



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
ICOPMAS 2010
 10-8 آذر ماه (تهران)



آنالیز خطر سیلاب ساحلی بندر انزلی به روش آنالیز احتمال توام

محمد الفته ، کارشناس ارشد مهندسی عمران ، دانشگاه تربیت مدرس ، m.olfateh@gmail.com ،
 مهدی شفیعی فر ، دانشیار مهندسی عمران ، دانشگاه تربیت مدرس ، shafiee@modares.ac.ir

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

1- مقدمه

جمعیت‌های ناحیه ساحلی که در نزدیکی خط ساحلی متمرکز می‌باشند، در برخی مناطق در معرض مخاطره‌هایی مانند سیل ناحیه ساحلی و سونامی می‌باشند. شهرهای ساحلی در ایران نیز هر از چند گاهی دچار مخاطراتی گردیده‌اند که از آن جمله می‌توان به طوفان گنو اشاره کرد. تغییرات کوتاه مدت تراز آب دریای خزر نیز در بسیاری از مناطق ساحلی این دریا مشکل‌ساز بوده است [1]. برای مثال می‌توان به طوفان 13 نوامبر 1993 اشاره کرد که در طی آن نیروگاه نکاء به دلیل بالا آمدگی بی‌سابقه تراز آب دچار مشکل گردید. در این تاریخ ایستگاه اندازه‌گیری سطح آب در بندر انزلی 55 سانتی‌متر مدطوفان را نشان داده است [2].

برنامه‌ریزی و اعمال روش های حفاظتی در مقابل هر مخاطره، نیازمند شناخت کافی از ماهیت و شدت خطر موردنظر می‌باشد. با توجه به اینکه مخاطرات پدیده‌هایی فیزیکی هستند، شدت آن‌ها دارای ماهیتی تصادفی می‌باشد. بنابراین برای بیان آن از مفهوم آمار و احتمال استفاده می‌شود. آنالیز خطر، روشی است برای محاسبه شدت مخاطرات و بیان آن با استفاده از مفهوم احتمال و یا دوره بازگشت. بنابراین برای حفاظت در برابر هر نوع مخاطره طبیعی، آنالیز خطر از جمله قدم‌های ابتدایی برای شناخت آن مخاطره و شدت آن می‌باشد. آنالیز خطر، به صورت کلی به دو روش آنالیز تک متغیره و آنالیز احتمال توام قابل انجام می‌باشد. در روش آنالیز تک متغیره، در صورت تعدد عوامل موثر وابسته، می‌توان از وابستگی و اندرکنش عوامل صرف نظر نمود و نتایج را به صورت مستقیم جمع نمود. در آنالیز خطر آبگرفتگی ساحلی در این روش، معمولاً تنها عامل تراز سطح آب در نظر گرفته می‌شود [3]. در روش آنالیز احتمال توام، وابستگی دو یا چند عامل در نظر گرفته شده و می‌توان اندرکنش بین عوامل را نیز در نظر گرفت. برای مثال مرجع [4] 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 50 سال نموده‌اند. سپس با استفاده از نتایج، آنالیز احتمال توام دو عامل موج و تراز آب انجام شده است.

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

2- آب گرفتگی ناحیه ساحلی

آب گرفتگی ناحیه ساحلی یا همان سیل ناحیه ساحلی در اثر بالا آمدن تراز آب دریا و در نتیجه، زیرآب رفتن نواحی ساحلی رخ می‌دهد. عوامل موثر در تغییر تراز آب و در نتیجه آب گرفتگی ناحیه ساحلی را می‌توان به صورت زیر نام برد [5]:
 (1) مدطوفان. (2) جزرومد نجومی. (3) نوسانات عمومی. (4) سونامی. (5) اثرات اقلیمی. (6) امواج Seich. (7) خیزآب موج. (8) بالاروی موج. (9) عامل فرسایش.

آب گرفتگی ناحیه ساحلی معمولاً نتیجه ای از اندرکنش بین عوامل موثر می‌باشد که ممکن است در برخی نواحی عوامل دیگری مانند بارش باران، جریان رودخانه‌ای و... نیز موثر باشند. باتوجه به اینکه سه عامل موج، مدطوفان و جزرومد نجومی از مهمترین و عمومی ترین

عوامل آب گرفتگی ساحلی هستند، وابستگی و اندرکنش بین این عوامل به صورت خلاصه بررسی می‌شوند. وابستگی بین دو عامل موج و مدطوفان دارای دو منشا می‌باشد. وابستگی اولیه بین این دو عامل به دلیل شرایط آب و هوایی است که باعث ایجاد مقادیر حداکثر این عوامل می‌شود. توضیح اینکه امواج شدید و مدطوفان، هر دو متأثر از یک شرایط آب و هوایی طوفانی می‌باشند. منشا دیگر وابستگی بین عوامل، تاثیر اندرکنش بین عوامل است که در ادامه برشمرده می‌شوند:

- اندرکنش غیر خطی عوامل مدطوفان و جزرومد نجومی: هنگام وقوع مدطوفان با افزایش تراز آب سرعت آن افزایش یافته و اختلاف فازی با حالت طبیعی ایجاد خواهد شد [6].
- اثر موج بر مدطوفان: تغییر در پروفیل سطح آب و تنش‌های سطحی [7] و تغییر در تنش بستر [8].
- اثر مدطوفان و جزرومد بر موج: تغییر در تراز آب (پدیده‌های خزش، انکسار و شکست) و جریان ناشی از مدطوفان و جزرومد (پدیده Doppler).

