Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 33-50
https://doi.org/10.22034/IJWER.2022.151154

Prediction of dissolved oxygen in wetlands using FCM-ANFIS model - A Case Study: Choghakhor Wetland

Behdad Pirzadeh Ashraf[1], Alireza Mojtahedi[2*], Mehran Dadashzadeh[3]

[1] M.Sc., Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran
[2] Associate professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran
[3] Ph.D. candidate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

Corresponding Author's E-mail: a.mojtahed@tabrizu.ac.ir

Received: 14 Sep. 2021
Accepted: 6 Jan. 2022

Homepage: **ijwer.uoz.ac.ir**

Abstract: In the present study, the health status of the Choghakhor wetland, as one of the twenty-five Iranian wetlands of international importance, is assessed using the ESCOM's wetland classification and risk assessment index (WCRAI). Furthermore, the ability of the FCM-ANFIS model is investigated to predict the dissolved oxygen (DO) with electrical conductivity, water level, air temperature and water temperature as input variables. The results highlight that the Choghakhor wetland is categorized as "D" based on the A-F ecological category, which means that the wetland ecosystem has changed and a large number of local species have become extinct. Also, the output of the FCM-ANFIS model indicates the acceptable performance of the model in predicting the amount of DO due to the high values of the efficiency criteria (for the best model, DC = 0.92 and RMSE = 0.07).

Keywords: Wetland health assessment, ESCOM's WCRAI, Online monitoring station, Choghakhor wetland, FCM-ANFIS

Introduction: Wetlands provide various supporting, provisioning, regulating, and cultural services, all of which make a significant contribution to the well-being of human populations. These delicate ecosystems have been long exposed to unsustainable extraction and various anthropogenic activities. In Iran, one-third of 25 designated sites (Ramsar sites) are under pressure or in critical condition. The risk assessment of these endangered ecosystems, thus, is highly required. In this regard, various studies have been conducted to evaluate wetland health status and to determine the factors threatening ecosystems. The first and most widely used methods for assessing wetland health status was proposed by Cowardin et al. (1979). Jang (1993) proposed the adaptive neural fuzzy inference system by combining the capabilities of fuzzy theory with neural networks. It provides accelerated learning capacity and adaptive interpretation capabilities to model complex patterns and apprehends nonlinear relationships. Kotze et al. (2005) proposed a method which can classify wetlands in any climatic conditions.

The development of time-series data mining techniques has provided an emerging method for wetland health assessment, such as adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS). In the present study, ESCOM's wetland classification and risk assessment index (WCRAI) is used for the first time to evaluate Choghakhor wetland health status. Furthermore, the ability of the FCM-ANFIS model is investigated to predict the dissolved oxygen (DO) in order to provide a model with high reliability to approximate the wetland parameters in the future.

Methodology: The Choghakhor wetland in the south of Shahr-e Kord, Chaharmahal and Bakhtiari province (31° 55' 23" latitude North, 50° 53' 59" longitude East) is located at the northern slopes of Kallar mountain (Fig. 1). The topography of the region is such that the plain formed by the mountains "Baraftab" in the north, "Shapurnaz" in the west, and "Kallar" from the west to the south has created a drainage basin of 114 square kilometers as a suitable location to feed a wetland with a surface area of about 1500 hectares.

ESCOM's WCRAI is a reliable approach to determine the overall wetland health status, which can be implemented by non-wetland experts. This index involves field sampling and in situ measurement of some water physicochemical parameters, including DO, EC, and pH, as well as various physical characteristics of the wetland.

Since the wetland are exposed to different anthropogenic activities, including agricultural activities, wastewater disposal, tourism, and livestock grazing, it is divided into four parts, and the results obtained from these parts are averaged to calculate the overall values (Fig. 2). Monthly water samples procured during 2017 and 2018 in the Choghakhor wetland. The periodic values obtained from four sampling points, located in the study area, are averaged to calculate the overall values of the indicators

In the present study, the fuzzy c-means clustering method (FCM) is used to derive the rules in Takaki-Sugeno fuzzy model, ans the health status of the Choghakhor wetland is assessed using the ESCOM's WCRAI.

Results and Discussion: In this study, nonlinear regression is performed on the qualitative data obtained from the wetland, in order to model the relationship between its parameters. For this purpose, an adaptive neural fuzzy inference system is utilized to model changes in DO at a depth of 1.4 m in the Choghakhor wetland. Water temperature, electrical conductivity at three depths of 0.3, 0.85 and 1.4 m, air temperature, water level and DO at two depths of 0.3 and 0.85 m are selected as input parameters. Daily and one-hour normalized time series data are used for the modeling. The results of modeling the changes in the DO parameter at a depth of 1.4 m are given in Table 8. The values of the efficiency criteria are measured to evaluate the performance of the developed models to the related inputs, using the determination coefficient (DC) and the root mean square error (RMSE). The results of the model in scenario M14 with electrical conductivity (0.3 m), water level, air temperature and water temperature (1.4 m) as input variables led to higher performance with the best efficiency criteria, including DC = 0.92 and RMSE = 0.07.

Risk assessment is an integral part of sustainable wetland management, where the ecosystem's health and wise exploitation are ensured. In this regard, the health status of the Choghakhor wetland, as one of the most important Iranian Ramsar sites, is assessed with ESCOM's WCRAI. Tables 10 and 11 represent the results of field measurements for four parts of the study area in 2017 and 2018, respectively. The results obtained confirmed a decline in the wetland health level in 2018 compared to 2017. The ESCOM's WCRAI generated overall scores of 48% and 41% for the Choghakhor wetland health level for 2017 and 2018, respectively.

Conclusion: The ESCOM's WCRAI generated overall scores of 48% and 41% for the Choghakhor wetland health level for 2017 and 2018, respectively. The Choghakhor wetland is categorized as "D" based on the ecological category, meaning the wetland ecosystem has undergone a transformation and a large number of local species have become extinct.Moreover, the FCM-ANFIS model is utilized to model changes in DO at a depth of 1.4 m in the Choghakhor wetland. The results highlight that the FCM-ANFIS model has a high ability to predict DO based on physical and water quality parameters. The results of the M14 model with electrical conductivity (0.3 m), water level, air temperature and water temperature (1.4 m) as input variables led to higher performance with the best efficiency criteria, including DC = 0.92 and RMSE = 0.07.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۵۰-۳۳
https://doi.org/10.22034/IJWER.2022.151154

پیش‌بینی شاخص کیفی اکسیژن محلول تالاب با استفاده از مدل سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی (مطالعه موردی: تالاب چغاخور)

بهداد پیرزاده اشرف[۱]، علیرضا مجتهدی[۲*]، مهران داداش‌زاده[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۲] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۳] دانشجوی دکتری مهندسی عمران، سازه‌های دریایی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نگارندهٔ مسئول: a.mojtahed@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶
وب‌گاه نشریه: **ijwer.uoz.ac.ir**

چکیده: تالاب‌ها به سبب ارائه خدمات گوناگون به جوامع بشری یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های موجود در طبیعت بوده و از ارزش زیادی برخوردارند. اما بر اثر وقوع خشکسالی‌های پی در پی و همچنین سو مدیریت در بهره‌برداری از این زیست‌بوم‌ها، این اکوسیستم‌های ارزشمند در خطر نابودی قرار گرفته‌اند. از همین رو، در راستای حفظ و بهره‌برداری خردمندانه از این زیست‌بوم‌های با ارزش، در پژوهش حاضر به ارزیابی وضعیت سلامت تالاب چغاخور که جزء مهم‌ترین تالاب‌های ایران بوده و در کنوانسیون رامسر نیز به ثبت رسیده، با استفاده از روش ماتریسی پرداخته شده است. همچنین در این پژوهش با استفاده از داده‌های ثبت و ذخیره شده در طی دو سال ۹۶ و ۹۷، توانایی مدل FCM-ANFIS در پیش‌بینی پارامتر اکسیژن محلول (DO) با استفاده رسانایی الکتریکی آب، دمای آب، رطوبت هوا، دمای هوا و عمق آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از مطالعات میدانی و امتیازدهی ماتریسی تالاب چغاخور حاکی از آن است که این تالاب در وضعیت D قرار دارد، بدین معنی که اکوسیستم تالاب دچار دگرگونی شده و مقدار زیادی از گونه‌های محلی از بین رفته‌اند و بایستی اقدامات جدی در راستای بهبود شرایط صورت پذیرد. همچنین خروجی مدل FCM-ANFIS اجرا شده بر روی تالاب چغاخور حاکی از عملکرد قابل قبول این مدل در پیش‌بینی میزان اکسیژن محلول با توجه به مقادیر بالای پارامترهای ارزیابی و میزان کم خطا (برای بهترین مدل، DC = ۰/۹۲ و RMSE = ۰/۰۷) می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی سلامت تالاب، ارزیابی ماتریسی تالاب، ایستگاه پایش آنلاین، تالاب چغاخور، FCM-ANFIS

۱- مقدمه

تالاب‌ها یکی از گسترده‌ترین منابع آبی طبیعی کشور محسوب می‌شوند و عرصه آن‌ها، محیط بسیار مناسبی را برای زیست گیاهان و جانوران مختلف و همچنین استفاده‌های انسانی فراهم کرده است. بروز تغییرات آب و هوایی در مناطق مختلف کشور، عدم رعایت حق‌آبه تالاب‌ها و کاهش آورد رودها، اجرای برخی طرح‌های صنعتی

