



زیست پژوهش و فناوری محیط

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

پژوهشکده محیط زیست

بررسی راهکارهای کارآمد به منظور مدیریت پایدار عمق و تراز سطح آب تالاب انزلی با تأکید بر رویکردهای پیشگیری و احیا

مرتضی کریمی^۱، هادی مدبری^۲✉، میر مسلم رهبر هاشمی^۳، مریم حقیقی خمایی^۳

۱- پژوهشگر گروه پایش منابع آب پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

۲- استادیار گروه پایش منابع آب پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

۳- مربی گروه پایش منابع آب پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	تالابها اکوسیستم‌های پیچیده و ارزشمندی هستند که طیف گسترده‌ای از موجودات در آنها زندگی می‌کنند. حفظ چنین اکوسیستم‌های حساس و کارکردهای محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی آن‌ها مستلزم تعیین مقدار آب مورد نیاز برای آن‌هاست. هدف از این تحقیق، بررسی روش‌های ممکن برای مدیریت پایدار عمق و تراز تالاب و ارائه راهکارهای مناسب در این راستا می‌باشد. با توجه به اینکه تراز تالاب انزلی به لحاظ هیدرولیکی تحت تأثیر تراز دریای خزر و دبی جریان رودخانه‌های منتهی به آن است، این تحقیق درصدد آن است که ضمن شناسایی و بررسی عوامل مؤثر بر کاهش عمق و تراز تالاب، روش‌های مختلف به منظور مدیریت پایدار تالاب را طی مطالعاتی جامع ارزیابی و گزینه‌های مناسب را ارائه کند. لذا مطالعه و بررسی راهکارها و گزینه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای با دو رویکرد پیشگیری و احیا برای افزایش عمق و تراز سطح آب تالاب به منظور حفظ و احیای کارکردها و پایداری اکولوژیکی آن پرداخته شده است. در رویکرد پیشگیری، اقداماتی شامل نظارت و جلوگیری از برداشت غیرمجاز آب، کنترل فرسایش و رسوب، اجرای عملیات بیولوژیکی و مکانیکی آب‌خیزداری، احیای تله‌های رسوبگیر، احداث بندهای اصلاحی در رودخانه‌ها برای افزایش زمان تمرکز حوضه و مدیریت آلاینده‌های ورودی به تالاب انجام شده است. در رویکرد احیا، راهکارهایی مانند مدلسازی هیدرودینامیک تالاب انزلی در قالب طرحی جامع، افزایش راندمان مصرف آب در شبکه آبیاری، لایروبی با ارزیابی دقیق محیط زیستی، مقابله با گیاهان مهاجم و امکان‌سنجی راهکارهای سازه‌ای برای کنترل و تنظیم تراز سطح آب تالاب بررسی شده‌اند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵	
کلید واژه‌ها: تثبیت تراز، عمق، تالاب انزلی، رویکرد احیا، رویکرد پیشگیری، مدیریت پایدار.	



Investigation of effective strategies for the sustainable management of water depth and level in Anzali wetland with emphasis on preventive and restorative approaches

Morteza Karimi¹, Hadi Modaberi^{2✉}, Mir Moslem Rahbar Hashemi³, Maryam Haghighi Khomami²

1- Researcher, Department of Water Resources Monitoring, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran

2- Assistance Professor, Department of Water Resources Monitoring, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran

3- Instructor, Department of Water Resources Monitoring, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran

Article Info	Abstract
Article type: Research Article	Wetlands are complex and valuable ecosystems that host a wide range of organisms. Preserving such sensitive ecosystems and maintaining their environmental, economic, and social functions require determining their ecological water needs. The aim of this study is to examine possible methods for the sustainable management of the water depth and level in the wetland and to provide suitable strategies accordingly. Given that the water level of Anzali Wetland is hydraulically affected by the Caspian Sea level and the discharge of the rivers flowing into it, this study seeks to identify and analyze the key factors contributing to the reduction in the wetland's depth and level. It further evaluates various structural and non-structural strategies through comprehensive studies and presents appropriate options for sustainable wetland management. Accordingly, this study investigates both preventive and restorative strategies to enhance the depth and water level of the wetland, aiming to preserve and restore its ecological functions and sustainability. In the preventive approach, actions such as monitoring and preventing unauthorized water extraction, controlling erosion and sedimentation, implementing biological and mechanical watershed management operations, rehabilitating sediment traps, constructing check dams in rivers to increase basin concentration time, and managing incoming pollutants to the wetland have been considered. In the restorative approach, strategies such as hydrodynamic modeling of Anzali Wetland within a comprehensive planning framework, improving irrigation network water-use efficiency, environmentally-assessed dredging operations, combating invasive plant species, and feasibility studies of structural interventions for regulating and stabilizing the wetland's water level have been addressed. This research ultimately aims to support the preservation and rehabilitation of the wetland's functions and its ecological sustainability.
Article history: Received: 2024/12/15 Accepted: 2025/03/07 Available online: 2025/05/05	
Keywords: Water level stabilization, Depth, Anzali wetland, Restoration approach, Preventive approach, Sustainable management.	

* Corresponding author E-mail address: modaberi@acecr.ac.com

مقدمه

تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی، به عنوان یک تهدید جدی، تالاب‌ها را با کاهش چشمگیر وسعت و تخریب گسترده مواجه کرده‌اند (Pekel et al., 2016; Murray et al., 2019; Zhong et al., 2020; Mao et al., 2020). در دهه‌های اخیر، کمبود بی‌سابقه منابع آب، آلودگی و تخریب اکوسیستم‌ها در بسیاری از نقاط جهان محققان و سیاست‌گذاران را وادار به وقف تلاش بیشتر در راستای حفاظ و احیای سلامت اکولوژیکی سامانه‌های آبی به ویژه تالاب‌ها کرده تا به توازن میان بشر و طبیعت دست یابند (Yang et al., 2018). تخصیص آب محیط زیستی مستلزم شناسایی و درک کمی و کیفی اجزای اکوسیستم و روابط متقابل آن‌هاست. از طرفی این روابط و چرخه‌های فیزیکی- شیمیایی- بیولوژیکی بسیار پیچیده هستند و نیز اثر تغییرات رژیم هیدرولوژیکی روی اکوسیستم هنوز کاملاً شناخته نشده است (Guo et al., 2001; Yang et al., 2016; Wan et al., 2022). تاکنون تعریف واحدی از نیاز آبی محیط زیستی ارائه نشده که مقبولیت عمومی یافته باشد. اما آنچه اکثر تعاریف ارائه شده برای نیاز آبی محیط‌زیست متفقاً بدان اشاره می‌نمایند: "رژیم آبی موردنیاز برای بقا و حفظ پایداری اکولوژیکی محیط‌های آبی در حداقل سطح ریسک" می‌باشد (Yang et al., 2016). شناسایی و تخصیص آب محیط زیستی تالاب‌ها نقش مؤثری در حفاظت از عملکردهای اکوسیستم خواهد داشت. برقراری تعادل بین نیازهای اکوسیستم‌های آبی و سایر مصارف آب در یک حوضه اصلی‌ترین مشغله فکری در مدیریت کلان آب در سطح جهان می‌باشد (Smakhtin et al., 2004). رژیم جریان در یک اکوسیستم آبی، از دیدگاه فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، محیط زنده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، تأمین آب کافی برای حفظ فرآیندهای اکولوژیکی محیط آبی بسیار ضروری است. تأمین حداقل جریان موردنیاز برای بقای محیط‌زیست و منافع ناشی از اکوسیستم آبی، سلامت رودخانه، توسعه اقتصادی و فقرزدایی از جوامع وابسته به محیط آبی را به دنبال دارد و ادامه حیات محیط آبی و استفاده‌های بشر از آن را تضمین می‌کند (Arthington et al., 1998; Walega et al., 2024).

با توجه به قرارگیری اکثر تالاب‌ها در پایین‌دست یک حوضه آبریز لذا عدم مدیریت منابع آب در بخش‌های مختلف مصرف، دخل و تصرف غیراصولی انسان از نظرساخت و ساز، احداث بندهای انحرافی سبب ایجاد مناقشات بین بخشی شده و به تبع آن تالاب‌هایی که در انتهای حوضه آبریز قرار دارند، دچار اثرات زیان‌بار متعددی شده‌اند. این تغییرات علاوه بر اکوسیستم‌های گیاهی و جانوری موجود بر روی انسان‌ها و سایر ذینفعانی که به نحوی با تالاب‌ها در ارتباط هستند نیز تأثیر دارد (مدبری و شکوهی، ۱۳۹۸).

