# پیش‌بینی تراز آب دریای خرز مبتنی بر سیستم تقریبگر فازی

فرهاد رمضانی موزیرجی[۱]  مهدی یعقوبی[۲]  عبدالعظیم قانقرمه[۳]

(دریافت ۸۸/۱۰/۲۶  پذیرش ۸۹/۱۱/۲)

## چکیده

**تراز آب دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین پهنه آبی بسته دنیا دائماً در حال نوسان است. اهمیت پیش‌بینی تراز آب دریای خزر با توجه به نوسانات چند متری دهه‌های اخیر و همچنین جلوگیری از زیان‌های آینده امری ضروری محسوب می‌گردد. عامل تنظیم کننده تراز این پهنه آبی یک‌سری عوامل هیدروکلیمایی مانند ورودی‌ها شامل رودخانه‌ها، بارش و آبهای زیرزمینی و خروجی‌ها شامل تبخیر و خروج به خلیج قره بغاز است. از تکنیک‌های آماری می‌توان به‌منظور مدل‌سازی فرایندها استفاده کرد. همچنین از تکنیک‌های فازی برای شناسایی سیستم و پیش‌بینی سری‌های زمانی استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از ترکیب تکنیک‌های آماری و سیستم‌های فازی، یک روش پیش‌بینی از تغییرات تراز این پهنه آبی پیشنهاد شد. نتایج آزمایش‌های پیش‌بینی بر روی داده‌های گذشته اعمال گردید و مزایای روش پیشنهادی بر حسب دقت نشان داده شد و در نهایت یک پیش‌بینی ۱۰ ساله از تراز آب دریای خزر ارائه گردید.**

***واژه‌های کلیدی***: پیش‌بینی، دریای خزر، رگرسیون، سیستم فازی، مدل‌سازی

# Caspian Sea Level Predication Based on Fuzzy Regressor System

*Farhad Ramezani Mouzirji*[1]  *Mehdi Yaghoobi*[2]  *Abdolazim Ghanghermeh*[3]

*(Received Jan. 16, 2010  Accepted Jan. 22, 2011)*

Abstract

The level of the Caspian Sea as the world's largest limited river basin is constantly fluctuating. The Importance of forecasting the Caspian Sea water level, in order to few meters fluctuation in recent decades and preventing future loss is considered to be essential. The agentes of water level regulator in Caspian sea are hydro climatology factors such as input series including rivers, rainfall and underground water and output including evaporation and discharge to Ghareboghaz gulf. Statistical techniques were used for modeling processes. Fuzzy techniques were also used for identification of the system and the time series prediction. In this article, a prediction of level fluctuating of this water area was suggested using combination of statistical combining statistical techniques and Fuzzy Systems. The Results of prediction experiments is exerted on the past data and advantage of the proposed method was shown according to the accuracy. Finally a 10-year forecast of the Caspian Sea level was presented.

Keywords: Predicting, Caspian Sea, Regression, Fuzzy System, Modelling.

---

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری
(نویسنده مسئول) ۲۲۷۰۹۱۵ (۰۱۱۱) ramezani.farhad@gmail.com
۲- استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد
۳- استادیار ورئیس گروه پایش‌های محیطی دریا، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر، ساری

1. Ph.D. Student, Dept. of Cumputer Eng., Sari Branch, Islamic Azad University, Sari (Corresponding Author) (+98 111) 2270915 ramezni. farhad@gmail.com
2. Assist. Prof., Dept. of Cumputer Eng., Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashad
3. Assist. Prof. and Manger of Enironmental Sea Protection Group, Caspian Sea National Research Center, Sari

## ۱- مقدمه

دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین پهنه آبی بسته کره زمین، از نظر حجم و سطح دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای بوده و به مانند یک حساسه آب و هواشناسی از عرضهای جغرافیایی مجاور قطب تا مجاور حاره عمل می‌کند و هر گونه تغییر در شرایط هیدروکلیماتولوژیکی این عرصه، اثر خود را در تغییرات سطح دریا نشان می‌دهد [۱]. در سالهای ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۵ بالاآمدگی شدید سطح آب دریای خزر سبب نگرانی ساحل‌نشینان شد. این امر موجب تخریب منازل مسکونی، صیادی، تجاری، اداری و به زیر آب رفتن زمین‌های مزروعی و تهدید تعداد زیادی از شهرهای ساحلی به‌خصوص از نظر تصفیه فاضلاب شهر و بالاآمدگی سفره آب زیرزمینی گردید که خود پیامدهای خطرناک بهداشتی و عمرانی شهرها و روستاها را در پی داشت [۲].

بالاآمدگی سطح آب دریا در طی این دو دهه سبب شد که علل متعددی از جمله پدیده‌های زمین‌شناختی، ویژگی‌های هیدروکلیماتولوژیکی و عامل فعالیتهای انسانی در این زمینه ارائه شود. دیدگاهها و نظرات ارائه شده در مورد علل نوسانات دریای خزر را می‌توان به‌صورت کلی به دو دسته تقسیم کرد [۳]:

۱- عوامل زمین‌شناسی شامل فعال شدن گنبدهای نمکی در کف دریا، حرکت تکتونیکی و لغزش مخروط‌افکنه ولگا

۲- عوامل هیدرولوژیک مانند تغییرات دبی آب ولگا، گرم‌تر شدن زمین و ظهور کلفهای خورشیدی.

