

## مقاله پژوهشی

### سنجش تاب‌آوری زیستی رودخانه با مدل‌های هوش مصنوعی (مطالعه موردی: رودخانه علی‌آباد)

نغمه جعفرزاده<sup>۱</sup>، سید احمد میرباقری<sup>۲\*</sup>، طاهر رجایی<sup>۳</sup>، افشین دانه‌کار<sup>۴</sup> و مریم رباطی<sup>۵</sup>

#### چکیده

تاب‌آوری طیف به‌هم‌پیوسته‌ای از ارتباطات بین محیط، رودخانه و واکنش اکوسیستم به تغییرات وارد شده را برای حفظ پایداری نشان می‌دهد؛ لذا بررسی میزان تاب‌آوری رودخانه، برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مهم و مؤثر است. با توجه به ارتباط تاب‌آوری زیستی به تغییر پارامترهای کیفی و کمی از مدل‌های هوش مصنوعی، بیان ژن ماشین بردار پشتیبان و هیبرید موجکی برای پیش‌بینی وضعیت ارتباطی آب رودخانه علی‌آباد در ایستگاه لوارک و در بازه زمانی ده ساله استفاده و نتایج با شاخص تاب‌آوری سنجیده شد. مدل‌های هیبریدی نسبت به غیرهیبریدی، عملکرد دقیق‌تر و خطای کمتری را با حذف نویز نشان دادند؛ چنانکه سناریوی ۴ با ترکیب روی و اکسیژن بیوشیمیایی و دبی در سری زمانی با نتایج صحت‌سنجی ضریب نش ساتکلیف (۰/۹۸)، جذر میانگین مربعات خطا (۰/۰۵) و میانگین قدرمطلق خطا (۰/۱۰) در مدل هیبرید موجک بردار پشتیبان بهترین پیش‌بینی را نشان داد. نتیجه هیبرید موجک بیان ژن با ضریب نش ساتکلیف (۰/۹۴)، جذر میانگین مربعات خطا (۰/۰۷) و میانگین قدرمطلق خطا (۰/۲۰) در سناریو ۴ تأکیدی بر تأثیر مثبت مدل‌های هیبریدی نسبت به مدل‌های کلاسیک در پیش‌بینی بود. نتیجه کلی تحقیق نشان داد رودخانه در شرایط سنجش تاب‌آور است و پیش‌بینی مدل‌های هیبریدی با اندازه‌گیری‌ها همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: بیان ژن، تاب‌آوری، شاخص زیستی، ماشین بردار پشتیبان، موجک.

ارجاع: جعفرزاده ن. میرباقری س. ا. رجایی ط. دانه‌کار ا. و رباطی م. ۱۳۹۹. سنجش تاب‌آوری زیستی رودخانه با مدل‌های هوش مصنوعی (مطالعه موردی: رودخانه علی‌آباد). مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۶۱-۷۰.

۱- دانشجوی دکتری گروه تخصصی علوم و مهندسی محیط‌زیست- آمایش سرزمین، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.  
۲- استاد تمام گروه مهندسی عمران- محیط‌زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.  
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه قم.  
۴- استاد تمام گروه محیط‌زیست، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.  
۵- استادیار گروه تخصصی علوم و مهندسی محیط‌زیست- آمایش سرزمین، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.

\* نویسنده مسئول: [mirbagheri@kntu.ac.ir](mailto:mirbagheri@kntu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

## مقدمه

تاب‌آوری معیاری برای سنجش میزان مقاومت و پایداری سیستم، توانایی آن در جذب تغییرات و توزیع آن و درعین‌حال حفظ روابط میان متغیرهای سیستم است که این نگرش به تاب‌آوری اکولوژیکی معروف است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۵). در مطالعه تاب‌آوری رودخانه، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر موجودات زنده آب به‌عنوان، عمده‌ترین شاخص در انعطاف‌پذیری در اکوسیستم آبی را پالم و همکاران (۲۰۰۵) بررسی کرده‌اند. از میان بیواندیکاتورها، جلبک‌ها دارای چرخه زندگی بسیار کوتاهی هستند، تولیدمثل سریعی دارند و به‌صورت مستقیم از فاکتورهای شیمیایی و محیطی تأثیر می‌پذیرند؛ لذا مناسب‌ترین ابزار اجزای بیولوژیک اکوسیستم آبی برای پایش کیفیت آب رودخانه و توصیف آشفتگی‌های طبیعی و انسانی هستند. نمونه‌گیری و نگهداری آن‌ها ساده و ارزان است، روش‌های استاندارد برای مطالعه آن‌ها وجود دارد و از نظر پراکنش، جهان‌شمول هستند (فعال، ۱۳۹۱). چنانکه در بررسی آثار کاربری زمین روی کیفیت آب رودخانه‌های ماگالیس و کروکدیل در آفریقای شمالی از دیاتومه استفاده شد نتیجه ارتباط مؤثر بین جلبک‌ها و تأثیرات کاربری‌ها با نرم‌افزار اومندیا مشخص شد (والش و وینر، ۲۰۰۹). همچنین بررسی دیاتومه‌ها به‌عنوان شاخص در مصب رودخانه ابرو ترکیه بررسی و نتایج با دیگر شاخص‌ها سنجیده شد (لایلا و همکاران، ۲۰۱۲). قابلیت استفاده از شاخص‌های ارزیابی کیفیت آب مبتنی بر دیاتومه‌ها در جریان‌های شهری زیمبابوه، میزان بالایی از همبستگی بین متغیرهای کیفیت آب و شاخص دیاتومه را نشان داد (برا و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به اینکه در مبحث تاب‌آوری و مقاومت در برابر فشارهای مزمن، سری زمانی، از فاکتورهای اصلی است و مدل‌های هوشمند در این امر کارآمد هستند، از سری مطالعاتی در زمینه سری زمانی، صورت گرفته است، کاربرد عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن<sup>۱</sup> در روندیابی سیلاب رودخانه زنگمار در مقایسه با روش موج دینامیکی توسط (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۴). فرآیند بارش رواناب ماهانه رودخانه کاکارضا واقع در استان لرستان، با استفاده از شبکه عصبی بیزین بررسی قرار و نتایج آن با روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان<sup>۲</sup> مقایسه شد (قربانی و دهقانی، ۱۳۹۵).