در چند دهه اخیر تالاب انزلی با مشکلات عدیده‌ای مواجه شده است که نوسان و تغییر سطح آب تالاب یکی از این مشکلات است. در حال حاضر تالاب با کاهش سطح و عمق آب روبرو شده، به‌طوری‌که عمق آن در عمیق‌ترین نقاط از حدود ۶ متر به حدود ۱/۵ متر کاهش یافته است. این کاهش اگرچه با نوسانات سطح آب دریای خزر ارتباط دارد اما نمی‌توان اثر عدم مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه آبریز تالاب انزلی و فعالیت‌های انسانی صورت گرفته در آن را نادیده گرفت. بهره‌برداری بی‌رویه از رودخانه‌ها به‌منظور رفع نیازهای کشاورزی، تغییر کاربری اراضی جنگلی به مزارع شالیزاری برنج، تأسیس آب‌بندها و بندهای انحرافی در مسیر رودخانه‌ها سبب کاهش حقایق محیط زیستی تالاب شده است. همچنین، دفع مواد زائد شامل فاضلاب شهری، فاضلاب‌های صنعتی و پساب‌های کشاورزی نقش مهمی در آلودگی تالاب و مرگ آبزیان و تغییر شرایط محیط تالاب داشته است (زبردست و جعفری، ۱۳۹۰). ورود و افزایش رسوبات به داخل تالاب و تبدیل زمین‌های حاشیه تالاب به اراضی زراعی از وسعت و عمق تالاب کاسته است. مدیریت ناصحیح در تالاب که سبب کاهش سریع عمق آب شده، رسوب‌گذاری در بخش‌هایی از تالاب، تراکم گیاهانی مانند آزولا و سنبل آبی، کاهش اکسیژن محلول در آب و کاهش جمعیت برخی از اجزای اساسی اکوسیستم، نشانه‌هایی از پیری زودرس تالاب است (میرزاجانی و همکاران، ۱۳۸۸). این اتفاق نه‌تنها از نظر محیط زیستی آثار منفی بسیاری خواهد داشت، بلکه مشکلات اقتصادی و اجتماعی متعددی را به‌خصوص برای ساکنین پیرامون تالاب به بار خواهد آورد.

بررسی میزان تغییرات عمق که کم شدن آن موجب خشک شدن تالاب و همچنین از بین رفتن زیستگاه گونه‌های زیادی از گیاهان و جانوران بومی و مهاجر به منطقه مورد مطالعه می‌شود، بسیار اهمیت دارد. نتایج مطالعات انجام‌شده در تالاب انزلی نشان داده است که تغییرات تراز سطح آب در تالاب انزلی عموماً متأثر از سطح تراز دریای خزر بوده و دبی جریان‌های ورودی به تالاب

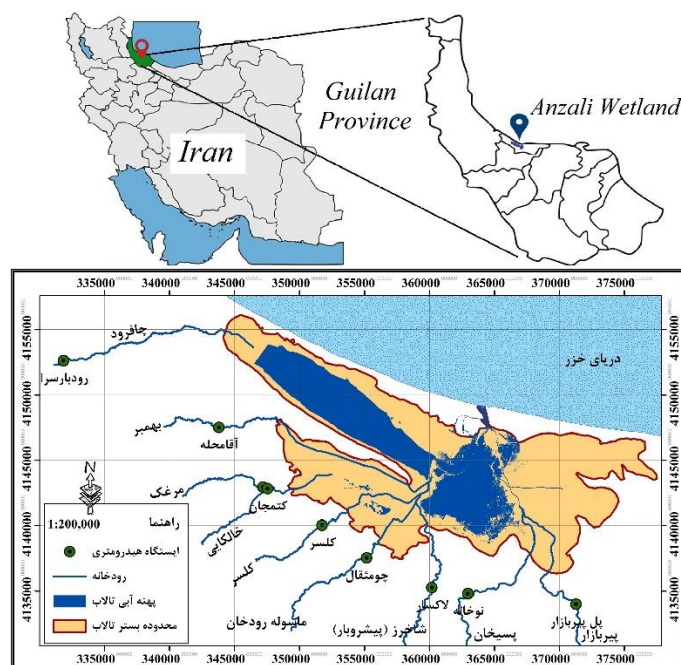
جز در مواقع سیلابی تأثیر چندانی بر تراز سطح آب تالاب ندارد اما با این حال کیفیت آب و روی به تالاب به لحاظ بار آلودگی و آورد رسوب از بالادست حوضه از طریق این رودخانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (مدبری و شکوهی، ۱۳۹۸). از این رو با توجه به روند نزولی کاهش دریای خزر و به دنبال آن کاهش تراز سطح آب، رعایت حقابه‌ی محیط زیستی تالاب و رهاسازی جریان محیط زیستی متناسب با اکولوژی آن در رودخانه‌های منتهی به تالاب به تنهایی نمی‌تواند شرایط اکولوژیکی مطلوب در تالاب را تأمین کند (مدبری و شکوهی، ۱۳۹۹؛ ۱۴۰۱). لذا بایستی ضمن بررسی و کنترل کمی و کیفی آب و رسوب ورودی به تالاب انزلی، راهکارهای مؤثری به منظور افزایش عمق و تراز سطح آب تالاب انزلی ارائه کرد. این تحقیق درصدد بررسی روش‌های ممکن به منظور تثبیت تراز تالاب و ارائه راهکارهای مناسب در این راستا می‌باشد. با توجه به اینکه تراز تالاب انزلی به لحاظ هیدرولیکی تحت تأثیر تراز دریای خزر (شرایط پایین‌دست) و دبی جریان ورودی از رودخانه‌های منتهی به آن است، در این تحقیق ضمن شناسایی و بررسی عوامل مؤثر بر کاهش تراز تالاب انزلی، روش‌های مختلف برای تثبیت تراز تالاب طی مطالعاتی جامع ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تالاب بین‌المللی انزلی در جنوب شرقی دریای خزر واقع شده که اهمیت بسزایی از نظر اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی دارد. این تالاب پذیرای آب رودخانه‌های متعددی است و با وسعتی حدود ۱۵۰۰۰ هکتار یکی از ۲۴ تالاب بین‌المللی ایران است که در سال ۱۳۵۴ به همراه ۱۸ تالاب دیگر به دفتر کنوانسیون رامسر معرفی شد. وسعت تالاب انزلی در فصل‌های زمستان و بهار به دلیل افزایش بارش، تا حدود ۲۱۸ کیلومترمربع و در فصل تابستان به سبب کم شدن حجم ورودی آب، کمبود بارش و افزایش میزان تبخیر به ۸۰ کیلومترمربع می‌رسد (عاشوری و عبدوس، ۱۳۹۳). تفاوت میان قسمت‌های مختلف تالاب از نظر خصوصیات جغرافیایی، ویژگی آب و هوایی و تنوع گیاهی و جانوری، سبب تقسیم تالاب به چهار بخش شرقی، مرکزی، غربی و جنوب غربی (سیاکشیم) شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیائی و بخش‌های مختلف تالاب انزلی را نشان می‌دهد. در بخش مرکزی تالاب انزلی پهنه آبی وسیعی وجود دارد و دو پناهگاه حیات وحش سلکه و سرخانکل به همراه خروجی آب تالاب به دریا در محدوده این بخش از تالاب قرار دارد. قسمت اعظم بخش شرقی این تالاب امروزه پوشیده از گیاهان آبی بن در آب و یکی از آلوده‌ترین و کم‌عمق‌ترین محدوده‌های تالاب انزلی است. بخش خمام و پناهگاه حیات وحش چوکام در محدوده این بخش از تالاب قرار دارد. بخش غربی تالاب انزلی که از نوع لاگون می‌باشد، پهنه آبی وسیعی است و عمیق‌ترین بخش تالاب در این محدوده قرار دارد و شامل بخش‌های ماهروزه و کپورچال است. سیاکشیم قدیمی‌ترین منطقه حفاظت‌شده در مجموعه تالاب انزلی است که امروزه به‌جز چند پهنه آبی و رودخانه‌های جاری در آن، بقیه سطح تالاب از گیاهان آبی بن در آب به‌ویژه نی پوشیده شده است (جاودان خرد، ۱۳۹۰). بخش‌های معروف به کلاس آبکنار و کلاس نرگستان در این منطقه قرار دارد. در سالیان اخیر بخش سیاکشیم دچار مشکلات زیادی شده به‌طوری‌که ارتباط این بخش با سایر بخش‌ها به حداقل رسیده است. این کاهش ارتباط با سایر قسمت‌ها سبب افت تراز سطح آب در این منطقه و دست‌درازی روستائیان حاشیه تالاب و افراد سودجو به بخش‌های مختلف سیاکشیم شده است. مدیریت ناصحیح در بالادست رودخانه‌های ورودی به تالاب سیاکشیم و صدور مجوزهای غیرقانونی برداشت شن و ماسه در این رودخانه‌ها سبب افزایش حجم رسوبات ورودی به تالاب و کاهش حجم مخزن شده است. مسئولین محلی برای رفع این معضل به لایروبی عمیق و غیرعلمی رودخانه‌های ورودی به تالاب پرداختند که این عملیات موجب شد رودخانه‌های لایروبی شده به‌مانند یک زهکش عمل کنند و با جلوگیری از پخش شدن آب در سطح تالاب، در مدت‌زمان بسیار کوتاه آوردهای رودخانه‌ها را به منطقه خروجی تالاب و دریا هدایت ن‌کنند. با توجه به توپوگرافی بخش‌های مختلف تالاب انزلی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر و در نظر گرفتن این نکته که در گذشته بخش حفاظت‌شده سیاکشیم مهم‌ترین زیستگاه اکولوژیکی تالاب انزلی برای گیاهان و جانوران بوده و بیشترین فعالیت‌های انسانی مخرب روی آن صورت گرفته است، این بخش برای ادامه مطالعات و

به عنوان معرف تالاب انتخاب و فرض بر آن قرار گرفت که با تأمین نیاز اکولوژیکی سیاکشیم، نیازهای اکولوژیکی سایر بخش های تالاب تأمین می شود.