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

3- 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 بوسیله مدلسازی و با استفاده از داده‌های عوامل موثر 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. همانطور 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 استفاده نمود.

در روش استفاده از توزیع‌های چند متغیره، آنالیز احتمال توام بر اساس برآزش تابع احتمال چند بعدی به داده‌ها و انتخاب بهترین برآزش انجام می‌شود. در این حالت داده‌ها باید دارای یک نوع توزیع و همان نوع توزیع دوجمله‌ای 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 می‌خواهیم توزیع مربوط به مجموع دو توزیع مختلف را محاسبه کنیم. برای مثال در محاسبه تراز سطح آب که شامل مجموع دو عامل مدطوفان و جزرومد 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 توزیع‌های متغیرهای X و Y ، $f_X(x)$ و $f_Y(y)$ برابر $f_X * f_Y$ (کانولوشن) می‌باشد. 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 توام استفاده نمود، 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 توام 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 مرجع [9] در قضیه مربوط به توابعی 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 دوجمله‌ای مرتبط می‌سازد [10]:

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

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

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

در این روابط $H(x_1, x_2)$ تابع چگالی احتمال توام و $F(x_i)$ توابع چگالی احتمال حاشیه‌ای می‌باشند. همچنین $u_i = F(x_i)$ می‌باشد. انواع متفاوتی از توابع مفصل موجود می‌باشند که در یک دسته بندی کلی به سه دسته توابع مفصل درجه دوم، توابع مفصل درجه سوم و توابع مفصل ارشمیدسی قابل تقسیم می‌باشند. توابع مفصل ارشمیدسی شامل خانواده بزرگتری از توابع مفصل می‌باشند و در کاربردهای مهندسی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. انواع مختلف این خانواده از توابع مفصل عبارتند از تابع مفصل گامبل-هاگارد¹، علی-میکائیل-حق²، کلایتون³، جو⁴ و ... [10]. در این تحقیق از سه تابع مفصل گامبل، فرانک و کلایتون استفاده شده است.

1- Gumbel-Hougaard.

2- Ali-Mikhail-Haq.

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهر انزلی می‌باشد. این شهر در استان گیلان و در سواحل جنوب غربی دریای خزر واقع است (شکل 1). این شهر در مختصات جغرافیایی $49^{\circ}28'$ طول شرقی و $37^{\circ}28'$ عرض شمالی قرار دارد. ارتفاع شهر از سطح آب‌های آزاد از 26- متر تا 21- متر می‌باشد و بلندترین نقطه آن نسبت به سطح آب دریای خزر در حال حاضر دارای تراز حدود 5+ متر می‌باشد. جمعیت شهر انزلی حدود 120/000 نفر می‌باشد که در مساحتی در حدود 49/3 کیلومتر مربع ساکن می‌باشند. طول ساحل این شهر در حدود 17 کیلومتر است.



شکل 1) موقعیت منطقه مورد مطالعه (شهر انزلی)

2-4- 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 1941 تا سال 2003 میلادی (سه نوبت در روز) استفاده شده است [11]. این داده‌ها نسبت به صفر بندر انزلی اندازه‌گیری شده است که برابر 26/37- متر از سطح متوسط آب آزاد می‌باشد. داده‌های مربوط به امواج از سال 1993 تا سال 2003 ثبت شده است [12]. این داده‌ها توسط بویه‌ای واقع در مختصات $49^{\circ}30'$ طول شرقی و $37^{\circ}37'30''$ عرض شمالی و در عمق 118 متری اندازه‌گیری شده است. این داده‌ها چهار نوبت در روز ثبت شده است و شامل ارتفاع مشخصه موج H_s ، پریود پیک موج T_p و متوسط جهت انتشار امواج در طول مدت ثبت داده می‌باشد. نقشه‌های توپوگرافی و هیدروگرافی نیز در دسترس می‌باشند. این نقشه‌ها از طول جغرافیایی $49^{\circ}22'30''$ تا $49^{\circ}30'00''$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}22'30''$ تا $37^{\circ}40'30''$ را پوشش می‌دهند. ناحیه مورد مطالعه دارای طول حدود 11500 متر و عرض 12000 متر می‌باشد.

5- تحلیل و نتایج

1-5- 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: (1) تغییرات کوتاه مدت (2) تغییرات فصلی و (3) تغییرات طولانی مدت می‌باشند. نوسانات کوتاه مدت در تحقیق حاضر مدطوفان نامیده می‌شوند. برای جداسازی مدطوفان‌های 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 2). تراز آب متوسط ماهیانه برای هر نقطه به صورتی محاسبه شده است که آن نقطه، روز 16ام از ماه باشد. یعنی از تراز آب در 15 روز قبل و بعد از نقطه مورد نظر متوسط‌گیری شده است:

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

$\bar{\eta}_s$: تراز متوسط ماهیانه

η_i : تراز آب ثبت شده

نوسانات بدست آمده شامل نوسانات مثبت و منفی می‌باشند که مقادیر مثبت آن در شکل (3) مشاهده می‌شود.

3- Clayton.

