دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

سال چهل و پنج، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۹۷ تا ۱۰۵
Vol. 45, No.1, Summer 2013, pp. 97-105

نشریه علمی – پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

مدل‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص دریای خزر با نظریه آشوب

محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین [۱*]، میراحمد لشته‌نشایی [۲]، محمدعلی قربانی [۳]، مرتضی بیک‌لریان [۴]

۱ استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز
۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه گیلان
۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز
۴ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز

(دریافت ۱۳۹۰/۱/۲۰، پذیرش ۹۲/۴/۱۰)

چکیده

ارتفاع موج شاخص دریا در واقع میانگین ارتفاع یک سوم مرتفع‌ترین امواج در یک وضعیت دریایی است. بررسی و پیش‌بینی این ارتفاع موج در تحلیل سامانه‌های دریایی از جمله نیروهای وارد بر سازه‌های دریایی و انتقال رسوب برای طراحی، بهره‌برداری و مطالعات مربوط به گستره دریایی، اهمیت دارد. در این تحقیق، خصوصیات دینامیکی سری زمانی ارتفاع موج شاخص ساعتی در ورودی بندر انزلی دریای خزر و پیش‌بینی آن با استفاده از مفاهیم نظریه آشوب انجام شده است. برای بازسازی فضای حالت، زمان تاخیر از روش تابع خود همبستگی و بعد محاط از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب محاسبه گردید. روش بعد همبستگی نیز برای بررسی آشوب‌پذیری ارتفاع موج شاخص دریا بکار گرفته شد. از روش پیش بینی موضعی برای پیش بینی سری زمانی ارتفاع موج شاخص استفاده شد که نتایج حاکی از دقت قابل قبول این نظریه در پیش بینی کمی ارتفاع موج شاخص دریاها دارند.

کلمات کلیدی

ارتفاع موج شاخص، پیش بینی موضعی، دریای خزر، نظریه آشوب

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: a_lotfollahi@yahoo.com

۱- مقدمه

طبیعت تصادفی سطح آب دریا باعث شده است که تنها راه بیان کمی آن، استفاده از روش‌های آماری باشد. برای تعیین موج طراحی، بیش‌تر از موج شاخص استفاده می‌شود. ارتفاع موج شاخص (Hs) برابر میانگین ارتفاع امواجی است که توسط دریانوردان دیده و گزارش شده است. بررسی‌ها نشان داده که این ارتفاع در واقع میانگین ارتفاع یک سوم مرتفع‌ترین امواج در یک وضعیت دریائی است. دلیل این انتخاب در حقیقت طراحی سازه-ها بر اساس مشاهدات دیداری امواج در گذشته است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که ارتفاع موج گزارش شده بوسیله دیده-بانی، به‌طور تقریب با مفهوم موج شاخص متناظر است. بنابراین انتخاب موج شاخص به عنوان موج طراحی، استفاده از تجربه را در مهندسی امکان‌پذیر می‌سازد [۶].

پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص در تحلیل سامانه‌های دریایی از جمله نیروهای وارد بر سازه‌های دریایی و انتقال رسوب از موارد اساسی در طراحی، بهره‌برداری و مطالعات مربوط به گستره دریایی به شمار می‌رود و بدین منظور از روش‌های مختلفی مانند شبکه های عصبی مصنوعی، منطق فازی، برنامه‌ریزی ژنتیک، مدل سری‌های زمانی، نظریه آشوب و غیره استفاده می‌شود.

در چند دهه اخیر، تحولی بزرگ در شیوه درک و بیان پدیده‌ها، توسط محققین انجام شده که در سال‌های گذشته، تبیین‌های خود را در قالب‌های منظم و مشخص ارائه می‌دادند. نظریه آشوب به مطالعه سامانه‌هایی می‌پردازد که در نگاه اول به نظر می‌رسد رفتار تصادفی داشته باشند اما در واقع همین سیستم تحت حاکمیت قوانین مشخصی است و یا به عبارتی در هر بی‌نظمی، نظمی نهفته است. چنین سیستمی به شرایط اولیه بسیار حساس است بگونه‌ای که ورودی‌های به ظاهر ناچیز و دلخواه قادرند اثرات شگرفی بر روی آن داشته باشند. به چنین سیستم‌هایی، سیستم‌های آشوبناک گفته می‌شود. پس ناپایداری، رفتار غیر دوره‌ای، سیستم‌های قطعی، غیر خطی بودن، در کنار همدیگر یک سیستم آشوبناک را تعریف می‌نمایند. نظریه آشوب برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط دانشمندی به‌نام ادوارد لورنز[۱] در هواشناسی به‌کار برده شد و سپس در حیطه تمام علوم و مباحث تجربی، ریاضی، رفتاری، مدیریتی و اجتماعی وارد شده و اساس تغییرات بنیادی در علوم بویژه هواشناسی، نجوم، مکانیک، فیزیک، ریاضی، زیست‌شناسی، اقتصاد و مدیریت را فراهم آورده است [۹].