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه

فرآیند تحقیق

این پژوهش با هدف بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات تراز تالاب انزلی و ارائه راهکارهای مناسب برای تثبیت آن، از روش های مختلف جمع آوری و تحلیل داده ها، بررسی هیدرولوژیکی، هیدرودینامیکی، و ارزیابی اثرات محیط زیستی بهره گرفته است. در گام نخست، داده های پایه ای شامل اطلاعات هیدرولوژیکی، هیدرودینامیکی، اقلیمی، و رسوب شناسی گردآوری شد. برای این منظور، داده های مربوط به دبی رودخانه های ورودی به تالاب، تغییرات سطح آب دریای خزر، میزان بارندگی، کیفیت آب، و تأثیرات انسانی نظیر برداشت های غیرمجاز آب و ورود آلاینده ها به تالاب از منابع مختلف مانند ایستگاه های هیدرومتری، تصاویر ماهواره ای، و گزارش های رسمی سازمان های مرتبط دریافت و پردازش شد. علاوه بر این، نمونه برداری های میدانی جهت ارزیابی میزان رسوب گذاری، کیفیت آب، و پوشش گیاهی تالاب انجام شد. داده های به دست آمده از این مرحله مبنای تحلیل های عددی و ارزیابی روش های مدیریتی قرار گرفت.

پس از گردآوری داده ها، به شناخت عوامل تأثیرگذار بر تراز و عمق تالاب انزلی پرداخته شد، سپس بر اساس هر یک از عوامل مورد نظر و همچنین مشکلات و معضلات موجود در تالاب که مرتبط با فاکتورهای عمق و تراز آب بودند، راهکارهای مدیریتی مختلفی ارائه شد. در بخش ارزیابی راهکارهای مدیریتی، دو رویکرد پیشگیری و احیا مورد بررسی قرار گرفت. در رویکرد پیشگیری، اقداماتی مانند نظارت و جلوگیری از برداشت غیرمجاز آب، کنترل فرسایش و رسوب، اجرای عملیات بیولوژیکی و مکانیکی آبخیزداری، احیای تله های رسوبگیر، احداث بندهای اصلاحی در رودخانه ها برای افزایش زمان تمرکز حوضه آبریز، و مدیریت آلاینده های ورودی به تالاب ارزیابی شد. این اقدامات با استفاده از تحلیل های کیفی و کمی و همچنین نظرسنجی از کارشناسان محیط زیست و منابع آب، اولویت بندی شدند. در رویکرد احیا، راهکارهایی مانند مدلسازی هیدرودینامیک تالاب در قالب یک طرح جامع، افزایش راندمان مصرف آب در شبکه های آبیاری، لایروبی با ارزیابی دقیق اثرات محیط زیستی، مقابله با گونه های

گیاهی مهاجم، و امکان سنجی اجرای سازه‌های تنظیمی برای کنترل و تثبیت تراز سطح آب تالاب مورد بررسی قرار گرفتند. برای هر یک از این روش‌ها، شاخص‌هایی نظیر کارایی اجرایی و میزان تأثیرگذاری بر پایداری اکولوژیکی تالاب تحلیل شد. در نهایت، بر اساس نتایج حاصل از مطالعات تخصصی و بررسی‌های میدانی، هر یک از راهکارهای مدیریتی با یکدیگر مقایسه شدند تا مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تثبیت تراز تالاب انزلی انتخاب شوند. معیارهای انتخاب شامل پایداری محیط زیستی، هزینه‌ها، قابلیت اجرایی، و تأثیرگذاری در بلندمدت بود. سپس بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهادات نهایی برای مدیریت بهینه تالاب ارائه گردید که می‌تواند به عنوان یک راهنمای علمی و اجرایی برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران حوزه محیط‌زیست و منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج و بحث

معضلات و چالش‌های تالاب

تالاب انزلی، به عنوان یک اکوسیستم آبی منحصربه‌فرد، با چالش‌ها و معضلات متعددی مواجه است که حیات آن را تهدید می‌کند. مهم‌ترین این مشکلات شامل کاهش تراز سطح آب دریای خزر، ورود آلاینده‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، رسوبات ورودی از حوضه‌های آبریز، تأثیرات احداث موج‌شکن‌های جدید و گسترش گیاهان مهاجم مانند سنبل آبی و آژولا است. کاهش تراز آب دریای کاسپین به‌طور مستقیم بر تراز آب تالاب تأثیر گذاشته و باعث خشک‌شدن بخش‌هایی از آن شده است. از سوی دیگر، ورود فاضلاب‌های شهری، پساب‌های صنعتی و کودهای شیمیایی به تالاب، کیفیت آب را کاهش داده و منجر به رشد بیش از حد گیاهان آبی و کاهش اکسیژن مورد نیاز آبزیان شده است. همچنین، رسوبات ورودی از رودخانه‌ها حجم مفید تالاب را کاهش داده و خدمات اکوسیستمی آن را تهدید می‌کند.

احداث موج‌شکن‌های جدید نیز با تغییر هیدرودینامیک جریان آب، باعث افزایش رسوب‌گذاری در کانال خروجی تالاب شده و فرآیندهای طبیعی مانند رسوب‌شویی را مختل کرده است. علاوه بر این، گیاهان مهاجم مانند سنبل آبی و آژولا به سرعت در تالاب گسترش یافته و تعادل اکولوژیکی آن را برهم زده‌اند. این گیاهان با جذب مواد مغذی و کاهش نور و اکسیژن آب، حیات آبزیان و سایر گونه‌های بومی را به خطر انداخته‌اند. در مجموع، این چالش‌ها نشان می‌دهد که تالاب انزلی در معرض تهدیدات جدی محیط زیستی قرار دارد و برای حفظ آن، نیازمند مدیریت یکپارچه، کنترل آلاینده‌ها، کاهش رسوبات ورودی و مقابله با گیاهان مهاجم است.

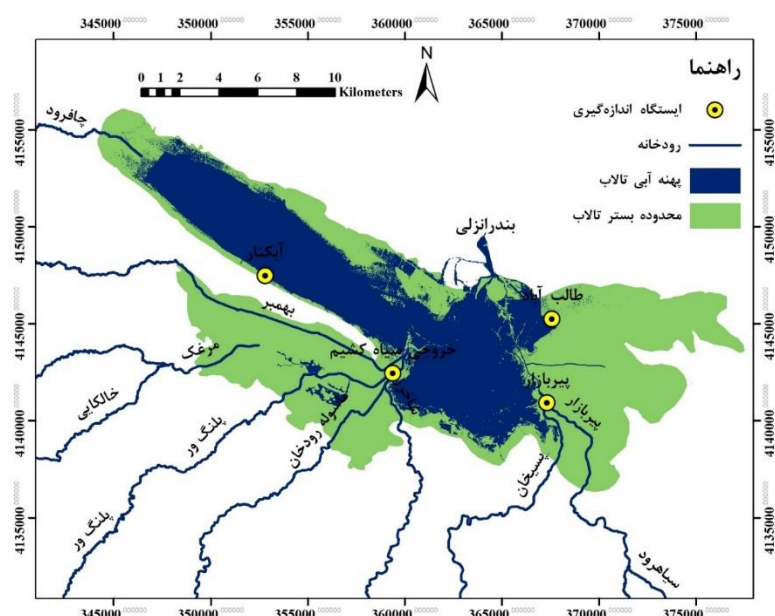
بررسی هیدرولیکی تالاب

یکی از مشکلات موجود برای تأمین اطلاعات پایه در تالاب انزلی عدم وجود ایستگاه‌های ترازسنجی مناسب و برنامه‌ای منظم و مداوم برای ثبت تراز سطح آب در طول زمان می‌باشد. در مقابل، ارتفاع سطح آب دریای خزر به‌طور پیوسته و منظم از سال ۱۳۰۵ تاکنون اندازه‌گیری شده است. با این فرض که می‌توان از روی سطح آب دریای خزر به سطح آب تالاب پی برد، لازم بود تا رابطه میان سطح آب این دو بخش استخراج گردد. در این بین، در نظر گرفتن برخی نکات از نظر ارتباط هیدرولیکی دو سیستم یادشده لازم است. از آنجاکه تراز آب تالاب انزلی متأثر از تراز آب دریای خزر می‌باشد وجود هر نوع سازه تنظیمی می‌تواند بر این ارتباط مؤثر باشد (JICA, 2005). در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۹ در خروجی تالاب موج‌شکنی احداث شد که عملاً بر روی تراز آب تالاب دارای اثر تنظیمی بوده و یک مقطع کنترل به حساب می‌آید. فرض بر این است که تالاب در کل، به‌صورت یک مخزن عمل می‌کند و بسته به شرایط پایین‌دست (تراز سطح دریا قبل از احداث موج‌شکن یا سطح آب در محل موج‌شکن) و شرایط بالادست (جریان ورودی از رودخانه‌ها)، تراز آب تالاب و به تبع آن مساحت و حجم آن تغییر می‌کند. بر این اساس و به کمک اطلاعات موجود، روابطی بین دبی رودخانه‌های ورودی به تالاب و اختلاف تراز بین سطح تالاب و دریا در دو شرایط قبل و بعد از احداث موج‌شکن به دست آمد با استفاده از این روابط و داشتن مقادیر دبی ورودی به تالاب و تراز دریای خزر در زمان‌های مختلف می‌توان میانگین تراز سطح آب تالاب را با دقت قابل قبولی برآورد کرد. شرکت جایکا در راستای مطالعات خود (JICA, 2005)