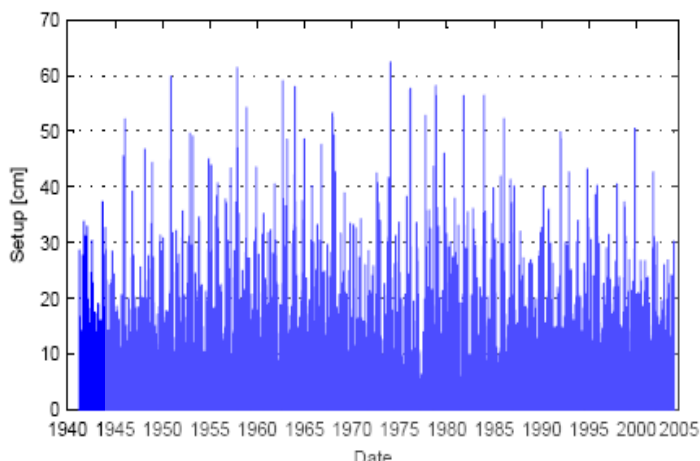
4 - Joe.

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 183 از سال فرض شده است و از 182 روز قبل تا 182 روز بعد از آن نقطه میانگین گرفته شده است:

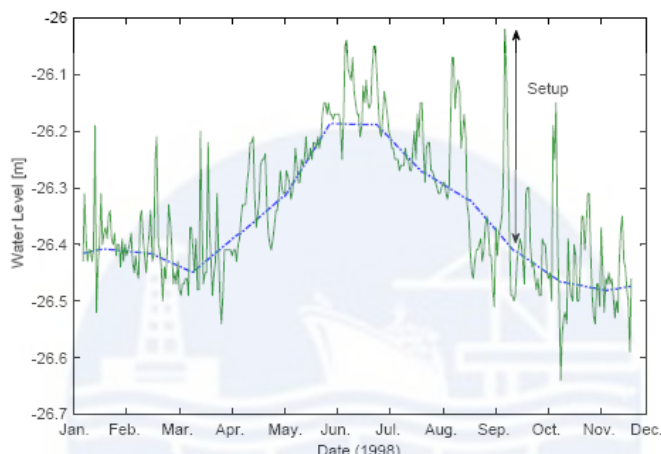
$$\bar{\eta}_y = \frac{1}{365} \sum_{i=182}^{+182} \eta_s \quad (5)$$

$\bar{\eta}_y$: تراز متوسط سالیانه

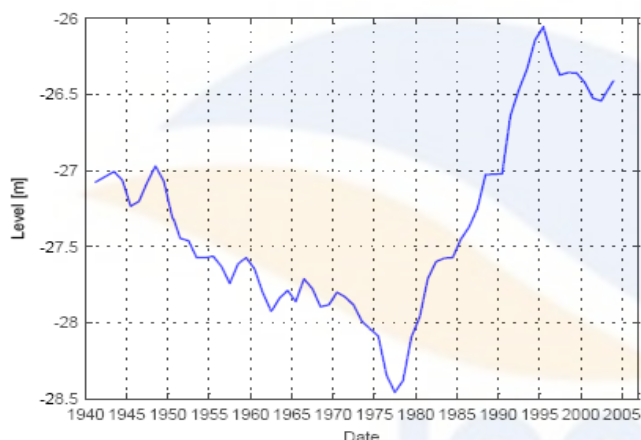
شکل (4) نشان دهنده نوسان‌های فصلی تراز آب دریای خزر می‌باشد. نتیجه حاصل از دو جداسازی بالا، تراز متوسط سالیانه دریای خزر می‌باشد که در شکل (5) مشاهده می‌شود. این تغییرات دارای ماهیتی تصادفی با توجه به تغییرات طولانی مدت عوامل مؤثر می‌باشند.



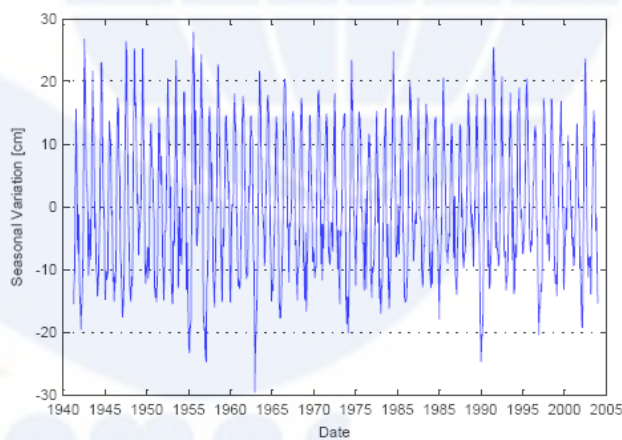
شکل (3) مقدار نوسانات کوتاه مدت (مد طوفان)



شکل (2) جداسازی نوسانات کوتاه مدت از میانگین فصلی



شکل (5) نوسان سالیانه دریای خزر



شکل (4) نوسانات فصلی

2-5- آنالیز خطر و مباحث آماری

آنالیز خطر ناحیه مورد مطالعه شامل آنالیز عامل تغییرات فصلی تراز آب از یک طرف و آنالیز احتمال توام دو عامل موج و مدطوفان می‌باشد. آنالیز احتمال این دو عامل به روش آنالیز احتمال توام و با استفاده از توابع مفصل انجام شده است. توابع مفصل، تابع احتمال توام دو عامل مورد نظر را با توجه به توابع چگالی احتمال حاشیه ای آنها ارائه می‌کنند. بنابراین اولین قدم محاسبه مناسب ترین توزیع مربوط به هر متغیر می‌باشد. سپس با استفاده از توابع مفصل توزیع احتمال توام موج و مدطوفان محاسبه می‌شود.