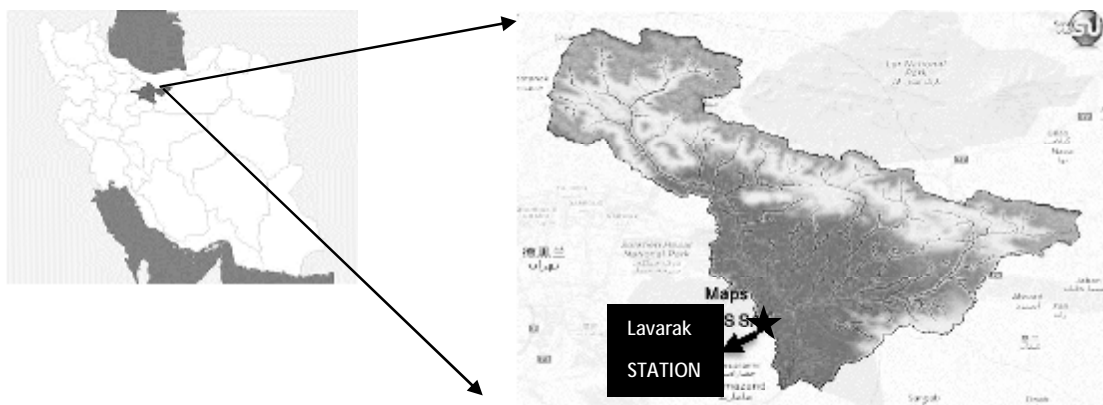
مدل‌سازی جریان رودخانه و مقایسه مدل ترکیبی برنامه‌ریزی بیان ژن - موجک<sup>۳</sup> با مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، نشان داد که عملکرد مدل ترکیبی در هر دو دوره زمانی روزانه و ماهانه، از مدل ساده بهتر بوده است (سلگی و همکاران، ۱۳۹۶). برای مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه کشکان واقع در لرستان نیز از مدل‌های هوشمند و بررسی صحت مدل‌های مورد مطالعه با یکدیگر استفاده شد (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۶). استفاده از برنامه‌نویسی بیان ژن در بیان تأثیرات حرارتی کاربری معمولی، مسکونی، صنعتی و تجاری با تراکم بالا، تأثیر ارزیابی و طراحی سیستم‌های مدیریت شهری برای حفاظت از جریان‌های حساس گرماگیر را نشان داد (ستار و همکاران، ۲۰۱۷). گونزالزکوستا و همکاران (۲۰۱۷) در مدیریت منطقه ساحلی ارزیابی برنامه‌های بیان ژن موجک و مدل ترکیبی شبکه عصبی موجکی ویولت در پیش‌بینی میزان کل نیتروژن در آب‌های دریایی بندر شارلوت بررسی شده است (رجایی و شهابی، ۲۰۱۶). مدل ترکیبی برنامه‌ریزی بیان ژن - موجک را برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت دمای هوا در ایستگاه‌های مهاباد و ارومیه در ایران صورت پذیرفت. نتایج نشان داد مدل ترکیبی موجک - بیان ژن عملکرد بهتری نسبت به بیان ژن دارد (سلگی و همکاران، ۱۳۹۶). در این پژوهش با استفاده از روش‌های هوشمند تلفیقی با موجک برای بررسی تاب‌آوری رودخانه، بر اساس تأثیر پارامترهای کیفی و کمی بر جلبک دیاتومه پرداخته و شاخص تاب‌آوری بر اساس تغییرات الگوی جمعیتی دیاتومه تعیین شد و نتایج مدل‌سازی، با استفاده از شاخص‌های آماری مقایسه قرار گردید.

## محل مورد مطالعه

رودخانه علی‌آباد - جاجرود در ۳۰ کیلومتری شمال شرق تهران با جهت جریان شمال غربی - جنوب شرقی قرار گرفته است. این رودخانه با ۴۰ کیلومتر طول و ۷۱۰ کیلومترمربع مساحت حوضه دارای شیبی برابر ۴٪ است (شکل ۱). دوره زمانی مورد بررسی در این تحقیق، دوره ۱۰ ساله از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ که داده‌ها به‌صورت ماهانه جمع‌آوری شده است (جدول ۱ و ۲، شکل ۲) (شرکت سهامی آبفا تهران).

1- Gene expression program (GEP)

2- Support vector machine (SVM)



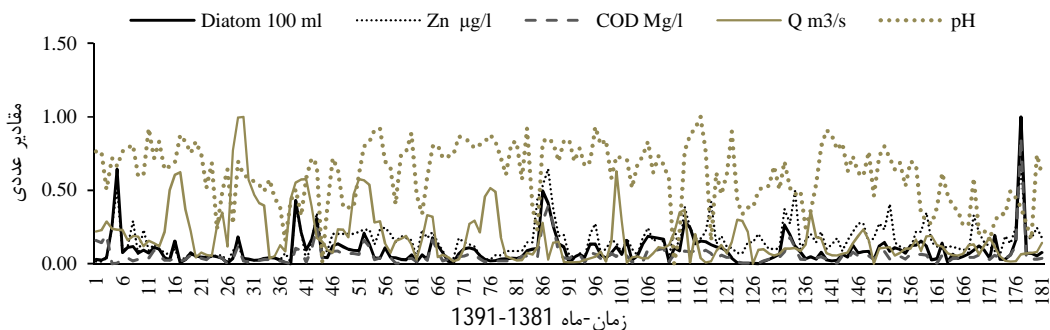
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (منبع: سازمان حفاظت محیط‌زیست تهران) حوزه جاجرود- ایستگاه لوارک

