

بررسی اثر تغییرات گام زمانی در مدل‌های پیش‌بینی امواج در دریاچه ارومیه

مهدی شفیعی فر^۱، حسین منتصری^۲

۱- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در تحقیق حاضر ضمن بکارگیری امکانات سیستم اطلاعات جغرافیایی و اتصال این سیستم به یک مدل پیشرفته نسل سوم پیش‌بینی موج که قابلیت اجرا در حالت‌های نسل اول و دوم را نیز دارا است، تاثیر گام زمانی محاسباتی در مدل‌های مختلف در شرایط یک میدان باد متغیر زمانی در دریاچه ارومیه بررسی شده است. با استفاده از امکانات مهیا شده در سیستم اطلاعات جغرافیایی در محیط ArcView کار ورود و خروج و کلیه عملیات پیش پردازش و پس پردازش مدل پیش‌بینی امواج صورت می‌گیرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مدل موج نسل سوم به خاطر در نظر گرفتن اندرکنش‌های غیر خطی امواج و روشی که در حل انتگرال مربوطه در نظر می‌گیرد، نسبت به گام‌های زمانی محاسباتی بزرگ بسیار حساس‌تر از مدل‌های نسل اول و نسل دوم است. از طرف دیگر نتایج این مدل در گام‌های زمانی نسبتاً کوچکتر (۱۰ دقیقه و کمتر) نسبت به تغییر گام زمانی در شرایط دریاچه ارومیه کمتر از دو مدل دیگر حساس می‌باشد به گونه‌ای که با کاهش گام زمانی تغییری در ارتفاع امواج حاصل نمی‌شود. **کلمات کلیدی:** مدل‌های پیش‌بینی امواج، گام زمانی محاسباتی، سیستم اطلاعات جغرافیایی

Effect of Computational Time Step on Wave Prediction Models Case Study Uremia Lake

Abstract

Development of advanced spectral wind wave models has been the subject of comprehensive researches which has led to reliable wave predictions for assessing the impact of waves on the natural environment, coastal protection, offshore structures and harbor over the past two decades. On the other hand, the Geographical Information Systems (GIS) are developed for working with geographical data which as standard tools are able to manage and represent such data.

In the present work, linking the third-generation wind wave model of SWAN and GIS has been implemented to ease data management and representation of inputs and outputs of the model that are geo-reference data. Then the effect of computational time step has been investigated using available data for Urmia Lake situated in the Northwest of Iran. As SWAN has the ability to perform the options of 1st, 2nd and 3rd generation modeling, these options have been used to evaluate results obtained by applying these models. Results indicate that the 3rd generation wave model is more sensitive to higher computational time steps than other modes of wave generation models. However, the convergence behavior of the third-generation model is much faster than that of other models.

Keywords: Time Step, Third-generation Wave Model, GIS, Coastal Hydrodynamics

۱- مقدمه

که استفاده از گام های زمانی بزرگ را ایجاب می کند، باعث عدم دستیابی به یک راه حل پایدار می شوند [۱] و [۲]. از این رو انتخاب یک گام زمانی مناسب که از یک طرف دقت نتایج را در بر داشته باشد و از طرف دیگر زمان اجرای مدل ها را برای مسایل عملی کاهش دهد، ضروری است.

۲- مدل های عددی پیش بینی موج

در چند دهه گذشته تلاش های بسیاری برای تهیه مدل های عددی پیش بینی امواج انجام گرفته و مدل های عددی مختلفی ارائه شده اند که طبیعت پیچیده تولید و زوال موج را توصیف می کنند. مبنای اکثر این مدل ها، حل عددی معادله تعادل انرژی طیفی^۱ می باشد. این معادله در حالت دو بعدی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial S(f, \theta)}{\partial t} + C_g \cdot \nabla S(f, \theta) = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (1)$$

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} \quad \text{که در آن:}$$

$S(f, \theta)$ طیف انرژی موج و C_g سرعت گروهی، f فرکانس و θ جهت مولفه های موج می باشند. در سمت راست معادله (۱)، که عبارت های چشمه و چاه می باشند، S_{in} انرژی وارده از طرف باد، S_{nl} اندرکنش غیرخطی مؤلفه های موج و S_{ds} افت انرژی ناشی از شکست موج بر اثر رشد موج می باشد. عبارت سمت چپ رشد طیف موج را به صورت تابعی از زمان و مکان نشان می دهد.

عبارت انرژی وارده از طرف باد، S_{in} ، در برگزیده مکانیسم های Philips و Miles می باشد. با رشد میدان موج، عبارت اندرکنش غیر خطی موج، S_{nl} ، جهت انتقال انرژی از مؤلفه های با پریود کوتاهتر به مؤلفه های با پریود بلندتر محاسبه می شود. با ادامه وزش باد، رشد موج تنها تا زمان خاصی ادامه می یابد و پس از آن که شیب تاج موج به حد خاصی برسد، رشد آن متوقف

امواج دریا مهمترین و موثرترین عامل در طراحی سازه های دریایی و بررسی فرآیندهای ساحلی می باشند. از اینرو داشتن آمار و اطلاعات کافی از امواج برای طراحی مناسب و اقتصادی سازه های دریایی و مطالعات مهندسی سواحل ضروری می باشد. از آنجاییکه آمار دراز مدت این مشخصات در اکثر نقاط دریایی موجود نیست، معمولاً با بکار بردن مدل های ریاضی مناسب از آمار باد برای پیش بینی مشخصه های امواج استفاده می شود. در این خصوص مدل های مختلفی تدوین و ارایه شده اند که به سه گروه مدل های نسل اول، نسل دوم و نسل سوم دسته بندی می شوند. برای کاربرد بهینه هریک از این مدل ها در شرایط محیطی و الگوهای باد مختلف، انجام بررسی های خاص نظیر بررسی شرایط عمق آب و درستی کاربرد مدل مورد نظر در این شرایط، بررسی دقت لازم با توجه به عدم قطعیت های اطلاعات ورودی ضروری می باشد. این مدل ها عمدتاً بر اساس معادله تعادل انرژی یک میدان موج استوار هستند که در ادامه تشریح می گردند.