در دسته‌بندی دیگری اثر عوامل داخلی و خارجی بیان می‌شود [۴]. عوامل داخلی عبارت‌اند از فرایندهایی که مستقیماً بر سطح تراز دریای خزر و سواحل آن تأثیر داشته، موجب تغییر حجم آب دریا می‌گردند مانند فرایند تبادل رطوبت (تبخیر، ریزش جوی، ورودی از لایه‌های زیر زمینی) و حرکات تکتونیکی پوسته زمین. کلیه فرایندهای دیگر که بر تغییرپذیری عوامل داخلی تأثیر می‌گذارند جزء عوامل خارجی هستند. این عوامل سبب ایجاد زنجیره واحد ارتباطات علت و معلول گشته که در نهایت به تراز آب دریا ختم می‌شود.

با توجه به موارد گفته شده، به‌منظور کنترل آثار تخریبی دریا و ارائه راهکارهای مناسب لازم است که تخمینی نسبت به آینده تحولات تراز آب دریا وجود داشته باشد. پس از کاهش تراز آب در سال ۱۹۳۰، توجه خاصی به مسئله پیش‌بینی تراز آب مبذول گردید. روشهای پیش‌بینی در چند محور توسعه یافت که از این میان می‌توان روشهای غیر مستقیم، روشهای احتمالی، پیش‌بینی اقلیم شناسی و محاسبه تراز با استفاده از بیلان آب را نام برد [۵].

بولگوف و همکاران[1] تنها روش پیش‌بینی درست تراز آب دریا را از طریق ساخت مدل فیزیکی بیان کردند [۶]. به عقیده ایشان روش درست پیش‌بینی تراز آب دریا، مدل کردن سیستم و سپس دریافت نتیجه و خروجی سیستم است. روش بیلان آب در حد زیادی در مقایسه با روشهای دیگر با ماهیت ساختار مدل فیزیکی برای تراز آب دریا هماهنگ است [۷]. به‌طور کلی پیش‌بینی‌های انجام شده برای تراز آب دریای خزر بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۱ را می‌توان به‌صورت جدول ۱دسته بندی کرد [۲].تاکنون هیچ یک از پیش‌بینی‌های انجام شده در زمینه تراز آب دریای خزر به جواب کاملاً درستی نرسیده است. در دوره پیش‌آبی دریای خزر در حدود ۲۰ نوع پیش‌بینی از تراز آب انجام شده که از این میان، ۱۹ نوع آن دریای خزر را به‌حالت بالاآمدگی نشان می‌دهند در حالی که تنها یکی از این مدلها عقب‌نشینی را نشان می‌دهد [۲]. به‌نظر می‌رسد علت اصلی پیش‌بینی ناموفق، عدم وجود یک تصویر فیزیکی معادل از نحوه ایجاد تغییرات سالانه تراز آب دریا و یا همان فقدان یک مدل درست از سیستم دریای خزر است. قانقرمه در مطالعه‌ای بیان کرده است که نوسانات دریای خزر از الگوی رفتاری خاصی پیروی می کند. با توجه به نتایج مطالعه مذکور در صورتی که رفتار تغییرات تراز آب دریای خزر به‌صورت یک مدل شبیه‌سازی شود، می‌توان از طریق مدل شبیه‌سازی شده به پیش‌بینی رفتار آن دست یافت [۸].

در این مطالعه مدل‌سازی سیستم و روشهای مدل‌سازی شرح داده شد، سپس ساختار مدل پیشنهادی بیان شد و نتایج تجربی ارائه گردید.

## ۲- مدل‌سازی سیستم

فرایند تلاش در مسیر ایجاد و انتخاب معادل‌های ریاضی برای پدیده‌ها را مدل‌سازی می‌نامند. در مواردی که میّسر شود، مدل‌های ریاضی هم پدیده‌های طبیعی جهان را و هم ساخته‌ها و آفرینش‌های خود انسان را نمایش می‌دهند. مدل‌سازی‌های ریاضی را اغلب به‌منظور توضیح و تباین رفتار پدیده‌ها، پیش‌بینی و نیز کنترل آن‌ها انجام می‌دهند. امروزه استفاده از روشهای مدل‌سازی در کارهای صنعتی خصوصاً با گسترش علوم رایانه‌ای، کاربرد وسیعی پیدا کرده است [۹].

به‌طور کلی دو روش برای تقریب و تخمین مدل سیستم وجود دارد: روشهای کلاسیک و مبتنی بر مدل و روشهای آزاد از مدل. در سالهای اخیر روشهای غیر کلاسیک و آزاد از مدل مانند شبکه‌های عصبی و تکنیک‌های فازی در مسئله پیش‌بینی بسیار مورد توجه

[1] Bolgov et al.