تراز تالاب انزلی را در چهار نقطه به صورت روزانه (دو بار در روز) به مدت چهل روز در ماه‌های مرداد و شهریور در سال ۱۳۸۲ اندازه‌گیری کرده است. موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری تراز سطح آب تالاب در شکل (۲) و خصوصیات جغرافیایی محل نصب اشل‌های تراز در جدول (۱) آورده شده است.

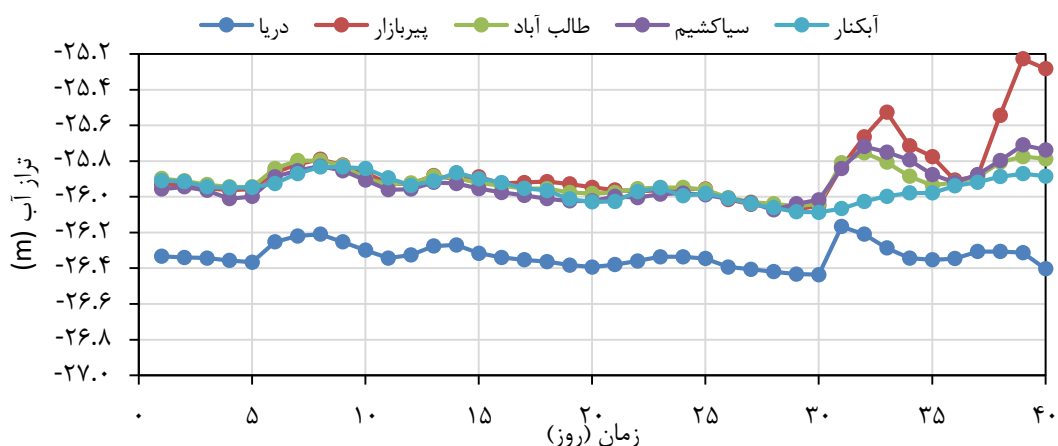
جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری تراز سطح آب تالاب انزلی توسط شرکت جایکا (JICA, 2005)

ایستگاه	نام محل	مختصات ایستگاه برحسب UTM	
		X	Y
TB-1	پیربازار	۴۱۴۰۹۰۹	۳۶۷۳۲۱
TB-1	طالب‌آباد	۴۱۴۵۲۱۹	۳۶۷۵۷۰
TB-1	خروجی سیاکشیم	۴۱۴۲۴۲۷	۳۵۹۳۷۵
TB-1	آبکنار	۴۱۴۷۴۶۵	۳۵۲۷۹۷



شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری تراز سطح آب تالاب انزلی

شکل (۳) تغییرات تراز سطح آب دریا و تالاب را در ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد. بررسی نمودار تغییرات تراز سطح تالاب در این چهار ایستگاه نشان داد که تراز سطح آب در نواحی مختلف تالاب در اکثر مواقع تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. بنابراین، می‌توان تالاب را همانند یک مخزن با تراز سطح آب ثابت در کل آن فرض کرد. لازم به توضیح است که در محل ورودی رودخانه‌ها به تالاب (مانند ایستگاه ترازسنجی پیربازار در محل ورود رودخانه‌های پیربازار و پسیخان) به دلیل نوع توپوگرافی آن و همچنین به دلیل وجود پوشش گیاهی مانند نی، زبری بستر در این نواحی افزایش یافته و باعث تأخیر در پخش حجم آب ورودی در پهنه تالاب و به دنبال آن افزایش ناگهانی تراز سطح آب در مواقع جریان سیلابی می‌شود. تغییرات تراز سطح آب در ایستگاه آبکنار کمی متفاوت است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود تغییر تراز سطح آب دریا، با یک تأخیر زمانی بر تراز سطح آب در ایستگاه آبکنار اثر می‌گذارد. به‌طور مثال در روز ۳۱م اندازه‌گیری، تراز سطح آب دریا افزایش ناگهانی داشته است اما تراز ایستگاه آبکنار تغییر محسوسی ایجاد نشده است و با تأخیر زمانی چندروزه به‌صورت یکنواخت مقداری افزایش یافته است. به نظر می‌رسد دلیل وجود این تأخیر زمانی، بزرگ بودن پهنه آبی قسمت غرب تالاب انزلی و فاصله زیاد ایستگاه آبکنار تا قسمت مرکزی تالاب باشد. همچنین، رودخانه چافروود تنها رودخانه‌ای است که به قسمت غربی تالاب وارد می‌شود و حتی در شرایط سیلابی رودخانه چافروود تأثیر چندانی بر تراز تالاب در بخش غربی ندارد.



شکل (۳) تراز سطح آب تالاب انزلی و دریای خزر (JICA, 2005)

مقایسه تراز دریای خزر با تراز سطح آب تالاب انزلی در این بازه زمانی نشان می‌دهد که تراز سطح آب تالاب مستقیماً تحت تأثیر تراز سطح آب دریای خزر است. شرکت جایکا نیز در مطالعات خود به این نکته اشاره کرده است که کانال خروجی تالاب در بندرانزلی به عنوان نقطه کنترل سطح آب تالاب عمل می‌کند (JICA, 2005). با توجه به شکل (۳)، در شرایط نرمال و غیر سیلابی اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا حدود ۰/۴ متر است. بنابراین، می‌توان گفت تراز سطح آب تالاب توسط تراز سطح آب دریای خزر کنترل می‌شود و اختلاف تراز موجود (بین دریا و تالاب) تحت تأثیر جریان ورودی به تالاب از طریق رودخانه‌ها و دیگر منابع آب ورودی است که باعث حرکت جریان به سمت دریا می‌شود. بررسی نوسانات تراز دریای خزر و تغییرات دبی رودخانه‌های منتهی به تالاب انزلی در طی سال در بخش مطالعات هیدرولوژی نشان داد که حداکثر تراز سطح آب دریای خزر در اوایل تابستان و حداقل تراز سطح آب در اوایل زمستان اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر در اوایل تابستان میانگین دبی ورودی به تالاب به حداقل می‌رسد.

با توجه به معادله برنولی بین دو مقطع فرضی در انتهای کانال خروجی تالاب (مقطع ۱) و در داخل تالاب انزلی (مقطع ۲)، معادله زیر برقرار است:

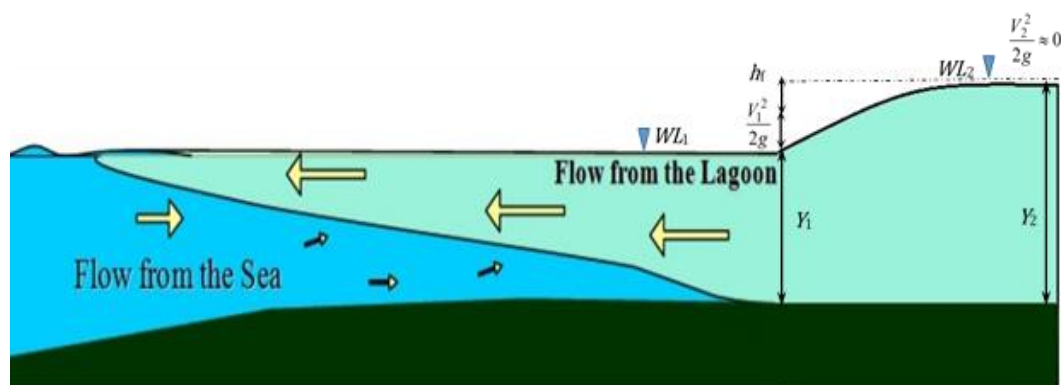
$$WL_2 + \frac{V_2^2}{2g} = WL_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_f$$

در رابطه بالا WL تراز سطح آب، V سرعت جریان، g شتاب گرانش و h_f افت اصطکاکی است. چون سرعت جریان در تالاب خیلی کم است می‌توان از $\frac{V_2^2}{2g}$ صرف نظر کرد در نتیجه با استفاده از معادلات زیر، تراز سطح آب و اختلاف تراز بین دو مقطع به دست می‌آید.