2-5-1- برازش

اولین قدم در آنالیز خطر به روش تابع مفصل، برازش توابع توزیع احتمال حاشیه‌ای مربوط به هر متغیر می‌باشد. در این تحقیق، با توجه به مرجع [13] چهار توزیع احتمال Gumbel, Weibull, Lognormal و GEV به داده‌های مدطوفان، موج و تغییرات فصلی برازش شده است. با توجه به اینکه توزیع مقادیر اکسترم متغیرها برای ما 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 اینکه طول مدت ثبت داده‌های موج 10 سال می‌باشد و در این تحقیق از روش آنالیز احتمال توام استفاده شده است، تنها می‌توان از 10 سال از داده‌های مربوط به مدطوفان که در طول این مدت اندازه‌گیری شده است استفاده کرد. با توجه به اینکه طول این مدت به اندازه کافی طولانی نمی‌باشد، مقادیر حداکثر داده‌ها از بلوک‌های فصلی انتخاب شده است. یعنی مدل‌های احتمالاتی به داده‌های مقادیر حداکثر مربوط به هر فصل برازش شده است. با توجه به اینکه مقادیر حداکثر موج و مدطوفان تواتر بیشتری در فصل پاییز دارند و ممکن است در روش انتخاب مقادیر حداکثر فصلی، داده‌های بزرگتری در فصل پاییز در نظر گرفته نشود، یک بار نیز داده‌های مدطوفان و موج به روش POT⁴ و با استفاده از توزیع GP⁵ برازش شده‌اند و با حالت قبل مقایسه شده‌اند. در این حالت برای انتخاب داده‌ها دو حد 95 و 99 درصد بزرگتر داده‌ها انتخاب شده است. با توجه به اینکه مقادیر حداکثر تغییرات فصلی تراز سطح آب می‌تواند 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 به نابع Gumbel برازش شده‌اند و از نتایج آن در تعیین تراز ایستایی استفاده شده است. برازش به روش حداکثر درست نمایی⁶ انجام شده است. روش حداکثر درست نمایی یکی از روش‌های تحلیلی برازش می‌باشد و اساس آن محاسبه پارامترهای مدل به صورتی است که حداکثر درست نمایی برای داده‌های رخ داده حاصل شود. تابع درست نمایی برای محیط پیوسته به شکل زیر می‌باشد:

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

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

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

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

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

نتایج برازش (پارامترهای محاسبه شده) در جدول (1) 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 خواهد شد. سپس با توجه به رابطه زیر 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

x_0 : مقدار مربوط به داده‌ها

مقدار احتمال رخداد داده‌ای خاص از سری داده‌ها از رابطه Weibull محاسبه شده است:

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

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 (2) مقادیر جذر میانگین مجذور خطا برای توزیع‌های مختلف ارائه شده است.

با توجه به مقادیر RMSE در جدول فوق، بهترین مدل برازش شده به دو عامل موج و مدطوفان، مدل GEV می‌باشد و بهترین مدل برازش شده به داده‌های تغییرات فصلی تراز سطح آب مدل Weibull می‌باشد. با توجه به مدل انتخاب شده، مقادیر موج، مدطوفان و تغییرات فصلی تراز آب با دوره بازگشت 100 سال محاسبه شده که در جدول (3) مشاهده می‌شود.

5- Peaks-Over-Threshold.

6- Generalized Pareto.

7- Maximum Likelihood Method (MLM).

در این قسمت، تابع توزیع احتمال توام دو عامل موج و مدطوفان با استفاده از توابع مفصل و با استفاده از زوج داده های ثبت شده همزمان این دو عامل محاسبه می شود. از سه نوع تابع مفصل از خانواده توابع مفصل ارشمیدسی استفاده شده است که عبارتند از: Clayton, Gumbel و Frank. داده های زوج موج و مدطوفان، همان مقادیر حداکثرهای فصلی می باشند که مقدار متغیر دیگر در آن لحظه به آن اضافه شده اند.

جدول 1) نتایج برازش

توزیع	CDF: F(x)	پارامترها			
		موج	مدطوفان 10 سال	تغییرات فصلی	متوسط سالانه خزر
GEV	$F(x) = \exp\left[-\left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right]$	$\kappa = -0.026$ $\sigma = 0.915$ $\mu = 2.985$ $m = 3.49$ $s^2 = 1.29$	$\kappa = -0.011$ $\sigma = 6.73$ $\mu = 22.62$ $m = 26.43$ $s^2 = 72.56$	$\kappa = -0.033$ $\sigma = 3.363$ $\mu = 16.35$ $m = 18.18$ $s^2 = 17.12$	-
Lognormal	$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$	$\mu = 1.202$ $\sigma = 0.324$ $m = 3.51$ $s^2 = 1.36$	$\mu = 3.227$ $\sigma = 0.316$ $m = 26.49$ $s^2 = 73.71$	$\mu = 2.878$ $\sigma = 0.222$ $m = 18.22$ $s^2 = 1.358$	-
Weibull	$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{a}\right)^b$	$a = 3.904$ $b = 3.372$ $m = 3.51$ $s^2 = 1.32$	$a = 29.49$ $b = 3.28$ $m = 26.45$ $s^2 = 78.64$	$a = 19.88$ $b = 4.682$ $m = 18.19$ $s^2 = 19.56$	-
Gumbel	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]$	$\alpha = 0.906$ $\beta = 2.973$ $m = 3.50$ $s^2 = 1.35$	$\alpha = 8.523$ $\beta = 38.28$ $m = 26.42$ $s^2 = 74.98$	$\alpha = 3.323$ $\beta = 16.29$ $m = 18.2$ $s^2 = 18.16$	$\alpha = 0.496$ $\beta = 1.416$ $m = 1.70$ $s^2 = 0.405$
میانگین و واریانس محاسبه شده از داده ها (بلوک فصلی)		$m = 3.50$ $s^2 = 1.28$	$m = 26.47$ $s^2 = 73.08$	$m = 18.21$ $s^2 = 16.80$	$m = 1.70$ $s^2 = 0.368$
GP	$F(x) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + \kappa \frac{x-\theta}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\kappa}}$	$\sigma = 1.185$ $\kappa = -0.496$ $\theta = 3.67$ $m = 4.46$ $s^2 = 0.31$	$\sigma = 0.906$ $\kappa = 2.973$ $\theta =$ $m = 3.50$ $s^2 = 1.35$		
		$\sigma = 0.782$ $\kappa = 0.0018$ $\theta = 2.34$ $m = 3.12$ $s^2 = 0.62$	$\sigma = 0.906$ $\kappa = 2.973$ $\theta =$ $m = 3.50$ $s^2 = 1.35$		
میانگین و واریانس محاسبه شده از داده ها (POT, u=0.99)		$m = 4.45$ $s^2 = 0.33$	$m = 35.20$ $s^2 = 24.40$		
میانگین و واریانس محاسبه شده از داده ها (POT, u=0.95)		$m = 3.12$ $s^2 = 0.61$	$m = 25.86$ $s^2 = 33.70$		