جدول ۱- موقعیت و شرح ایستگاه‌های انتخابی برای مطالعه (سازمان آبفا تهران)

| نام ایستگاه | نام رودخانه      | کد ایستگاه | ارتفاع ایستگاه | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی | UTM-X  | UTM-Y   |
|-------------|------------------|------------|----------------|---------------|---------------|--------|---------|
| لوارک       | علی‌آباد- جاجرود | ۴۱-۱۶۳     | ۱۶۰۰           | ۳۵-۴۸-۰۰۰     | ۵۱-۴۱-۰۰۰     | ۵۶۳۲۵۰ | ۳۹۶۲۲۵۰ |

جدول ۲- مشخصات آماری پارامترهای کیفی آب رودخانه علی‌آباد در ایستگاه لوارک

| پارامتر | واحد              | کمینه | بیشینه | میانگین | انحراف معیار | ضریب همبستگی | R2    |
|---------|-------------------|-------|--------|---------|--------------|--------------|-------|
| Q       | m <sup>3</sup> /s | ۰/۰۷۲ | ۱۷/۹۱  | ۳/۳۰    | ۰/۱۸         | -۰/۷۵        | -۰/۸  |
| Zn      | µg/l              | ۰     | ۶۹     | ۱۰/۲۵   | ۰/۱۱         | ۰/۸۹         | -۰/۹  |
| COD     | Mg/l              | ۰/۸   | ۴۲/۳   | ۳/۲۳    | ۰/۰۷         | ۰/۹۲         | -۰/۹۳ |
| pH      | -                 | ۷/۶۶  | ۸/۵۵   | ۸/۲۰    | ۰/۲۱         | -۰/۵۳        | -۰/۵۵ |
| Diatom  | 100 ml            | ۱۱۲۰  | ۸۵۲۳۱۴ | ۸۱۵۵۱   | ۰/۱۱         |              |       |



شکل ۲- نمودار تغییرات ماهانه pH-Q-COD-Zn-Diatom ایستگاه لوارک در طی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۹۱

## روش مطالعه

### تعیین شاخص‌ها و سناریوها

تاب‌آوری در یک اکوسیستم، واکنش یک متغیر به فشار وارده داخلی یا خارجی در جهت ثبات و ادامه بقا در یک مدت‌زمان معین است؛ بنابراین برای بررسی تاب‌آوری، دقیقاً باید روابط بینابینی آن متغیر و پارامترها در طی زمان معین و میزان قدرت تحمل یا واکنش آن سنجیده شود. این فرایند در مباحث زیستی از جهات گوناگون

مانند میزان آسیب‌پذیری یا تغییرات جمعیتی و تنوع گونه در طی زمان، بر اساس تغییرات اقلیم با مدل‌ها و نرم‌افزارهایی مانند تیتان یا مدل‌های اکولوژیکی مرتبط بررسی شده است (بکر و همکاران، ۲۰۱۸). معیارهای مورد بررسی تاب‌آوری بیولوژیکی رود (با زیرمعیار دیاتومه) و معیار تأثیر آلاینده‌ها (با زیرمعیار پارامترهای شیمیایی) و معیار تغییر اقلیم (با زیرمعیار تغییرات دبی) در سری زمانی ۱۰ ساله تعیین شد. اطلاعات ورودی برای مدل

ژن از نرم‌افزار ژن اکسپروتولز<sup>۵</sup> استفاده می‌شود.

جدول ۳- سناریوهای پیش‌بینی تاب‌آوری رودخانه در ایستگاه لوارک

| ترکیبات ورودی مدل                             | خروجی   | ردیف |
|---|---------|------|
| Zn-COD-Q                                      | دیاتومه | ۱    |
| Zn-pH-COD                                     | دیاتومه | ۲    |
| Zn-pH-pH <sub>t-1</sub> -Q                    | دیاتومه | ۳    |
| Zn-Zn <sub>t-1</sub> -COD-Q <sub>t-1</sub> -Q | دیاتومه | ۴    |
| Zn-COD <sub>t-1</sub> -COD                    | دیاتومه | ۵    |

### ماشین بردار پشتیبان

اولین بار واپنیک در سال ۱۹۹۵ الگوریتم خطی‌سازی ماشین بردار پشتیبان را ارائه کرد. از الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان، علاوه بر طبقه‌بندی می‌توان برای خطی‌سازی (رگرسیون) و پیش‌بینی داده‌ها استفاده کرد. این تابع از راه آموزش مدل ماشین بردار پشتیبان روی یک مجموعه داده به‌عنوان مجموعه آموزش که شامل فرایندی برای بهینه‌سازی دائمی تابع خطاست، قابل دسترسی است (سیدیان و همکاران، ۱۳۹۳). برای پیش‌بینی با ماشین بردار پشتیبان روشی نام لیب ماشین بردار پشتیبان را لین و چنگ در سال ۲۰۰۱ ابداع کردند و تا سال ۲۰۱۳ به‌روزرسانی شد، استفاده شد؛ که توسط فرایند کرنلی انجام می‌گیرد (گانگ و همکاران، ۲۰۱۶). در این مطالعه از هسته RBF به‌دلیل عملکرد خوب و مزایای آن در پیش‌بینی‌های سری زمانی استفاده شد (اسلامیان و همکاران، ۲۰۰۹). این روش در متلب اجرا شد و توسط برنامه‌های C++ خوانده می‌شود.

### موجک و تبدیل موجک

موجک در لغت به معنی یک موج کوچک که دارای طول محدود و میانگین صفر در آن طول است و حالت نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی دارد. در موجک توابع گوناگونی وجود دارند که با توجه به عملکردهای مختلف آن‌ها نتایج متفاوتی نیز حاصل می‌شود در این پژوهش از موجک‌های هار<sup>۶</sup>، داوبچیز<sup>۷</sup>، استفاده شده است. شرح تئوری موجک در کتاب چوی (۱۹۹۲) آمده است (رجایی و برومند، ۲۰۱۵).