سولوماتین و همکاران (۲۰۰۱)، تخمین سطح آب دریای شمال را با استفاده از نظریه آشوب و شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام دادند. نتایج، برتری روشهای غیر خطی برای سری‌های زمانی تک متغیره را نسبت به مدل های خطی همچون خود همبستگی و مدل آریما، در تخمین سطح موج آب در منطقه ساحلی نشان دادند [۱۴]. استهلیک (۲۰۰۳) به بررسی آشوب-پذیری دبی روزانه رودخانه پرداخت. در این تحقیق با توجه به مفهوم تاخیر زمانی، دو سری از داده‌های دبی رودخانه اولریسکا[۲] در جمهوری چک، با مدت تاخیر زمانی مختلف، برای بررسی امکان رفتار آشوبی داده‌ها و برآورد تاثیر مدت زمان تاخیر در ماهیت جاذب‌های متناظر، تجزیه و تحلیل شدند [۱۵]. ریگوندا و همکاران (۲۰۰۴) داده‌های جریان سه رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف روزانه، پنج روزه و هفت روزه را از نظر آشوب-پذیری بررسی نمودند. تعدادی از سری داده‌ها رفتار آشوبناک و برخی رفتار تصادفی را نشان دادند [۱۳]. خان و همکاران (۲۰۰۵) امکان وجود سیگنال‌های آشوبی در سری‌های زمانی محدود را بررسی نموده و نشان دادند که داده‌های هیدرولوژیکی محدود نیز می‌توانند رفتار آشوبناکی از خود نشان دهند [۱۲]. کوجاک و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل پیش‌بینی موضعی نظریه آشوب، پیش‌بینی جریان ماهانه سد یامولا[۳] را مورد مطالعه قرار دادند که پیش‌بینی‌های کوتاه مدت، نتیجه بهتری نسبت به روش‌های دیگر نشان داد [۸]. داملا و یالچین (۲۰۰۷) به پیش-بینی حجم سیلاب‌ها با استفاده از نظریه آشوب پرداختند و نشان دادند که مقادیر پیش‌بینی شده با نظریه آشوب نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده با مدل سری‌های زمانی، دقت قابل ملاحظه‌ای دارد [۵]. اِن جی و همکاران (۲۰۰۷) کاربرد روش‌های تحلیلی آشوبناک را بر روی سری‌های جریان نویزدار روزانه بررسی نمودند [۱۷]. وو و همکاران (۲۰۰۹) از مدل آشوب و مدل هندسی فرکتال برای تخمین سری زمانی کیفیت آب با تعداد داده‌های کم استفاده و نتایج را با مدل خاکستری و مدل سری زمانی AR مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که دقت تخمین مدل آشوب بیشتر از مدل خاکستری و همچنین مدل سری زمانی AR است [۷]. شانگ و همکاران(۲۰۰۹) روش مدل سری زمانی غیرخطی دینامیکی یا نظریه آشوبی را برای تحلیل داده‌های رسوبات معلق بکار گرفتند. نتایج نشان دادند که خصوصیات آشوبناک در پدیده انتقال رسوب وجود داشته و روش‌های برپایه دینامیک فضای حالت می‌تواند برای تحلیل و پیش‌بینی غلظت رسوبات معلق استفاده شود [۱۱]. زالدیوار و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از نظریه آشوب، ترازهای ماکزیمم سطح آب در بندر ونیز ایتالیا را مطالعه و نشان دادند که روش-های مبتنی بر نظریه آشوبی قابلیت شبیه‌سازی نوسانات ترازهای سطح آب را بخوبی دارد [۱۸].

با توجه به اهمیت ارتفاع موج شاخص بعنوان ارتفاع موج طراحی و نیز قابلیت‌های بالای نظریه آشوب در شبیه سازی

فرآیندهای مختلف طبیعی، در این تحقیق سعی شده است ارتفاع موج شاخص ساعتی دریای خزر در منطقه ورودی بندر انزلی با این روش بررسی و توانایی تخمین ارتفاع ساعتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بازسازی فضای حالت[۴]

مفهوم فضای حالت، ابزاری سودمند برای مطالعه سیستم‌های دینامیک است. طبق این مفهوم، یک سیستم دینامیک می‌تواند توسط یک نمودار فضای حالت توصیف شود. این سیستم شامل یک مختصات با متغیرهایی است که در فرمول ریاضی آن وجود دارد و متغیرها نشان دهنده وضعیت سیستم در هر لحظه خاص می‌باشند. تکنیک متداولی که توسط تاکن[۵] ارائه شده از روش تاخیر برای نگاشتن یک سری زمانی واحد در یک فضای de بعدی استفاده می‌نماید [۱۶]. روش تاکن به بیان ساده به این صورت است که شبکه‌ای به طول m از روی سری زمانی عبور داده شده و به این ترتیب یک ماتریس با تعداد سطرهای برابر m تشکیل می‌یابد، برای سری زمانی داریم:

$$x(t) = (x_0, x_1, x_2, x_3, ..., x_i, ...) \qquad (۱)$$

ماتریس برای بازسازی خط سیر اینگونه است:

$$X = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_{m-1} \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_m \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_{m+1} \\ \vdots & & & & \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

تاکن نشان داده است که چنین ماتریسی کلیه ویژگی‌های هندسی سیستم دینامیکی اولیه را بدون اینکه با خودش برخوردی داشته باشد بیان می‌نماید. انتخاب هوشیارانه تاخیرها (تغییر دوره نمونه‌برداری مقادیر متوالی Xi) با تاثیر بر وسعت جاذب نتیجه را بهتر می‌کند.