**جدول ۱**- پیش‌بینی‌های انجام شده برای تراز آب دریای خزر بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۱[۱].

| شماره | نویسنده | سال | روش | سال | تراز | سال | تراز | سال | تراز |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | بودیکو و همکاران[1] | ۱۹۹۸ | Palaoeanalogus | ۲۰۰۰ | -۲۸/۱ | ۲۰۲۰ | -۲۷،۱ | ۲۰۵۰ | -۲۲،۴ |
| ۲ | لابانوو[2] | ۱۹۹۹ | Palaoeanalogus | ۲۰۰۰ | -۲۸/۶ | ۲۰۲۰ | -۲۷،۸ | ۲۰۵۰ | -۲۴،۲ |
| ۳ | فرولو[3] | ۱۹۹۵ | Probalility/Palaoe | ۲۰۱۰ | از ۲۷-به ۲۵-با احتمال ۹۰٪ | | | | |
| ۴ | گولیتسین[4] | ۱۹۹۸ | Sea Balance | با بیشترین احتمال در سال ۲۰۰۰ بین ۲۶- و ۲۷- | | | | | |
| ۵ | کلیگ[5] | ۱۹۹۴ | Sea Balance | ۲۰۰۵ | -۲۶ | ۲۰۱۰ | -۲۵/۵ با احتمال ۵۰٪ | | |
| ۶ | گلوبتسوو و همکاران[6] | ۱۹۹۵ | Atmospheric circul | ۱۹۹۵ | -۲۶/۵ | ۲۰۰۰ | -۲۶/۳ | ۲۰۱۰ | -۲۶/۲ |
| ۷ | رودینوو[7] | ۱۹۹۱ | Atmospheric circul | حداکثر ۲۶- | | | | | |
| ۸ | کرنگ و پوپوو[8] | ۱۹۹۱ | Atmospheric circul | حد بالایی از ۲۵- تا ۲۶- | | | | | |
| ۹ | درویدوو[9] | ۱۹۹۰ | Lapse rates | افزایش ارتفاع تا سال ۲۰۰۵ | | | | | |
| ۱۰ | سیدورنکوو[10] | ۱۹۹۰ | Atmospheric circul | افزایش ارتفاع تا سال ۲۰۱۰ | | | | | |
| ۱۱ | کیم و نیکولینا[11] | ۱۹۹۴ | North Atantic Cirucl | تا ۲۰۴۰ هر سال ۹ سانتیمتر افزایش | | | | | |
| ۱۲ | مالینین[12] | ۱۹۹۴ | Tele water air temp | ۲۰۰۰ | -۲۶/۵ | ۲۰۱۰ | -۲۵/۵ | | |
| ۱۳ | نایدنوو و همکاران[13] | ۱۹۹۳ | Statistical | ۲ سطح پایدار ۲۵/۵- و ۲۷/۷- سطح ناپایدار ۲۶/۴- | | | | | |
| ۱۴ | شلیامین[14] | ۱۹۹۳ | Solar cyclicity | تا ۲۰۰۰ افزایش تا ۲۰۲۰ کاهش و افزایش تا ۲۰۶۰ | | | | | |
| ۱۵ | آلیشاو و همکاران[15] | ۱۹۹۳ | Solar cyclicity | ۲۰۲۵ | -۲۵ | ۲۰۵۰ | -۲۵/۳ | ۲۱۰۰ | -۲۷ |
| ۱۶ | شکو[16] | ۱۹۹۳ | Solar cyclicity | تا ۱۹۹۹، ۱۲ سانتیمتر افزایش تا ۲۰۰۵ تکرار این روند | | | | | |
| ۱۷ | دوو انانین[17] | ۱۹۹۵ | Wolf Number | ۲۰۲۵ | -۲۵ | | | | |
| ۱۸ | گتمن[18] | ۲۰۰۱ | Wolf/Belinski | ۲۰۰۲ | -۲۵/۳ | ۲۰۰۶ | -۲۵/۵ | ۲۰۱۲ | -۲۴/۵ |
| ۱۹ | مرکز ملی مطالعات دریای خزر | ۱۹۹۶ | Sea Balance | ۲۰۰۰ | -۲۶/۳ | ۲۰۰۵ | -۲۵/۵ | ۲۰۱۰ | -۲۴ |
| ۲۰ | گروکی[19] | ۲۰۰۱ | Sea Balance | ۲۰۰۵ | -۲۷/۳ | ۲۰۱۵ | -۲۷/۹ | ۲۰۳۰ | -۲۸/۴ |

[1] Bodyko et al.
[2] Labanov
[3] Frolow
[4] Golitsyn
[5] Klige
[6] Golubtsov et al.
[7] Rodionov
[8] Krenk & Popove
[9] Droydov
[10] Sidorenkov
[11] Kim & Nikulina
[12] Malinin
[13] Naidenov et al.
[14] Shlyamin
[15] Alishaev et al.
[16] Sheko
[17] Duvananin
[18] Getman
[19] Gorky

قرار گرفته‌اند. این تکنیک‌ها، پیچیدگی سیستم‌های واقعی را به‌واسطه روشهای قطعی و معین نشان می‌دهند و خصوصیت تصادفی که ممکن است به‌طور ذاتی در این سیستم ها وجود داشته باشد را نادیده می‌گیرند.

سیستم‌های کلاسیک را اصطلاحاً سیستم‌های مبتنی بر مدل می‌نامند که به‌کمک یک مدل ریاضی پیاده‌سازی می‌شوند. وقتی این مدل موجود باشد رابطه‌ای عینی بین پارامترهای آزاد سیستم و خروجی‌ها و اهداف آن وجود دارد و تمامی پارامترها و روابط میان آنها دقیقاً تعریف می‌گردند و در این حالت هیچ ابهامی در سیستم وجود نخواهد داشت. اما اگر این مدل موجود نباشد، روشهای کلاسیک با شکست مواجه می‌شوند. معمولاً این اتفاق در مورد سیستم‌های پیچیده و حقیقی روی می‌دهد که برای آنها تعریف یک رابطه ریاضی، مشکل و گاه غیر ممکن است.

تحلیل رگرسیون، تکنیک آماری برای بررسی و به مدل در آوردن ارتباط بین متغیرها است. کاربردهای رگرسیون متعدد است و تقریباً در هر زمینه‌ای از جمله مهندسی، فیزیک، اقتصاد، علوم‌زیستی و علوم اجتماعی صورت می‌پذیرد. در حقیقت تحلیل رگرسیونی ممکن است تکنیک آماری با بیشترین و وسیع‌ترین کاربرد بین تکنیک‌های آماری باشد [۹].