در شبیه سازی عددی پیش بینی امواج، دقتی که مدل ها با آن فرایند های فیزیکی موثر در رشد امواج را تقریب می زنند در ارزیابی نتایج مدل ها بسیار حایز اهمیت می باشد. مدل های نسل سوم در عین قابلیت برای در نظر گرفتن پدیده های مطرح فیزیکی، دارای مشکل عددی ناشی از وجود مقیاس های زمانی چندگانه می باشند که این مساله ناشی از طبیعت امواج ناشی از باد بخاطر در بر گرفتن دامنه ای از فرکانس های مختلف می باشد. با توجه به اینکه نسبت مقیاس زمانی بیشترین مولفه های فرکانسی به کمترین مولفه ها غالباً بسیار بیشتر از یک می باشد، در نتیجه انتخاب مناسب این مقیاس های زمانی برای دستیابی به دقت های عددی لازم بسیار ضروری می باشد. این مساله استفاده از گام های زمانی خیلی کوچک در الگوریتم عددی را ایجاب می کند که ممکن است غیر عملی باشد. افزون بر این بخاطر ماهیت معادلات حاکم و وجود پدیده غیر خطی اندر کنش موج با موج در کنار مسایل اقتصادی

¹ Spectral energy balance equation

۱-۲- مدل‌های پیش‌بینی موج نسل اول

مدل نسل اول که نخستین مدل ریاضی طیفی پیش‌بینی موج می‌باشد، در سال ۱۹۵۷ توسط Gelci و همکاران توسعه یافت. در آن زمان در مورد عبارتهای چشمه و چاه در معادله انرژی آگاهی چندانی وجود نداشت. در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ مدل‌های جدیدتری توسط Moskowitz (1966) و Bennett (1968) بوجود آمدند که در این مدل‌ها از اندرکنش غیر خطی بین مؤلفه‌های موج یا کاملاً صرفنظر شده بود و یا آن را به شکل ساده‌ای و با استفاده از نتایج Hasselman برای طیف Pierson-Moskowitz کاملاً توسعه یافته مدل می‌کردند [۴].

مطالعات بیشتر نشان داد که منبع اصلی انرژی در طی مرحله اصلی رشد در فرکانس‌های پایین طیف، انتقال غیر خطی از فرکانس‌های بالاتر می‌باشد. لذا با روشن شدن اهمیت زیاد اندرکنش‌های غیرخطی، نیاز به بازنگری در مدل‌های پیش‌بینی امواج احساس گردید. این بازنگری، منجر به ارائه مدل‌های نسل دوم گردید.

۲-۲- مدل‌های پیش‌بینی موج نسل دوم

مدل‌های موج نسل دوم در مقایسه با مدل‌های نسل اول اندرکنش‌های غیر خطی میان مؤلفه‌های موج را نیز مدل می‌کنند، با این محدودیت که در محاسبه انتگرال Boltzman فرض‌هایی محدود کننده مدنظر قرار می‌گیرد که علت آن ساده کردن محاسبات وقت‌گیری است که در حل این انتگرال به آن برخورد می‌شود [۵].

۳-۲- مدل‌های پیش‌بینی موج نسل سوم

در اواسط دهه ۱۹۸۰ پیشرفت‌هایی در محاسبه انتگرال Boltzman بوسیله Hasselman و همکاران (۱۹۸۵) و Snyder و همکاران (۱۹۹۳) حاصل شد [۶] و [۷]. این پیشرفت‌ها بر دشواری‌های اساسی مدل‌های نسل دوم غلبه کرد. در محاسبه این انتگرال هیچ گونه فرض محدود کننده‌ای به شکلی که در مدل‌های نسل

شده و موج می‌شکند. این شکست موج که به اتلاف سطحی موج^۲ معروف است، با آنچه که در نزدیکی ساحل و به دلیل کاهش عمق رخ می‌دهد، متفاوت است. برای در نظر گرفتن پدیده اخیر از عبارت S_{ds} استفاده می‌شود.

عبارت اندرکنش غیرخطی مؤلفه‌های موج (S_{nl}) بحث برانگیزترین عبارت در میان عبارتهای چشمه می‌باشد. حالت کلی اندرکنش غیرخطی امواج هنگامی اتفاق می‌افتد که چهار مؤلفه موج شرایط تشدید را به شکل زیر محقق سازند:

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4, \quad (2)$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3 + \sigma_4$$

که در آن k_i عدد موج و σ_i فرکانس نسبی موج می‌باشد. هنگامی که بین تعدادی از مؤلفه‌های موج تشدید صورت می‌گیرد، انرژی موجود در طیف موج به نوعی باز توزیع می‌شود، به گونه‌ای که انتقال انرژی به فرکانس‌های پایین طیف که قسمت اصلی طیف را تشکیل می‌دهند، باعث پایداری شکل طیف می‌گردد.

مطالعات Hasselman در طی سال‌های ۱۹۶۲ تا ۱۹۶۸ چهارچوب تئوری مناسبی برای تخمین مقدار خاص انتقال انرژی که میان مؤلفه‌های مختلف فرکانسی - جهتی در طیف موج رد و بدل می‌شود، بنا کرد [۳]. بر اساس نتایج وی، نرخ انتقال انرژی حاصل از اندرکنش غیرخطی سه مؤلفه موج به مؤلفه چهارم طیف، توسط یک انتگرال چهارگانه روی عددهای موج این مؤلفه‌ها بدست می‌آید که به انتگرال Boltzman شش بعدی معروف است که تا کنون راه حل تحلیلی برای آن بدست نیامده است. اصولاً لحاظ کردن این عبارت در معادلات انرژی و چگونگی روش حل آن و میزان ساده سازی‌هایی که در حل این عبارت صورت می‌گیرد، تفکیک کننده نسل‌های مختلف مدل‌های ریاضی پیش‌بینی موج می‌باشد که در ادامه بدان اشاره می‌شود.

² White capping

با توجه به اینکه مدل نسل سوم موج قابلیت اجرا در حالت‌های نسل اول و دوم را نیز دارد، یک مطالعه موردی جهت بررسی حساسیت نسل‌های مختلف مدل‌های پیش‌بینی امواج به گام زمانی محاسباتی روی دریاچه ارومیه انجام گرفت. میدان باد مورد استفاده در این تحقیق یک میدان باد متغیر زمانی است که در هر گام زمانی مقدار و جهت سرعت تغییر می‌نماید.

در ادامه بعد از شرح مختصر راجع به نحوه اتصال مدل موج با GIS نتایج بررسی‌های بعمل آمده برای پیش‌بینی امواج دریاچه ارومیه ارائه می‌گردد.