برای سری‌های زمانی اسکالر که t=۱,۲,۳,... فضای حالت می‌تواند با استفاده از تاخیرها ایجاد شود. ایده اساسی درباره نحوه انتخاب زمان تاخیر آنست که ارزیابی هر متغیر مجزای سیستم توسط متغیرهای دیگر سیستم تعیین می‌شود که دارای اثر متقابل هستند. بنابراین اطلاعات هر متغیر وابسته در تاریخچه هر متغیر مستقل دیگر سیستم وجود خواهد داشت. بر اساس چنین معادل‌سازیی، فضای حالت می‌تواند با استفاده از المان x_t سری‌های زمانی ایجاد شود و تاخیر آن طبق سری‌های زمانی جدید خواهد بود:

$$Y_t = \{x_t, x_{t-\tau}, x_{t-2\tau}, \ldots, x_{t-(m-1)\tau}\} \qquad (۳)$$

که در آن τ، نشان‌دهنده زمان تاخیر بوده و در سری‌های زمانی عددی، برابر با حاصلضرب زمان نمونه‌برداری می‌باشد و m، اندازه محاط شده را نشان می‌دهد [۱۰].

انتخاب زمان تاخیر مناسب در تحلیل‌های بعدی بطور کامل موثر است و انتخاب دلخواه آن، برای استخراج دینامیک داده‌ها مناسب نیست. اگر زمان تاخیر در مقایسه با مقیاس‌های زمانی مربوط به ذات سیستم بسیار کوچک انتخاب شود، مولفه‌های متوالی در برابر تاخیر به شدت به هم نزدیک و وابسته هستند. بنابراین، تمام بردارهای تاخیر در فضای محاط m بعدی در حوالی محور قطری فضا متمرکز می‌شوند. این پدیده با عنوان افزودگی نامیده شده است. از طرف دیگر، اگر زمان تاخیر τ بسیار بزرگ انتخاب شود، مولفه‌های متفاوت بطور کامل ناهمبسته می‌شوند. در این حالت جاذب بازسازی شده ممکن است بسیار پیچیده شود حتی اگر جاذب واقعی سیستم ساده باشد [۱].

فراسر و سوینی (۱۹۸۶) برای تعیین زمان تاخیر[۶] مناسب، استفاده از تابع میانگین اطلاعات متقابل[۷] (AMI) بین داده‌های سری زمانی را پیشنهاد نمودند [۳]. اطلاعات متقابل بین اندازه $y(t)$ و اندازه $y(t+\tau)$ عبارت است از میزان فراگیری در مورد اندازه‌گیری $y(t+\tau)$ با استفاده از اندازه‌گیری $y(t)$. تابع میانگین اطلاعات متقابل که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$I(\tau) = \sum_{t,t+\tau} p(y(t), y(t+\tau)).\log_2\left[\frac{p(y(t), y(t+\tau))}{p(y(t)).p(y(t+\tau))}\right] \qquad (۴)$$

بمنظور محاسبه میانگین اطلاعات متقابل $I(\tau)$ لازم است که احتمال‌های مجزا $p(y(t))$ و $p(y(t+\tau))$ موجود در رابطه (۴) تخمین زده شود و برای محاسبه آنها هیستوگرام مربوط به $y(t)$ و $y(t+\tau)$ در نظر گرفته می‌شود و برای محاسبه احتمال مشترک $p(y(t), y(t+\tau))$ از هیستوگرام بردار $(y(t), y(t+\tau))$ استفاده می‌شود. فراسر و سوینی اولین مینیمم تابع میانگین اطلاعات متقابل را بعنوان زمان تاخیر مناسب معرفی کردند.

متداول‌ترین روش تعیین بعد محاط[۸] بهینه (m) از سری‌های زمانی آشوبی، روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب[۹] می‌باشد. در این روش بررسی می‌شود که چه موقع انقطاع کاذب در مسیرهای حالت که از تصویر نمودن جاذب در یک فضا با بعد پایین ناشی شده است، متوقف می‌گردد. در این روش ابتدا

با در نظر گرفتن m مولفه برای هر بردار تاخیر، می‌توان بردارهای تاخیر $Y_i(t)$ را مطابق رابطه ۵ در فضای محاط تشکیل داد:

$$Y_i(t) = \left[y(t), y(t-\tau), \ldots, y(t-(m-1)\tau)\right]^T \qquad (۵)$$

rامین همسایه هر بردار تاخیر $Y_i(t)$ عبارت است از:

$$Y_r^{NN}(t) = \left[y(t_r), y(t_r-\tau), \ldots, y(t_r-(m-1)\tau)\right]^T \qquad (۶)$$

که در آن r=۱,۲,...,۵ و فاصله بین دو بردار همسایه بر اساس جمله اقلیدسی به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$R_m^2 = \sum_{i=0}^{m-1}\left[y(t-i\tau) - y(t_r - i\tau)\right]^2 \qquad (۷)$$

اگر بردار $Y_r^{NN}(t)$ یک همسایه واقعی برای بردار $Y_i(t)$ باشد، این همسایگی ناشی از ماهیت دینامیکی سیستم است ولی اگر این همسایگی در اثر تصویر از یک فضا با بعد بالاتر به فضایی با بعد پایین صورت گرفته باشد، در این صورت با رفتن از بعد m به $m+1$، این همسایه‌های کاذب از همسایگی بردار $Y_i(t)$ خارج می‌شوند. با افزایش بعد m به $m+1$، مولفه‌های اضافه شده به بردارهای تاخیر $Y_i(t)$ و $Y_r^{NN}(t)$، به ترتیب $y(t-m\tau)$ و $y(t_r-m\tau)$ خواهند بود بنابراین فاصله بین دو بردار بر اساس نرم اقلیدسی در فضای $m+1$ بعدی بطور مشابه عبارت است از:

$$R_{m+1}^2 = R_m^2 + \left[y(t-m\tau) - y(t_r - m\tau)\right]^2 \qquad (۸)$$

بنابراین، فاصله اضافه شده در فضای $m+1$ بعدی را نسبت به فاصله دو بردار در فضای m بعدی بصورت رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2 - R_m^2}{R_m^2}} = \frac{\left|y(t-m\tau) - y(t_r - m\tau)\right|}{R_m} \qquad (۹)$$

هرگاه کمیت گفته شده از یک مقدار آستانه (حدود ۱۵-۱۰) فراتر برود، همسایه تحت بررسی، کاذب در نظر گرفته می شود [۱].