سیستم‌های فازی نیز برای فرموله کردن دانش بشری استفاده می‌شوند. همچنین کاربردهایی در شناسایی دینامیک غیر خطی سیستم‌ها دارند. اساساً سیستم‌های فازی پدیده‌های غیر خطی و نامشخص را به‌راحتی توصیف می‌کنند.

در این مطالعه روشی برای انجام پیش‌بینی تراز آب دریای خزر با استفاده از مفهوم مدل‌سازی پیشنهاد شد که در آن از ترکیب سیستم‌های استنتاج فازی و روشهای آماری برای مدل‌سازی استفاده شد. عملاً این روش به ساخت یک مدل از نوسانات دریای خزر منجر گردید. برای این منظور، تراز آب دریای خزر که طی چند دهه تحت تأثیر عوامل مؤثر دچار تغییر شده بود، به‌صورت خروجی یک سیستم در نظر گرفته شد و مدل سیستم مورد نظر با استفاده از ترکیب مدل‌های آماری و فازی ساخته شد.

با وجود اینکه تراز آب دریای خزر با تأثیر تمام عوامل داخلی و خارجی و عوامل مستقیم و غیر مستقیم به‌وجود آمده، ولی برای ساخت مدل به‌جای استفاده از تمام پارامترهای تأثیرگذار بر دریا، از سری زمانی تراز آب دریای خزر استفاده شد. این سری زمانی، تغییرات تراز آب دریای خزر را از سال ۱۸۳۷ میلادی تا اکنون در برداشت.

### ۲-۱- تحلیل سری‌های زمانی

برای یک تحلیل سری زمانی و پیش‌بینی آینده آن، نیاز به آشنایی با رفتار سری به‌عنوان تابعی از زمان است. پیدا کردن الگوهای مناسب برای سری‌های زمانی کار مهمی است. برای ساختن یک الگو جنکینز[1] و باکس[2] سه مرحله عمده را پیشنهاد دادند که از هریک از آنها ممکن است چندین بار استفاده شود: ۱- تشخیص یا شناسایی الگو ۲- برازش الگو ۳- تشخیص درستی الگو [۱۰].

در مدل‌های سری زمانی یک متغیره، تلاش می‌شود تا متغیر سیستم صرفاً بر اساس اطلاعاتی که در مقادیر گذشته آن متغیر و همچنین در مقادیر جاری و گذشته آن نهفته است، مدل‌سازی و پیش‌بینی گردد. مدل‌های سری زمانی معمولاً بر مبنای تئوری بنا نمی‌شوند بلکه تلاش می‌کنند تا از نظر تجربی، ویژگی‌های مربوط به داده‌های مشاهده شده را تبیین نمایند. هنگامی که در یک مدل ساختار مناسبی وجود ندارد، مدل‌های سری زمانی می‌توانند مفید باشند.

در مدل رگرسیون خطی ساده، فرایندهای قابل پیش بینی با یک تابع ساده مانند رابطه ۱ پیش بینی می‌شود

$$y = ax + b \qquad (۱)$$

در حالت کلی معادلات رگرسیون تنها در ناحیه‌ای از متغیرهای رگرسیون اعتبار دارند که مشتمل بر داده‌های مشاهده شده باشد [۱۱]. در این مدل‌ها در صورت امکان، تعداد مشاهدات مورد استفاده برای به‌دست آوردن مدل باید زیاد باشد.

### ۲-۲- برآورد پارامتر های مدل

یکی از مسائل مهم در تحلیل رگرسیون، برآورد پارامترهای مدل است. این روند برآورد پارامترها، برازش مدل به داده‌ها نیز نامیده می‌شود. شیوه‌های مختلفی برای برآورد پارامترها وجود دارد. یکی از این شیوه‌ها، روش حداقل مربعات خطا است. آزمون دلتا $\delta$ یکی از روشهای برازش مدل به‌صورت غیرپارامتریک است. از این روش برای تخمین مدل بدون نیاز به تطبیق مجدد بر روی مجموعه آزمایش استفاده می‌شود [۱۲].

#### ۲-۲-۱- آزمون دلتا

تئوری و روش آزمون دلتا، نگاشت بین $\bar{x}_i$ و $y_i$ است که $\bar{x} = x_1, x_2, ..., x_t$ یک سری زمانی گسسته با یک مجموعه مرتب از مقادیر است و $y_i$ را می‌توان خروجی سیستم در نظر گرفت. تئوری آزمون دلتا به‌صورت رابطه ۲بیان می‌شود. این رابطه برای N جفت چند ورودی -یک خروجی برقرار است

$$y_i = f(\bar{x}_i) + r_i \qquad (۲)$$

که در این رابطه

f یک مدل انطباق نامشخص و $r_i$ یک نویز برای مدل به‌دست آمده

[1] Jenkins
[2] Box

از سیستم است. آزمون دلتا بر پایه فرضیاتی از تابع تقریب پیوسته حاصل می‌شود که بر روی مجموعه داده‌های ورودی انجام می‌گیرد. این فرضیات بیان می‌کنند که هنگامی که دو ورودی x و x' نزدیک به‌هم باشند، تابع بر این دلالت خواهد کرد که خروجی‌های f(x) و f(x') به اندازه کافی نزدیک به‌هم خواهند بود، اما تحت تأثیر وجود نویز، این حالت برقرار نخواهد شد. روش کار آزمون دلتا به این صورت است که در ابتدا نزدیک‌ترین همسایه به نقطه $\bar{x}_i$ در مجموعه $\{\bar{x}_1,..,\bar{x}_N\}$ با $\bar{x}_{NN}$ نمایش داده می‌شود. سپس آزمون دلتا، به صورت رابطه ۳ تعریف می‌گردد

$$\delta = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{n} | y_{NN}(i) - y_i |^2 \qquad (۳)$$

که در این رابطه

$y_{NN}(i)$ خروجی متناظر با $\bar{x}_{NN}$ است [۱۲]. این روش برای انتخاب تعداد پارامترهای تأثیرپذیر نیز می‌تواند به‌کار گرفته شود.