پیرامون تالاب‌ها و دریاچه‌ها و ورود پساب‌های صنعتی و کشاورزی به تالاب‌ها بدون در نظرگرفتن اثرات زیست‌محیطی از جمله تهدیداتی است که این زیست‌بوم‌های حیاتی را تهدید می‌کند. متاسفانه با وجود آگاهی از ارزش والای این زیست‌بوم‌ها، هنوز روند تخریب این سیستم‌های طبیعی بی‌همتا که ده‌ها کارکرد متفاوت و موزون را یک‌جا در خود دارند، متوقف نشده است. در این اکوسیستم‌ها، آب اصلی‌ترین عامل اثرگذار بر فرآیندهای حاکم در آن‌ها می‌باشد. مکانیزم‌های مخرب تالاب‌ها را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود؛ عوامل مخرب انسانی (آلودگی‌ها، بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیستی، استخراج زغال سنگ، توسعه شهرنشینی) و عوامل طبیعی (تغییرات اقلیمی، تهاجم بیولوژیکی گونه‌های مهاجم). در حال حاضر تالاب‌ها ۶ درصد سطح کره زمین را در بر گرفته‌اند. از این میان ۱۶۰۲ تالاب در ۱۲۵ کشور با مساحت ۱۴۵۸۲۳۶۲۵ میلیون هکتار در کنوانسیون رامسر به عنوان تالاب‌های با اهمیت بین‌المللی ثبت شده‌اند. ایران دارای ۲۵۰ تالاب بزرگ و کوچک، ساحلی و داخلی، دائمی و موقت می‌باشد که برحسب میزان بارندگی و جریان آب‌های سطحی مساحت آن‌ها بین ۲ تا ۲/۵ میلیون هکتار تغییر می‌کند (Behroozi Rad, 2011). مروری بر وضعیت موجود تالاب‌های ایران نشان می‌دهد که عواملی همچون عدم وجود شاخص‌های مدیریتی، مدیریت غیر کارا، بهره‌برداری نامعقول، تغییر کاربری و تبدیل زمین‌های تالابی، سدسازی، صید غیر قانونی، کم‌آبی و خشکسالی، اجرای طرح‌های عمرانی، وارد کردن گونه‌های گیاهی و جانوری غیربومی، احداث و توسعه مزارع، تکثیر و پرورش آبزیان، احداث بزرگراه‌ها و استفاده بیش از اندازه از آب تالاب‌ها سبب خشک شدن تالاب‌های کشور شده است. تقریباً هیچ تالابی در ایران بدون معضل نیست و اهمیت تالاب‌ها در اقتصاد و کیفیت زندگی مردم ایران مورد توجه کافی قرار نگرفته است. حال آن که باید در نظر داشت حفظ و نگهداری تالاب‌ها به عنوان اکوسیستم‌های کاربردی، برای پایداری و توسعه ضروری است (Adamus and Stockwell, 1983).

حفظ سیستم‌های پیچیده مرتبط با زیست‌مندان تالاب و عوامل موثر بر زندگی و زیست آن‌ها، به منظور رسیدن به هدف بهره‌مندی از منابع بی‌شمار اقتصادی، تفرجگاهی، علمی، ژنتیکی و ...، با انجام مطالعه، شناخت دقیق آن‌ها از نظر زیستی و علمی، شناخت نیازهای ذینفعان و بهره‌برداران و جامعه‌شناسی مربوط به ساکنان تالاب با هدف رفع مشکلات و تهدیدها و در نهایت تقویت امکانات و ظرفیت‌های آن امکان‌پذیر خواهد بود. در کنار تلاش برای شناخت این اکوسیستم‌های آبی، به عنوان حساس‌ترین منابع جهانی که با مشکلات متعدد زیست‌محیطی روبه‌رو می‌باشند، شناسایی و ارائه راهکارهای کاربردی به منظور پایش و نظارت به تالاب‌ها می‌تواند بنیادی‌ترین گام در رفع معضلات مربوط به از دست رفتن تالاب‌ها شود. برای ارائه راهکارهای موثر و منطبق بر روش‌های پیشنهادی کنوانسیون رامسر در زمینه مدیریت تالاب‌ها، نیاز به تعریف و شناخت وضعیت فعلی و پیش‌بینی تقریبی از شرایط آتی می‌باشد که در جهت نیل به این اصل، مطالعات علمی انجام گرفته در سال‌های گذشته، مورد ارزیابی قرار گرفته است. البته شایان ذکر می‌باشد که با توجه به اهمیت موضوع متأسفانه بررسی‌های انجام گرفته ناکافی بوده و نیاز به مطالعات بیشتر احساس می‌شود.

با در نظر گرفتن مباحث فوق می‌توان دریافت که اولین گام در بررسی تالاب‌ها، طبقه‌بندی و ارزیابی شرایط تالاب می‌باشد. هدف از طبقه‌بندی تالاب‌ها کنترل پارامترهای طبیعی حاصله از تالاب‌ها است که این امر معمولاً با بررسی و دسته‌بندی شاخصه‌های رایج فیزیکی و یا بیولوژیکی تالاب، همچون هیدرولوژی، هیدروژئومورفولوژی و یا گونه‌های گیاهی موجود، بررسی می‌گردد (Brinson, 1993). یکی از نخستین و پرکابردترین روش‌ها جهت ارزیابی تالاب‌ها توسط Cowardin et al. (1979) ارائه شده است. این روش از پنج بخش که به صورت سلسله مراتبی عمل می‌کند، تشکیل شده است که از اول به آخر عبارتند از سیستم، زیر سیستم، مجموعه‌ها، زیرمجموعه‌ها و گونه غالب. البته این روش نسبتاً پیچیده بوده و با رویکردی همه جانبه سعی در ارزیابی و دسته‌بندی تالاب‌ها دارد. این روش که هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای نواقصی است که موجب عدم کفایت آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود چرا که این روش بر اساس مطالعاتی که در ناحیه

خاصی از ایالات متحده انجام شده بود، ارائه گردیده و همین امر موجب فراگیر نبودن آن می‌شود (Dely et al., 1999). مطالعات تکمیلی نیز توسط سایر محققین در جهت رفع این مشکل انجام گرفت اما هر یک نواقصی داشتند که موجب عدم کاربردی بودن آن‌ها می‌گردید (Breen, 1988; Silberbauer and King, 1991; Rowntree, 1993). Brinson (1988) مدلی مفهومی از تأثیرات موقعیت حوضه و خواص جریان ورودی آب بر چرخه آبی و کیفیت آب تالاب ارائه نمود که اهمیت در نظر داشتن کیفیت آب را در طبقه‌بندی تالاب آشکار می‌ساخت. اما در نهایت Kotze et al. (2005) با مبنا قرار دادن روش کواردین روش نوینی را ارائه کردند که توانایی رده‌بندی تالاب‌ها در هر شرایط آب و هوایی را دارا بود. این روش، تالاب‌ها را با بررسی سه ویژگی هیدرولوژی، زمین‌شناسی و گونه‌های گیاهی تالابی مورد ارزیابی و دسته‌بندی قرار می‌دهد.

از طرفی تنها ارائه روشی جهت ارزیابی وضعیت تالاب در تنظیم برنامه‌های مدیریتی کافی نخواهد بود و در کنار آن وجود مدلی که بتواند فرآیندهای تالاب را ارزیابی نماید احساس می‌شود. پس نیاز است تا با استفاده از داده‌های حاصله از حسگرها، الگوهای موجود میان آن‌ها شناسایی گردد. مزایای روش‌های محاسبات نرم همچون سیستم عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS) موجب شده تا این روش‌ها در مباحث مدیریت آب مورد توجه قرار گرفته و در زمینه‌های مختلف از آن استفاده گردد. Chiu (1994) در مطالعه‌ای از ANFIS جهت ساخت مدل پیش‌بینی سیل استفاده نمود. در این مطالعه جهت افزایش دقت از کلاسترینگ فازی استفاده گردید و نتایج حاصله با مدل شبکه عصبی پس انتشار (BPNN) مقایسه گردید که نتایج حاکی از آن بود که مدل ANFIS عملکرد بهتری دارد. Chang and Chang (2006) از مدل ANFIS جهت مدل‌سازی ارتفاع آب در یک حوضه آبریز در تایوان استفاده نمودند. در این تحقیق، داده‌های ۳۰ ساله مربوط به سیلاب‌های شدید مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که مدل ANFIS عملکرد خوبی در مدل‌سازی ارتفاع آب در حوضه مورد نظر داشته است. Tiwari et al. (2018) به توسعه یک سیستم عصبی فازی تطبیقی مبتنی بر داده برای مدل‌سازی شاخص کیفیت آب با استفاده از مجموعه داده‌های به دست آمده از هشت ایستگاه نظارتی مختلف در رودخانه ساتلوج در شمال هند پرداختند و دقت پیش‌بینی دو روش کلاسه‌بندی Subtractive و fuzzy C means را مورد ارزیابی قرار دادند.