۳- ارتباط مدل پیش‌بینی امواج با GIS

چگونگی ارتباط دو طرفه بین مدل نسل سوم موج و سیستم اطلاعات جغرافیایی و کاربرد آن برای دسترسی به مشخصه‌های امواج در دریاها و دریاچه‌ها توسط منتصری و همکاران ارائه شده است [۱۳]. در این تحقیق اتصال مدل نسل سوم موج و سیستم اطلاعات جغرافیایی توسط برنامه‌هایی به زبان Avenue در محیط نرم‌افزار ArcView برقرار شده است. این نرم‌افزار یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی است که دارای قابلیت بالا در نمایش پدیده‌ها، ترکیب لایه‌های اطلاعاتی مختلف، داشتن پایگاه داده بسیار قوی می‌باشد. برنامه‌ها و آنالیزهای دلخواه GIS در ArcView می‌تواند بوسیله زبان برنامه نویسی پیش‌بینی شده به نام Avenue صورت پذیرد. از دیگر توانایی‌های ArcView قابلیت سفارشی‌کردن آن با استفاده از برنامه‌ها و Extension های دلخواه است [۱۴].

در این تحقیق تلاش بر این بوده است تا با اتصال مدل موج SWAN و GIS از امکانات GIS برای پردازش ورودی‌ها و خروجی‌های مدل هیدرودینامیک حداکثر بهره برداری بعمل آید. سیستم GIS این امکان را فراهم می‌آورد که تمامی داده‌ها بتوانند با استفاده از تکنیک هم پوشانی^۳ به راحتی با یکدیگر

دوم به کار رفته بود، وجود نداشت و در نتیجه نسل سوم مدل‌های پیش‌بینی امواج بوجود آمدند. کاربری مدل‌های نسل سوم نیازمند در اختیار داشتن امکانات خاص محاسباتی می‌باشد که با پیشرفت‌های کامپیوتری در سال‌های اخیر امکان مناسب مهیا شده است. در حال حاضر مدل‌های نسل سوم مانند WAM [۸ و ۹]، WAVEWATCH [۱۰] و SWAN [۱۱] و [۱۲] برای پیش‌بینی وضعیت امواج در دریاها و اقیانوس‌ها استفاده می‌شوند. در حالیکه دو مدل اول شرایط موج را در شرایط آب عمیق و در مقیاس اقیانوسی مدل می‌نمایند، مدل SWAN انتشار امواج از آب عمیق تا مناطق کم عمق ساحلی را نیز مدلسازی می‌نماید.

مدل نسل سوم موج SWAN دارای این مزیت است که ضمن در نظر گرفتن شرایط آب کم عمق، قابلیت اجرا در حالت غیر ایستا را دارد. به این معنا که کلیه شبکه‌های ورودی توپوگرافی، باد، تراز آب، جریان و اصطکاک بستر می‌توانند با زمان تغییر کنند و مدل قادر است در هر گام زمانی تغییرات شبکه‌های ورودی را اعمال نماید. لذا می‌توان مدل را برای یک زمان معین با گام‌های زمانی مورد نظر اجرا نمود و خروجی‌ها را نیز در گام‌های زمانی متفاوت بدست آورد. با توجه به قابلیت‌های مدل SWAN در لحاظ نمودن پدیده‌های مرتبط مخصوصاً در نظر گرفتن پدیده‌های هیدرودینامیکی مناطق کم عمق ساحلی، در تحقیق حاضر از این مدل استفاده شده است.

از آنجاییکه ورود اطلاعات و پردازش خروجی‌های این مدل بسیار مشکل و وقت گیر می‌باشد، ابتدا اتصال این مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) توسط نویسندگان مقاله انجام گرفت. در این رابطه پس از بررسی کد اصلی برنامه SWAN و درک روابط زیر برنامه‌های نرم‌افزار، اتصال دو جانبه SWAN و GIS به گونه‌ای برقرار شده است که با استفاده از قابلیت‌های GIS، تهیه ورودی‌های مدل و پردازش نتایج با دقت و سهولت بیشتری انجام گیرد.

³ Overlay

ترکیب شده و نتایج تحقیقات بی درنگ در دسترس کاربر قرار گیرد.

مدل ریاضی SWAN به داده های زمین مرجع مانند هیدروگرافی، باد، اصطکاک کف، تراز آب و جریان نیازمند است. این داده‌ها و شرایط مرزی مدل به خوبی می‌توانند بوسیله GIS آماده شوند.

مقادیر فوق ممکن است از طریق اندازه‌گیریها یا از نتایج دیگر مدل‌های ریاضی تولید شده باشند و در پایگاه داده های GIS ذخیره گردند. مدل SWAN با حل یک سیستم معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی به بررسی میدان موج می پردازد. با حل این سیستم معادلات، ارتفاع موج، طول موج، پیروی موج، انرژی موج و دیگر پارامترهای موج بدست می‌آیند. خروجی‌های مدل نیز از نوع داده‌های زمین مرجع هستند و به صورت یک شبکه نقاط همراه با پارامترهای موج به عنوان یک مشخصه⁴ به GIS می روند و برای حصول یک نمای کلی از مقادیر مربوطه یا ترکیب آنها پردازش می‌شوند. در حقیقت GIS فرصت عملی کردن مبادله داده بین مدل با فرمتهای ورودی و خروجی مختلف و استفاده از ابزارهای نمایشی متعدد را میسر می‌سازد.

ورودی مدل از پایگاه داده GIS تحویل گرفته می شود. به عنوان مثال مورفولوژی از نقشه های خطوط تراز، رقومی می‌شود و در پایگاه داده GIS ذخیره می‌گردد. GIS داده‌های رقومی شده این خطوط تراز را با ساختن شبکه نامنظم مثلثی (TIN) پردازش می نماید و به فرمت ورودی مدل بر می‌گرداند. مدل نیز نتایج خود را برای استفاده بعدی در پایگاه داده GIS قرار می‌دهد. در حقیقت GIS فرصت عملی کردن مبادله داده بین مدل با فرمتهای ورودی و خروجی مختلف و استفاده از ابزارهای نمایشی متعدد را میسر می‌سازد.

در اتصال SWAN و GIS، فایل ورودی مدل موج از طریق یک سری کادرهای محاوره ای که در

⁴ Attribute

محیط ArcView ایجاد شده‌اند، ساخته می‌شود. پارامترهای ورودی و دستورات خروجی مدل موج که از طریق این کادرها توسط کاربر وارد می‌شود، عبارتند از: مقادیر اولیه، تراز آب، عمق حداقل مدخل ورودی، شتاب جاذبه و ...