$$WL_2 = WL_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_f$$

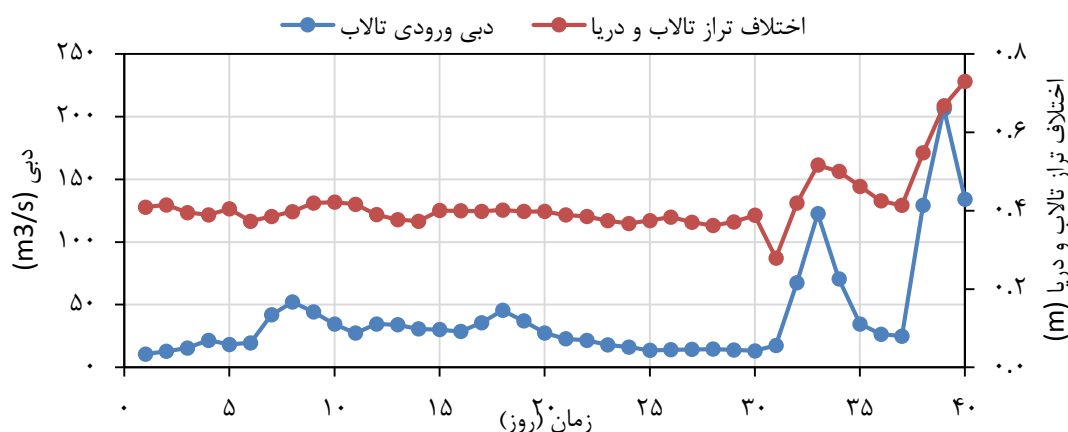
$$\Delta h = WL_2 - WL_1 = \frac{V_1^2}{2g} + h_f$$

بنابراین، اختلاف تراز سطح آب دریا و تالاب به سرعت جریان خروجی و افت اصطکاکی جریان از تالاب تا دریا بستگی دارد. شکل (۴) شمای پیش روی آب دریا به داخل تالاب را نشان می‌دهد.



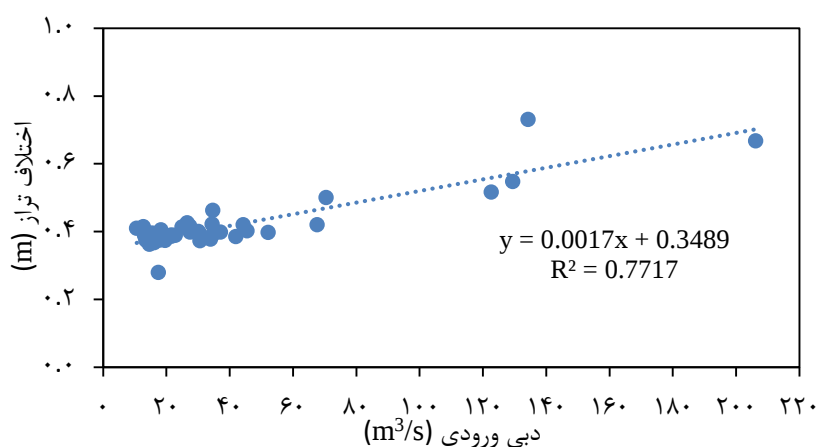
شکل (۴) شمای پیشروی آب دریا و اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا

اگر تراز سطح آب دریا ثابت فرض شود و از تبخیر و دیگر مصارف آب تالاب صرف نظر گردد آنگاه براساس معادله بیلان می‌توان گفت دبی خروجی و ورودی به تالاب باهم برابرند. باتوجه به مطالعات شرکت دزآب در سال ۱۳۹۱ و شرکت جایکا در سال ۲۰۰۵ ظرفیت کانال خروجی تالاب حدود ۱۴۰۰ مترمکعب در ثانیه برآورد شده است که این عدد ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه بزرگتر از حداکثر سیلابی است که در سال ۱۳۷۷ در حوضه آبریز تالاب اتفاق افتاده بود در نتیجه تالاب می‌تواند حداکثر آب ورودی به خود را از طریق کانال خروجی تخلیه نماید. بر اساس نظر کارشناسان و افراد بومی در سال‌های قبل از احداث موج‌شکن بندرانزلی، در بعضی اوقات که دریا حالت طوفانی داشته با افزایش ارتفاع امواج و سرعت جریان کرانه‌ای در دریا، نفوذ آب دریا و جریان برگشتی به تالاب اتفاق می‌افتاد که حتی جهت حرکت معکوس جریان قابل تشخیص بوده است. اما، توسعه موج‌شکن‌ها با توجه به هدف احداث آن‌ها از نفوذ امواج به محدوده بندر و کانال خروجی تالاب جلوگیری کرده است و باعث تضعیف جریان برگشتی شده و تشخیص آن به صورت چشمی امکان‌پذیر نیست. مقدار پیشروی آب دریا در تالاب از طرفی به قدرت امواج و میزان نفوذ آن‌ها به داخل کانال خروجی تالاب و مقدار افزایش تراز دریا و از طرف دیگر به مقدار دبی رودخانه‌های ورودی به تالاب بستگی دارد. هرچه دبی رودخانه‌ها بیشتر باشد توانایی تالاب برای افزایش تراز سطح آب خود و غلبه بر جریان برگشتی از دریا بیشتر می‌شود. باید به این نکته توجه داشت که افزایش یا کاهش تراز دریای خزر به تدریج رخ می‌دهد و تالاب فرصت دارد تا با افزایش تراز سطح آب خود اختلاف تراز سطح آب را نسبت به دریا حفظ کند. میانگین دبی ورودی به تالاب در ماه مرداد به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین، در شکل (۵) نیز در ۱۵ روز اول (مرداد) دبی ورودی به تالاب بین ۱۰ تا ۵۰ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده است که در مواقعی از میانگین ماهانه آن (۲۷ مترمکعب بر ثانیه) کمتر است و باوجود اینکه تراز آب دریا حداکثر است اما همچنان اختلاف تراز حدود ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ متر مشاهده می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت یک اختلاف تراز نسبتاً ثابتی بین دریا و تالاب وجود دارد.



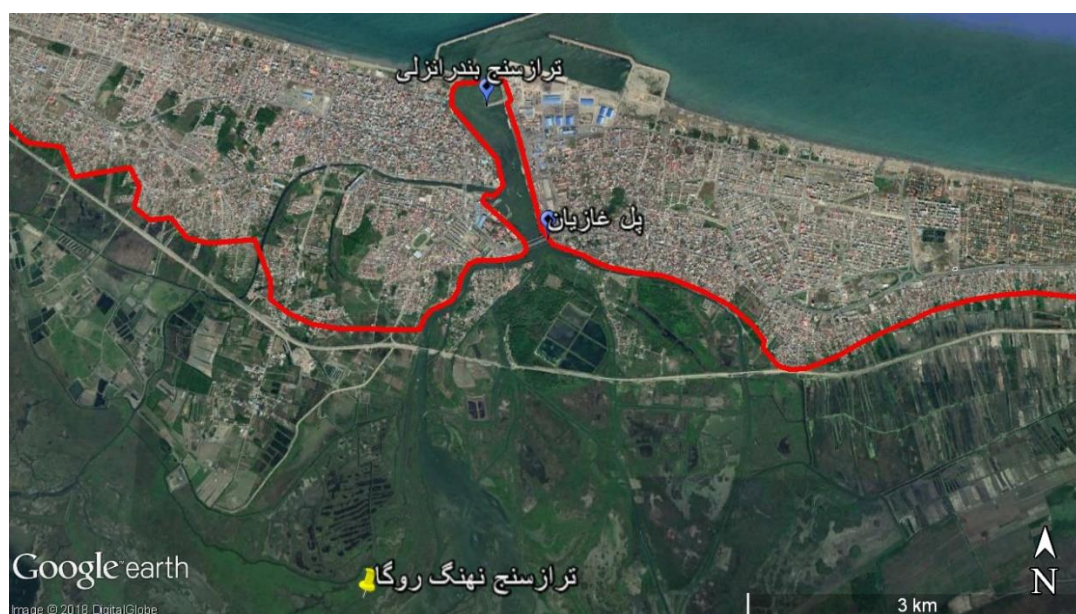
شکل (۵) نمودار دبی ورودی به تالاب انزلی و اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا در بازه زمانی ۴۰ روزه در سال ۱۳۸۲

در مرحله آخر برای یافتن رابطه‌ی بین دبی ورودی به تالاب و اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا، این دو پارامتر نسبت به هم مقایسه شدند و برازش خطی آن با ضریب همبستگی ۰/۷۷ به دست آمد. لازم به ذکر است که اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا به صورت تفاضل میانگین تراز سطح تالاب (میانگین تراز تالاب در ۴ ایستگاه ترازسنجی) و تراز آب دریای خزر در نظر گرفته شد. بنابراین می‌توان از طریق این رابطه با داشتن دبی ورودی به تالاب و تراز دریای خزر در زمان‌های مختلف، میانگین تراز سطح آب تالاب را با دقت مناسبی برآورد کرد. باتوجه به شکل (۶) و رابطه‌ی خطی بین دبی ورودی و اختلاف تراز تالاب و دریا، مقدار ثابت ۰/۳۴۸۹ متر مشاهده می‌شود که طبق رابطه برنولی که به آن اشاره شد می‌توان گفت که این مقدار مربوط به افت اصطکاکی و موضعی است. بنابراین با مشخص بودن دبی ورودی به تالاب در بازه زمانی قبل از احداث موج‌شکن (۲۰۱۰) می‌توان تراز سطح آب تالاب را با دقت مناسبی با استفاده از معادله شکل زیر برآورد کرد.