## ۳- ساختار ایجاد مدل پیش‌بینی تراز آب دریا

مقادیر مختلف تراز آب دریای خزر در طی سالیان مختلف می‌تواند همانند یک سری زمانی گسسته به‌صورت یک بردار $\bar{x} = x_1, x_2,..., x_t$ نشان داده شود که t تعداد عناصر سری است. مسئله پیش‌بینی تراز سال بعد، $x_{t+1}$، با استفاده از یک مدل رگرسیون بدون هیچ ورودی بیرونی می‌تواند به‌صورت رابطه ۴ تعیین شود [۱۳]

$$\bar{x}_{t+1} = f_r(x_t, x_{t-1},..., x_{t-M+1}) \qquad (۴)$$

که در این رابطه

$x_{t+1}$ مقدار تراز آب پیش‌بینی شده سال بعدی توسط مدل $f_r$ و M تعداد ورودی‌ها برای مدل است. پیش‌بینی متوسط تراز سالهای آینده دریای خزر نیاز به ساخت یک مدل $f_r$ دارد. این مدل ورودی‌های رگرسیون (مقادیر معلوم یا ترازهای گذشته دریای خزر) را به خروجی‌های رگرسیون (ترازهای آینده یا همان مقادیر پیش بینی‌های آینده) نگاشت می‌دهد. هنگامی که طول پیش‌بینی بیشتر از یک در نظر گرفته شود، مقادیر نامشخص می‌توانند با استفاده از دو روش مستقیم و غیر مستقیم پیش‌بینی شوند.

در صورتی که از روش غیر مستقیم یا بازگشتی برای پیش‌بینی مدل استفاده شود، با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده به‌عنوان داده‌های شناخته شده، مقادیر ناشناخته بعدی پیش‌بینی می‌شوند. این روش ساده‌ترین روشی است که می‌تواند برای ساخت مدل به‌کار رود. اما ضعف این روش پیش‌بینی، اجتماع خطا است. یعنی مقدار خطای به‌وجود آمده در پیش‌بینی هر مرحله، در مقادیر پیش‌بینی شده بعدی بدون تأثیر نیست.

در روش پیش‌بینی مستقیم، برای پیش‌بینی هر مقدار مجهول نیاز به یک مدل است. بنابراین برای بیشینه طول پیش‌بینی H، H مدل مستقیم ساخته می‌شود. در این ساختار برای هر طول پیش‌بینی h، یک مدل به‌صورت رابطه ۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۴]

$$\hat{x}_{t+h} = f_h(x_t, x_{t-1},..., x_{t-M+1}), 1 \le h \le H \qquad (۵)$$

به‌منظور ساخت مدل پیش‌بینی با هر طول پیش‌بینی، یک سیستم استنتاج فازی با نگاشتی بین بردار ورودی‌های قطعی و خروجی قطعی تعریف می‌شود. به‌طورعمده هر ترکیبی از توابع عضویت، عملگرها و مدل استنتاج می‌تواند به‌کار گرفته شود، اما انتخاب مناسب تأثیر بسزایی برروی نتایج کاربردی خواهد داشت.

در پیاده‌سازی، از مقدار کمینه برای ترکیب عطفی و استلزام، از تابع عضویت گوسی برای ورودی‌ها و خروجی سیستم و از روش مرکز ثقل برای غیر فازی کردن استفاده شد. در این حالت خاص، نمونه مدل فازی با M ورودی برای پیش‌بینی با طول h به‌صورت رابطه ۶ است [۱۵]

$$F_h(\bar{x}) = \frac{\sum_{l=1}^{N_h} \min(\mu_{R_l^h}, \min \mu_{L_l^{i,h}}(x_v))}{\sum_{l=1}^{N_k} \min \mu_{L_l^{i,h}}(x_v)} \qquad (۶)$$

که در این رابطه

$N_h$ تعداد قوانین موجود در پایگاه دانش برای طول h، $\mu_{L_l^{i,h}}$ درجه عضویت L که با تابع تعلق گوسین برای ورودی‌های وابسته به زبان شناختی تعریف می‌شود و $\mu_{R_l^h}$ درجه عضویت R که با تابع تعلق گوسین تعریف می‌شود [۱۵].

مسئله ساخت یک مدل می‌تواند دقیقاً به‌صورت تعریف ساختار مناسبی از توابع عضویت و ساخت یک پایگاه دانش فازی از یک مجموعه داده بیان شود. به‌طوری‌که سیستم فازی $F_h(\bar{x})$ دقیقاً تراز آب hامین سال بعدی را پیش‌بینی می‌کند. به‌دست آوردن مدل هر طول پیش‌بینی، طی دو مرحله اصلی انجام می‌شود که در ادامه به آن اشاره شده است [۱۶].