مود اجرا؛ مدل می تواند در دو حالت ایستا و غیر ایستا در یک پیروی زمانی مشخص با گام های زمانی ثابت اجرا گردد.

سیستم مختصات مسأله؛ سیستم مختصات به دو صورت کروی و کارتزین می تواند در نظر گرفته شود. این سیستم مختصات باید در کلیه شبکه های ورودی و شبکه محاسباتی یکسان در نظر گرفته شود.

پارامترهای شبکه محاسباتی؛ مختصات مرکز شبکه محاسباتی، طول، عرض و تعداد مش ها در سیستم مختصات مسأله مشخص می شود. همچنین فرکانس‌ها س حداقل و حداکثر، تعداد تقسیمات در فضای جهتی و فرکانسی در این قسمت تعیین می گردد.

شبکه های ورودی؛ شامل شبکه توپوگرافی، باد، تراز آب، جریان و اصطکاک می باشند. مشخصات این شبکه ها به عنوان ورودی به مدل داده می شود.

طیف امواج؛ مدل قابلیت ارائه طیف امواج بر اساس طیف های JONSWAP، Pierson-Moskowitz را دارد.

خروجی های مدل؛ به دو صورت جدول مربوط به مشخصات امواج و خروجی طیفی ارائه می‌گردد. مشخصات امواج شامل ارتفاع مشخصه، پیروی، جهت متوسط، جهت انتقال انرژی، توزیع جهتی، عرض نرمال شده طیف فرکانسی، اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک کف و انرژی انتقالی می باشد. پس از اجرای مدل موج در محیط ArcView، نتایج مدل جهت آنالیز و پردازش به GIS فرستاده می‌شود.

عملیات توسط ماکروها (زیر برنامه ها) ی GIS آغاز می‌شود. این ماکروها ورودی و خروجی مدل و تعویض

این شبکه توپوگرافی در دو جهت X و Y برابر ۸۶۰۰۰ و ۱۴۷۰۰۰ متر می‌باشد. شکل (۱)، توپوگرافی دریاچه را در محیط GIS نشان می‌دهد. تراز سطح آب دریاچه 1276/5 متر از سطح دریاهای آزاد که معادل سطح متوسط دریاچه در یک دوره ۶۹ ساله می‌باشد، در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است در بررسی حاضر شرایط دریاچه قبل از احداث میانگذر شهید کلانتری مد نظر قرار گرفته و اثر خاکریز موجود در مدلسازی‌ها لحاظ نشده است.

میدان باد مورد استفاده یک طوفان واقعی با جهت و مقدار متغیر در زمان مربوط به طوفان ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک ارومیه از تاریخ ۱۹۹۸/۱۲/۱۰ تا ۱۹۹۸/۱۲/۱۱ می‌باشد. زمان تداوم این طوفان ۳۶ ساعت می‌باشد و به صورت ۳ ساعته اندازه‌گیری شده است. با توجه به این که ثبت داده‌ها در ایستگاه خشکی انجام شده است، لازم بوده این سرعتها به سرعتهای روی دریاچه تبدیل شوند. برای این تصحیح از روش ارائه شده در مرجع CEM استفاده شده است. شکل (۲) تغییرات زمانی مقدار و جهت سرعت باد در مدت این طوفان را نشان می‌دهد.

جهت اعمال این طوفان به مدل، از یک شبکه یکنواخت مستطیلی با همان ابعاد و مش‌بندی شبکه هیدروگرافی بستر در هر دو جهت X و Y استفاده شده است. با توجه به اینکه الگوی باد منطقه در دست نبوده است، در هر گام زمانی سرعت و جهت باد برای تمام نقاط شبکه یکسان در نظر گرفته شده است. گام‌های زمانی اعمال طوفان به مدل ۳ ساعت می‌باشد. بنابراین ۱۲ گام زمانی در اعمال این طوفان به کار برده شده است. میدان باد مربوط به هر گام زمانی به صورت فایل‌های متنی جداگانه‌ای در محیط GIS تهیه شده است. مدل در هر ۳ ساعت از محاسبه، مقادیر میدان باد را از فایل مربوطه می‌خواند.

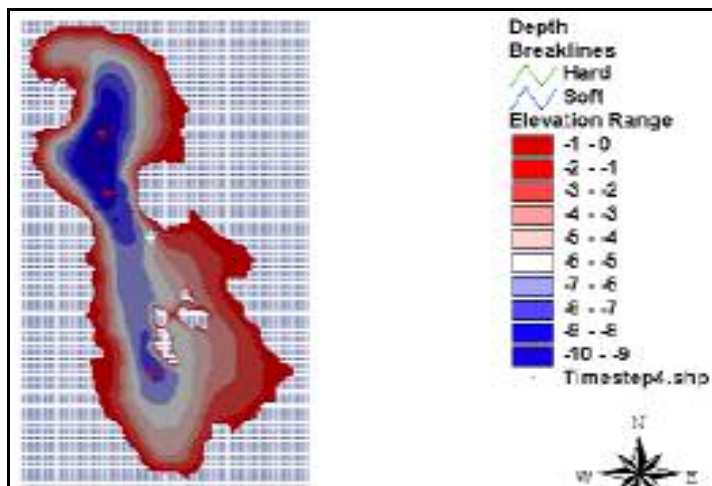
داده‌ها را کنترل می‌نمایند. تمام داده‌های مدلها و GIS توسط فایل‌های متنی (ASCII) مبادله می‌شوند. ارتباط GIS و مدل‌ها توسط ماکروهای نوشته شده به زبان Avenue در محیط ArcView برقرار می‌گردد.

در این ارتباط دو طرفه ورودی‌های مدل موج شامل هندسه مدل، توپوگرافی مورد نیاز مدل، تراز سطح آب، میدان باد، میدان جریان و پارامترهای اولیه مدل از محیط GIS تهیه شده و در اختیار مدل موج قرار می‌گیرد. هندسه و پارامترهای اولیه مدل و اصطکاک کف، از محیط GIS به مدل معرفی می‌گردد. هندسه مدل مربوط به هندسه کلیه شبکه‌های ورودی و محاسباتی می‌باشد. توپوگرافی مورد نیاز مدل از رقومی کردن نقشه خطوط تراز در محیط GIS بدست می‌آید و در اختیار مدل قرار می‌گیرد. شبکه باد در حالت‌های شبکه باد ثابت و شبکه باد متغیر زمانی از محیط GIS تهیه می‌شود و به مدل می‌رود. تراز آب مورد نیاز مدل می‌تواند از اندازه‌گیری‌ها یا از دیگر مدل‌های ریاضی مانند مدل مدطوفان حاصل گردد.