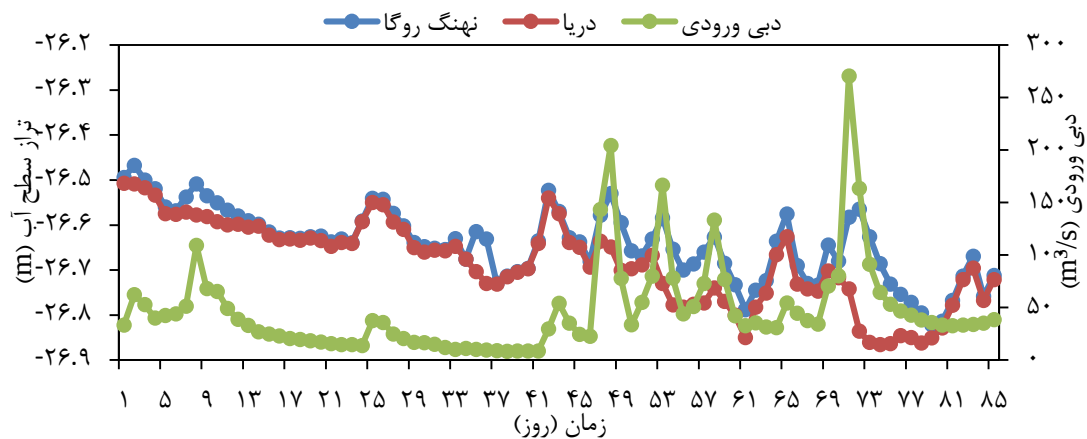


شکل (۶) نمودار برازش دبی ورودی و اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا

تنها داده‌های تراز سطح آب تالاب موجود بعد از احداث موج‌شکن، مربوط به سال ۱۳۹۵ در ایستگاه نهنگ روگا است. شکل (۷)، موقعیت ترازسنج نهنگ روگا را در تالاب انزلی نشان می‌دهد.

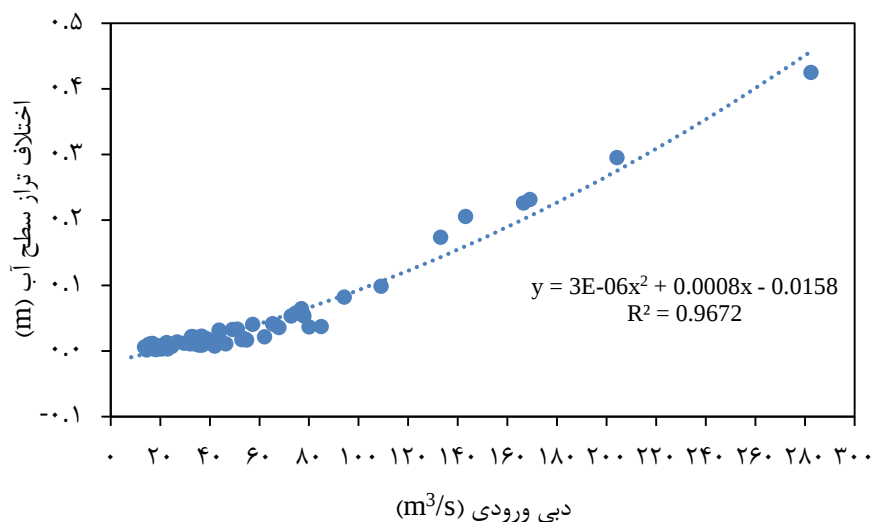


شکل (۷) موقعیت ترازسنج نهنگ روگا در تالاب انزلی



شکل (۸) نمودار تراز سطح آب تالاب و دریا و دبی ورودی به تالاب در بازه زمانی ۹۰ روزه در سال ۱۳۹۵

با توجه شکل (۸) و گزارش شرکت جابکا، تراز سطح آب در تالاب انزلی تقریباً یکسان است و می‌توان تراز سطح آب در ایستگاه نهنگ روگا را به کل تالاب تعمیم داد. با بررسی این داده‌ها نیز رابطه‌ای بین اختلاف تراز سطح آب دریا و تالاب و دبی ورودی به تالاب به دست آمد. همان‌طور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود در مواقعی که دبی ورودی افزایش می‌یابد، تراز تالاب نیز افزایش پیدا کرده اما دیگر اختلاف تراز سطح آب به صورت ثابت مشاهده نمی‌شود. از طرفی تنها تغییر در کانال خروجی تالاب، احداث موج‌شکن‌های بندرانزلی است. بنابراین می‌توان تراز سطح آب تالاب انزلی را در بازه زمانی در سال ۱۳۹۵، طبق شکل (۹) و معادله مربوطه برآورد کرد. در جدول (۲) معادلات برآورد شده به منظور تخمین تراز سطح آب تالاب انزلی در دو بازه زمانی ارائه شده است.



شکل (۹) رابطه بین دبی ورودی و اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا در بازه زمانی ۹۰ روزه در سال ۱۳۹۵

جدول ۲- معادلات برآورد شده به منظور تخمین تراز سطح آب تالاب انزلی

معادله	R ²	بازه زمانی
$Y = 0.0017x + 0.3489$	0.772	۱۳۸۲
$Y = 3 \times 10^{-6}x^2 + 0.0008x - 0.0158$	0.967	۱۳۹۵
X: دبی ورودی به تالاب (CMS) و Y: اختلاف تراز سطح آب تالاب و دریا (m)		

بررسی دبی جریان و رسوب ورودی به تالاب

با توجه به منتهی شدن ۹ رودخانه اصلی به تالاب انزلی، مجموع میانگین دبی ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در پایین‌دست حوضه‌های آبریز هر رودخانه نشان‌دهنده دبی ورودی به تالاب انزلی می‌باشد. لذا مجموع میانگین بلندمدت و کوتاه‌مدت دبی ایستگاه‌های هیدرومتری موجود به ترتیب برابر با ۶۲/۶۹ و ۵۸/۸۸ محاسبه شد که حاکی از کاهش حدود ۶/۱ درصدی میانگین دبی ورودی به تالاب انزلی در دوره کوتاه‌مدت (۱۰ ساله) نسبت به دوره بلندمدت (۳۰ ساله) می‌باشد. به طور کلی، بیشترین آبدهی مربوط به ماه آبان و کمترین آن در ماه مرداد می‌باشد. رودخانه پسیخان با میانگین دبی ۲۰/۰۸ مترمکعب بر ثانیه (حدود ۳۲ درصد دبی ورودی به تالاب) دارای بیشترین آبدهی و رودخانه بهمبر با میانگین دبی ۱/۷۴ مترمکعب بر ثانیه (حدود ۲/۸ درصد دبی ورودی به تالاب) کمترین سهم آبدهی را به خود اختصاص داده است.

با اعمال روابط همبستگی انتخاب شده بده لحظه ای و بار رسوب معلق نظیر روزانه در آبدهی های روزانه دوره آماری موجود هر کدام از ایستگاه‌های هیدرومتری (به تفکیک)، بار رسوب معلق روزانه ایستگاه‌ها محاسبه گردید. در مرحله بعد، از مجموع بار رسوب معلق روزانه در هر ماه، بار رسوب معلق ماهانه و از مجموع بار رسوب معلق ماهانه در هر سال آبی، بار رسوب معلق سالانه متناظر ایستگاه‌ها مجموعاً حدود ۱۴۳ هزار تن بدست آمد. بر اساس مطالعات اخیر که توسط سازمان محیط زیست انجام شده است، بخش رسوب، بار کل رسوب ورودی به تالاب انزلی از طریق ۹ رودخانه اصلی حدود ۵۰۰ الی ۶۰۰ هزار تن در سال برآورد گردیده است. بنابراین با توجه به اینکه برآورد رسوب در مطالعه حاضر بر اساس آمار پایش دوره‌ای شرکت آب منطقه‌ای بوده و پایش رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه‌ها با تواتر دو بار در ماه انجام شده است، استناد به این آمار عملاً تأثیر جریان‌های سیلابی و یا جریان‌های ناشی از ذوب برف که دارای بار رسوبی بسیار بالایی هستند را در نظر نمی‌گیرد. لذا مقدار واقعی رسوب ورودی به تالاب انزلی بیشتر از مقادیر ارائه شده در این گزارش (۱۴۳ هزار تن) است و ارائه مقدار دقیق و یا نزدیک به واقعیت منوط بر پایش مستمر رسوب رودخانه در شرایط آب و هوایی و هیدرولوژیکی مختلف در طول سال می‌باشد. با این حال به منظور تحلیل اولیه از شرایط حوضه‌های منتهی به تالاب و مشخص کردن سهم هر یک در رسوب ورودی به تالاب، استفاده از آمار مذکور کفایت می‌کند.