کردن روابط در اکوسیستم رودخانه برای دیاتومه، با توجه به عوامل تأثیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی بر بیولوژی (جلبک دیاتومه) (آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷) و هم بر اساس روش‌های آماری ضریب همبستگی بینابین آن‌ها ست. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی انتخابی، بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی<sup>۲</sup> در بحث کیفی آب مؤثر بوده‌اند و بر اساس استاندارد جهانی با جلبک مرتبط هستند (ارزیابی اثرات زیست‌محیطی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵). با توجه به اندازه‌گیری‌ها غلظت متغیرهای کیفی مانند فلزات- اسیدیته- انواع موجودات سلولی- نیترات- فسفات- اکسیژن شیمیایی و بیوشیمیایی و مواد جامد محلول و غیره در فصول سیلابی سال و همچنین در روزهای با بارندگی سنگین تغییر می‌کند. در دبی بالا میزان موجودات کمتر می‌شود (مهجوری و کراچیان، ۲۰۱۰). شاخص تاب‌آوری بر اساس جمعیت دیاتومه با در نظر گرفتن شاخص دیاتومیک تروفیک به‌عنوان حداکثر میزان دیاتومه موجود تعیین شد (پاول و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین شاخص فراوانی جمعیت دیاتومه در میان کل گونه‌ها ۳۰ درصد به‌عنوان حداقل جامعه‌ای که بتواند قدرت تحمل آسیب‌پذیری را داشته باشد، مدنظر قرار گرفت (چارچوب دستورالعمل آب<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸-۲۰۰۰). برای تهیه ترکیب متناسب از متغیرهای مستقل ورودی مدل‌های هوشمند از آزمون‌های آماری استفاده شد و مقادیر ضرایب همبستگی متغیرها به دست آمد و با توجه به همبستگی متقابل و معنادار بین متغیرهای ورودی و خروجی الگوهای مختلفی طبق جدول ۳ ارائه شد.

### بیان ژن

روش بیان ژن را در سال ۱۹۹۹ فریرا ارائه کرد. این روش ترکیبی از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک بود. در این روش پدیده‌های مختلف با استفاده از مجموعه‌ای از توابع شامل توابع اصلی حسابی  $\{+, -, \times, /, \}$ ، توابع مثلثاتی یا هر نوع تابع ریاضی دیگر  $\{\sqrt{\quad}, x^2, \exp, \log, \sin, \cos, \dots\}$  و مجموعه‌ای از ترمینال‌ها (از مقادیر ثابت و متغیرهای مستقل مسأله)، مدل‌سازی می‌شوند (نیک پور و همکاران، ۱۳۹۶). برای به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی بیان

5- Gene XproTools5  
6- Haar  
7- Daubechies

1- EPA  
2- WHO  
3- EIA  
4- WFD

### معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

در این پژوهش عملکرد پیش‌بینی مدل‌ها با استفاده از معیارهای آماری- ضریب نش ساتکلیف (معادله (۱))، جذر میانگین مربعات خطا (معادله (۲)) و میانگین قدرمطلق خطا (معادله (۳)) بررسی که این معیارها، با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد (گانگ مینگ و همکاران، ۲۰۰۵).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - y_{p,i})}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \sigma_i)} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{p,i} - Q_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{p,i} - O_i| \quad (3)$$

قرار می‌دهد. (سیدیان و همکاران، ۱۳۹۳) نتایج  $\epsilon$ ,  $\lambda$ , C در تابع در نرم‌افزار متلب از مدل‌سازی به دست آمد، در تابع جای‌گذاری شد و سپس داده‌های آزمون برای انجام پیش‌بینی مدل‌سازی شد. میزان  $\lambda$  بین ۰ تا ۱۰ و محدوده پارامترهای C بین ۱۰<sup>-۵</sup> تا ۱۰<sup>۵</sup> و  $\epsilon$  بین ۱۰<sup>-۴</sup> است. از نتایج به دست آمده برای صحت‌سنجی استفاده شد.

در ادامه برای بالا بردن بازدهی و کاهش خطا از هیبرید موجک استفاده شد. در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۶ پارامترها توسط موج مادر هار و داوچز که دارای ۴ موجک بودند، تقسیم شد. ضریب همبستگی هرکدام از موجک‌های پارامترها با دیاتومه سنجیده و بهترین موجک در ترکیب سناریوی تعریف شده وارد سیستم بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان شد.

جدول ۴- مقادیر استفاده‌شده در مدل‌سازی بیان ژن

| تعداد | عملکرد ژنتیکی | تعداد | عملکرد ژنتیکی     |
|-------|---------------|-------|-------------------|
| ۸     | اندازه رأس    | ۳۰    | تعداد کروموزوم    |
| ۳     | تعداد ژن      | ۹۸۹   | تعداد نسل         |
| ۲۰۰۰  | نسل تولیدی    | ۲۰۴   | تعداد توابع       |
| ۳     | میزان جهش     | ۱۲۲   | تعداد داده آموزشی |
| ۵     | حداکثر ترکیب  | ۵۷    | تعداد داده تست    |

### مدل‌سازی

فرآیند گام‌به‌گام حل یک مسأله با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن متشکل از پنج مرحله به شرح زیر است: ۱- انتخاب مجموعه ترمینال؛ ۲- انتخاب مجموعه توابع؛ ۳- شاخص اندازه‌گیری دقت مدل؛ ۴- مؤلفه‌های کنترل؛ ۵- معیارهای توقف برنامه (سلگی و همکاران، ۱۳۹۶). تدوین و فرموله کردن رابطه بین شاخص تنوع زیستی و فیزیکوشیمیایی پارامترهای آب و نیز از بین بردن متغیرهای غیرضروری از متغیرهای مستقل، کاربرد اصلی بیان ژن در این تحقیق است. این فرمول‌ها در نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> مورد بازخوانی قرار گرفت و سی دوره، از داده‌های آزمون نهایی با فرمول به دست آمده محاسبه شدند (جدول ۴) و نتیجه محاسبات صحت‌سنجی شد.