جدول 2) مقادیر RMSE برای برازش های متفاوت

داده ها	RMSE					
	GEV	Lognormal	Weibull	Gumbel	GP, 0.99	GP, 0.95
مدطوفان برای طول مدت 10 سال	10.6	10.74	10.98	11.27	13.42	15.18
داده های موج	0.20	0.21	0.23	0.27	0.28	0.32
داده های تغییرات فصلی تراز آب	0.64	0.62	0.58	0.61	0.62	0.65

جدول 3) مقادیر موج، مدطوفان و تغییرات فصلی تراز آب با دوره بازگشت 100 سال

دوره بازگشت (سال)	مد طوفان با توجه به 10 سال داده (cm)	موج (m)	تغییرات فصلی (cm)	تراز آب متوسط سالانه (m)
100	53	7	32	-25.3

توابع مفصل معرفی شده به روش حداکثر درست نمایی به این زوج داده‌ها برازش شده‌اند. جدول (4) پارامتر محاسبه شده تابع مفصل و ارائه می‌کند. بهترین برازش به روش RMSE انتخاب شده است. برای این منظور احتمال توام رخداد موج و مدطوفان از داده‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

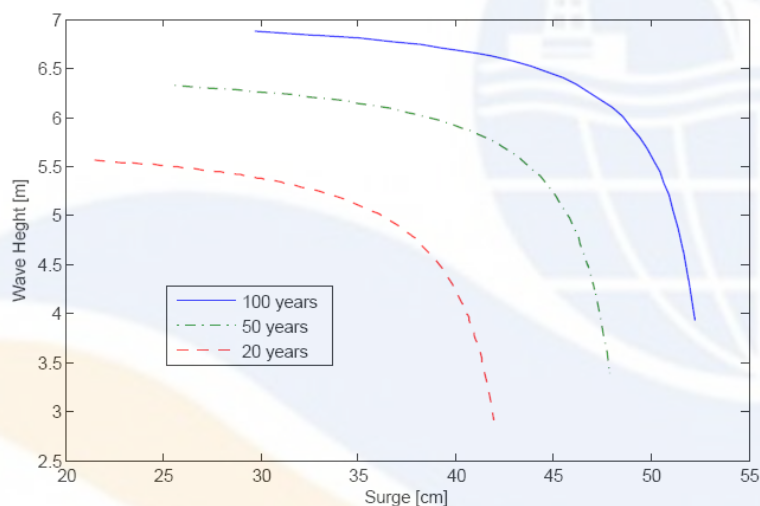
$$H(x_{1i}, x_{2i}) = P(X_1 \leq x_{1i}, X_2 \leq x_{2i}) = \frac{\text{No.of}(x_{1j} \leq x_{1i}, \text{and } x_{2j} \leq x_{2i}) - 0.44}{n + 0.22} \quad (12)$$

در این رابطه n تعداد کل داده‌ها می‌باشد. سپس مقدار زوج رخداد از معکوس تابع چگالی احتمال توام محاسبه شده است. با توجه به دوبعدی بودن تابع مفصل مقادیر معکوس تابع چگالی احتمال توام 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 (4) مشاهده می‌شود.

جدول (4) پارامتر محاسبه شده توابع مفصل و مقدار RMSE

	Frank	Gumbel	Clayton
پارامتر تابع مفصل θ	3.4975	1.4842	0.2757
RMSE	4.502	2.496	6.447

با توجه به این مقادیر تابع مفصل Gumbel بهترین برازش می‌باشد. نتایج حاصل از آنالیز احتمال توام دو عامل موج و مدطوفان به صورت نمودار ترکیب این دو عامل با دوره بازگشت مشخص می‌باشد. این نمودارها برای دوره بازگشت‌های 100، 50 و 20 سال در شکل (6) ارائه شده است.