بررسی بیلان آب تالاب

با در نظر گرفتن کلیه منابع و مصارف در سطح حوضه تالاب انزلی مقدار کل جریان سطحی ورودی به تالاب برآورد شد که با توجه به رابطه‌ی بین دبی ورودی به تالاب و اختلاف تراز سطح آب تالاب با دریا، تراز سطح آب تالاب در هر ماه برآورد شده و حجم و مساحت متناظر با هر تراز در هر ماه با استفاده از روابط سطح-حجم-ارتفاع محاسبه گردید. سپس تغییرات حجم آب تالاب در هر ماه نسبت به ماه قبل محاسبه و با جایگذاری آن در معادله بیلان، تنها مؤلفه مجهول یعنی حجم آب سطحی خروجی از طریق کانال بندرانزلی به دریا محاسبه شد. در جدول (۳) نتایج محاسبات بیلان تالاب انزلی در سال آبی ۱۳۹۹-۰۰ ارائه شده است. در شش‌ماه اول سال آبی به دلیل روند نزولی تراز آب دریای خزر دبی جریان آب سطحی خروجی بیشتر از ورودی است اما در شش‌ماه دوم سال آبی با وجود اینکه تبخیر افزایش می‌یابد، دبی آب سطحی خروجی کمتر از ورودی است که نشان دهنده ذخیره آب در تالاب به دلیل روند صعودی تراز دریای خزر است.

جدول (۳) نتایج محاسبات بیلان تالاب انزلی در سال آبی ۱۳۹۹-۰۰ به عنوان سال مبنا و شرایط وضع موجود

بیلان تالاب ۱۳۹۹-۰۰	حجم آب سطحی ورودی (MCM)	حجم بارش (MCM)	حجم تبخیر از سطح آب (MCM)	حجم تبخیر-تعرق ورودی (MCM)	جمع	اختلاف تراز تالاب و دریا (m)	حجم تالاب (MCM)	مساحت تالاب (km ²)	اختلاف حجم با ماه قبل (MCM)	حجم آب سطحی خروجی (MCM)
مهر	۱۱۸/۵۲	۴۷/۸۳	۲/۹۲	۵/۵۰	۱۶۶/۳۵	۰/۰۲۷	۵۶/۹۲	۳۹/۸۷	-	-

آبان	۱۳۷/۷۶	۳۸/۱۸	۱/۲۰	۲/۲۷	۱۷۵/۹۴	۰/۰۳۵	۵۵/۱۲	۳۸/۷۸	-۱/۸۰	۱۷۴/۲۶
آذر	۳۸۰/۷۴	۵۸/۱۹	۰/۷۹	۱/۵۰	۴۳۸/۹۴	۰/۱۶۶	۶۳/۹۳	۴۴/۰۸	۸/۸۱	۴۲۷/۸۳
دی	۱۳۴/۲۴	۱۱/۱۱	۰/۹۶	۱/۶۶	۱۴۵/۳۵	۰/۰۳۴	۴۹/۹۴	۳۵/۶۱	-۱۳/۹۹	۱۵۶/۷۳
بهمن	۸۲/۸۰	۱۳/۳۹	۰/۸۹	۱/۵۳	۹۶/۱۹	۰/۰۱۳	۴۸/۶۵	۳۴/۸۱	-۱/۲۹	۹۵/۰۷
اسفند	۱۹۳/۸۲	۲۳/۶۰	۱/۴۳	۲/۴۷	۲۱۷/۴۲	۰/۰۶۴	۵۵/۴۴	۳۸/۹۷	۶/۸۰	۲۰۶/۷۲
فروردین	۱۲۱/۰۱	۰/۵۸	۴/۵۷	۷/۵۴	۱۲۱/۵۹	۰/۰۲۶	۵۰/۳۰	۳۵/۸۳	-۵/۱۴	۱۱۴/۶۲
اردیبهشت	۱۴۵/۹۹	۶/۹۸	۵/۰۱	۸/۲۶	۱۵۲/۹۷	۰/۰۳۷	۵۴/۸۹	۳۸/۶۴	۴/۵۹	۱۳۵/۱۱
خرداد	۹۳/۰۶	۲/۳۰	۸/۳۹	۱۳/۸۵	۹۵/۳۶	۰/۰۱۶	۵۹/۲۱	۴۱/۲۵	۴/۳۲	۶۸/۸۰
تیر	۷۵/۹۳	۱۵/۰۵	۱۰/۷۰	۲۰/۱۹	۹۰/۹۸	۰/۰۰۹	۵۹/۷۴	۴۱/۵۷	۰/۵۳	۵۹/۵۶
مرداد	۷۱/۰۱	۱۱/۲۷	۷/۹۰	۱۴/۹۰	۸۲/۲۸	۰/۰۰۸	۵۶/۸۱	۳۹/۸۰	-۲/۹۳	۶۲/۴۰
شهریور	۸۸/۵۹	۳۲/۶۰	۶/۸۲	۱۲/۸۷	۱۲۱/۱۹	۰/۰۱۴	۵۰/۹۶	۳۶/۲۴	-۵/۸۵	۱۰۷/۳۵

ارائه راهکارهای مدیریتی

عدم مدیریت صحیح و همچنین مدیریت مجزا بر منابع آب تا کنون خساراتی را بر پیکره‌های آبی اعم از سطحی و زیرسطحی وارد نموده است و این منابع را با مخاطرات و محدودیت‌های بسیاری مواجه ساخته است. در نتیجه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در دانش و تکنولوژی در سال‌های اخیر، رویکردهای مدیریت جامع منابع آب برای بهینه‌سازی و حفظ پایداری منابع آب موجود مورد توجه جدی قرار گرفته است. لذا امروزه مدیریت جامع و یکپارچه‌ی آب به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت نسبی منابع آب روبه‌رو هستند به‌عنوان ضرورتی اجتناب‌ناپذیر پذیرفته شده است. پس از تکامل مفهوم IWRM، مدیریت واقعی منابع آب در طول سال‌ها از یک رویکرد فنی با تجزیه و تحلیل و اقدامات فنی به سمت فرآیندی که هدف آن تأمین منافع همه ذینفعان و دستیابی به توافق برای وضعیت مطلوب سیستم و اقدامات لازم برای رسیدن به آن بود، تغییر یافته است (Mostert et al., 2000). رویکردهای گذشته مدیریت منابع آب که به ارتباطات میان اجزا مختلف چرخه آب توجه کافی نداشته و مدیریت منابع آب را بر اساس تقسیمات سیاسی و به تفکیک اجزا مختلف تدوین نموده، موجب شده است تا اجزا مختلف سیستم‌های منابع آب دچار مشکلات جدی کمی و کیفی شوند. بر این اساس امروزه رویکرد مدیریت جامع منابع آب در حوضه آبریز توسعه یافته، تا یکپارچگی بین عناصر سیستم و فعل و انفعالات فیزیکی و ساختاری آن حفظ شود. هرچند مدیریت به‌هم‌پیوسته منابع آب ممکن است به دلایل مختلف، آرمانی و دور از دسترس به نظر برسند ولی حرکت به‌سوی آن یک چالش حرفه‌ای در همه جوامع وابسته به آب است (Agrawal et al., 2004). نکته مهمی که در مطالعات جامع مدیریت منابع آب باید مورد توجه قرار گیرد، شناخت مولف‌ها و عدم قطعیت‌های آن‌ها، مشخص و روشن نمودن ارتباطات بین آن‌ها و اثرات مستقیم و غیرمستقیم بین مؤلفه‌ها می‌باشد تا با حل یک مشکل و برنامه‌ریزی یک مؤلفه، قسمت‌های دیگر سیستم تحت الشعاع قرار نگیرد. در این بخش با توجه به نتایج مطالعات پایه و تخصصی انجام شده در طرح حاضر، راهکارهای مدیریتی برای بهبود شرایط تالاب انزلی به لحاظ عمق و تراز سطح آب آن با دو رویکرد پیشگیری و احیا ارائه شده است.