۲-۲- بعد همبستگی

بعد همبستگی[۱۰] یکی از روش‌های مرسوم جهت تعیین آشوبناکی سیستم و همچنین بعد آشوبی می‌باشد. برای فضای حالت mبعدی، تابع همبستگی $C(r)$ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C(r) = \lim_{N\to\infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j}^{(1\le i<j\le N)} H\left(r - \left|Y_i - Y_j\right|\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن H، یک تابع هویساید پله‌ای با $u \ge 0$ بر $H(u)=1$ و $u \le 0$ بر $H(u)=0$ بوده و $u = r - \left|Y_i - Y_j\right|$، N تعداد نقاط در فضای مزبور، r شعاع کره ساخته شده به مرکز Y_i یا Y_j می‌باشد. برای مقادیر مثبت r، تابع همبستگی $C(r)$ با رابطه (۱۱) به r مربوط می‌شود:

$$C(r)_{\substack{r\to 0\\ N\to\infty}} \approx a r^{D_2} \qquad (۱۱)$$

که در آن a، یک ضریب ثابت بوده و D_2 توان همبستگی می‌باشد که از رابطه (۱۲) بدست می‌آید:

$$D_2 = \lim_{\substack{r\to 0\\ N\to\infty}} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \qquad (۱۲)$$

از آنجائیکه مجموعه داده‌ها پیوسته نخواهد بود، شعاع کره نمی‌تواند مقادیر نزدیک به صفر داشته باشد، در نتیجه $\log C(r)$ بر $\log(r)$ تقسیم شده و از آن حد گرفته می‌شود و سپس قسمت خطی نمودار حاصل از آن انتخاب می‌شود. در نتیجه این کار، مقدار D_2 حاصل می‌شود. با استفاده از رسم D_2 در مقابل m برای فرایندهای تصادفی، D_2 بدون رسیدن به یک مقدار اشباع با افزایش m تغییر می‌کند در حالیکه برای فرایندهای قطعی مقدار D_2 بعد از یک m معین اشباع می‌گردد. مقدار اشباع، بعد فرکتالی (بعد همبستگی) جاذب یا سری زمانی است [۲].

بمنظور بررسی آشوب‌پذیری و تخمین بعد همبستگی مناسب می‌توان از سه نمودار استفاده نمود:

نمودار log*C*(*r*)/log(*r*) در مقابل تغییرات log(*r*): با استفاده از این منحنی می‌توان ناحیه مقیاس‌گذاری را تشخیص داد، یعنی ناحیه‌ای که در آن به ازای مقادیر پیوسته log(*r*) نسبت log*C*(*r*)/log(*r*) به ازای ابعاد محاط مختلف به مقدار ثابتی رسیده و اشباع می‌شود که همان بعد فرکتال است.

نمودار log*C*(*r*) در مقابل تغییرات log(*r*): با استفاده از روش حداقل مربعات می‌توان در ناحیه مقیاس‌گذاری شیب نمودار(توان همبستگی) را به ازای ابعاد محاط مختلف محاسبه نمود.

نمودار تغییرات توان همبستگی در برابر ابعاد محاط مختلف. با استفاده از این نمودار می‌توان رفتار آشوبناک و بعد همبستگی مناسب را تشخیص داد.

۲-۳- پیش‌بینی موضعی[۱۱]

همانطور که گفته شد، با در نظر گرفتن سری‌های زمانی تک متغیره، می‌توان فضای حالت را بوجود آورد. فرض می‌شود که سری‌های زمانی از یک سیستم دینامیک دارای رفتار بی‌نظم با

بعد m در فضای حالت تشکیل شده‌اند، برای این سری‌های زمانی خواهیم داشت:

$$x_i \in R, i = 1,2,\dots,N \qquad (۱۳)$$

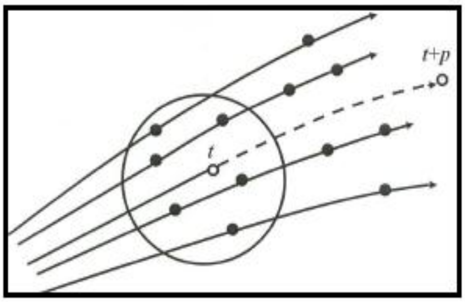
$$X_i = (x_i, x_{i-\tau},\dots,x_{i-(m-1)\tau}) \in R^m \qquad (۱۴)$$

$$i = 1+(m-1)\tau, 2+(m-1)\tau,\dots,N-1,N \qquad (۱۵)$$

X_i بردار m بعدی از مقادیر x_i، $x_{i-\tau}$، $x_{i-2\tau}$، ... و $x_{i-(m-1)\tau}$ است. چنین روندی بیانگر ساختار فضای حالت با توجه به مشخصات جاذب می‌باشد. در چنین فضای m بعدی، پیش‌بینی با تقریب تغییر X_i با زمان صورت می‌گیرد. با در نظر گرفتن ارتباط بین نقاط X_t و X_{t+p} در زمان P، جاذب توسط تابع F بصورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$X_{t+P} \cong F(X_t) \qquad (۱۶)$$

روش تقریب موضعی و مدل آن در شکل (۱) نشان داده شده است. در این روش پیش‌بینی، تغییر X_t با زمان در جاذب، فرض می‌شود که با نقاط نزدیک آنها یکسان باشد. در اینجا X_{t+p} توسط ترتیب dام از تابع چند گانه $F(X_t)$ تعیین می‌شود [۸].