برای مدل‌سازی پیش‌بینی با ماشین بردار پشتیبان از مدل لیب- ماشین بردار پشتیبان<sup>۲</sup> استفاده شد. داده‌ها ابتدا نرمال و سپس ۷۰ درصد آن‌ها، برای آموزش و ۳۰ درصد به‌عنوان تست در نظر گرفته و به‌صورت ماتریس به نرم‌افزار معرفی شدند. برای پیش‌بینی میزان دیاتومه آب به‌صورت ماهانه توسط مدل ماشین بردار پشتیبان سه پارامتر  $\lambda$ ,  $\epsilon$  C بهینه شدند. پارامتر  $\lambda$  مهم است؛ زیرا این پارامتر ممکن است به برازش کمتر یا بیشتر منجر شود. پارامتر C یک کنترل‌کننده است و مقدار خطای پیش‌بینی را تحت تأثیر

### نتایج و بحث

در این مطالعه از روش‌های هوشمند سری زمانی برای پیش‌بینی میزان دیاتومه به‌عنوان شاخص سلامتی و تاب‌آوری رودخانه علی‌آباد در ایستگاه لوارک در بازه زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۱ استفاده شد. مدل‌سازی تغییرات جمعیت و پیش‌بینی توسط مدل‌های بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان با نرم‌افزارهای مخصوص انجام شد؛ به‌گونه‌ای که داده‌های آموزش و تست به نسبت ۷۰ به ۳۰ و نرمال شده و سپس مدل شدند. برای بهبود نتایج و کاهش خطاهای ناشی از خطا از هیبرید موجک هار و داوچز در ۴ سطح استفاده شد. نتایج به‌دست آمده صحت سنجی شدند (جدول‌های ۵ تا ۹). در این مدل‌سازی از سناریوهای مختلف، بر اساس میزان و نوع تأثیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی بر دیاتومه و میزان همبستگی زمانی آن‌ها استفاده و الگوهای جمعیتی به‌عنوان شاخص تاب‌آوری با حدود ( $>40000$  جمعیت تاب‌آور  $>70000$ ) تعیین شد (استونسون، ۲۰۱۴).

جدول ۵- نتایج صحت‌سنجی مدل بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و مدل‌های هیبریدی در سناریوی ۱

| سناریو      | صحت‌سنجی | بیان ژن | موجک بیان ژن | ماشین بردار پشتیبان | موجک بردار پشتیبان |
|-------------|----------|---------|--------------|---------------------|--------------------|
| Di-Zn-Q-COD | MEA      | ۰/۰۷    | ۰/۰۴۳        | ۰/۰۶                | ۰/۰۲               |
|             | RMSE     | ۰/۴۵    | ۰/۰۸         | ۰/۳۳                | ۰/۰۷               |
|             | E        | ۰/۶۸    | ۰/۹۰۴        | ۰/۷۸                | ۰/۹۶               |

جدول ۶- نتایج صحت‌سنجی مدل بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و مدل‌های هیبریدی در سناریوی ۲

| سناریو       | صحت‌سنجی | بیان ژن | موجک بیان ژن | ماشین بردار پشتیبان | موجک بردار پشتیبان |
|--------------|----------|---------|--------------|---------------------|--------------------|
| Di-pH-Zn-COD | MEA      | ۰/۲۸    | ۰/۱۸         | ۰/۲۵                | ۰/۱۳               |
|              | RMSE     | ۰/۴۵    | ۰/۳۴         | ۰/۴۲                | ۰/۲۵               |
|              | E        | ۰/۱۶    | ۰/۴۲         | ۰/۳۵                | ۰/۷۳               |

جدول ۷- نتایج صحت‌سنجی مدل بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و مدل‌های هیبریدی در سناریوی ۳

| سناریو                        | صحت‌سنجی | بیان ژن | موجک بیان ژن | ماشین بردار پشتیبان | موجک بردار پشتیبان |
|-------------------------------|----------|---------|--------------|---------------------|--------------------|
| Di-Zn-pH-pH <sub>t-1</sub> -Q | MEA      | ۰/۱۲    | ۰/۱۳         | ۰/۱۵                | ۰/۱۱               |
|                               | RMSE     | ۰/۳۵    | ۰/۲۵         | ۰/۳۳                | ۰/۱۲               |
|                               | E        | ۰/۱۷    | ۰/۲۱         | ۰/۱۵                | ۰/۵۳               |

جدول ۸- نتایج صحت‌سنجی مدل بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و مدل‌های هیبریدی در سناریوی ۴

| سناریو   | صحت‌سنجی | بیان ژن | موجک بیان ژن | ماشین بردار پشتیبان | موجک بردار پشتیبان |
|--|----------|---------|--------------|---------------------|--------------------|
| Di-Zn <sub>t-1</sub> -Zn-COD-Q <sub>t-1</sub> -Q | MEA      | ۰/۰۵    | ۰/۰۲         | ۰/۰۳                | ۰/۰۱               |
|  | RMSE     | ۰/۰۹    | ۰/۰۷         | ۰/۰۸                | ۰/۰۵               |
|  | E        | ۰/۷۸    | ۰/۹۴         | ۰/۸۲                | ۰/۹۸               |

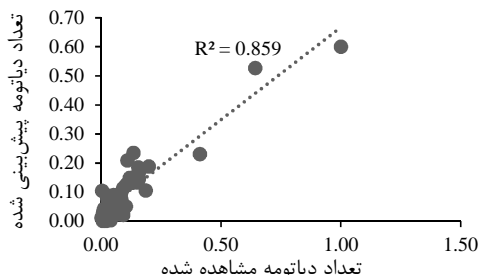
جدول ۹- نتایج صحت‌سنجی مدل بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و مدل‌های هیبریدی در سناریوی ۵

| سناریو                        | صحت‌سنجی | بیان ژن | موجک بیان ژن | ماشین بردار پشتیبان | موجک بردار پشتیبان |
|-------------------------------|----------|---------|--------------|---------------------|--------------------|
| Di-Zn-COD <sub>t-1</sub> -COD | MEA      | ۰/۱۱    | ۰/۱۰۳        | ۰/۳۶                | ۰/۰۹               |
|                               | RMSE     | ۰/۷۷    | ۰/۲۳         | ۰/۱۵                | ۰/۱۷               |
|                               | E        | ۰/۲۷    | ۰/۶۵         | ۰/۳۹                | ۰/۹۱               |