در پژوهش حاضر سعی شده است تا با تاکید بر جنبه کیفی آب تالاب، ارزیابی خطر انجام گیرد چرا که در بحث مدیریت تالاب، شناخت کلی از شرایط فعلی تالاب لازم و مفید خواهد بود. شایان ذکر است که با توجه به عدم وجود روش مدون و تصویب شده برای ارزیابی خطر و دسته‌بندی تالاب در ایران، ارائه و مقایسه روش‌های مختلف در انجام هر چه بهتر بررسی‌ها ضروری می‌باشد. از این‌رو، در پژوهش حاضر رویکرد طبقه‌بندی و ارزیابی خطری به کار گرفته شده که کاربردی بوده و استفاده از آن نیاز به تخصص بالایی نداشته باشد تا شاید این امر زمینه‌ساز استفاده از این روش در سطح کلان باشد. از طرفی باید در نظر داشت که برای طرح‌ریزی شرایطی پایدار نیاز به پیش‌بینی از آینده است؛ چرا که در صورت عدم وجود تصویری تقریبی از آینده، برنامه‌ریزی دچار مشکل می‌شود و ممکن است اقدامات بعدی را بی‌اثر سازد. به همین دلیل در این پژوهش سعی گردیده که با استفاده از داده‌های موجود، توانایی مدل FCM-ANFIS در پیش‌بینی پارامتر اکسیژن محلول مورد بررسی قرار گیرد تا با ارائه مدلی با قابلیت اعتماد بالا بتوان تقریبی از پارامترها در آینده را به دست آورد و اقدامات مناسب را در راستای بهره‌وری خردمندانه از تالاب انجام داد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تالاب چغاخور در جنوب غربی ایران در استان چهارمحال و بختیاری (°۳۱ ′۵۵ ″۱۰ عرض شمالی، °۵۰ ′۵۴ ″۲۰ طول شرقی) به عنوان بیست و سومین تالاب بین‌المللی ایران در فهرست تالاب‌های عضو کنوانسیون رامسر ثبت شده است. این اکوسیستم با مساحتی حدود ۱۵۰۰ هکتار در دامنه ارتفاعات برآفتاب در شمال و کوه کلار در جنوب در نزدیکی شهر بلداجی واقع گردیده است که نقشه هوایی این تالاب

در شکل ۱ قابل مشاهده است. ضلع شمالی تالاب با فاصله کمی از جاده شهرکرد- بروجن دارای سواحل سنگریزه‌ای و قلوه سنگی می‌باشد که به جهت دسترسی راحت بوده و مورد استفاده‌های تفرجی و به خصوص ماهیگیری با قلاب قرار می‌گیرد. این ضلع تالاب از عمق آب بیشتری برخوردار بوده و سد خاکی چغاخور نیز در همین قسمت واقع شده است. جهت جنوبی تالاب نیز در بخش آبی، مهم‌ترین زیستگاه پرندگان بوده و در خشکی دارای کاربری‌های زراعت، باغداری و دامداری سنتی می‌باشد. روستاهای واقع در جنوب تالاب، مهم‌ترین سکونت‌گاه انسانی حاشیه تالاب به حساب می‌آیند. ضلع غربی تالاب بسیار عریض و از شیب بسیار ملایمی برخوردار است که از کم عمق‌ترین نقاط تالاب محسوب می‌شود و محل تجمع و زیست پرندگان آبزی و کنار آبزی می‌باشد.

تالاب مورد بررسی علاوه بر اهمیت منطقه‌ای برای مردم محلی و نیز استان‌های مجاور، با توجه به اهمیت زیستگاهی برای پرندگان مهاجر فصلی و نیز آبزیان مختلف دارای اهمیت بین المللی بوده و نیازمند مدیریتی هوشمندانه در راستای بهره‌برداری خردمندانه از تالاب‌ها است.

۲-۲- سیستم پایش آنلاین تالاب

طرح حفاظت از تالاب‌های ایران به عنوان پروژه همکاری بین سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، صندوق تسهیلات

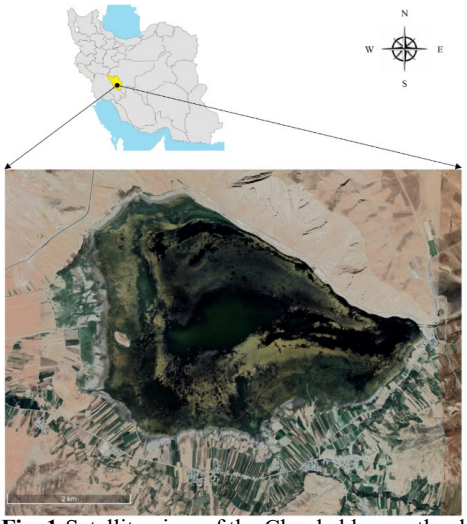

Fig. 1 Satellite view of the Choghakhor wetland
شکل ۱ تصویر هوایی از تالاب چغاخور (۲۰۲۱)

محیط زیست جهانی (GEF) و برنامه توسعه ملل متحد (UNDP) با هدف کاهش یا حذف دائمی تهدیدات و به طور کلی پایداری و بقای اکوسیستم‌های تالابی ایران، در تالاب‌های منتخب و مهم به عنوان زیستگاه‌های نمونه از سال ۲۰۰۵ آغاز گردید و در تلاش است تا تجربیات بدست آمده را در قالب معرفی رویکرد زیست‌بومی و استقرار یک سیستم مدیریتی جدید و فراهم کردن ساز و کارهایی قانونی برای اجرایی شدن آن به سایر تالاب‌های کشور گسترش دهد (DWAF, 2007). در راستای اجرایی شدن برنامه‌های مدیریت تالاب‌های کشور، طرح حفاظت از تالاب‌های ایران با همکاری سازمان برنامه توسعه ملل متحد، دولت ژاپن و سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران اقدام به طراحی و اجرای برنامه پایش آنلاین نمودند که در مرحله اول منجر به ایجاد سه ایستگاه پایش آنلاین اکوسیستمی در تالاب‌های چغاخور، کانی‌برازان، سولدوز و نوروزلو (آفلاین) و سامانه دسترسی آنلاین به داده‌ها می‌باشد.

۲-۳- سیستم پایش آنلاین تالاب

تالاب‌ها در سراسر جهان برای سالیان متمادی تحت فشار بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی و فعالیت‌های مختلف انسانی نظیر گسترش شهرنشینی، توسعه مناطق صنعتی و تغییر کاربری اراضی بوده‌اند (Salimi et al., 2021). از این‌رو، ارزیابی ریسک این اکوسیستم‌های ارزشمند و در خطر نابودی، به منظور اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب و اجرای به موقع اقدامات مربوطه جهت جلوگیری یا محدود کردن تهدیدهای موجود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر، ارزیابی ریسک اکوسیستم‌های تالابی توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است که نتیجه آن توسعه رویکردهای متعدد جهت ارزیابی ریسک تالاب‌ها و شناسایی تهدیدهای موجود با استفاده از شاخص‌ها و ابزارهای متفاوت بوده است. در این میان، رویکردهای ارزیابی سریع در مدیریت تالاب‌ها به دلیل قابل اجرا بودن آن‌ها با صرف زمان و هزینه نسبتاً کم، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند (Stein et al., 2009). از رویکردهای ارزیابی سریع که اجرای آن آسان و در عین حال کاربردی بوده و ارزیابی قابل اعتمادی از وضعیت کلی تالاب به دست می‌دهد، شاخص طبقه‌بندی و ارزیابی خطر اسکوم

(ESKOM) می‌باشد که توسط Oberholster et al. (2014) توسعه داده شده است. شاخص اسکوم، تلفیقی از پارامترهای کیفی آب و مشخصه‌های فیزیکی و اکولوژیکی تالاب می‌باشد که وضعیت سلامت تالاب را به صورت کمی گزارش می‌کند. این شاخص برای اولین بار بر روی چندین تالاب از انواع مختلف در آفریقای جنوبی اجرا شد. توسعه این شاخص، بر پایه پنج ویژگی مهم اکوسیستم‌های تالابی یعنی نوع تالاب، هیدروژئومورفولوژی، اندازه و مقیاس تالاب، نواحی تالابی و دوره آبی بوده که هر کدام تأثیر به سزایی در عملکرد تالاب دارند. این چارچوب از نه پارامتر فیزیکی و کیفی آب جهت برآورد وضعیت کلی تالاب بهره می‌برد که پس از بررسی‌ها و نمونه‌برداری‌های میدانی، هر کدام از این پارامترها براساس بازه‌های ارائه شده امتیازدهی شده که در مجموع عددی بین ۰ تا ۳۶ تولید می‌کنند و در نهایت با استفاده از یک شاخص اکولوژیکی، سطح سلامت تالاب دسته‌بندی می‌گردد. طبقه‌بندی وضعیت تالاب بر اساس این چارچوب در جدول ۱ آورده شده است.

پارامترهای فیزیکی تالاب

پارامترهای فیزیکی انتخاب شده جهت برآورد ریسک تالاب که متشکل از شش پارامتر است، شامل بررسی خاک تالاب، پوشش گیاهی حاشیه تالاب و گیاهان آبی منطقه می‌باشد. این پارامترها و بازه‌های امتیازدهی مربوطه در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه بخش‌های مختلف تالاب انتخاب شده در معرض فعالیت‌های گوناگون انسانی از جمله کشاورزی، چرای دام‌ها و گردشگری است، به منظور بازتاب این فعالیت‌ها و نیز تسهیل بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی، منطقه مورد مطالعه به چهار قسمت تقسیم شده است که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. این تقسیم‌بندی بر اساس تفاوت اندکی که در فیزیولوژی و شرایط مرزی ورودی (نظیر رودخانه‌ها و منابع آلودگی) نواحی مختلف تالاب بوده و بنا بر جهات اصلی شمالی، جنوبی، شرقی و غربی صورت گرفته است. بدیهی است که مقادیر پارامترهای فیزیکی و کیفی آب برای کل تالاب برابر با میانگین مقادیر بدست آمده از این چهار بخش می‌باشد. اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و جمع‌آوری نمونه‌های آب جهت اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب، به صورت دوره‌ای هر ماه یک بار انجام شده و در ارزیابی نهایی، از میانگین مقادیر بدست آمده از این دوره‌ها استفاده شده است. مطالعات میدانی نیز طی دو سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام گرفته است.