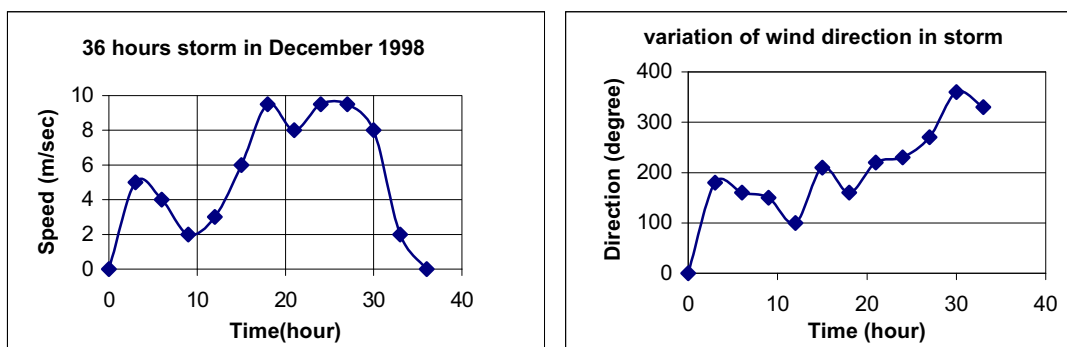
مدل موج با حل یک سیستم معادلات دیفرانسیل غیر خطی به حل میدان موج می‌پردازد و در هر نقطه از شبکه محاسباتی ارتفاع موج، طول موج، پریود موج و جهت موج را می‌دهد. پس از اجرای مدل، نتایج مدل به صورت یک شبکه نقاط به همراه مشخصه‌های میدان موج جهت نمایش و ترکیب لایه‌های اطلاعاتی مختلف به GIS می‌روند. در صورتی که مدل برای یک طوفان با گام‌های زمانی مختلف اجرا شود، فایل خروجی مدل شامل مشخصه‌های امواج در هر یک از گام‌های زمانی مورد نظر خواهد بود. همچنین طیف امواج در هر نقطه و در هر گام زمانی محاسبه می‌شود.

۴- داده‌های ورودی مدل

جهت بررسی تغییرات الگوی شکل‌گیری امواج در دریاچه ارومیه، از یک شبکه توپوگرافی مستطیلی از منطقه با ابعاد مش ۵۰۰ متری استفاده شده است. ابعاد



شکل ۱ - هیدروگرافی دریاچه ارومیه و نقاط رکورد گیری نتایج



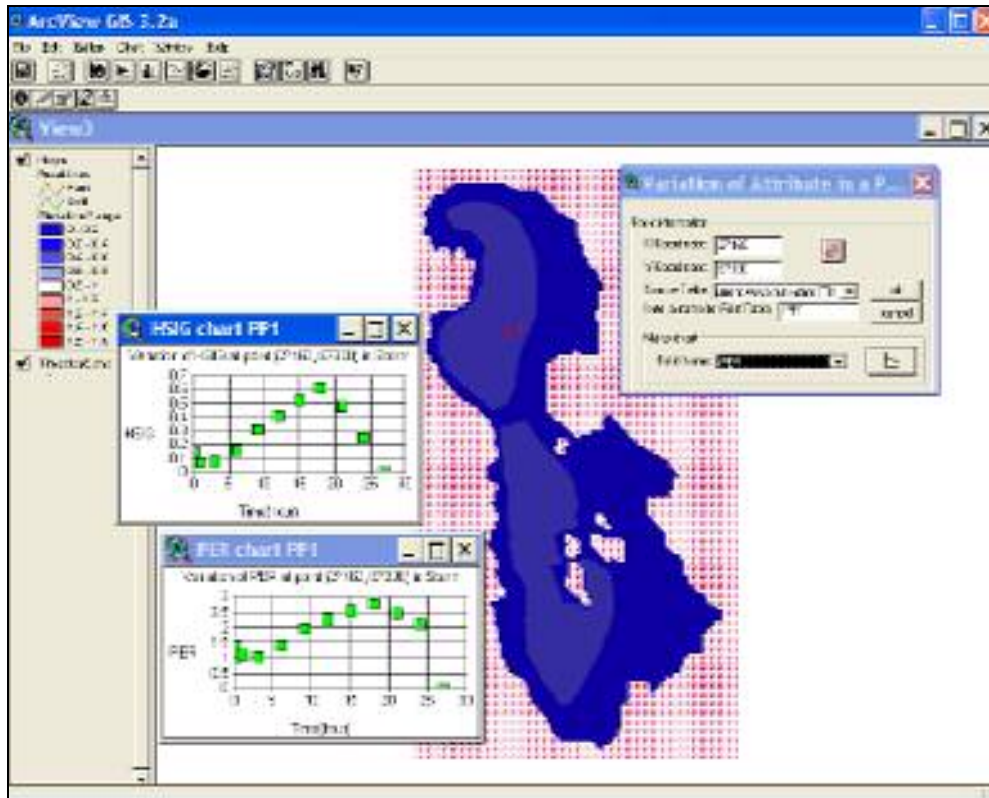
شکل ۲- مقدار و جهت طوفان در گام‌های زمانی مختلف

۵- بررسی میدان امواج

نتایج خروجی مدل موج در یک فایل ذخیره می‌شود که شامل ۱۲ مشخصه موج در هر نقطه شبکه محاسباتی است. در حالتی که مدل برای یک طوفان در زمان اجرا شده باشد، فایل خروجی مدل شامل مشخصه‌های امواج در هر نقطه از شبکه محاسباتی و در هر گام زمانی است. مدل پس پردازش، از محیط GIS فایل خروجی مدل را خوانده و به صورت یک بانک اطلاعاتی به محیط ArcView می‌آورد. این بانک دارای مشخصه‌های جغرافیایی X و Y، ارتفاع موج، پیروی موج و جهت موج می‌باشد. برنامه در ادامه، اطلاعات مربوط به هر گام زمانی را از جدول خروجی داده‌ها خوانده و به صورت یک لایه نقطه‌ای به محیط

ArcView منتقل می‌کند. این لایه دارای مشخصه‌های مختلفی از میدان موج منطقه مربوط به همان گام زمانی می‌باشد. می‌توان در محیط ArcView بر اساس هر یک از این مشخصه‌ها، یک Grid تهیه کرد و الگوی تغییرات آن مشخصه را در میدان مشاهده نمود.