### ۳-۱- انتخاب متغیر

انتخاب متغیر اولین مرحله در روش است. تخمین آزمون دلتا برای انتخاب مناسب زیر بخش‌های بهینه از مجموع M ورودی اولیه به‌کار گرفته می‌شود که M سایز بیشترین تقریبگر است. از نتیجه آزمون دلتا به‌عنوان معیاری برای مناسب بودن انتخاب متغیر خاص استفاده می‌شود. پارامترهای ورودی که تخمین آزمون دلتا را برای مراحل بعدی به حداقل می‌رسانند، انتخاب می‌شوند. مزیت اصلی این روش، انتخاب بهینه متغیرهای موجود است.

### ۳-۲- شناسایی سیستم و میزان‌سازی

این مرحله خود شامل ۳ زیر مرحله است. همه فرایندها به‌وسیله این سه زیرمرحله تا زمانی که شرط خطای آزمایش ارضا نشود، تکرار

می گردند.

### ۳-۲-۱- شناسایی سیستم

در این زیر مرحله، ساختار سیستم استنتاج شامل برچسب‌های زبان شناختی و قواعد کلی مشخص می‌گردد. به‌منظور پیاده‌سازی مدل بیان شده، شناسایی با استفاده از الگوریتم وانگ[1] و مندل[2] که از تخمین آزمون دلتا مشتق شده است، انجام می‌شود [۱۷]. در الگوریتم وانگ و مندل تعداد برچسب‌های هر ورودی باید از قبل مشخص باشد. در این روش از کمترین تعداد ممکن برچسب‌ها تا بیشترین تعداد برچسب‌ها به‌عنوان محدوده پیچیدگی سیستم مورد جستجو قرار می‌گیرد. هنگامی که سیستمی با خطای آزمایشی کمتر از تخمین دلتا ساخته شد، این فرایند تکرار شناسایی متوقف می‌شود.

### ۳-۲-۲- میزان‌سازی سیستم

مرحله میزان‌سازی به‌صورت مرحله‌ای مجزا از زیر مراحل شناسایی در نظر گرفته می‌شود. در این روش از الگوریتم یادگیری با سرپرستی که به‌وسیله میانگین مربعات خطا نرمال شده، استفاده می‌شود.

### ۳-۲-۳- انتخاب پیچیدگی

آخرین مرحله، پیچیدگی تقریبگرهای فازی است. برای این منظور اولین یا ساده ترین سیستم واقع شده در محدوده خطای تعریف شده به‌وسیله آزمون دلتا، انتخاب می‌شود.

## ۴- شبیه‌سازی و ارائه نتایج تجربی

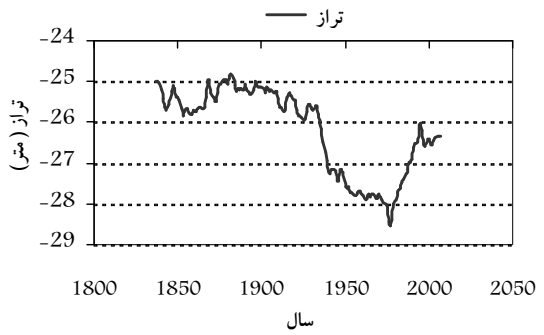
به‌منظور ارزیابی، مجموعه داده‌های تراز آب دریای خزر از سال ۱۸۳۷ تا سال ۲۰۰۷ یک‌بار با استفاده از سیستم پیشنهادی و یک بار با استفاده از روش آماری، مدل گردید. به‌منظور مقایسه دقت پیش‌بینی بین سیستم پیشنهاد شده با روش پیش‌بینی کلاسیک، دو شاخص مجموع قدر مطلق خطا و میانگین مجموع مربعات خطا که به‌صورت روابط ۷ و ۸ تعریف می‌گردند، در نظر گرفته شد

$$SAE = \sum_{t=1}^{n} |Y_t - F_t| \qquad (۷)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} |Y_t - F_t|^2 \qquad (۸)$$

که در این روابط

SAE مجموع قدر مطلق خطا، $F_t$ مقدار پیش بینی شده، $Y_t$ مقدار واقعی سری در لحظه t و MSE میانگین مجموع مربعات خطا است. مجموعه تراز آب دریای خزر شامل ۲۰۴۰ نمونه از تغییرات ماهانه تراز آب است که از مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر تهیه شد [۱۸]. اما به‌منظور پیش‌بینی سالانه، متوسط سالیانه آن محاسبه و در نظر گرفته شد. چنانچه در شکل ۱ نشان داده شده است، این داده‌ها شامل ۱۷۱ نمونه از متوسط نوسانات سالیانه طبیعی تراز آب دریای خزر هستند.




**شکل ۱**- متوسط نوسانات سالیانه تراز آب دریای خزر

به‌منظور آزمایش مدل، ده سال آخر کل دوره که از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۷ بود، به‌عنوان مجموعه آزمون در نظر گرفته شد تا بتوان یک پیش‌بینی ده ساله برای آن به‌دست آورد. این پیش‌بینی می‌تواند ساختار تغییرات ده ساله تراز آب را نشان دهد. برای ایجاد مدل پیشنهادی، به‌علت تأثیر زیاد تراز آب دریا در یک دوره ده ساله، بر روی تراز بعدی، بیشترین سایز تقریبگر ۸ پارامتر و حداکثر طول پیش‌بینی به‌صورت ده ساله در نظر گرفته شد. در مرحله اول روش آزمون دلتا، برای همه انتخابهای ممکن، متغیرهای اجرا شده و متغیرهایی با کمترین تخمین آزمون دلتا انتخاب می‌شوند. این فرایند به‌طور مستقل برای هر طول پیش‌بینی اجرا می‌شود. تعداد متغیرهای انتخاب شده برای هر طول پیش‌بینی در شکل ۲ نشان داده شده است.