پارامترهای کیفی آب

پارامترهای کیفی آب که در توسعه رویکرد ارزیابی ریسک تالاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند، شامل اکسیژن محلول (DO)، رسانایی الکتریکی (EC) و pH می‌باشند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، نمونه‌های آب به صورت دوره‌ای هر ماه یک بار، طی دو سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ جمع‌آوری شده و برای اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب مورد ارزیابی واقع شده‌اند. مطابق با روش‌های استاندارد نمونه‌گیری، بطری‌های نمونه‌برداری غیر واکنشی قبل از نمونه‌برداری دو بار با استفاده از آب تالاب کاملاً شستشو داده شده و سپس نمونه‌های نهایی از عمق ثابت ۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شدند. پس از نمونه‌برداری، مقادیر DO، EC و pH با استفاده از یک مولتی‌متر قابل حمل در محل نمونه‌برداری، اندازه‌گیری شدند. همانند پارامترهای فیزیکی، از بازه‌های امتیازدهی پیشنهادی توسط Oberholster و همکاران (۲۰۱۴) برای امتیازدهی پارامترهای کیفی آب استفاده شده است (جدول ۳).

۲-٤- سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی

Jang (1993) برای نخستین بار با کنار هم قرار دادن توانایی‌های تئوری فازی و شبکه عصبی، مدل استنتاج عصبی-فازی تطبیقی را ارائه داد. این مدل در برگیرنده دو مدل فازی و عصبی در یک ساختار می‌باشد. بخش فازی رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی توسط شبکه عصبی تعیین می‌گردد. منطق فازی بر مبنای تئوری مجموعه‌های فازی استوار است که بین طبقات مختلفی از موضوعات، ارتباط برقرار می‌کند، به طوری که عضویت از جنس درجه باشد و با پارامتر درجه به توان میزان عضویت را نشان داد..

جدول ۱ طبقه‌بندی وضعیت تالاب بر اساس مطالعات میدانی (Oberhelster و همکاران، ۲۰۱۴)

Table 1 Description of the A-F ecological categories (Oberholster et al., 2014)

Ecological category	Score(%)	Description
A	90-100	Unmodified (natural)
B	80-90	Mostly natural with few modifications. A few small-scale natural habitats and biota changes may have occurred, but the ecosystem functions are essentially unchanged.
C	60-80	Moderately modified. Changes in and loss of natural habitat and biota have occurred, but the basic ecosystem functions are still predominantly unchanged.
D	40-60	Largely modified. A massive loss of natural habitat, biota, and basic ecosystem function has occurred.
E	20-40	Seriously modified. The loss of natural habitat, biota, and basic ecosystem functions is extensive.
F	0-20	and the system has ,Critically modified. Modifications have reached a critical level been entirely modified with an almost complete loss of natural habitat and biota

جدول ۲ بازه‌های امتیازدهی پارامترهای فیزیکی تالاب (Oberhelster و همکاران، ۲۰۱۴)

Table 2 The ESCOM's WCRAI scoring ranges for wetland health indicators-Physical parameters (Oberholster et al., 2014)

Indicator	Unit	Score Range				
		4	3	2	1	0
Aquatic vegetation cover	%	41 - 65	26 - 40	5 - 25	> 65	< 5
Spatial heterogeneity of macrophytes	#	> 3	3	2	1	0
Attached algae	cm^2	0	1 - 1000	1001 - 5000	5001 - 10000	> 10000
Width of fringing vegetation	m	> 30	8 - 30	3 – 7.9	0.5 – 2.9	< 0.5
Degree of bank stability		High	Moderately high	Medium	Moderately low	Low
Degree of pugging	$\#/m^2$	0	1 – 6	7 - 12	13 - 19	> 19

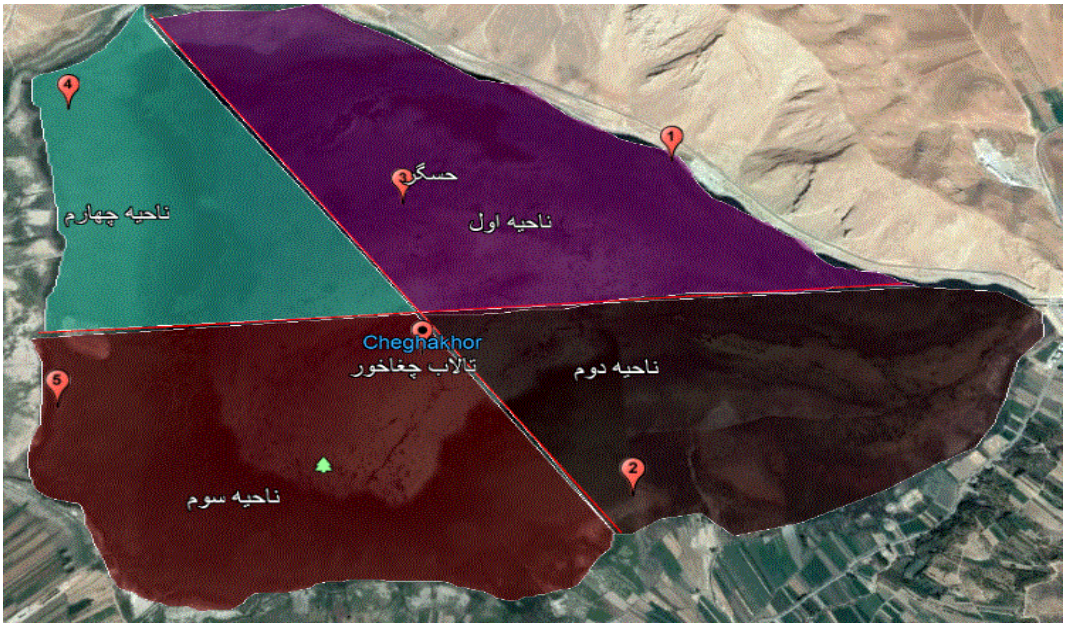

Fig. 2 Four parts of the Choghakhor wetland with water sampling points

شکل ۲ تقسیم‌بندی نواحی چهارگانه تالاب چغاخور و نقاط نمونه‌برداری شده جهت بررسی کیفی آب

جدول ۳ بازه‌های امتیازدهی پارامترهای کیفی آب (Oberhelster و همکاران، ۲۰۱۴)

Table 3 The ESCOM's WCRAI scoring ranges for wetland health indicators-Water quality parameters (Oberholster et al., 2014)

Indicator	Unit	Score Range				
		0	1	2	3	4
Dissolved oxygen	mg/l	< 1.5	1.5 - 2	2.01 – 5.0	5.01 - 7.0	> 7
Electrical conductivity (nonpans)	µS/cm	> 5833	2501 - 5833	834 - 2500	293 - 833	0 - 292
Electrical conductivity (pans)	µS/cm	> 11600	7833 - 11600	2451 - 7832	419 - 2450	0 - 418
pH		< 6 or > 8	6.0 – 6.2	6.21 – 6.6	6.61 – 7.0	7.01 - 7.5

بخش شبکه عصبی نیز با استفاده از روش‌های یادگیری عصبی، راه‌حلی را برای بدست آوردن اطلاعاتی درباره مجموعه داده‌ها به منظور مدل‌سازی فازی ارائه می‌دهد تا پارامترهای تابع عضویت به نحوی تنظیم شوند که بهترین سیستم استنتاج فازی به داده‌های موجود اختصاص یابد.

مدل استنتاجی عصبی- فازی تطبیقی، شبکه‌ای چند لایه متشکل از گره‌ها و اتصال‌دهنده گره‌ها می‌باشد. برای یک مدل فازی مرتبه اول سوگنو با دو ورودی، یک خروجی و دو تابع عضویت برای هر یک از ورودی‌ها، یک مدل شبکه عصبی-فازی تطبیقی معمولی در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳ فرض گردیده است که سیستم فازی دارای ورودی x و y یک خروجی f می‌باشد. برای چنین مدلی قوانین معمولی با در نظر گرفتن دو قانون فازی اگر- آنگاه، به صورت زیر تعریف می‌گردد (Takagi and Sugano, 1983).

Rule 1: If $\mu(x)$ is A_1 and $\mu(y)$ is B_1 then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Rule 2: If $\mu(x)$ is A_2 and $\mu(y)$ is B_2 then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

که متغیرهای A_1، A_2، B_1 و B_2 به ترتیب توابع عضویت برای ورودی‌های x و y هستند و p_1، q_1، r_1، p_2، q_2 و r_2 پارامترهای تابع خروجی می‌باشند. بنابراین در این حالت فرمول‌بندی در شبکه فازی-عصبی تطبیقی از یک آرایش شبکه عصبی پنج لایه پیشرو پیروی می‌کند. در این پژوهش به منظور استخراج قواعد در مدل فازی تاکاگی-سوگنو از روش خوشه‌بندی فازی C-means (FCM-ANFIS) استفاده شده است. خوشه‌بندی اولین بار توسط Bezdek در سال ۱۹۸۱ ارائه گردید.