شکل (۱): مکانیزم پیش‌بینی موضعی و مدل آن

تخمین موضعی فرایند با رابطه (۱۷) انجام می پذیرد که X_{t+p} بوسیله چند جمله‌ای مرتبه dام قابل تعیین است:

$$x_{t+p} \cong f_0 + \sum_{k_1=0}^{m-1} f_{1k_1} X_{t-k_1\tau} + \sum_{\substack{k_2=k_1\\ k_1=0}}^{m-1} f_{2k_1k_2} X_{t-k_1\tau} X_{t-k_2\tau} + \dots + \sum_{\substack{k_d=k_{d-1}\\ \vdots \\ k_2=k_1\\ k_1=0}}^{m-1} f_{dk_1k_2\dots k_d} X_{t-k_1\tau} X_{t-k_2\tau} \dots X_{t-k_d\tau} \qquad (۱۷)$$

با استفاده از n تعداد X_{T_h} و $X_{T_{h+p}}$ برای مقادیر از پیش تعیین شده، ضرایب f توسط معادله (۱۸) تعیین می‌شوند:

$$x \cong Af \qquad (۱۸)$$

که در این رابطه

$$x = (x_{T_{1+p}}, x_{T_{2+p}},\dots,x_{T_{n+p}}) \qquad (۱۹)$$

و

$$f = (f_0, f_{10}, f_{11},\dots,f_{1(m-1)}, f_{200},\dots,f_{d(m-1)(m-1)\dots(m-1)}) \qquad (۲۰)$$

و A ماتریکس ژاکوبین $n \times (m+d)!/m!d!$ می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌شود:

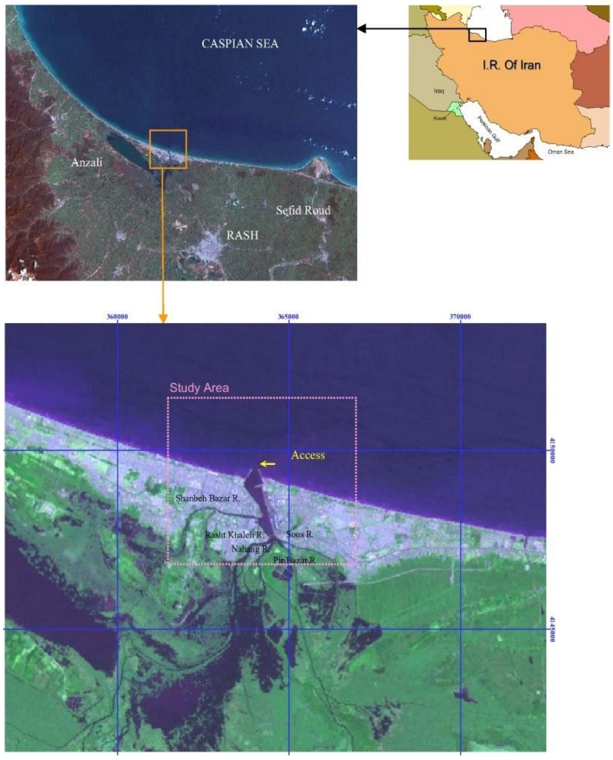
$$A = \begin{bmatrix} 1x_{T_1} & x_{T_{1-\tau}} & \dots & x_{T_{1-(m-1)\tau}} & x_{T_1}^2 & \dots & x_{T_{1-(m-1)\tau}}^d \\ 1x_{T_2} & x_{T_{2-\tau}} & \dots & x_{T_{2-(m-1)\tau}} & x_{T_2}^2 & \dots & x_{T_{2-(m-1)\tau}}^d \\ \vdots & \vdots & & & \vdots & & \vdots \\ 1x_{T_n} & x_{T_{n-\tau}} & \dots & x_{T_{n-(m-1)\tau}} & x_{T_n}^2 & \dots & x_{T_{n-(m-1)\tau}}^d \end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$

گفتنی است که اگر f حتی یک چند جمله‌ای درجه اول باشد، پیش‌بینی باز هم بصورت غیرخطی خواهد بود، زیرا در طی فرایند پیش‌بینی، هر نقطه از $x(t)$ دارای همسایگی متفاوت خواهد بود که منجر به همسایگی‌های متفاوت و بیان‌های متفاوت برای f خواهد شد [۴].

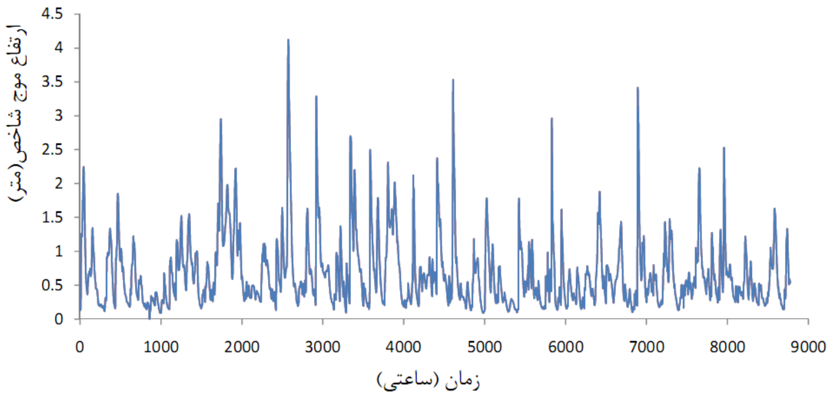
۳- منطقه و داده‌های مورد استفاده

ارتفاع‌های موج شاخص ثبت شده توسط بویه در منطقه ورودی بندر انزلی دریای خزر در محدوده ″۲۷ ′۲۷ °۴۹ طول شرقی و ″۲۷ ′۲۸ °۳۷ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۲).