**شکل ۲**- اعتبارسنجی با آزمون دلتا

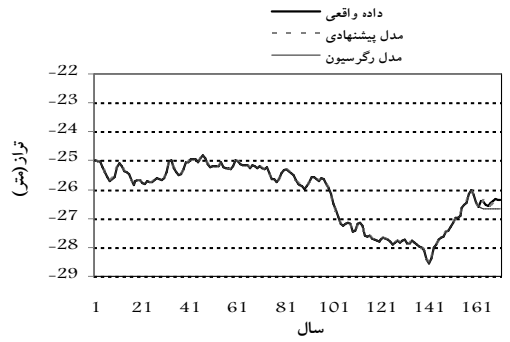
[1] Wang
[2] Mendel

در مرحله دوم به‌منظور شناسایی سیستم استنتاج فازی، الگوریتم وانگ و مندل بر روی مجموعه آموزش به‌کار برده شد. در طول این فرایندها، تخمین آزمون دلتا برای کنترل اینکه آیا بهترین تخمین ممکن به‌دست آمده است یا خیر، صورت گرفت. به‌عبارتی، مقایسه صحیحی بین پیچیدگی مدل و خطای آزمایش صورت گرفت تا در نهایت پیش‌بینی با سایز تقریبگر ۸ پارامتری و متوسط تراز ده ساله به‌دست آید.

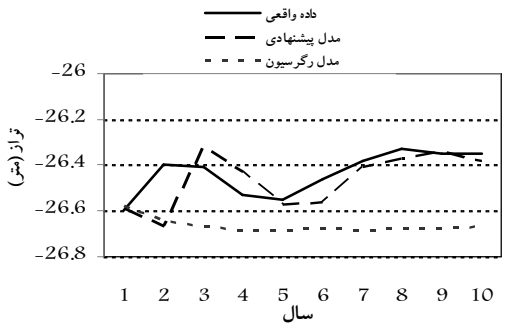
همانطور که پیشتر گفته شد، مقایسه‌ای بین مدل پیشنهادی با یک مدل کلاسیک انجام شد. در اینجا مدل کلاسیک استفاده شده همان مدل رگرسیون بود که در موارد بسیاری برای پیش‌بینی تراز آب دریای خزر استفاده شده بود. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر، از تعداد متغیرهای به‌دست آمده از روش پیشنهادی برای تعداد متغیرهای مورد استفاده در مدل رگرسیون استفاده شد. شکلهای ۳ و ۴ خروجی شبیه‌سازی شده مدل رگرسیون با استفاده از روش پیش‌بینی غیر مستقیم و مدل پیشنهادی با استفاده از روش پیش‌بینی مستقیم به همراه داده‌های واقعی را نشان می‌دهند.

همانطوری که شکلهای۳ و ۴ نشان می‌دهند، مدل پیش‌بینی پیشنهادی توانسته با به‌دست آوردن رفتار دینامیکی تراز آب دریا، پیش‌بینی بهتری از مدل رگرسیون ساده داشته باشد. اما به‌منظور کامل‌تر کردن ارزیابی از دو معیار میانگین مربعات خطا و مجموع قدر مطلق خطا استفاده شد. جدول ۲ مقادیر معیارهای ارزیابی برای کل داده‌ها که با هر دو مدل شبیه‌سازی شده‌اند را نشان می‌دهد.

درجدول ۲ مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی کاملاً بهتر از مدل آماری عمل نموده است. یعنی توانسته با مقدار خطای کمتری مدل کلی تغییرات تراز آب دریای خزر را شبیه‌سازی نماید. برای نتیجه پیش‌بینی، یک پیش‌بینی ده ساله از سالهای آینده در نظر گرفته شد. برای این منظور همه داده‌های قابل دسترسی به‌عنوان مجموعه آموزش در نظر گرفته شدند تا مدل پیش‌بینی ایجاد شود. سپس با استفاده از مدل به‌دست آمده به پیش‌بینی ده سال آینده (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷) پرداخته شد. شکل ۵ ، پیش‌بینی ده ساله‌ای از تراز آب دریای خزر را نشان می‌دهد.



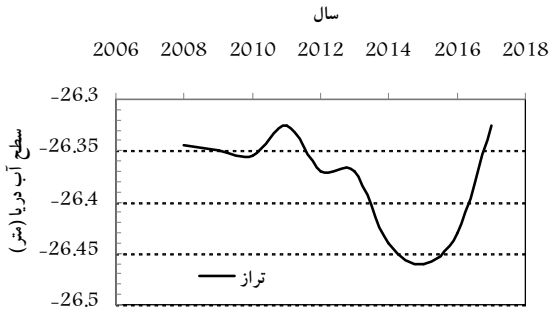

**شکل۳**- دو روش پیش‌بینی ده ساله از تراز آب دریای خزر به همراه داده‌های واقعی




**شکل۴**- پیش‌بینی ده ساله‌ای از تراز آب دریای خزر به همراه داده‌های واقعی (قرمز واقعی، سبز پیش‌بینی شده با مدل پیشنهادی و آبی پیش‌بینی با مدل رگرسیون)

**جدول۲** - معیارهای میانگین مربعات خطا و مجموع قدر مطلق خطای به‌دست آمده برای دو مدل پیش بینی از روی کل داده‌ها

| طول پیش بینی | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MSE مدل پیشنهادی | ۰/۱۴۲ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۱۷۷ | ۰/۰۱۹۶ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۳۶ |
| SAE مدل پیشنهادی | ۱۴/۸۱ | ۱۵/۲۵ | ۱۵/۹۱ | ۱۶/۹۱ | ۱۷/۸۹ | ۱۹/۲۰ | ۲۰/۵۵ | ۲۲/۲۱ | ۲۴/۱ | ۲۶/۵ |
| MSE مدل آماری | به ازای هر طول پیش‌بینی ۰/۷۵۷ | | | | | | | | | |
| SAE مدل آماری | به ازای هر طول پیش‌بینی ۱۲۶/۹ | | | | | | | | | |