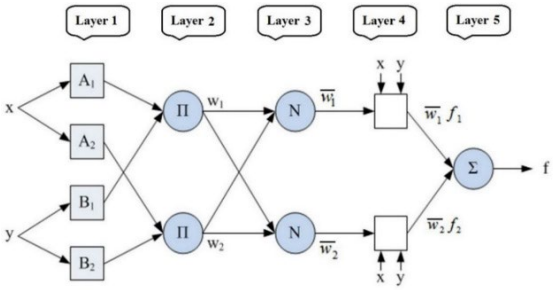

Fig. 3 Equivalent ANFIS architecture

شکل ۳ ساختار معادل ANFIS

در این روش، داده‌ها به c خوشه و با درجه عضویت مشخص به هر خوشه تقسیم‌بندی می‌شوند. حداکثر تعداد خوشه‌های مورد استفاده این روش در بازه $2 < C \max < \sqrt{n}$ قرار دارد که در این بازه تعداد مشاهدات آماری است. میزان درجه عضویت هر داده به هر خوشه، در ماتریس عضویت $U = [u_{i,j}]c \times n$ مشخص می‌شود. در این روش دو محدودیت اصلی وضع شده است، اول اینکه هیچ خوشه‌ای نباید تهی باشد که این محدویت را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان نمود:

$$0 < \sum_{j=1}^{n} u_{i,j} < n \forall_i \in \{1,2,3,\dots,c\} \qquad (1)$$

محدودیت دوم، محدودیت نرمال‌سازی است. به بیان دیگر مجموع درجات عضویت هر داده به همه خوشه‌ها باید برابر یک باشد.

$$\sum_{i=1}^{c} u_{i,j} = 1 \ \forall_j \in \{1,2,3,\dots,c\} \qquad (2)$$

روش خوشه‌بندی فازی C-means سعی دارد تا برای یک مجموعه نقاط، داده افرازهایی بیابد تا تابع هدف زیر را

کمینه کند.

$$Jm(\widetilde{U},V)\sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{n}(u_{i,j})^{m'}(d_{ij})^2 \qquad (3)$$

به طوری که d_{ij} فاصله اقلیدسی بین مرکز خوشه i ام و داده j ام می‌باشد.

$$d_{ij}=\left[\sum_{k=1}^{m}(x_{kj}-v_{ki})^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (4)$$

که در این روابط m تعداد متغیرها و v_{ki} مرکز خوشه i ام و از داده k ام و $m'\in[1,\infty]$ است و میزان فازی بودن را مشخص می‌کند و معمولاً عددی بین ۲ تا ۲/۵ است (Bezdek, 1981).

لازم به ذکر است که جهت مدل‌سازی استنتاج تطبیقی عصبی-فازی در این پژوهش از کد نوشته شده در محیط برنامه MATLAB استفاده شده است.

۲-۵- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این پژوهش از ضریب تبیین (DC) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی کارایی و عملکرد مدل‌های توسعه داده شده، استفاده شده است. DC بیانگر این است که مدل تا چه اندازه توانسته است داده‌های واقعی را برازش کند و می‌تواند مقداری بین منفی بی‌نهایت و یک داشته باشد که هر چقدر این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشانگر عملکرد مطلوب مدل مورد نظر بوده و بالعکس. از سوی دیگر، RMSE برای بررسی (اندازه‌گیری) اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده داده‌ها به کار می‌رود. هر چقدر مقدار RMSE کمتر باشد، عملکرد مدل مطلوب‌تر خواهد بود. به صورت کلی بهترین مدل مدلی است که بیشترین DC و کمترین RMSE را داشته باشد. DC و RMSE به ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه می‌باشند (Nourani and Fard, 2012).

$$\mathrm{DC}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(N_{obs_i}-N_{pre_i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(N_{obs_i}-\overline{N_{obs}})^2} \qquad (5)$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(N_{obs_i}-N_{pre_i})^2}{n}} \qquad (6)$$

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل آماری داده‌ها

پیش از ورود به بحث مدل‌سازی، لازم است که مشخصات آماری داده‌هایی که برای توسعه مدل‌های هوش مصنوعی در این پژوهش استفاده شده‌اند، مورد بررسی قرار گیرند. به منظور توسعه مدل FCM-ANFIS نیز سری‌های زمانی حاصل از تالاب چغاخور به صورت داده‌های یک ساعته و میانگین روزانه استفاده شده است. شایان ذکر است که در تالاب چغاخور داده‌برداری در سه ارتفاع ۰/۳، ۰/۸۵ و ۱/۴ متری انجام گرفته است. در جدول ۴ مشخصات آماری داده‌های ایستگاه چغاخور آورده شده است.

در ادامه جهت بررسی همبستگی خطی بین متغیرها و نحوه اثرگذاری داده‌ها بر روی یکدیگر از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. شرط لازم برای استفاده از این روش حصول اطمینان از توزیع نرمال پارامترها می‌باشد. جهت اطمینان از نرمال بودن توزیع پارامترها از آزمون چولگی و کشیدگی استفاده شد. با محاسبه این دو شاخص آماری برای هر پارامتر مشخص شد که تمامی پارامترها به جز فشار هوا از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند که با استفاده از تبدیل لگاریتمی، داده‌های مربوط به فشار هوا نیز نرمال‌سازی گردید. نتایج همبستگی بین داده‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. این ضریب بیانگر میزان و جهت همبستگی بین دو متغیر بوده و مقدار آن بین ۱+ و ۱- می‌باشد. اگر مقدار بدست آمده مثبت باشد، به معنی این است که تغییرات دو متغیر به طور هم جهت اتفاق می‌افتد، یعنی با افزایش هر متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد و برعکس. از سوی دیگر، اگر مقدار همبستگی منفی باشد، دو متغیر در جهت عکس هم عمل می‌کنند؛ یعنی با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر کاهش می‌یابد و برعکس. اگر مقدار به‌دست آمده صفر شود، نشان‌دهنده این است که هیچ رابطه‌ای بین دو متغیر وجود ندارد.

اگر ۱+ شود به معنای همبستگی مثبت کامل و اگر ۱- شود

یعنی همبستگی کامل و منفی است (Pirzadeh Ashraf, 2018).نکته قابل توجه در رابطه با ضرایب همبستگی، همپوشانی معکوس رسانایی الکتریکی در عمق ۰/۳ متر نسبت به رسانایی الکتریکی در سایر عمق‌ها می‌باشد که این ارتباط معکوس رفته رفته افزایش می‌یابد. علت وقوع این پدیده را می‌توان در ته‌نشینی آنیون‌ها و کاتیون‌ها بر اثر انفعالات شیمیایی دانست. از طرفی این شاخصه با دمای آب در هر سه ارتفاع و دمای هوا همپوشانی معکوس قوی را نشان می‌دهد. می‌توان علت را در افزایش فعل و انفعالات شیمیایی و اکسیداسیون بیستر آنیون‌ها و کاتیون‌ها با افزایش دما دانست، چرا که افزایش دما انرژی مورد نیاز فرآیندها را تأمین نموده و کاتیون‌های سطحی طی فرآیندهای شیمیایی خنثی شده و به بستر منتقل می‌شوند (van der Valk, 2012). از سوی دیگر رسانایی الکتریکی در سطح، رابطه معکوس نسبتاً قوی با تراز آب نشان می‌دهد که گواهی بر استدلال ذکر شده می‌باشد، چرا که اگر عمق آب زیاد باشد کاتیون‌ها و آنیون‌ها بیشتر در عمق فرو رفته

جدول ۴ مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده در توسعه مدل‌های هوش مصنوعی

Table 4 Statistical characteristics of data used in the development of artificial intelligence models

Parameter (Daily)	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation	Variance
DO 0.85m	0	15.04	7.51	2.75	7.57
DO 0.30m	47.20	19/14	8.89	2.09	4.39
DO 1.40m	0	11.10	5.37	3.11	9.71
EC 0.30m	244.73	549.17	322.53	57.05	3254.89
EC 0.85m	69.93	674.91	366.99	106.64	11373.10
EC 1.40m	64/73	674.29	360.66	130.38	16999.50
Water temp. 0.30m	1.25	24.43	13.96	6.58	43.31
Water temp. 0.85m	1.94	24.59	13.49	6.20	38.45
Water temp. 1.40m	2.27	24.54	13.22	5.58	34.31
Air temp.	1.13	28.08	14.77	7.81	61.00
humidity	4.16	89.81	46.51	16.74	280.30
Water level	0.90	2.07	1.47	0.29	0.85
Air pressure	85.43	1066.37	789.89	19.91	369.77

جدول ۵ ضرایب همبستگی میان پارامترها

Table 5 Correlation coefficients between parameters

	DO 0.3m	DO 0.85m	DO 1.4m	EC 0.3m	EC 0.85m	EC 1.4m
DO 0.3m	1.000	0.903	0.179	0.070	- 0.217	- 0.296
DO 0.85m	0.903	1.000	0.381	0.018	- 0.154	- 0.252
DO 1.4m	0.179	0.381	1.000	0.249	0.298	0.043
EC 0.3m	0.070	0.018	0.249	1.000	- 0.147	- 0.437
EC 1.4m	- 0.296	- 0.252	0.043	- 0.437	0.867	1.000
EC 0.85m	- 0.217	- 0.154	0.298	- 0.147	1.000	0.867
Water temp. 0.30m	- 0.174	- 0.095	- 0.317	- 0.801	0.095	0.388
Water temp. 0.85m	- 0.168	0.076	- 0.290	- 0.806	0.089	0.381
Water temp. 1.40m	- 0.255	- 0.123	- 0.275	- 0.781	0.103	0.387
Air temp.	- 0.297	- 0.273	- 0.447	- 0.741	- 0.008	0.308
humidity	0.161	0.096	0.158	0.562	- 0.204	- 0.372
Air pressure	0.094	0.051	- 0.009	- 0.265	- 0.068	0.038
Water level	0.295	0.423	0.010	- 0.696	0.149	0.313

و در نتیجه میزان رسانایی کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند در کنترل و رشد جلبک‌های سطحی موثر واقع شود. شایان ذکر است که کم بودن میزان همبستگی بین پارامترها را نمی‌توان به معنی نبود رابطه بین آن‌ها دانست، زیرا ضریب پیرسون تنها وجود یا عدم وجود رابطه خطی بین دو متغیر را بررسی کرده و قادر به شناسایی روابط غیرخطی نمی‌باشد.