داده‌های ساعتی ارتفاع موج شاخص از ساعت ۱۴ تاریخ ۱۹۹۸/۶/۲۳ تا ساعت ۱۴ تاریخ ۱۹۹۹/۶/۲۳ جهت این مطالعه انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفت که نمودار سری زمانی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. خصوصیات آماری مقادیر ارتفاع موج شاخص مورد استفاده در این تحقیق محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۲): موقعیت بویه در ورودی بندر انزلی



شکل (۳): سری زمانی ارتفاع موج شاخص دریای خزر در مدت یک سال

جدول (۱): خصوصیات آماری ارتفاع موج شاخص دریای خزر

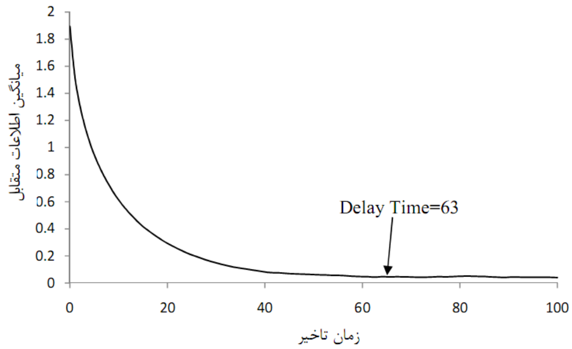
مشخصه های آماری	ارتفاع موج شاخص (متر)
تعداد داده ها	۸۷۷۳
میانگین	۰/۶۸
انحراف معیار	۰/۵۲
حداکثر مقدار	۴/۱۲
حداقل مقدار	۰/۰۰۰۱
ضریب چولگی	۱/۹۸
ضریب کشیدگی	۵/۵۶

۴- نتایج و بحث

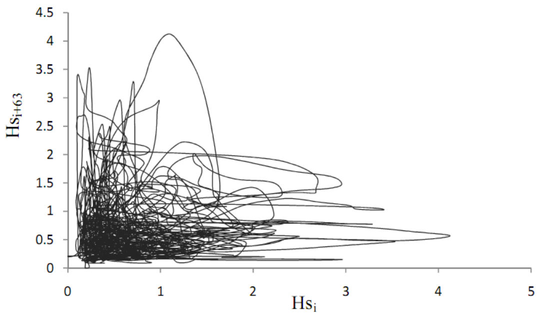
نخستین گام برای بازسازی فضای حالت تخمین عوامل زمان تاخیر (τ) و بعد محاط (m) می‌باشد. سری داده‌های ارتفاع موج شاخص ساعتی در طی یک سال به دو قسمت تقسیم شد که ۱۱ ماه برای ایجاد فضای حالت، (تخمین زمان تاخیر، بعد محاط) به‌کار رفته و مقادیر سری ارتفاع‌های موج ماه آخر یعنی از ۱۹۹۹/۵/۲۳ تا ۱۹۹۹/۶/۲۳ جهت فرایند پیش‌بینی انتخاب شده است.

در این تحقیق زمان تاخیر با استفاده از روش تابع میانگین اطلاعات متقابل محاسبه و اولین مینیمم نسبی تابع به عنوان مناسب‌ترین زمان تاخیر لحاظ شده است. همانطور که از شکل ۴ مشخص است زمان تاخیر $\tau =$ ۶۳ به عنوان مناسب‌ترین زمان

در نظر گرفته شده است. شکل (۵) فضای حالت ساخته شده با زمان تاخیر محاسبه شده را نشان می‌دهد:

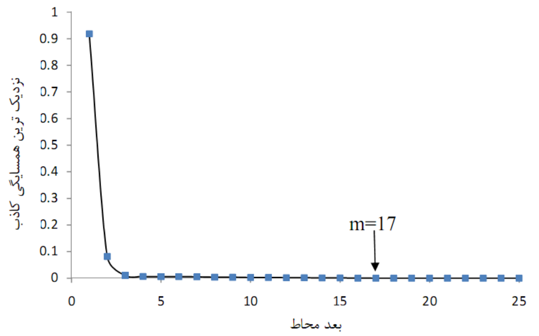


شکل (۴): تابع خود همبستگی به ازای زمان‌های تاخیر متفاوت



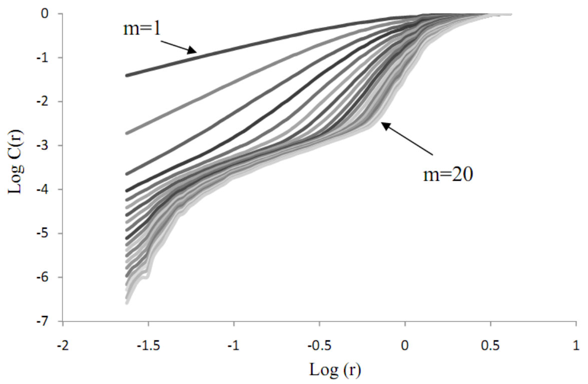
شکل (۵): فضای حالت دبی روزانه با زمان تاخیر ۶۳ ساعت

دومین عامل فضای حالت، بعد محاط می‌باشد که در این مطالعه از روش نزدیکترین همسایگی کاذب استفاده شده است. مطابق شکل (۶)، بعد محاط محاسبه شده برای سری داده‌های ساعتی دریای خزر برابر ۱۷ بدست آمد.

