در نهایت با توجه به توپوگرافی ناحیه و محاسبه عوامل خیز آب و بالاروی موج، نقشه آب گرفتگی ناحیه مورد مطالعه رسم شده است. اختلاف حداکثر مقدار تراز آب در حالت آنالیز تک متغیره نسبت به آنالیز احتمال توأم حدود ۲۵ سانتی متر است. داده‌های مدت طوفان در حالت ۶۰ سال و ۱۰ سال آنالیز شده است که این مسأله باعث بزرگتر شدن ۱۲ سانتی متری مقدار مدطوفان با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در حالت استفاده از ۶۰ سال داده نسبت به حالت استفاده از ۱۰ سال داده می‌شود.

نقشه آب گرفتگی مربوط به دوره بازگشت ۱۰۰ سال برای حالت آنالیز احتمال توأم، با توجه به تراز آب محاسبه شده و نقشه توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه، رسم شده است (شکل ۱۰). همچنین لازم به ذکر است که ارتفاع بالاروی موج تنها برای سمت رو به دریای ناحیه ساحلی محاسبه شده است و با توجه به استهلاك موج برای نواحی داخلی این عامل در نظر گرفته نشده است.

۷- نتیجه گیری

عوامل متفاوتی در آب گرفتگی ناحیه ساحلی مؤثر هستند که شدت هر عامل در هر منطقه متفاوت است. در بین این عوامل، بعضی به دلیل خصوصیات فیزیکی و منشاء تولید، دارای وابستگی نسبی می‌باشند. در این تحقیق، آنالیز خطر آب گرفتگی با در نظر گرفتن این وابستگی انجام گرفته



شکل ۱۰ نقشه آب گرفتگی ناحیه ساحلی شهر انزلی برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال به روش آنالیز احتمال توأم مناطق مستعد آب گرفتگی به صورت رنگی نشان داده شده‌اند.

عوامل دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در نظر گرفته شده اند.

بنابراین حدود ۱۲ سانتی‌متر از این ۲۵ سانتی‌متر اختلاف، مربوط به این عامل است و عملاً این دو روش حدود ۱۳ سانتی‌متر اختلاف یعنی حدود ۵ تا ۱۶ درصد اختلاف را ایجاد می‌کنند؛ اما مزیت روش آنالیز احتمال توأم علاوه بر نزدیکی بیشتر با واقعیت، در اختیار قرار دادن ترکیب‌های متفاوت از تراز سطح آب و موج با دوره بازگشت متفاوت می‌باشد که می‌توان از آن در موارد دیگر از جمله طراحی سازه‌های احداثی در این نواحی نیز استفاده کرد.

پدیده‌های موج، تغییرات کوتاه مدت تراز آب و تغییرات فصلی تراز آب در آنالیز خطر در نظر گرفته شدند. عامل تغییرات طولانی مدت تراز آب دریای خزر خود عامل دیگری است که رویکرد دیگری را می‌طلبد. تغییرات متوسط سالانه تراز آب خزر از سال ۱۹۷۵ تا ۱۹۹۵ حدود ۲/۵ متر بوده است که در مقابل ۲ متر تغییرات اشاره شده ناشی از بقیه عوامل مقدار بزرگی است. همچنین این تغییر در مدت ۲۰ سال رخ داده است در حالی که برای بقیه

۸- فهرست علائم

$f(x)$	تابع توزیع احتمال
$F(x_i)$	توابع چگالی احتمال حاشیه‌ای
f_p	فرکانس پیک
$G(f, \theta)$	طیف جهتی موج
$H(x_1, x_2)$	تابع چگالی احتمال توأم
H_s	ارتفاع مشخصه موج
K_r	ضریب انکسار موج
K_S	ضریب خزش موج
N	تعداد رخدادها
P_d	فشار دینامیکی موج در عمق
RMSE	مقادیر جذر میانگین مجذور خطا
S_{xx}	مولفه عمود بر ساحل تنش تشعشی
T_p	پریود پیک موج

Goda Y. (1985). "Random Seas and Design of Maritime Structures", University of Tokyo Press.

Goda Y., Suzuki Y. (1985). "Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu's directional spectrum", Tech. Note Port And Harbor Res. Inst. 230.

Haug W. and Xu S. 2008, "Frequency analysis for predicting 1% annual maximum water levels along Florida coast, US", Hydrological Processes, 22: 4507-4518.

Heffernan J.E. (2000). "A Directory of Coefficients of Tail Dependence", Extremes, 3, pp. 279-290.

Hughes S.A. (2004). "Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter", Coastal Engineering, 51, pp. 1085-1104.

Joe, H. (1997). "Multivariate models and dependence concepts", Chapman and Hall, London.

Li C.W. and Song Y. (2006). "Correlation of extreme waves and water levels using a third-generation wave model and a 3D flow model", Ocean Engineering, 33, pp. 635-653.

Rodriguez G., Nistal A., Perez B. (1999), "Joint occurrence of high tide, surge and storm-waves on the northwest Spanish coast", Bol. Inst. Esp. Oceanogr., 15, pp. 21-29.

Saltou N. (1990). "Maximum likelihood methods", Methods in Enzymology, 183, pp. 584-598.

Sklar A. (1959). "Fonctions de repartition à n dimensions et leurs marges", Publ. Inst. Statist. Univ., 8, pp. 229-231.

Sobey R.J. (2005). "Extreme low and high water levels", Coastal Engineering, 52, pp. 63-77.

Williams A.E. (1986). "Engineering and design storm surge analysis and design water level determinations", U.S Army Corps of Eng., Washington D.C.

Wolf J. (2008). "Coupled wave and surge modeling and implications for coastal flooding", Adv. Geosci., 17, pp. 19-22.

Wolf J. (2009). "Coastal flooding: impacts of coupled wave-surge-tide models", Nat Hazards, 49, pp. 241-260.

z	حد بالای توزیع‌های احتمال حاشیه‌ای مرتبط
$\bar{\eta}_s$	تراز متوسط ماهیانه
η_i	تراز آب ثبت شده
$\bar{\eta}_y$	تراز متوسط سالانه
$\bar{\eta}$	تراز متوسط آب
θ	جهت انتشار موج
θ	شیب بستر
χ	پارامتر نشان دهنده که وابستگی بین دو متغیر
ρ	جرم مخصوص آب

۹- منابع

امیدی م. (۱۳۸۶). "مفصل‌ها و کاربرد آنها در تعیین مدل خشک‌سالی در ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

بابائی ج. (۱۳۷۶). "بررسی نوسانات آب های ساحلی دریای خزر در اثر تغییرات جوی (باد)", پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

زون ای. (۱۳۸۰)، "خزر در سه قرن"، ترجمه شمسی ع.، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر.

Aas, K., Czado, K.C., Frigessi, A. and Bakken, H. (2009). "Pair-coupla construction of multiple dependence", Insurance Mathematics and Economics, 44, pp. 182-198.

CEM (2006). "Coastal engineering manual", US Army, Corps of Engineering.

Christoffersen J.B. and Jonsson I.G. (1985). "Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion", Ocean Engineering, 12, pp. 387-423.

Geernaeri G.L, Katsaros K.B. and Richter K. (1986). "Variation of the drag coefficient and its dependence on sea state", Journal of Geophysical Research, 91, pp. 7667-7679.