۳-۲- مدل‌سازی پارامترهای کیفی آب با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی

در این پژوهش به انجام رگرسیون غیرخطی بر روی داده‌های کیفی حاصله از تالاب، به منظور مدل‌سازی و شناسایی ارتباط میان پارامترهای آن پرداخته شده است. برای این منظور، اقدام به مدل‌سازی تغییرات پارامتر اکسیژن محلول (DO) در عمق ۱/۴ متری آب تالاب چغاخور با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی گردیده است. پارامترهای دمای آب و رسانایی الکتریکی در سه عمق ۰/۳، ۰/۸۵ و ۱/۴ متر، دمای هوا، تراز آب و اکسیژن محلول در آب در دو عمق ۰/۳ و۰/۸۵ متر به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شده‌اند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، جهت مدل‌سازی از داده‌های سری زمانی نرمال‌شده روزانه و یک ساعته استفاده شده است.

در مرحله نخست جهت تشخیص داده‌هایی که تأثیر بیشتری در مدل‌سازی دارند، از شبکه عصبی چند لایه استفاده شد. به این صورت که مدل‌هایی طبق جدول ۶ آموزش دیدند که با استفاده از خروجی این مدل‌ها، داده‌هایی که اثرگذاری بالایی دارند، شناسایی شدند. نتایج خروجی‌های حاصله از مدل‌های ذکر شده در جدول ۶، و در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است

با بررسی خروجی‌های مدل‌های شبکه عصبی می‌توان دریافت که طبق انتظار، دمای آب در ارتفاعات مختلف و دمای هوا بهترین عملکرد را در مدل‌سازی اکسیژن محلول در آب دارند. همچنین مشخص شد که مدل M5 که مربوط به رسانایی الکتریکی در عمق ۰/۸۵ متر می‌باشد، ضعیف‌ترین عملکرد را در میان مدل‌ها دارد. حال با در نظر داشتن اطلاعات حاصله از آنالیز حساسیت، مدل‌های ارائه شده در جدول ۷ به عنوان ورودی شبکه FCM-ANFIS انتخاب شدند.

همچنین در انتخاب پارامترها سعی گردیده از نتایج مطالعات پیشین بهره گرفته شود (Forouhi, 2020؛ Hasani et al., 2021). نتایج مدل‌سازی تغییرات پارامتر اکسیژن محلول در عمق ۱/۴ متری در جدول ۸ آورده شده است. برای ارزیابی کارایی و عملکرد مدل‌های توسعه داده شده از ضریب تبیین (DC) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. مقدار DC بیانگر توانایی مدل در برازش داده‌های واقعی است که هر چقدر این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشانگر عملکرد مطلوب مدل مورد نظر می‌باشد.

جدول ۶ مدل‌های به کار رفته در مرحله شناسایی داده‌های موثر

Table 6 The models used in the effective data identification step

Model	Input Parameter	Output Parameter
M1	Air temp.	DO 1.4
M2	DO 0.3m	DO 1.4
M3	DO 0.85m	DO 1.4
M4	EC 0.3m	DO 1.4
M5	EC 0.85m	DO 1.4
M6	EC 1.4m	DO 1.4
M7	Water level	DO 1.4
M8	Water temp. 0.3m	DO 1.4
M9	Water temp. 0.85m	DO 1.4
M10	Water temp. 1.4m	DO 1.4

جدول ۷ مدل‌های ارائه شده به FCM-ANFIS

Table 7 The models provided to FCM-ANFIS

Model	Input Parameters
M11	Temp 0.3m, Temp 0.85m, Temp 1.4, EC 0.3m
M12	EC 0.3m, DO 0.85m, Temp Air
M13	EC 0.3m, Water level, Temp Air
M14	EC 0.3m, Water level, Temp Air, Temp 1.4
M15	All data
M16	EC 0.3m, Water level

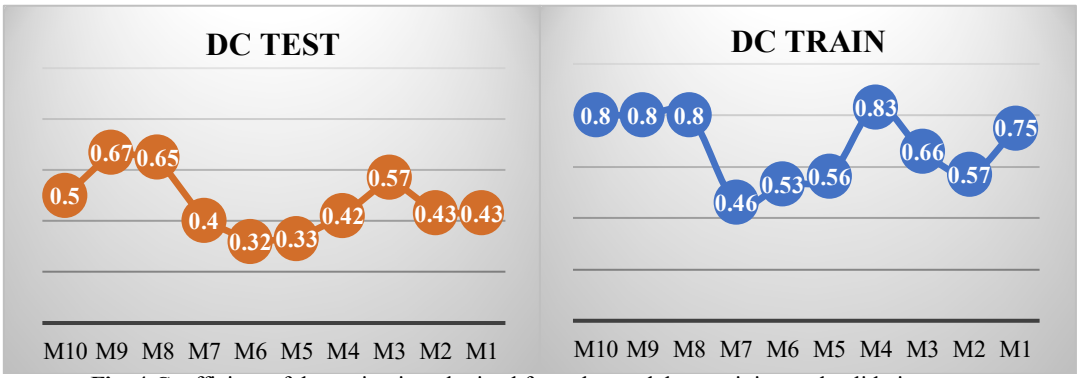

Fig. 4 Coefficient of determination obtained from the models at training and validation stage

شکل ۴ ضریب تبیین حاصله از مدل‌ها در مرحله آموزش و صحت‌سنجی

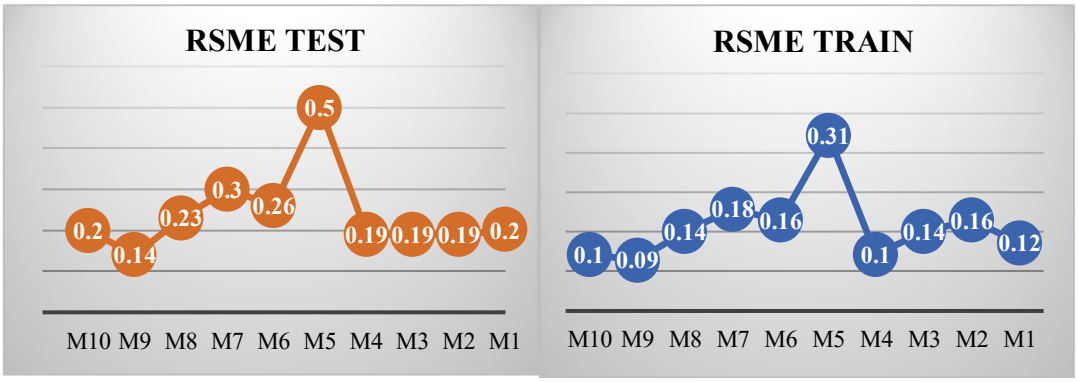

Fig. 5 Root mean squared error obtained from the models at training and validation stage