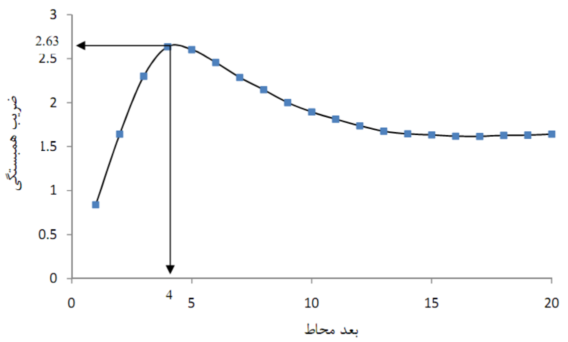


شکل (۶): مقادیر نزدیک ترین همسایگی کاذب برای ابعاد محاط مختلف

از روش بعد همبستگی برای بررسی آشوبناکی و تعیین بعد فرکتالی استفاده شد. تابع مربوط به بعد همبستگی به ازای زمان تاخیر τ =۶۳ و بعد محاط (m) از ۱ تا ۲۰ محاسبه و ارتباط میان تابع همبستگی $C(r)$ و شعاع r با افزایش m در شکل (۷) نشان داده شده است. برای تعیین بعد همبستگی و بررسی آشوب‌پذیری داده‌ها، مقادیر شیب منحنی‌ها با استفاده از روش حداقل مربعات در فاصله ۱/۲- تا ۰/۲- از $\log(r)$ و نیز به ازای تمامی مقادیر r (روی محور y ها) در فاصله ۰/۲- تا ۴/۵- از $\log C(r)$ محاسبه و نتایج در شکل (۸) ارائه شده است. در این شکل مقادیر شیب یا همان بعد همبستگی به ازای مقادیر مختلف بعد محاط در دو فاصله گفته شده نشان داده شده است. بعد همبستگی با افزایش بعد محاط تا یک مقدار مشخص یعنی m=۴ افزایش یافته و در این مقدار اشباع می‌شود به همین دلیل بعد همبستگی مناسب برای داده‌های ساعتی، برابر با D_2=۲/۶۳ در نظر گرفته شده است و همچنین اشباع شدن بعد همبستگی دلالت بر آشوب‌پذیر بودن تغییرات ارتفاع موج شاخص دریای خزر دارد.

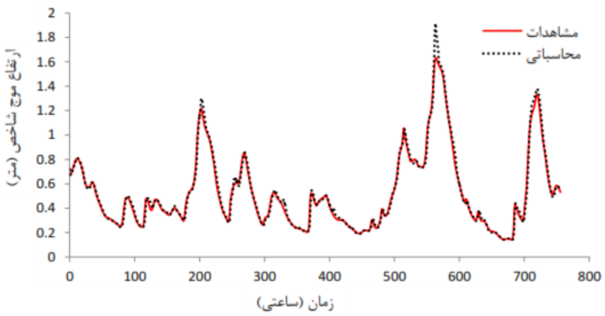


شکل (۷): نمودار مربوط به ارتباط میان تابع همبستگی C(r) و شعاع r با افزایش مقادیر بعد محاط

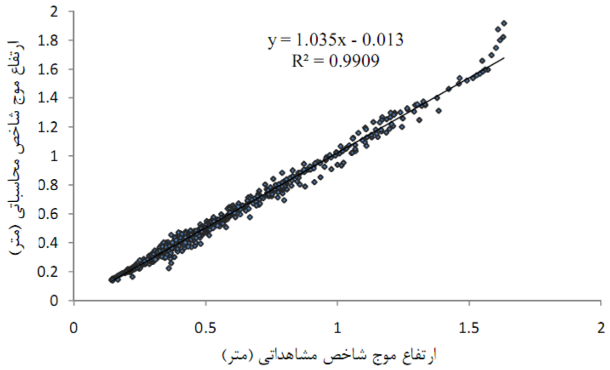


شکل (۸): نمودار تغییرات بعد همبستگی با افزایش بعد محاط ارتفاع موج شاخص ساعتی دریای خزر

در ادامه برای فرایند پیش‌بینی، الگوریتم پیش‌بینی موضعی به‌کار برده شده و همه مراحل محاسبات برای ماه آخر، به عنوان دوره آزمایش انجام شده است. ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا برای مقادیر مشاهداتی و محاسباتی ارتفاع موج شاخص ساعتی دریا برای داده‌های ماه آخر بترتیب برابر با ۰/۹۹۰۹ و ۰/۰۳۳۵ حاصل شد. نمودار مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در شکل ۹ و نمودار پراکنش آنها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۹ مشخص است، ارتفاع موج محاسباتی و مشاهداتی به جز در مقادیر ماکزیمم بسیار نزدیک به هم بوده که این امر بیانگر دقت قابل قبول این نظریه در پیش‌بینی و همچنین مناسب بودن پارامترهای محاسبه شده است.