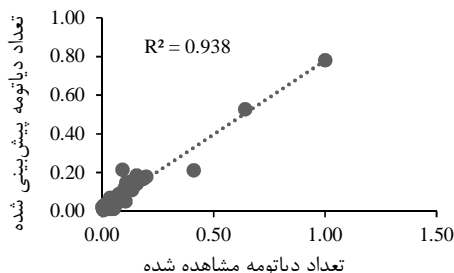
تأثیرات کاهش خطای کرنلی بود. چنانکه در پژوهش‌هایی (روان‌سالار و رجایی، ۲۰۱۵؛ رجایی و خوانی، ۲۰۱۶؛ عزیزاده و همکاران، ۲۰۱۷) این مهم اثبات شده است. طبق پژوهش انجام‌شده روی مدل‌های کلاسیک و هیبریدی بردار پشتیبان به‌طورکلی، هر دو مدل پیش‌بینی‌های بهتر از مدل بیان ژن را نشان دادند؛ درحالی‌که پیش‌بینی با مدل هیبریدی قابل‌اعتمادتر؛ اما استفاده از مدل بیان ژن به‌مراتب آسان‌تر و نسبت به پارامترها قابل‌انعطاف‌تر بود. از بین مدل‌های به‌کار رفته مدل هیبرید موجک ماشین بردار پشتیبان در سناریوی ۴، بیشترین دقت و در سناریوی ۳ کمترین مقدار را در صحت‌سنجی نشان داد. تفاوت عمده این دو سناریو، وجود اسیدیته در سناریوی ۳ است. مدل هیبریدی ماشین بردار پشتیبان - موجک در پیش‌بینی مقادیر دیاتومه رودخانه،

با مقایسه خطاهای هرکدام از مدل‌ها، مشخص شد که هر ۴ مدل با دقت خوب و خطای قابل قبولی می‌توانند میزان جمعیت دیاتومه در ارتباط با پارامترها را مشخص کنند. در مقایسه بین مدل‌های هیبریدی نیز نتیجه مدل‌ها نسبت به غیر هیبریدی بهتر و دارای خطای کمتری بود که با تحقیقات (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۶) روی این مدل‌ها همخوانی داشت. مدل‌های غیر هیبریدی به‌دلیل وجود فرکانس‌های مختلف داده‌های زمانی، دارای خطای بیشتری بودند و از این میان مدل ماشین بردار پشتیبان به‌دلیل کاهش خطای کرنلی در حین مدل‌سازی نتیجه بهتری را نسبت به بیان ژن نشان داد. این نتایج با نتایج مطالعات احمدی و همکاران (۱۳۹۳) در استفاده از مدل‌ها مطابقت دارد. در مقایسه بین دو مدل هیبریدی، ماشین بردار پشتیبان - موجک نتیجه بهتری را نشان داد که از

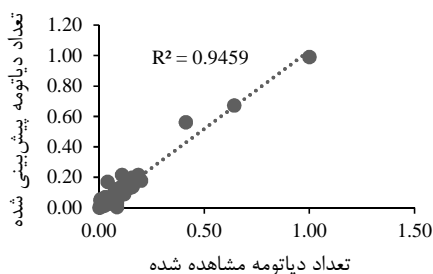
شد و سناریوی ۴ نتایج بهتری را در رابطه با پیش‌بینی میزان دیاتومه برای ادامه بقا در اکوسیستم نشان داد (شکل‌های ۳ تا ۶)؛ به‌گونه‌ای که می‌توان گفت رودخانه با همین روند در شرایط تاب‌آور قرار دارد.



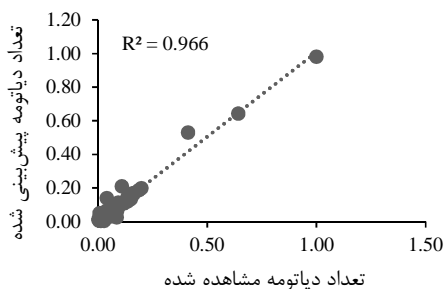
شکل ۳- پیش‌بینی میزان دیاتومه با مدل بیان ژن در سناریوی ۴