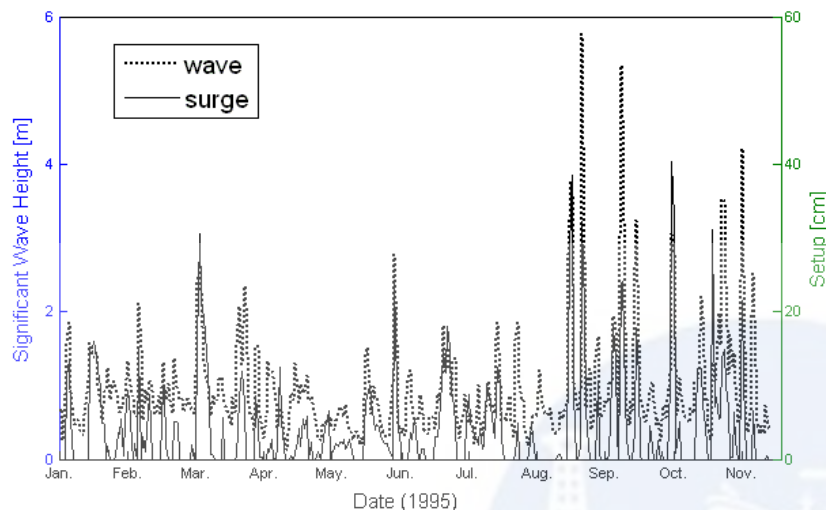
شکل (6) نمودار احتمال توام دو عامل موج و مدطوفان برای دوره بازگشت‌های 100، 50 و 20 سال

3-5- بررسی وابستگی بین عوامل موثر

1-3-5- بررسی کیفی

همانطور 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 (مدت 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 می‌باشد. دو عامل مدطوفان 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 1995) بررسی می‌شود. همان طور که در شکل (7) مشاهده می‌شود، در اکثر موارد در طول مدت اشاره شده، مقادیر حداکثر این دو عامل به صورت هم زمان رخ می‌دهند که این وابستگی در همه حالات یکسان نمی‌باشد. بنابراین یک وابستگی نسبی بین این دو عامل مشاهده می‌شود. در این تحقیق با در نظر گرفتن احتمال رخداد توام این دو عامل، این وابستگی نسبی در نظر گرفته شده است.

برای کمی 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، ضریب همبستگی جینی و ... اشاره کرد [14]. ضریب دیگری که وابستگی بین دو متغیر تصادفی را به صورت ضریبی بین منفی یک و یک بیان می‌کند پارامتر χ می‌باشد که در این تحقیق استفاده شده است.



شکل 7) سری زمانی وقوع دو عامل موج و مدطوفان

این ضریب به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [15]:

$$\chi = \lim_{Z \rightarrow Z^*} \Pr(Y > z | X > z) \quad (13)$$

در این رابطه Z حد بالای توزیع‌های احتمال حاشیه‌ای مربوط 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 $F(x)$ و $F(y)$ (توابع چگالی احتمال) و در نتیجه تبدیل Z^* به 1 (حد بالا) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\chi = \lim_{u \rightarrow 1} \Pr(U > u | V > u) \quad (14)$$

$$U = F(y), \quad V = F(x), \quad u = F(z) \quad (15)$$

پارامتر u مقداری است که چگالی احتمال هریک از عوامل باید از آن بزرگتر باشند. پارامتر χ برای مقادیر اکسترم دو عامل موج و مدطوفان به سمت $0/4$ میل می‌کند. این مقدار نشان دهنده وابستگی نسبی بین این دو عامل می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود برای کل داده‌ها این ضریب برابر $0/65$ می‌باشد.

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

در این بخش نتایج آنالیزهای آماری انجام شده با توجه به نقشه‌های هیدروگرافی و توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه به آب کم عمق منتقل می‌شوند. سپس با محاسبه دو عامل خیزآب و بالاروی موج، نقشه‌های آب گرفتگی ناحیه رسم می‌شود. مشخصات موج آب عمیق شامل ارتفاع مشخصه موج (H_s)، پریود پیک موج (T_p) و متوسط جهت انتشار موج برای بازه‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. ارتفاع مشخصه موج با توجه به تحلیل‌های آماری مشخص می‌باشد. از نمودار احتمال توام دو عامل مدطوفان و ارتفاع موج سه نقطه برای انتقال به آب کم عمق انتخاب شده است (برای دوره بازگشت 100 سال). پریود موج و جهت انتشار موج مربوط به هر ارتفاع موج از داده‌های ثبت شده استخراج شده است. برای مثال برای موج با ارتفاع 5 تا 6 متر، کوچکترین پریود ثبت شده $9/25$ و بزرگترین آن $10/25$ ثانیه می‌باشند. بنابراین امواج در این محدوده ارتفاعی، با پریود 9، 10 و 11 ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. در مورد جهت انتشار امواج نیز همین شیوه اتخاذ شده است. برای مثال امواج در همین محدوده ارتفاع، دارای جهت انتشار بین $17/61$ تا $38/41$ درجه نسبت به شمال می‌باشند. بنابراین این محدوده امواج در جهت‌های $15-40$ درجه به ساحل منتقل شده است. مشخصات امواج آب عمیق منتقل شده در جدول (6) ارائه شده است. مقدار ارتفاع موج 7 متر مربوط به حالت غیر توام می‌باشد.