شکل (۹): نمودار مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی ارتفاع موج شاخص ساعتی



شکل (۱۰): پراکنش مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بعد محاط ۱۷ و زمان تاخیر ۶۳

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر تلاش برای بررسی عملکرد نظریه آشوب برای مدل‌سازی ارتفاع موج شاخص ساعتی در ناحیه ورودی بندر انزلی در طول یک سال آماری است. با استفاده از روش‌های تابع خودهمبستگی و شمارش نزدیک‌ترین همسایگی کاذب، مقادیر زمان تاخیر $\tau = ۶۳$ و بعد محاط $m = ۱۷$ جهت بازسازی فضای حالت برای بررسی رفتار دینامیکی ارتفاع موج ساعتی بدست آمد. نتایج حاصل از بعد همبستگی به‌عنوان شاخصی جهت تمایز بین رفتار آشوبناک و تصادفی بکار گرفته شد. بعد همبستگی بدست آمده برابر با ۲/۶۳ و حاکی از رفتار آشوبناک و بعد کم ارتفاع موج ساعتی است. پیش‌بینی موضعی انجام گرفته نیز بجز در موارد ماکزیمم، نتایج خوبی ارائه داده است. البته در نواحی ماکزیمم مقادیر محاسباتی از مقادیر مشاهداتی بیشتر شد که این نتیجه در جهت اطمینان می‌باشد. این امر یعنی قابلیت نظریه آشوب در مطالعه نوسانات سطح آب دریاها در نتایج تحقیقات زالدیوار و همکاران (۱۹۹۸) نیز به اثبات رسیده است.

۶- مراجع

[۱] پری زنگنه، م.؛ عطائی، م.؛ معلم، پ.؛ "بازسازی فضای حالت سری‌های زمانی آشوبی با استفاده از یک روش هوشمند"، نشریه الکترونیک و قدرت دانشکده مهندسی برق. سال اول. ش ۲، ص ۳ تا ۱۰، ۱۳۸۸ .

[۲] Elshorbagy, A.; Simonovic, S. P.; Panu, U.S.; “Estimation of missing stream flow data using principles of chaos theory”, Journal of Hydrology, No. 255, pp. 123 – 133. , 2002.

[۳] Fraser, A.; Swinney, H.L.; “Independent coordinates for strange attractors from mutual information”, Phys. Rev. A, No. 33, pp. 1134 – 1140, 1986.

[۴] Porporato, A.; Ridolfi, L.; “Nonlinear analysis of river flow time sequences”, Water Resources Research, No. 33(6), pp. 1353 - 1367, 1997.

[۵] Damle, C.; Yalcin, A.; “Flood Prediction Using Time Series Data Mining”, Journal of Hydrology, No. 333, pp. 305 – 316, 2007.

[۶] Chakrabarti, S.K.,; Hydrodynamics of Offshore Structures, WIT Press, UK, 2001.

[۷] Wu, J.; Lu, J.; Wang, J.; “Application of chaos and fractal models to water quality time series prediction”, Environmental Modelling & Software, No. 24, pp. 632 – 636, 2009.

[۸] Kocak, K.; Bali, A.; Bektasoglu, B.; “Prediction of Monthly Flows by Using Chaotic Approach”. International congress on river basin management, 22-24 March, Antalya, Turkey, Chp 4, No. 117, 553 – 559, 2007.

[۹] Kocak, K.; Saylan, L.; Sen, O.; “Nonlinear Time Series Prediction of O3 Concentration In Istanbul”, Atmosphere Environment, No. 34, pp. 1267 - 1271, 2000.

[۱۰] Kennel, M.; Brown, R.; Abarbanel, H.D.I.; “Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction”. Physical Review A, No. 45(6), pp. 3403 – 3411, 1992.

[۱۱] Shang, P.; Na, X.; Kamae, S.; “Chaotic analysis of time series in the sediment transport phenomenon”, Chaos, Solitons and Fractals, No. 41, pp. 368 – 379, 2009.

[۱۲] Khan, S.; Ganguly, A.R.; Saigal, S.; “Detection and Predictive Modeling of Chaos in Finite Hydrological Time Series”, Nonlinear Processes in Geophysics, No. 12, pp., 41 – 53,2005.

[۱۳] Regonda, S.K.; Sivakumar, B.; Jain, A.; “Temporal scaling in river flow: can it be chaotic?”, Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, No. 49(3), June. 2004.

[۱۴] Solomatine, D.P.; Velickov, S.; Wust, J.C.; “Predicting Water Levels and Currents in the North Sea Using Chaos Theory and Neural Networks”. Proc. 29 th Iahr Congress, Beijing, China, September, pp. 1-11, 2001.

[۱۵] Stehlik, J.; “Deterministic Chaos in Runoff Series”. Czech Hydro meteorological institute, Dept of Experimental Hydrology, 143, 06 prague, 2003.

[۱۶] Takens, F.; “Detecting strange attractors in turbulence”. In: Rand, D.A., Young, L.S. (Eds.), Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics, vol. 898, pp: 366–381 , 1981.

[۱۷] Ng, W.W.; Panu, U.S.; Lennox, W.C., “Chaos based Analytical techniques for daily extreme hydrological observations”, Journal of Hydrology, No. 342, pp. 17 – 41, 2007.

[۱۸] Zaldivar, J.M.; Strozzi, F.; Gutierrez, E.; Shepherd, I.M.; Tomasin, A.; “Early detection of high water at Venice Lagoon using chaos theory techniques”. In Babovic, V., Larsen, L.C. (Eds.), Proceedings of the Third International Conference on Hydro informatics ’98, vol. 2. Danish Hydraulic Institute, Copenhagen, pp. 1483 – 1490, 1998.

۷- پی نوشت ها

[۱] Edward Lorenz
[۲] Uhlirska
[۳] Yamula Dam
[۴] Reconstruction of Phase Space
[۵] Taken
[۶] Delay Time
[۷] Average Mutual Information
[۸] Embedding Dimension
[۹] False Nearest Neighbors
[۱۰] Correlation Dimension
[۱۱] Local Prediction