شکل ۴- پیش‌بینی میزان دیاتومه با مدل ماشین بردار پشتیبان در سناریوی ۴



شکل ۵- پیش‌بینی میزان دیاتومه با مدل موجک بیان ژن در سناریوی ۴



شکل ۶- پیش‌بینی میزان دیاتومه با مدل موجک ماشین بردار پشتیبان در سناریوی ۴

عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر پیش‌بینی‌شده این مدل مقادیر مشاهداتی را به‌خوبی برآورد کرد. در مقایسه بین سناریوها، سناریوی ۴ در مجموع کمترین خطا و بیشترین هماهنگی با تاب‌آوری را نشان می‌دهد. با بررسی سناریوها میزان تأثیر اسیدیته در میزان دیاتومه در این رودخانه کمتر از سایر پارامترهاست که در سناریوهای ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که با نتیجه تحقیقات بر روی دیاتومه توسط (سینکیویز و گاسیوویسکی، ۲۰۱۷) در دریاچه‌های اسیدی برعکس است که البته تفاوت رفتاری دیاتومه در ارتباط با این پارامتر نیز تأکید شده است. تغییرات دبی با تأثیر منفی و اکسیژن شیمیایی و فلز روی به‌عنوان خواهر فلز سنگین کبالت، با اثر مثبت دارای بیشترین تأثیر بر میزان جمعیت دیاتومه در رودخانه بودند. این تأثیر به‌خوبی در سناریوهای ۱ و ۴ قابل مشاهده بود؛ به‌گونه‌ای که تأثیر این پارامترها در تحقیقات کلی تأثیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی بر انواع جلبک‌ها توسط آهی چای و همکاران (۲۰۱۱) بررسی شده است. گفتنی است در پژوهش‌های مشتمل بر پیش‌بینی روش‌های هوشمند هیبریدی، عملکرد مدل سنجش تاب‌آوری آب تحت تأثیر پارامترهای شیمیایی ورودی تغییر می‌یابد و این امر نشان‌دهنده اهمیت تأثیر پارامترها بر دیاتومه است؛ چنانکه در سناریوهای شامل روی و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی خطای کمتری نسبت به سناریوهای شامل اسیدیته مشاهده شد که این امر نشان‌دهنده تأثیر زمانی مهم این دو پارامتر بر جمعیت دیاتومه است. با توجه به اینکه میزان جمعیت دیاتومه در دبی بالا به دلیل جریانات قوی آب کمتر است و دبی همبستگی منفی با جمعیت دیاتومه دارد، تأثیر آن کمتر مشاهده شد؛ اما تأثیر وجود یا نبود این پارامتر در سناریوها درجه اهمیت آن را کمتر از روی و اکسیژن شیمیایی و بیشتر از اسیدیته بر جمعیت دیاتومه نشان می‌دهد. با عنایت به اینکه در مطالعات پژوهشگران میزان اسیدیته به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار گزارش شده است (آهی چای و همکاران، ۲۰۱۱)؛ اما در سناریوهای شامل اسیدیته در این رودخانه تأثیر آن کمتر بود. لذا برای بررسی وضعیت زیستی این رودخانه ابتدا تأکید بر میزان روی و سپس اکسیژن شیمیایی و پس از آن‌ها، دبی افزایش یا کاهش مؤثر جمعیت دیاتومه را نشان خواهد داد. نتایج کلی پیش‌بینی به دست آمده با شاخص تاب‌آوری مقایسه

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از کاربرد مدل‌های هوش مصنوعی و هیبریدی موجک برای پیش‌بینی تاب‌آوری رودخانه استفاده شد. برای تعیین شاخص تاب‌آوری اکولوژیکی رودخانه سه معیار تأثیرات انسانی، اقلیم و بیولوژی با زیر معیارها و شاخص‌ها مشخص گردید. الگوی جمعیتی دیاتومیک تروفیک جلبک دیاتومه به‌عنوان شاخص تاب‌آوری (متغیر وابسته) در نظر گرفته شد و سایر شاخص‌ها، به‌عنوان متغیر مستقل معین، سناریوهای تعریف‌شده مدل‌سازی شدند و صحت‌سنجی انجام گرفت. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم پارامترهای اکسیژن شیمیایی و فلز روی به‌عنوان خواهر فلز سنگین کبالت بر جلبک بود. دبی ارتباط معکوس و اسیدیته کمترین تأثیرگذاری را داشت. از طرفی دیگر نتایج پیش‌بینی نشان‌دهنده تأثیر مثبت مدل‌های هیبریدی توسط موجک با حذف نویز در پارامترهای ناپیوسته بود. از میان مدل‌ها، مدل ماشین بردار پشتیبان به‌دلیل فرایند کرنلی کمترین خطا را داشت که در ترکیب با موجک، خطا را به حداقل رساند. در نهایت میزان دیاتومه پیش‌بینی شده بر اساس شاخص تاب‌آوری در محدوده قابل‌تحمل و قابل‌جبران قرار داشت. از نتایج این پژوهش اهمیت تأثیر پارامترهای با ارتباط مستقیم (اکسیژن شیمیایی و فلز روی) بر میزان تاب‌آوری بود که در مدیریت کاربری اراضی باید مورد توجه قرار گیرد. تغییرات اقلیم مانند بارش و خشک‌سالی با تأثیر بر غلت سایر پارامتر کیفی در رده دوم اهمیت قرار دارد. مدل‌های هیبریدی هوش مصنوعی برای پیش‌بینی در عرصه زیست‌سنجی نتیجه مثبتی را نشان دادند؛ لذا این روش‌ها در پیش‌بینی‌های زیست‌محیطی می‌توانند به تفسیر بهتر ارتباطات و پدیده‌ها منجر شود و به توسعه پایدار برنامه‌ریزی منابع زیست‌محیطی و سیاست‌های مدیریت منابع آب کمک کنند.

## منابع

- احمدی، ف. رادمنش، ف. و آبادی، ر. ۱۳۹۳. مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه باراندوز چای). نشریه آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی. ۲۸(۶): ۱۱۶۲-۱۱۷۱.

- دهقانی، ر. یونسی، ح. و ترابی پوده، ح. ۱۳۹۶. مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان. برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه بیزین در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها مطالعه موردی: رودخانه کشکان. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۴): ۱۲۵-۱۲۸.
- رضایی، م. ر. سرایی، م. ح. و دانش‌نیا، ا. ب. ۱۳۹۵. تبیین مفهوم تاب‌آوری و شاخص‌ها و چهارچوب‌های آن در سوانح طبیعی. فصلنامه پیشگیری و مدیریت بحران. ۱۶(۱): ۹۶-۱۱۲.
- سلگی، ا. زارعی، ح. و گلابی، م. ر. ۱۳۹۶. بررسی عملکرد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با روش‌های پیش‌پردازش داده‌ها جهت مدل‌سازی جریان رودخانه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۲): ۱۸۵-۲۰۱.
- سیدیان، س. م. سلیمانی، م. و کاشانی، م. ۱۳۹۳. پیش‌بینی دبی جریان رودخانه با استفاده از اکوهیدرولوژی ۱(۳): ۱۶۷-۱۷۹.
- فعال، ز. ۱۳۹۱. بررسی کیفی آب رودخانه بهمن‌شیر با استفاده از جلبک‌ها به‌عنوان شاخص‌های زیستی فصلنامه علمی محیط‌زیست. سازمان حفاظت محیط‌زیست. ۲۲-۳۲.
- قبادیان، ر. قربانی، م. ع. و خلج، م. ۱۳۹۴. بررسی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در روند یابی سیلاب رودخانه زنگمار در مقایسه با روش موج دینامیکی. مجله آب و خاک. ۲۷(۳): ۵۹۲-۶۰۲.
- قربانی، م. ع. و دهقانی، ر. ۱۳۹۵. کاربرد شبکه‌های عصبی بیزین ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان ژنی در تحلیل بارش - رواناب ماهانه مطالعه موردی: رودخانه کاکارضا. علوم و مهندسی آبیاری شهید چمران اهواز. ۳۹(۲): ۱۲۵-۱۳۸.
- نیک‌پور، م. ر. ثانی‌خانی، ه. سجاد، م. ب. و عارف، م. ۱۳۹۶. کاربرد مدل‌های بیان ژن ماشین بردار پشتیبان Ls-WNN-ANN شبیه‌سازی بارش رواناب رودخانه خیاوچای. اکو هیدرولوژی. ۴۲: ۶۲۷-۶۳۹.