جدول 6) مشخصات امواج آب عمیق منتقل شده به ساحل

H_s [m]	7	6.9	6.1	4.0
T_p [sec]	9,10,11	9,10,11	9,10,11	8,9,10,11
Direction	15-40	15-40	15-40	20-55

انتقال طیف موج به آب کم عمق با استفاده از مدول NSW نرمافزار MIKE 21 انجام شده است. تراز آب ایستا برای هر حالت برابر مجموع ترازهای مدطوفان و تغییرات فصلی با دوره بازگشت مربوط و تراز سالیانه خزر با دوره بازگشت 100 سال در نظر گرفته شده است. همانطور که اشاره شد خیزآب و بالاروی موج دو عامل موثر 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 [16]:

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho g d} \frac{dS_{xx}}{dx} \quad (16)$$

$\bar{\eta}$: تراز متوسط آب

S_{xx} : مولفه عمود بر ساحل تنش تششی

مقدار S_{xx} بوسیله مدل محاسبه شده است و با تبدیل dx به Δx مقدار η محاسبه شده است. حداکثر خیزآب موج از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{\eta}_{max} = \bar{\eta}_s + \frac{d\bar{\eta}}{dx} \Delta x \quad (17)$$

در این رابطه Δx طول ناحیه ساحلی که حداکثر خیزآب موج آن را پوشش می‌دهد و η_s مقدار خیزآب در محل خط ساحل است. بالاروی موج در این تحقیق با توجه به پارامتر ممان موج محاسبه شده است [17]. پارامتر ممان موج از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_F(x, t) = \int_{-h}^{\eta(x)} (P_d + \rho u^2) dz \quad (18)$$

P_d : فشار دینامیکی موج در عمق Z

ρ : چگالی آب

u : سرعت افقی ذرات آب در عمق Z

رابطه بین پارامتر ممان موج و مقدار بالاروی موج به شکل زیر است:

$$\frac{R}{h} = CF(\alpha) \left[\frac{M_F}{\rho g h^2} \right]^{0.5} \quad (19)$$

در رابطه فوق C ضریب ثابت و $F(\alpha)$ تابعی از شیب ساحل یا سازه است. برای امواج نامنظم این ضرایب برای $R_{u2\%}$ برابراند با:

For $1/30 < \tan(\alpha) < 2/3$ and $H_{mo}/L_p > 0.0225$:

$C = 4.4$

$F(\alpha) = \tan 0.7(\alpha)$

به صورت کلی 13 ترکیب شرایط آب عمیق به ساحل منتقل شده است. جدول (7) نتایج مربوط به ارتفاع خیزآب موج و بالاروی موج را برای هر حالت ارائه می‌کند. با محاسبه مقادیر خیزآب و بالاروی موج، مقدار تراز آب نهایی از مجموع این دو عامل و تراز آب مربوط محاسبه می‌شود. در مورد آنالیز احتمال توام که سه نقطه از نمودار برداشت شد، حداکثر تراز آب مربوط به حداکثر آن سه مورد می‌باشد. نتایج محاسبه شده در جدول (8) و جدول (9) مشاهده می‌شوند. همچنین تراز نهایی نسبت به تراز -26 متر که تراز پایه آب در نقشه‌های توپوگرافی است ارائه شده است.

با توجه به تراز آب محاسبه شده و نقشه توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه، نقشه آب گرفتگی مربوط به دوره بازگشت 100 سال برای حالت آنالیز احتمال توام رسم شده است (شکل 8). همچنین لازم به ذکر است که ارتفاع بالاروی موج تنها برای سمت رو به دریای آزاد ناحیه ساحلی در نظر گرفته شده است و برای نواحی آب گرفته داخلی، با توجه به استهلاک موج، این عامل در نظر گرفته نشده است.

جدول 7) مقادیر خیزآب و بالاروی موج برای امواج با ارتفاع و پررود متفاوت

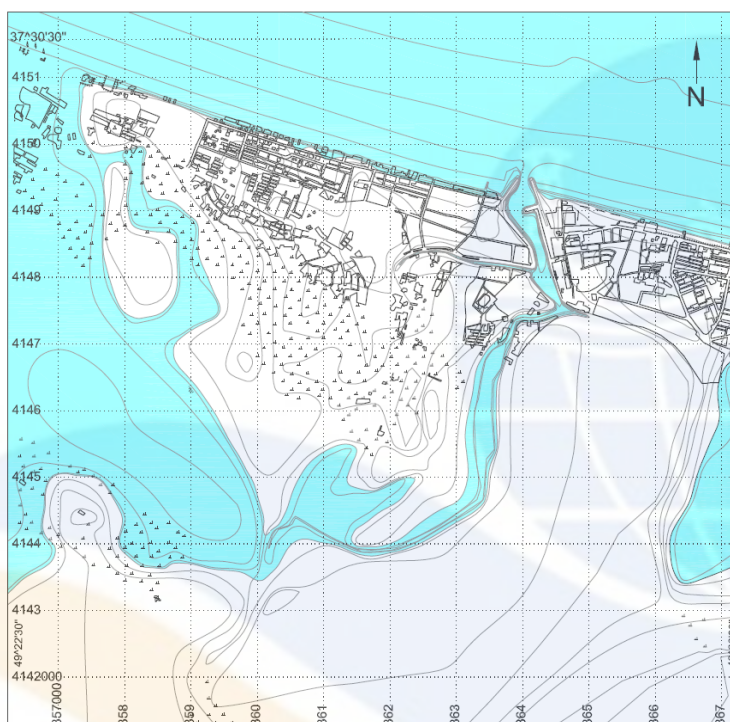
H_s [m]	Wave Setup [m] for T_p [sec]				Wave Runup [m] for T_p [sec]			
	8	9	10	11	8	9	10	11
7.00	-	0.52	0.55	0.6	-	0.57	0.58	0.58
6.90	-	0.52	0.55	0.6	-	0.57	0.58	0.58
6.10	-	0.49	0.52	0.54	-	0.57	0.58	0.58
4.00	0.33	0.35	0.37	0.39	0.56	0.56	0.57	0.57

جدول 8) مقادیر تراز نهایی آب در حالت آنالیز احتمال غیر توام برای دوره بازگشت 100 سال