مدول رکوردگیری زمانی از مشخصه‌های موج، جهت نمایش تغییرات مشخصه‌ها در نقاط مختلف از شبکه محاسباتی در طول مدت طوفان تهیه شده است. این برنامه به گونه‌ای طراحی شده است که با کلیک بر روی هر نقطه از لایه‌های نقطه‌ای منتقل شده به محیط ArcView، نمودار مربوط به تغییرات هر یک از مشخصه‌های موج بر اساس درخواست کاربر را نمایش می‌دهد، شکل (۳).



شکل ۳- نمایش نحوه دریافت تغییرات ارتفاع و پرید امواج در هر نقطه از دریاچه ارومیه در طول طوفان

۶- بررسی نتایج

زمانی قرار می‌گیرند. معمولاً گام زمانی در مدل موج باید به اندازه‌ای کوچک باشد که تغییرات زمانی میدان موج بتواند لحاظ گردد.

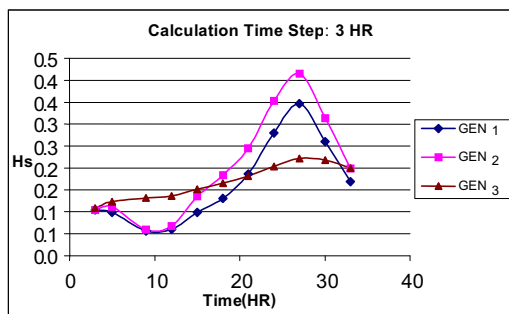
جهت بررسی اثر گام زمانی محاسباتی روی مدل‌های مختلف، مدل موج در سه حالت نسل اول، نسل دوم و نسل سوم با گام‌های زمانی محاسباتی ۳ ساعت، ۱ ساعت، ۳۰ دقیقه، ۱۰ دقیقه، ۵ دقیقه و ۱ دقیقه اجرا گردید. در حالت گام زمانی ۳ ساعت که برابر گام زمانی اعمال طوفان به مدل می‌باشد، مدل نسل سوم نسبت به مدل‌های دیگر کاملاً متفاوت عمل می‌کند. با توجه به اینکه در گام‌های زمانی مختلف جهت باد تغییر می‌نماید و از آنجا که مدل موج نسل سوم، معادله مربوط به اندرکنش‌های غیرخطی بین مؤلفه‌های موج را بطور کامل و به صورت عددی حل

در بررسی نتایج، باید بازه محاسباتی زمانی از لحظه‌ای در نظر گرفته شود که وضعیت اولیه مدل بتواند درون منطقه محاسباتی انتشار یابد. قبل از این زمان، خروجی‌ها معتبر نیستند، چون معمولاً وضعیت اولیه شناخته شده نیست و تنها وضعیت بدون موج یا وضعیت ابتدایی برای دریا فرض می‌شود.

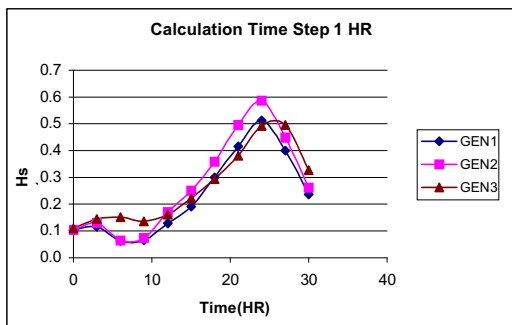
از آنجا که مدل موج نسل سوم مورد استفاده در این تحقیق بر اساس روش عددی ضمنی^۵ استوار است، توسط معیار پایداری کورانت^۲ (که مرتبط با گام‌های زمانی و مکانی است) محدود نمی‌شود [۱۵ و ۱۶]. بنابراین گام زمانی در مدل نامحدود است. با این وجود، صحت نتایج مدل بطور آشکار تحت تأثیر گام

^۵ Implicit

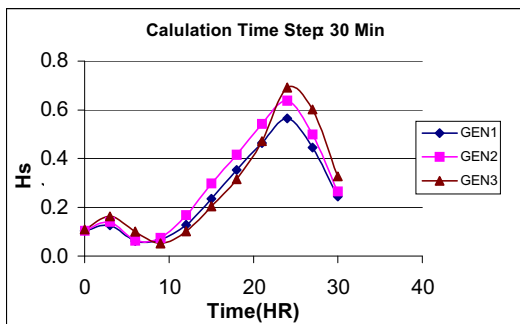
^۲ Courant Stability Criterion



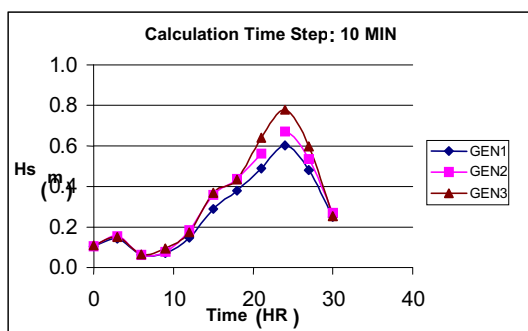
الف) گام زمانی محاسباتی برابر ۳ ساعت



ب) گام زمانی محاسباتی برابر ۱ ساعت



ج) گام زمانی محاسباتی برابر ۳۰ دقیقه



د) گام زمانی محاسباتی برابر ۱۰ دقیقه

شکل ۴- تغییرات ارتفاع موج در مدل‌های نسل اول، نسل دوم و نسل سوم با گام‌های زمانی محاسباتی مختلف