10. Alizadeh M. J. Rajae T. and Motahari M. 2017. No Access Flow forecasting models using hydrologic and hydrometric data. Proceedings of the Institution of Civil



- P. S. Alexander G. Brooks' S. Carr J. Clayton S. N. Dahm C. Follstadshah J. Galata D. L. Loss S. G. Goodwin P. Hart D. D. Hassett B. Jenkinson R. G. M. Kondolef Lave R. Meyer J. L. O'donnell T. K. Pagano L. and Sudduh E. 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *Ecology*. 427: 208-21.
23. Paul M. J. Walsh B. Oliver J. and Thomas D. 2017. Algal indicators in streams: areviewof their application in water quality management of nutrient pollution U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.P: 44
24. Rajaei T. and Boromand A. 2015. Forecasting of chlorophyll-a concentrations in South San Francisco Bay using five different models. *Ocean Research*. 53: 208-217.
25. Rajaei T. and Shahabi A. 2016. Evaluation of wavelet-GEP and wavelet-ANN hybrid models for prediction of total nitrogen concentration in coastal marine waters *Arabian Journal of Geosciences*. 9: 176.
26. Rajaei T. and Khani S. 2016. Comment on "Performance of ANFIS versus MLP-NN dissolved oxygen prediction models in water quality monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1): 938-940.
27. Ravansalar M. and Rajaei T. 2015. Evaluation of Wavelet Performance via an ANN-Based Electrical Conductivity Prediction model. *Environmental Monitoring and Assessment* 1876.
28. Sattar A. M. A. Gharabaghi B. Sabouri F. and Thompson A. M. 2017. Urban stormwater thermal Gene expression models for protection of sensitive receiving streams. *Hydrological Processes*. 31(13): 2330-2348.
29. Sienkiewicz E. and Gąsiorowski M. 2017. The diatom- inferred pH reconstructions for a naturally neutralized pit lake in south-west Poland using the Mining and the Combined pH training sets. 15(605-606): 75-87.
30. Stevenson J. 2014. Ecological assessment with algae: a review and synthesis. *Journal Phycol*. 50: 437-461.
31. WFD. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy Official Journal of the European Communities L 327/1 of 22.12.2000.
32. WFD. 2008. Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, the Council Official Journal of the European Communities L 348/84 of 24.12.2008.
- Engineers- Water Management. 170(3): 150-162.
11. Ahii Chia M. Paul B. S. alon S. O. and adaMu A. 2011. Green algal interactions with physicochemical parameters of some manmade ponds in Zaria northern Nigeria. *Brazilian Journal of Botany*. 34(3): 285-295.
12. Beckera M. E. Beckerb T. J. and Belluccia C. J. 2018. Diatom tolerance metrics to identify total phosphorus as candidate cause of aquatic life impairment in Connecticut USA freshwater streams. *Ecological Indicators* 93: 638-646.
13. Bere T. Mangadze T. and Mwedzi T. 2014. The application and testing of diatom-based indices of stream water quality in Chinhoyi Town Zimbabwe. *Water SA*. 4(3): 503-512
14. EPA. 2017. Smart Growth Fixes for Climate Adaption and Resilience. 94 p.
15. EIA/OECD. Chirista Claap G. B. A. K. K. O. November 2015. Low-Emission Development Strategies LEDS: Technical Institutional and Policy Lessons Head of Publications Service. 70 p.
16. Eslamian S. University F. and Gohari A. 2009. Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using Support Vector Machines and Artificial Neural Networks in Greenhouse. *Research Journal of Environmental Sciences*. 3(4):439-447
17. González Costa J. J. Reigosa M. J. Matfás J. M. and Covelo E. F. 2017. Soil Cd Cr Cu Ni Pb and Zn sorption and retention models using svm: Variable selection and competitive model. *Science of the Total Environment*. 593-594(Supplement C): 508-522.
18. Gong Y. Zhang Y. Lan S. and Wang H. Y. 2016. A Comparative Study of Artificial Neural Networks Support Vector Machines and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System for Forecasting Groundwater Levels near Lake Okeechobee Florida. *Water Resour Management*. 301: 375-391.
19. Guang M. Z. Hong W. L. Xiang C. J. and XU M. 2005. Assessment of the water quality and nutrition of the Dongting Lake with wavelet neural network. *Journal of Hunan University*. 32: 91-94.
20. Laila R. Rosa T. and Carles I. 2012. The use of diatom assemblages as ecological indicators in highly stratified estuaries and evaluation of existing diatom indices. *Article in Marine Pollution Bulletin*. 643: 500-511.
21. Mahjouri N. and Kerachian R. 2010. Revising river water quality monitoring networks using discrete entropy theory: the Jajrood River experience *Assessment*. 175(1-4): 291-302.
22. Palmer M. A. Berdata E. S. Allan J. D. Lake

33. Walsh G. and Wepener V. 2009. The influence of land use on water quality and diatom community structures in urban and agriculturally stressed rivers. *Water SA*. 35(5): 579-594.