شکل ۵ مجذور میانگین مربعات خطاهای حاصله از مدل‌ها در مرحله آموزش و صحت‌سنجی

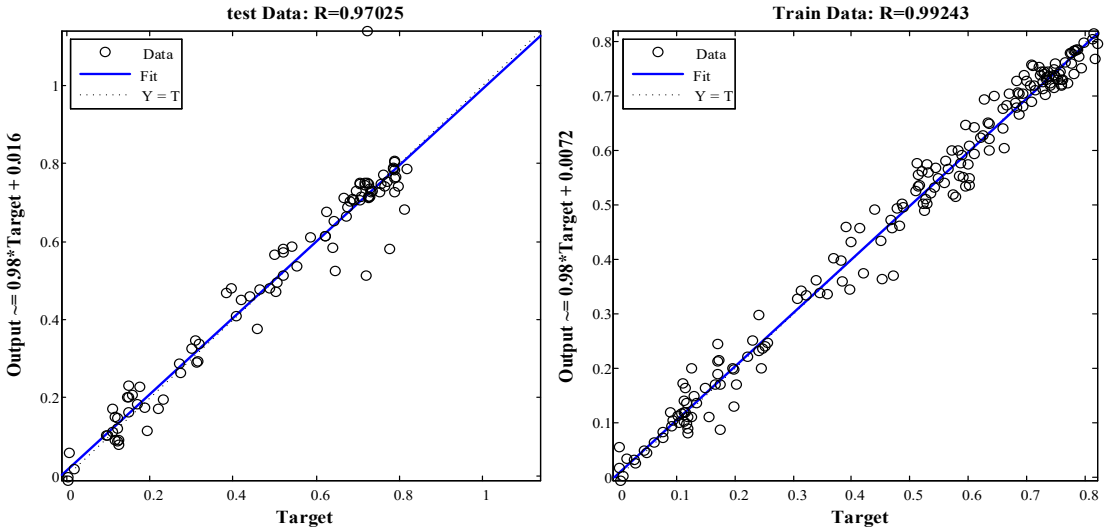

Fig. 6 Scatter plot for M14 model at training and validation stage

شکل ۶ نمودار پراکنش مربوط به مرحله آموزش و صحت‌سنجی برای مدل M14

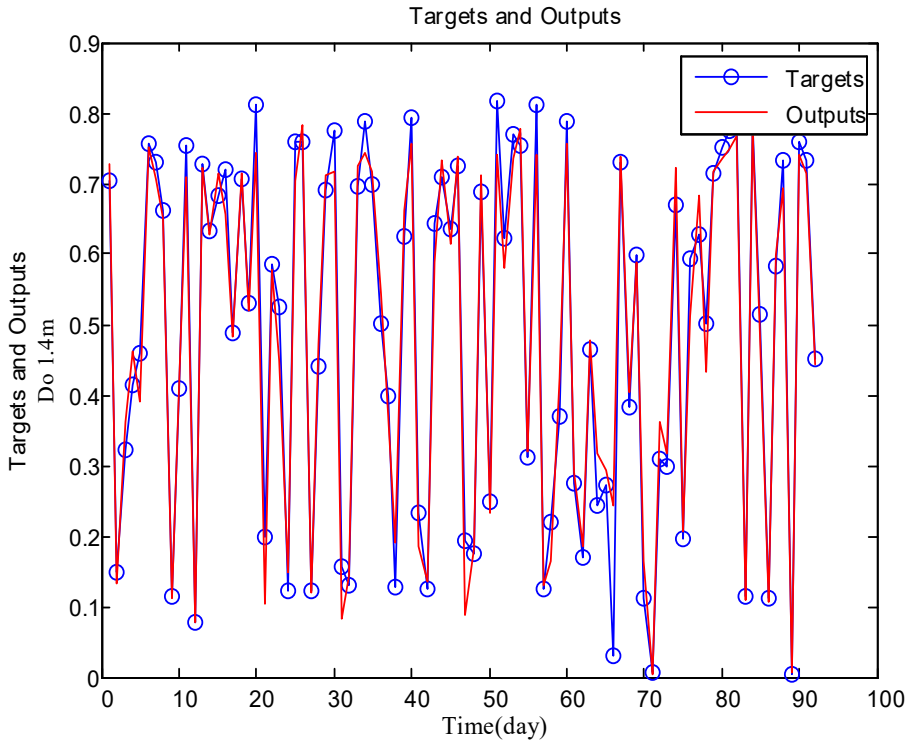

Fig. 7 Observed versus computed DO time series for M14 model

شکل ۷ نمودار مقایسه سری زمانی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده DO برای مدل M14

۳-۳- ارزیابی وضعیت سلامت تالاب

ارزیابی سلامت تالاب به جهت تضمین سلامت و حفظ یکپارچگی اکوسیستم مورد نظر و بهره‌برداری پایدار از آن، بخش جدایی‌ناپذیر مدیریت صحیح و پایدار اکوسیستم‌های تالابی می‌باشد. در این میان استفاده از چارچوب و رویکردی که بتواند ارزیابی دقیق و واقع‌گرایانه‌ای از وضعیت تالاب ارائه دهد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این پژوهش، تالاب چغاخور که جزء مهم‌ترین تالاب‌های ایران بوده و در فهرست تالاب‌های کنوانسیون رامسر نیز به ثبت رسیده، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب و با استفاده از چارچوب ارزیابی سلامت اسکوم مورد ارزیابی قرار گرفت. این چارچوب یکی از روش‌های کم‌هزینه و کاربردی می‌باشد که با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی و شیمیایی تالاب، آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد نخستین گام در بحث ارزیابی سلامت تالاب، شناسایی نوع تالاب با در نظر گرفتن شاخصه‌های فیزیکی، اکولوژیکی و هیدرولوژیکی می‌باشد. در جدول ۹ برخی از شاخصه‌های تالاب مورد بررسی ارائه شده است که بر اساس همین موارد، نوع تالاب در این مطالعه مشخص گردید.

پس از تشخیص نوع تالاب، نوبت اندازه‌گیری‌های میدانی در تالاب‌ها است. باید در نظر داشت که به علت پویایی سیستم تالاب، صرف انجام محاسبات نرم کافی نبوده و بررسی‌های میدانی بخشی جدایی‌ناپذیر در بررسی وضعیت اکوسیستم تالاب می‌باشند (Bird, 2010).

جدول ۸ نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده در FCM-ANFIS

Table 8 Results of FCM-ANFIS for the provided models

Model	DC		RMSE	
	Training	Validation	Training	Validation
M11	0.92	0.86	0.06	0.09
M12	0.93	0.82	0.06	0.08
M13	0.89	0.79	0.08	0.10
M14	0.98	0.92	0.03	0.07
M15	0.96	0.80	0.07	0.12
M16	0.91	0.75	0.07	0.13

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، به منظور بازتاب فعالیت‌های مختلف و نیز تسهیل بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی، منطقه مورد مطالعه به چهار قسمت تقسیم گردید. طی بازدید میدانی سعی شد تا تغییر نوع پوشش گیاهی نیز در این تقسیم‌بندی مدنظر قرار گیرد؛ چرا که تغییر در نوع گونه‌ها حاکی از شرایط خاص آن ناحیه دارد. با مشخص شدن نواحی چهارگانه تالاب چغاخور، پارامترهای کیفی مورد نیاز با انجام بازدیدهای میدانی اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین با استفاده از نتایج نمونه‌برداری‌های آبی که توسط دفتر تالاب‌های ایران انجام گرفته بود، شرایط تالاب ارزیابی گردید.

با عنایت به اینکه داده‌های برداشت شده در قسمت‌های مختلف تالاب، طی دو سال در دسترس بوده و در این مدت بازدیدهای میدانی نیز انجام گرفته است، می‌توان وضعیت تالاب را در دو سال متوالی ارزیابی و تغییرات شرایط را بررسی نمود. نتایج امتیازدهی تالاب برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به ترتیب در جداول ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. نتایج حاصله از مطالعات میدانی حاکی از آن است که اکولوژی این تالاب دستخوش تغییرات زیادی نسبت به شرایط نرمال شده و ضروری است تا برنامه‌های مدیریتی مدونی طرح‌ریزی گردد تا شرایط تالاب وخیم‌تر نشود. مقایسه شرایط تالاب در این دو سال متوالی نشان می‌دهد که وضعیت تالاب نسبت به سال گذشته کمی بدتر شده است اما اختلاف چندان زیاد نبوده و از لحاظ وضعیت در یک کلاس طبقه‌بندی می‌شوند.

٤- نتیجه‌گیری

تالاب‌ها یکی از اکوسیستم‌های با ارزش در طبیعت می‌باشند که حفظ و بهبود شرایط آن‌ها باعث ارتقا سطح کیفیت حیات در مناطق مجاور تالاب‌ها خواهد شد. با توجه به ارزش بالا و آگاهی روز افزون جامعه بشری نسبت به این اکوسیستم‌های حیاتی، دفتر تالاب‌های ایران با حمایت نهادهای بین‌المللی و در راستای احیا و بهبود شرایط تالابی و استفاده خردمندانه از منابع تالاب، اقدام به نصب و راه‌اندازی ایستگاه پایش آنلاین در تالاب چغاخور نموده است. این پژوهش نیز با هدف بررسی داده‌های این ایستگاه آنلاین و همچنین بررسی کاربردی بودن ایستگاه‌های پایش در ارزیابی سلامت تالاب‌ها صورت گرفته است.

در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از روش ماتریسی، سلامت تالاب چغاخور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این روش با انجام نمونه‌گیری‌های میدانی، شاخصه‌های مهم شیمیایی و فیزیکی تالاب اندازه‌گیری شده و بر اساس این اندازه‌گیری‌ها امتیازی به تالاب اختصاص داده می‌شود که این امتیاز معرف وضعیت سلامت تالاب می‌باشد.

همچنین، در راستای نیل به استفاده کاربردی از داده‌های حاصله از ایستگاه‌های پایش آنلاین و به سبب اینکه میزان اکسیژن محلول نقش کلیدی در حفظ سلامت اکوسیستم‌های تالابی و به طور کلی بدنه‌های آبی دارد، وجود ارتباط میان این پارامتر و سایر پارامترها با استفاده از FCM-ANFIS بررسی گردید. همچنین قبل از ارائه داده‌ها به شبکه FCM-ANFIS، داده‌های ساعتی حاصله از حسگرها به داده‌های روزانه تبدیل گشته و نیز جهت تشخیص داده‌های غالب، به کمک شبکه عصبی چند لایه، داده‌های مستقل نسبت به داده وابسته تحلیل حساسیت شدند.