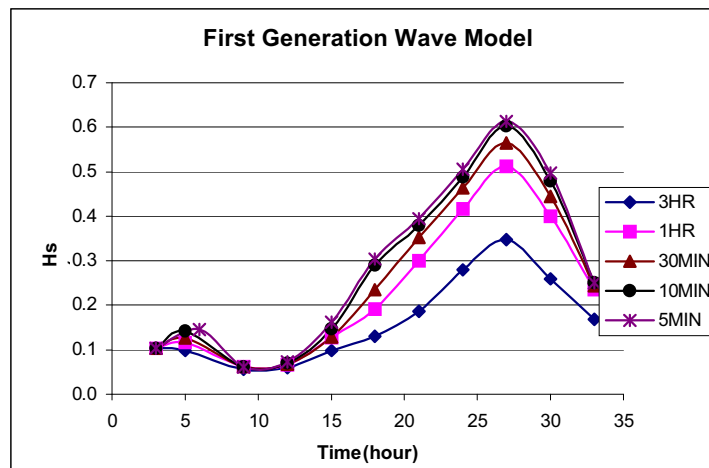
می‌نماید، جهت اعمال تغییرات مقدار و جهت باد و انتقال انرژی بین مؤلفه‌های امواج فرصت کافی نخواهد داشت و لذا مقادیر کمتری را نسبت به مدل‌های نسل اول و دوم ارائه می‌دهد. اما در مدل نسل اول که این اندرکنش‌ها مدل نمی‌شود و در مدل نسل دوم که بصورت ساده‌سازی شده این اندرکنش‌ها مدل می‌گردد، برابر بودن گام زمانی با گام محاسباتی تأثیر زیادی نمی‌گذارد.

در ادامه با کاهش گام زمانی محاسباتی که مدل فرصت اعمال تغییرات را خواهد داشت، به تدریج پیک موج در مدل نسل سوم افزایش می‌یابد و از مدل‌های نسل اول و دوم نیز پیشی می‌گیرد. لازم به ذکر است که پیک موج در مدل‌های نسل اول و دوم نیز با کاهش گام زمانی محاسباتی افزایش می‌یابد، اما این افزایش چشمگیر نیست. در شکل (۴) نتایج مدل برای گام‌های زمانی ۳ ساعت، ۱ ساعت، ۳۰ دقیقه و ۱۰ دقیقه در یک نقطه مشخص شده در شکل (۳) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که مدل‌های نسل‌های مختلف نسبت به تغییرات گام‌های زمانی بزرگ حساس هستند اما با کاهش گام زمانی نتایج پیش‌بینی ارتفاع امواج به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند.

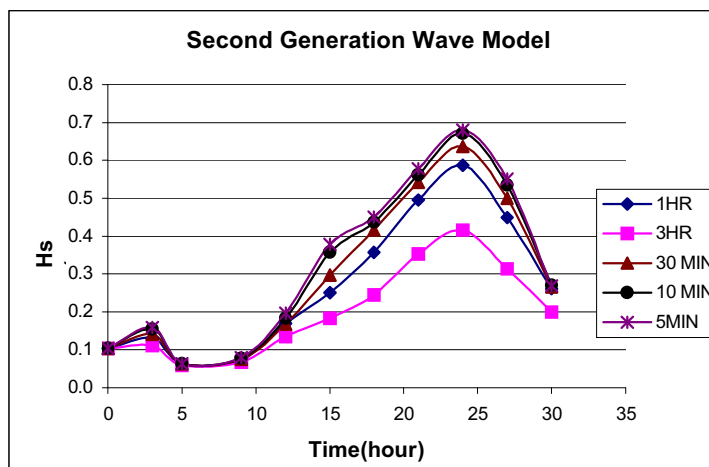
به منظور دستیابی به حداقل گام زمانی که با انتخاب آن نتایج مدل‌ها دارای تغییرات قابل توجه نباشد، مدل‌ها با گام زمانی ۵ دقیقه نیز اجرا شدند. نتایج حاصل برای گام زمانی محاسباتی برابر ۵ دقیقه، کاملاً مشابه نتایج مدل برای گام زمانی ۱۰ دقیقه بود و با کاهش گام زمانی از ۱۰ دقیقه به ۵ دقیقه نتایج مدل‌ها بدون تغییر خواهد بود. لذا با توجه به شرایط منطقه مورد بررسی، گام زمانی ۱۰ دقیقه را می‌توان بعنوان حداقل گام زمانی که دقت‌های لازم را بدست می‌دهد پذیرفت.

در نظر گرفتن گام زمانی برابر ۳۰ دقیقه تقریباً به ۹۵ درصد از دقت مدل نسل سوم رسید. بنابراین می‌توان گفت مدل‌های نسل دوم در دامنه‌های زمانی بزرگ که موج به رشد نهایی خود رسیده است، جواب‌های تقریباً یکسانی با مدل نسل سوم ارائه می‌دهد، اما برای بررسی میدان امواج در دامنه‌های زمانی کوتاه که انتقال انرژی موج بین مؤلفه‌های موج حائز اهمیت است، استفاده از مدل‌های نسل سوم که اندرکنش بین مؤلفه‌های موج را به صورت کامل در نظر می‌گیرد، مناسب‌تر است.

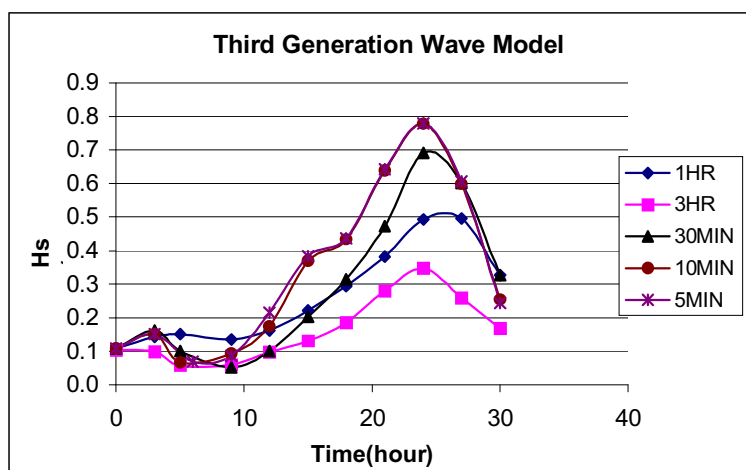
در شکل‌های (۵) تا (۷) تغییرات ارتفاع موج برای مدل‌های مختلف و گام‌های زمانی متفاوت بطور جداگانه مقایسه شده است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که مدل نسل سوم به تغییرات گام زمانی محاسباتی بسیار حساس می‌باشد، در حالی که مدل نسل اول و دوم بعد از رسیدن از گام زمانی محاسباتی ۳ ساعت به ۱ ساعت حساسیت زیادی را نشان نمی‌دهند. همانگونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در مدل نسل سوم با کاهش گام زمانی از ۳ ساعت تا ۱ ساعت و سپس تا ۳۰ دقیقه و در نهایت تا ۱۰ دقیقه، تغییرات زیاد است. اما در مدل‌های نسل اول و نسل دوم تغییرات ارتفاع موج از ۱ ساعت تا ۱۰ دقیقه زیاد نیست بگونه‌ای که در این مدل‌ها می‌توان با