دوره بازگشت	تراز متوسط سالیانه [m]	تغییرات فصلی [m]	مدطوفان [m]	خیز آب موج [m]	بالاروی موج [m]	تراز نهایی [m]	تراز نهایی نسبت به 26[m] -
100	-25.3	0.32	0.53	0.6	0.58	-23.27	2.73

جدول 9) مقادیر تراز نهایی آب در حالت آنالیز احتمال توام برای دوره بازگشت 100 سال

دوره بازگشت	تراز متوسط سالیانه [m]	تغییرات فصلی [m]	مدطوفان [m]	خیز آب موج [m]	بالاروی موج [m]	تراز نهایی [m]	تراز نهایی نسبت به 26[m] -
100	-25.3	0.32	0.30	0.6	0.58	-23.5	2.5
			0.48	0.54	0.58	-23.38	2.62
			0.52	0.39	0.57	-23.5	2.5



شکل 8) نقشه آب گرفتگی ناحیه ساحلی شهر انزلی برای دوره بازگشت 100 سال و آنالیز احتمال توام

7- نتیجه گیری

عوامل متفاوتی در آب گرفتگی ناحیه ساحلی موثر می‌باشند که شدت هر عامل در هر منطقه متفاوت می‌باشند. در بین این عوامل، بعضی به دلیل خصوصیات فیزیکی و منشا تولید دارای وابستگی نسبی می‌باشند. در این تحقیق، آنالیز خطر آب گرفتگی در سواحل شهر انزلی با این رویکرد انجام گرفته است. عوامل محلی مخصوص به این ناحیه در نظر گرفته شده است و وابستگی بین عامل مدطوفان و موج در نظر گرفته 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 گردیده است.

وابستگی میان مقادیر حداکثر دو عامل موج و مد طوفان به صورت کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی در هر دو حالت نشان دهنده وابستگی نسبی بین این دو عامل می‌باشد. ضریب همبستگی 0/45 مویید این امر می‌باشد.

اختلاف حداکثر مقدار تراز آب در حالت آنالیز تک متغیره نسبت به آنالیز احتمال توام حدود 11 سانتیمتر می‌باشد. اما مزیت روش آنالیز احتمال توام علاوه بر نزدیکی بیشتر با واقعیت، در اختیار قرار دادن ترکیب های متفاوت از تراز سطح آب و موج با دوره بازگشت متفاوت می‌باشد که می‌توان از آن در موارد دیگر نیز استفاده کرد از جمله طراحی سازه های احداثی در این نواحی.

پدیده های 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 می طلبد. تغییرات متوسط سالانه تراز آب خزر از سال 1975 تا 1995 حدود 2/5 متر بوده است که در مقابل 2 متر تغییرات اشاره شده ناشی از بقیه عوامل مقدار بزرگی می باشد. همچنین این تغییر در مدت 20 سال رخ داده است در حالی که برای بقیه عوامل دوره بازگشت 100 ساله در نظر گرفته شده است.

8- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مدیریت و کارشناسان محترم اداره کل مهندسی سواحل و بنادر سازمان بنادر و دریانوردی به خاطر در اختیار قرار دادن داده های موج و تراز آب تشکر و قدردانی می گردد.

9- مراجع

- [1]- زون ای، (1380) خزر در سه قرن، علی شمسی، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر.
- [2]- بابائی ج، (1376) بررسی نوسانات آب های ساحلی دریای خزر در اثر تغییرات جوی (باد)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [3]- Haung W., Xu S. (2008), Frequency analysis for predicting 1% annual maximum water levels along Florida coast US, Hydrological Processes, Vol. 22, 4507-4518.
- [4]- Li C.W., Song Y. (2006), Correlation of extreme waves and water levels using a third-generation wave model and a 3D flow model, Ocean Engineering, Vol. 33, 635-653.
- [5]- Williams A.E. (1986), Engineering and design storm surge analysis and design water level determinations, U.S Army Corps of Eng., Washington D.C.
- [6]- Wolf J. (2008), Coupled wave and surge modeling and implications for coastal flooding, Adv. Geosci., Vol. 17, 19-22.
- [7]- Geernaeri G.L, Katsaros K.B., Richter K. (1986), Variation of the drag coefficient and its dependence on sea state., Journal of Geophysical Research, Vol. 91, 7667-7679.
- [8]- Christoffersen J.B., Jonsson I.G. (1985), Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion, Ocean Engineering, Vol. 12, 387-423.
- [9]- Sklar A. (1959), Fonctions de repartition à n dimensions et leurs marges., Publ. Inst. Statist. Univ., Vol. 8, 229-231.
- [10]- Nelson, R. B. (1999), An Introduction to Copulas, Springer-Verlag, New York.
- [11]- داده های ثبت شده تراز سطح آب در بندر انزلی، اداره کل بنادر و دریانوردی استان گیلان.
- [12]- داده های ثبت شده موج در مختصات $49^{\circ}30'$ طول شرقی و $37^{\circ}37'30''$ عرض شمالی، سازمان بنادر و دریانوردی.
- [13]- Sobey R.J. (2005), Extreme low and high water levels, Coastal Engineering, Vol. 52, 63-77.
- [14]- Coles, S. G. (2001). An introduction to statistical modelling of extreme values. Springer-Verlag (Series in Statistics), London, UK.
- [15]- Heffernan J.E. (2000), A Directory of Coefficients of Tail Dependence, Extremes, Vol. 3, 279-290.
- [16]- CEM (2006), Coastal Engineering Manual, US Army Corps of Engineering.
- [17]- Hughes S.A. (2004), Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, Coastal Engineering, Vol. 51, 1085-1104.