آنالیز آماری داده‌های حاصله از سنسورهای پایش آنلاین حاکی از آن است که این داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. همچنین بررسی هم‌پوشانی داده‌ها نشانگر این است که دمای آب و دمای هوا ارتباط خطی بالایی با اکسیژن محلول دارند که دور از انتظار نمی‌باشد. علاوه بر این نتایج حاصله حاکی از وجود ارتباط معکوس قوی میان رسانایی الکتریکی در عمق ۰/۳ متری با رسانایی الکتریکی در عمق‌های ۰/۸۵ و ۱/۴ متری می‌باشد. با انجام تحلیل حساسیت بر روی داده‌های حاصله از حسگرهای تالاب چغاخور نیز مشخص گردید که دمای آب، دمای هوا و رسانایی الکتریکی بیشترین تأثیر را در مدل‌سازی اکسیژن محلول در عمق ۱/۴ متری دارند. نتایج مدل‌سازی‌ها نیز نشان می‌دهد که مدل ANFIS-FCM توانایی بالایی در پیش‌بینی اکسیژن محلول بر اساس پارامترهای فیزیکی و کیفی آب دارد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید

جدول ۹ تعیین نوع تالاب مورد مطالعه

Table 9 Determination of wetland type

Wetland name	Area (Hectares)	Status of the region	Current source of water supply and water quality	Wetland type
Choghakhor	1500	Maximum and minimum altitude are 2277 and 2271 meters, respectively. Surrounded by mountains	Karst groundwater, Basin surface runoff	Lake type

جدول ۱۰ امتیازات تالاب چغاخور در سال ۱۳۹۶

Table 10 The output scores for Choghakhor wetland in 2017

Indicator	Score					Achieved score
	4	3	2	1	0	
Electrical conductivity	-	635	-	-	-	3
PH	-	-	-	-	8.5	0
Dissolved oxygen	-	-	3.75	-	-	2
Surface soil consolidation	-	-	9	-	-	2
Degree of bank stability	-	Moderately high	-	-	-	3
Vegetation cover percentage	-	-	25%	-	-	2
Attached algae	-	-	0.45	-	-	2
Width of fringing vegetation	-	-	-	1.5	-	1
Vegetation layers	-	-	2	-	-	2
	Total score (out of 36)					17
	Percentage of score					48%

جدول ۱۱ امتیازات تالاب چغاخور در سال ۱۳۹۷

Table 11 The output scores for Choghakhor wetland in 2018

Indicator	Score					Achieved score
	4	3	2	1	0	
Electrical conductivity	-	742	-	-	-	3
PH	-	-	-	-	9.68	0
Dissolved oxygen	-	-	-	-	0.75	0
Surface soil consolidation	-	-	-	15	-	1
Degree of bank stability	-	Moderately high	-	-	-	3
Vegetation cover percentage	-	-	25%	-	-	2
Attached algae	-	-	0.45	-	-	2
Width of fringing vegetation	-	-	4	-	-	2
Vegetation layers	-	-	2	-	-	2
	Total score (out of 36)					15
	Percentage of score					41%

که بهترین ترکیب ورودی جهت پیش‌بینی DO، ترکیب مدل M14 (EC 0.3m, Water level, Temp Air, Temp 1.4) با

DC و RMSE ارزیابی به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۰/۰۷ می‌باشد.

علاوه بر این، نتایج مطالعات میدانی از تالاب چغاخور حاکی از آن است که این تالاب در وضعیت D قرار دارد که به این معنی است که اکوسیستم تالاب دچار دگرگونی شده و تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی و جانوری ساکن از دست رفته و فعالیت‌های اصلی تالاب دست خوش تغییر گشته است. همچنین مقایسه نتایج حاصله از دو سال متوالی حاکی از آن است که وضعیت این تالاب طی دو سال مورد مطالعه رو به افول نهاده است؛ چرا که امتیاز تالاب در سال دوم کمتر از سال اول می‌باشد.

۵- فهرست نشانه‌ها

تابع عضویت فازی	$u_{i,j}$
تابع هدف	J
تعداد خوشه‌ها در مدل استنتاج عصبی-فازی تطبیقی	c
شاخص فازی	m'
فاصله اقلیدسی بین مرکز خوشه i ام و داده jام	d_{ij}
ماتریس عضویت فازی (m)	U
مرکز خوشه i ام و از داده k ام	v_{ki}
مقدار محاسبه شده توسط مدل	$\mathrm{N_{pre_i}}$
مقدار مشاهداتی	$\mathrm{N_{obs_i}}$
میانگین مجموعه داده‌های مشاهداتی	$\overline{N_{obs}}$

منبع‌ها References

Adamus, P.R. and Stockwell, L.T. (1983). A method for wetland functional assessment, Volume I: Critical review and evaluation concepts. Washington, DC: US Department of Transportation, Federal Highway Agency FHWA-IP-82-23, 176.

Behroozi Rad, B. (2011). Environmental Crises in Iran International Wetlands, the First National Conference. 26 to 2 December, Ahwaz Science and Research Branch (In Persian).

Bezdek, J.C. (1981). Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms, Plenum Press, New York.

Bird, M.S. (2010). Aquatic invertebrates as indicators of human impacts in South African wetlands. Report to the Water Research Commission.

Breen, C., Rogers, K., Ashton, P. (1988). Vegetation processes in swamps and flooded plains. Vegetation of inland waters, Springer: 223-247.

Brinson, M.M. (1988). Strategies for assessing the cumulative effects of wetland alteration on water quality. Environmental Management 12(5): 655-662.

Brinson, M.M. (1993). A hydrogeomorphic classification for wetlands, EAST CAROLINA UNIV GREENVILLE NC.

Chang, F.J. and Chang, Y.T. (2006). Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. Advances in Water Resources, 29, 1–10.

Chiu, S.L. (1994). Fuzzy model identification based on cluster estimation. Journal of Intelligent & fuzzy systems. 2(3): 267-278.

Cowardin, L.M., Carter, V., Golet, F.C. and LaRoe, E.T. (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. US Fish and Wildlife Service FWS/OBS 79/31. 103 pp.

Dely, J.L., Kotze, D.C., Quinn, N.W. and Mander, J.J. (1999). A pilot project to compile an inventory and classification of wetlands in the Natal Drakensberg Park. Prepared for the South African Wetlands Conservation Programme, DEAT.

DWAF (2007). Manual for the assessment of a Wetland Index of Habitat Integrity for South African floodplain and channelled valley bottom wetland types, Pretoria, South Africa: Resource Quality Services, Department of Water Affairs and Forestry. Report No. N/0000/WEI/0407.

Forouhi, H. (2020). Water quality index assessment of wetland using artificial neural network (ANN) approach: the case of kanibarazan. M.Sc Thesis, University of Tabriz, Iran, 93p.

Hasani, S.S., Mojtahedi, A. and Reshadi, M.A.M. (2021). Development of a Novel Fuzzy Logic-Based Wetland Health Assessment Approach for the Management of Freshwater Wetland Ecosystems. Wetlands. 41, 100.

Jang, J.S.R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 23(3): 665-685.

(2021). Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands, Journal of Environmental Management. 286, 112160.

Silberbauer, M. and King, J. (1991). Geographical trends in the water chemistry of wetlands in the south-western Cape province, South Africa. Southern African Journal of Aquatic Science. 17 (1-2): 82-88.

Stein, E.D., Fetscher, A.E., Clark, R.P., Wiskind, A., Grenier, J.L., Sutula, M., Collins, J.N. and Grosso, C. (2009). Validation of a wetland rapid assessment method: use of EPA's level 1-2-3 framework for method testing and refinement, Wetlands. 29, 648.

Takagi, T., Sugeno, M. (1983). Derivation of fuzzy control rules from human operator's control action, in Proc. IFAC Symp. Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis, 55–60.

Tiwari, S., Babbar, R. and Kaur, G. (2018). Performance Evaluation of Two ANFIS Models for Predicting Water Quality Index of River Satluj (India). Advances in Civil Engineering. 2018. 1-10.

van der Valk, A.G. (2012). The Biology of Freshwater Wetlands (Biology of Habitats Series). Oxford University Press; 2nd edition. United Kingdom, 296p

Kotze, D.C. (2005). An ecological assessment of the health of the Mohlapetsi wetland, Limpopo Province. South Africa: Centre for Environment, Agriculture and Development, University of KwaZulu-Natal. CPWF Project Report. Colombo, Sri Lanka: CGIAR Challenge Program on Water and Food.

Nourani, V. and Fard, M.S. (2012). Sensitivity analysis of the artificial neural network outputs in simulation of the evaporation process at different climatologic regimes, Advances in Engineering Software. 47, 127–146.

Oberholster, P.J., McMillan, P., Durgapersad, K., Botha, A.M. and De Klerk, A.R. (2014). The development of a Wetland Classification and Risk Assessment Index (WCRAI) for non-wetland specialists for the management of natural freshwater wetland ecosystems, Water, Air, & Soil Pollution. 225, 1–15.

Pirzadeh Ashraf, B. (2018). Wetland health evaluation using provided water quality data by online monitoring sta-tion (case study). M.Sc Thesis, University of Tabriz, Iran, 133p.

Rowntree, K. (1993). A hydro-geomorphic survey of wetland areas in the north-eastern Cape forests area. Report to Cape Nature Conservation, Eastern Cape Regional Scientific Services.

Salimi, S., Almuktar, S.A.A.A.N., and Scholz, M.