شکل ۵- تغییرات ارتفاع موج در طول طوفان در مدل‌های نسل اول در نقطه P1 با گام‌های زمانی مختلف



شکل ۶- تغییرات ارتفاع موج در طول طوفان در مدل‌های نسل دوم در نقطه P1 با گام‌های زمانی مختلف



شکل ۷- تغییرات ارتفاع موج در طول طوفان در مدل‌های نسل سوم در نقطه P₁ با گام‌های زمانی مختلف

۷- نتیجه گیری

با رشد و توسعه فناوری‌های نوین کامپیوتری و بوجود آمدن مدل‌های ریاضی در زمینه‌های مختلف هیدرودینامیک، امکان دسترسی به حجم عظیمی از داده‌ها در زمینه‌های مختلف مهندسی سواحل مهیا شده است که تجزیه و تحلیل این حجم از داده‌ها نیازمند استفاده از امکانات خاص نرم افزاری و سخت افزاری است که سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به نحو مطلوبی آن را فراهم می‌سازند.

در این تحقیق ابتدا اتصال مدل پیشرفته SWAN با یک سیستم اطلاعات جغرافیایی در محیط ArcView با موفقیت انجام گرفته است. سپس با استفاده از یک میدان باد متغیر زمانی تاثیر گام زمانی محاسباتی در مدل‌های مختلف روی دریاچه ارومیه بررسی شده است. نتایج حاصل از بررسی نشان داده است که:

- مدل موج نسل سوم به خاطر در نظر گرفتن اندرکنش‌های غیر خطی امواج و روشی که در حل انتگرال مربوطه در نظر می‌گیرد، نسبت به گام‌های زمانی محاسباتی بزرگ (۳۰ دقیقه و بیش از ۱۰ دقیقه) بسیار حساس‌تر از دو مدل

دیگر است. از طرف دیگر این مدل در گام‌های زمانی نسبتاً کوچکتر (۱۰ دقیقه و کمتر) نسبت به تغییر گام زمانی کمتر از دو مدل دیگر حساس می‌باشد به گونه ای که با کاهش گام زمانی تغییری در ارتفاع امواج حاصل نمی‌شود. از این رو برای مدلسازی پیش‌بینی امواج با مدل‌های نسل سوم حتماً بایستی گام‌های محاسباتی کوچکتری را در نظر گرفت. در نظر گرفتن گام‌های زمانی بیشتر منجر به برآورد کمتر ارتفاع موج می‌گردد.

- برای دریاچه ارومیه با یک شبکه توپوگرافی ۵۰۰ متری و شبکه محاسباتی ۱۰۰۰ متری تحت اثر یک طوفان واقعی با تداوم ۳۶ ساعت، در مدل نسل سوم با گرفتن گام زمانی محاسباتی برابر ۱۰ دقیقه تقریباً می‌توان به دقت قابل قبول دست یافت.

- با توجه به اثر گام زمانی محاسباتی از یک سو و اهمیت مقدار ارتفاع امواج در طراحی سازه‌های دریایی از سوی دیگر، انتخاب گام زمانی مناسب (تا حد ممکن کوچک) که ارتفاع موج واقعی را برآورد نماید، ضروری می‌باشد.

مراجع

- Janssen, P.A.E.M. Dynamics and modelling of ocean waves, Cambridge University Press, New York, 1994.
- 10-Tolman, H.L., A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents, *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 21, 1991, pp. 782–797.
- 11-Booij, N. Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. "A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation", *J. Geophys. Res.* Vol. 104, 1999, pp. 7649–7666.
- 12-Rogers, W.E., Hwang, P.A. and Wang, D.W. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications, *J. Phys. Oceanogr.* 33 (2003), pp. 366–389.
- 13-Liebig, W., 1996, "GIS and Mathematical Models", Second Joint European Conference & Exhibition on Geographical Information, Barcelona, Spain 1996. Norderney, Germany.
- 14-Holthuijsen, L.H, Booij, N. R., Ris, R. C., Haagsma, IJ. G. "Swan User Manual", 1996 Swan Cycle III, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering.
- 15-Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.M.M., Kriezi, E.E., Zijlema, M., Van der Westhuysen, A.J., 2004. SWAN—User manual. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section.
- ۱۶- منتصری، ح، شفیعی فر، م، اتصال مدل ریاضی پیش‌بینی موج با سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت بررسی الگوی شکل‌گیری امواج در دریاها، ششمین کنفرانس بین‌المللی عمران، اصفهان، ۱۳۸۲.
- 1-Tolman, Limiters in third-generation wind wave models, *Global Atmos. Ocean Syst.* 8 (2002), pp. 67–83.
- 2-Hargreaves, J.C. and Annan, J.D., Comments on "Improvement of the short-fetch behavior in the wave ocean model (WAM)", *J. Atmosphere Ocean Technology* Vol. 18, 2001, pp. 711–715.
- 3-Young, J.R, 1999, "Wind Generated Ocean Waves", University of Adelaide, Australia, 1999.
- 4-Massel, S.R., 1996, *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction*, World Scientific Publishing, London.
- 5-Booij, N., L.H. Holthuijsen and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing the second generation HISWA wave model with the third-generation SWAN wave model, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 215-222
- 6-Hasselmann, S., Hasselmann K., Allender, J.H. and Barnett, T.P., 1985, "Computations and Parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum", *J. Physical Oceanography*, 15, pp. 1378-1391.
- 7-Snyder, R.L, Thacker, W.C., Hasselmann, S., Hasselmann K and Barzel, G., 1993, "Implementation of an efficient scheme for calculating nonlinear transfer from wave-wave interaction", *J. Geophysics Research*, 98, pp. 14507-14525.
- 8-WAMDI Group, The WAM model—a third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 18, 1988, pp. 1775–1810.
- 9-Komen, G.J. Cavaleri, L. Donelan, M. Hasselmann, K. Hasselmann S. and