**شکل۵**- پیش‌بینی ده ساله از تراز آب دریای خزر (۲۰۱۷-۲۰۰۸)

## ۵- نتیجه گیری

طبق یافته‌های این پژوهش، میانگین خطای آموزش و آزمایش مدل پیشنهادی و همچنین دقت مدل بسیار بهتر از مدل آماری بود. روش پیشنهادی بیان شده نیاز به هیچ مرحله اعتبار سنجی ندارد و بنابراین همه مجموعه داده‌های قابل دسترسی، می‌توانند به‌عنوان مجموعه آموزش استفاده شوند تا مدل‌های سیستم مورد نظر را ایجاد نمایند. لذا این روش توانسته یک پیش‌بینی ده ساله از تراز آب دریای خزر برای سالهای آینده ارائه دهد.

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که احتمال پیشروی مجدد دریای خزر در آینده وجود خواهد داشت در صورتی که در چند سال آینده تراز آب دریای خزر ابتدا اندکی کاهش یافته سپس دوباره بالا می‌آید. در دوره ده ساله پیش‌بینی شده، می‌توان حداقل تراز را در سال ۲۰۱۵ با تراز منفی ۲۶/۴۵ و حداکثر تراز را در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۱ با تراز منفی ۲۶/۳۲ دانست.

عوامل مهمی که در بالابردن دقت مدل پیشنهادی نقش کلیدی دارند عبارت‌اند از: انتخاب متغیر، به کارگیری یک الگوریتم یادگیری برای میزان‌سازی و استفاده ازآزمون دلتا برای انتخاب تعداد برچسب‌های زبان شناختی برای هر ورودی. در این مقاله نشان داده شد که مدل‌های برپایه تقریبگرهای فازی نسبت به تقریبگرهای آماری در توانایی تعمیم کاملاً مناسب‌تر عمل می‌کنند.

## ۶- قدردانی

به‌این وسیله از مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر که نویسندگان را در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

## ۷- مراجع

1- Aladin, N., and Plotnikov, I. (2004). *The Caspian sea*, Lake Basin Management Initiative, Russia.

2- Ghangherme, A. (2004). "The oscillatory behavior of the water level in the Caspian sea water balance." *Workshop on Caspian Sea Issues, Particulary the Management Governors and Mayors of the Coastal Province of Gilan*, Rasht. (In Persian)

3- Ghangherme, A., and Ramesht, M. H. (2005). *Can the fluctuations of the Caspian sea be controlled*?, Isfahan Univerisity, Isfahan. (In Persian)

4- Malinin, V. M. (1994). *The problem of the Caspian sea level forescast*, Translated by Shamsi, Caspian Sea Natioanl Research Center, Sari. (In Persian)

5- Klige, R. K. (1992). *The history of variations in the level of the caspian sea*, Translated by Shamsi, Caspian Sea National Research Center, Sari. (In Persian)

6- Bolgov, M. V., Trubetskova, M. D., and Filimonova, M. K.(2004). *On the problem of the Caspian sea level forecasting*, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Russia.

7- Bolgov, M.V. (2005). "Stochastic models in a problem of the Caspian sea level forecasting." *ISSH International Symposium on Stochastic Hydraulics*, Nijmegen, Netherlands, 23-27.

8- Ghangherme, A. (1997). *Continental changing and behavior of Caspian sea level*, Armed Forces Geographical Organization, Tehran. (In Persian)

9- Montgomeri, D. C., and Peck, E. A. (2003). *Introduction to linear regression analysis*, 2nd Ed., Translated by Razavi Parizi, Shahid Bahonar University, Kerman. (In Persian)

10- Box, G.P., and Jenkins, G.M. (1976). *Time series analysis: Forecasting and control*, Holden-day Inc., San Francisco, CA.

11- Tseng, F., Tzeng, G., Yu, H., and Yuan, B. (2001). "Fuzzy ARIMA model for forecasting the foreign exchange market." *Fuzzy Sets and Systems*, 118, 9-19.

12- Jones, A. J. (2004)."New tools in non-linear modelling and prediction." *Computational Management Science*, 1, 109-149.

13- Tanaka, H., Uejima, H., and Asai, K. (1982). "Linear regression analysis with fuzzy model." *IEEE Trans. Systems Man Cabernet*, 12, 903-907.

14- Pouzols, M., Lendasse, A., and Barriga, A. (2008). "Fuzzy inference based autoregressors for time series prediction using nonparametric residual variance estimation." *International Conference on Fuzzy Systems (IEEE)*, Sofia, Bulgaria, 613-618.

15- Ramezai Mozirji, F., and Yaghoobi, M. (2009). "New method in time series predication based on fuzzy autoregressors." *3rd Joint Congress on Fuzzy and Intelligent System*, Yazd. (In Persian)

16- Bargiela, A., Pedrycz, W., and Nakashima, T. (2007). "Multiple regression with fuzzy data." *Fuzzy Sets and Systems*, 158, 2169-2188.

17- Wang, L., and Mendel, J. M. (1992). "Generating fuzzy rules by learning from examples." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22 (4), 1414-1427.

18- CSNR. (2009). "Water and meterological databases." <http://www.csnrc.ir/> (Apr. 2010)