رویکرد پیشگیری

کنترل فرسایش و رسوب در سطح زیر حوضه‌های تالاب

اولویت حوضه‌ها به منظور برنامه‌ریزی برای کنترل رسوب بر اساس فوریت محدوده‌های تالاب انزلی با تمرکز بر درجه پیشرفت خشک‌شدگی باید تعیین شود. در مطالعات مختلف محدوده سیاکشیم به عنوان بحرانی‌ترین محدوده در روند خشک‌شدگی

گزارش شده است. پس از آن محدوده سرخانکل به عنوان اولویت بعدی عنوان شده، و محدوده آبکنار در درجه بعدی قرار دارد. لذا حوضه آبریز رودخانه‌های منتهی به محدوده سیاکشیم دارای اولویت بالاتر برای برنامه‌ریزی کنترل رسوب می‌باشند. اولویت‌های بعدی شامل حوضه‌های منتهی به محدوده شرقی تالاب و پس از آن محدوده آبکنار هستند. در مطالعات شرکت جایکا نیز بر همین اساس حوضه‌های رودخانه‌های ورودی به تالاب از نظر وضعیت رسوب اولویت‌بندی شده است. بر اساس نتایج مطالعات مذکور در ارتباط با مقدار رسوب حوضه‌های آبریز رودخانه‌های ورودی به تالاب انزلی و با توجه به پارامترهای آورد رسوب رودخانه، مساحت حوضه و مناطق عملیات حفاظتی اداره کل منابع طبیعی در بالادست حوضه، و همچنین بر اساس موقعیت ورودی هر رودخانه نسبت به پهنه تالاب، اولویت حوضه‌های اصلی (حوضه‌های ۹ گانه) تالاب انزلی به منظور کنترل رسوب مطابق با جدول (۴) است. اولویت حوضه رودخانه‌ها به ترتیب برابر با حوضه آبریز ماسال (مرغک و خالکایی)، ماسوله رودخان، پیش‌رودبار، پلنگ‌ور، بهمبر، پسیخان، پیربازار، خمام‌رود و چافرود می‌باشد. در سال‌های اخیر طرح تلفیقی در حوضه رودخانه ماسال به منظور کنترل جریان‌ات رسوب ورودی به تالاب انزلی، به عنوان رودخانه مدل، با مشارکت اعضای زیر کمیته مدیریت آبخیزداری برنامه‌ریزی شد بر اساس نتایج طرح تلفیقی، طراحی، اجرا و عملیات پایش و نگهداری در مناطق کوهستانی زیر حوضه آلتزه که به عنوان رسوب‌خیزترین حوضه انتخاب شده بود، انجام شد. انتقال تکنولوژی از طریق همین فعالیت‌ها صورت گرفت. به منظور ادامه دادن فعالیت‌ها، برنامه میان‌مدتی برای فعالیت‌های مربوط به مناطق کوهستانی و مسیر اصلی رودخانه از سال ۲۰۲۰ تا سال ۲۰۳۰ تهیه شد.

جدول (۴) اولویت‌بندی حوضه‌ها به منظور کنترل رسوب ورودی به تالاب انزلی (پروژه مدیریت اکولوژیک تالاب انزلی)

محدوده تالاب	ترتیب اولویت	حوضه رودخانه	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	مجموع طول رودخانه (کیلومتر)
سیاه کشیم	۱	ماسال (مرغک و خالکایی)	۶۳۹	۴۲/۳
	۲	ماسوله	۳۸۹	۳۰/۸
	۳	پیش‌رودبار	۴۴۲	۳۷/۲
	۴	پلنگ‌ور	۲۲۷	۲۵/۸
	۵	بهمبر	۱۵۱	۱۹/۵
بخش شرقی	۶	پسیخان	۷۹۹	۴۷/۶
	۷	پیربازار	۲۸۶	۶۵/۱
	۸	خمام‌رود	۷۰	۲۸/۸
آبکنار	۹	چافرود		۱۷/۲

احیای سدهای رسوب‌گیر موجود

احداث سدها یا تله‌های رسوب‌گیر در بالادست مخازن طبیعی و مصنوعی، از جمله اقدامات سازه‌ای پیشگیرانه مؤثر و کارآمدی است که امروزه در عرصه مدیریت و بهره‌برداری پایدار از منابع آب و رسوب رودخانه‌ها و تالاب‌ها، از جایگاه مهمی برخوردار می‌باشد. با احداث تله‌های رسوب‌گیر در محل ورود رودخانه‌ها به تالاب‌ها و دریاچه‌ها، امکان مهار بخش مهمی از بار رسوب رودخانه قبل از ورود به چنین اکوسیستم‌های ارزشمندی میسر می‌گردد. در عین حال با توجه به ظرفیت محدود این گونه سدها، تداوم بهره‌برداری و تله‌اندازی مستمر بار رسوبی، مستلزم تخلیه دوره‌ای رسوبات می‌باشد تا ضمن استفاده از آن‌ها برای اهداف مختلف عمرانی، ساختمانی و صنعتی و کاربردهای زراعی، حجم مخزن سازه دوباره احیا و برای تله‌اندازی مجدد رسوبات بازیافت شود. تخلیه رسوبات انباشته شده در سدهای رسوب‌گیر از جمله شیوه‌های مؤثر برداشت مصالح رودخانه‌ای با هدف تأمین نیازهای مختلف عمرانی بوده و بخشی از ملزومات تضمین کارایی مستمر این گونه سازه‌ها در برنامه مدیریت حوضه آبخیز و اکوسیستم‌های آبی است که در این راستا ملاحظات محیط زیستی مرتبط با لایروبی را نیز باید در نظر گرفت. در حال حاضر ۳ تله‌ی رسوب‌گیر بر روی محل ورودی رودخانه‌های پسیخان، پیش‌رودبار و چافرود به تالاب انزلی احداث شده است. تله رسوب‌گیر پسیخان در قسمت

شرقی منتهی به رودخانه پیربازار به مساحت ۱۱ هکتار و عمق ۷ متر، تله رسوبگیر سیاه‌درویشان (رودخانه پیش‌رودبار) به مساحت ۸ هکتار و عمق ۷ الی ۸ متر و تله رسوبگیر شیل‌سر (رودخانه چافرود) به وسعت ۳/۵ هکتار و عمق ۲/۵ متر طراحی شده است.

عملیات بیولوژیکی و مکانیکی آبخیزداری در سطح زیرحوضه‌ها

مجموعه عملیات بیولوژیکی پیش‌بینی شده در عرصه‌های جنگلی و مرتعی به منظور کنترل فرسایش و تولید رسوب، به عنوان یکی از مهمترین راهکارهای کاهش بار رسوبی ورودی به تالاب و حفظ و احیای تالاب پیشنهاد می‌گردد. بدین منظور لازم است بر اساس بازدیدهای میدانی، نقشه برداری و نظرات کارشناسی، مناطق بحرانی شناسایی شده و با توجه به نوع پوشش گیاهی، شیب منطقه و سایر پارامترهای مهم نسبت به ارائه الگوی کاشت و نقشه‌های مربوطه اقدام نمود و عملیات بیولوژیکی متناسب با منطقه طراحی شود و یا در صورت وجود مطالعات، نسبت به اجرای طرح‌ها بر اساس اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها اقدام نمود. به طور کلی برنامه‌های کنترل فرسایش و رسوب براساس کاربری اراضی در محدوده مطالعاتی را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم نمود: مدیریت فرسایش و رسوب در مراتع، مدیریت فرسایش و رسوب در اراضی جنگلی و مدیریت فرسایش و رسوب در اراضی کشاورزی.

احداث بندهای اصلاحی در رودخانه‌ها به منظور افزایش زمان تمرکز حوضه

با توجه به شیب و عرض پایدار رودخانه‌ها در محدوده مطالعاتی و همچنین شیب موجود رودخانه، به منظور تثبیت بستر، می‌توان از روش کاهش پتانسیل انتقال رسوب استفاده به عمل آورد. در این روش کاهش پتانسیل انتقال رسوب، با استفاده از احداث سازه‌هایی در مسیر آبراهه‌ها و رودخانه، سبب افزایش ارتفاع سطح آب و کاهش شیب انرژی، ایجاد شیب پایدار و در نتیجه تثبیت شیب بستر در بازه معینی از رودخانه می‌گردد. که در نهایت موجب کنترل فرسایش و انتقال رسوب به پایین‌دست و همچنین افزایش زمان تمرکز حوضه خواهد شد و به تبع آن پیک سیلاب نیز کاهش می‌یابد. بندهای اصلاحی سازه‌های کوچکی هستند که به منظور کاهش شیب آبراهه‌ها، کاهش سرعت جریان، افزایش زمان تمرکز و مهار فرسایش در آبراهه‌ها ساخته می‌شوند. مصالحی نظیر چوب، سنگ، سنگ و ملات، بتن و تورپسنگ در ساخت بندهای اصلاحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سازه‌ها در سطح گسترده‌ای در طرح‌های حفاظت خاک و آبخیزداری توسط دستگاه‌های اجرایی در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است.

مدیریت آلاینده‌های ورودی به تالاب انزلی

پس از شناسایی موقعیت و نوع منابع آلاینده، مقدار و زمان بارگذاری آن نیز بررسی شده و با توجه به پارامترهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی دخیل در حوضه رودخانه، بار آلودگی وارده در بازه‌های مختلف رودخانه اندازه‌گیری و مطالعه شود. پس از بررسی توان خودپالایی رودخانه، منابع آلاینده موجود در یک بازه مشخص از رودخانه، مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به شرایط هر یک از منابع آلاینده، و همچنین شرایط سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی گزینه‌های مختلف برای جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به داخل رودخانه ارزیابی و ارائه خواهد شد. سپس در مرحله بعد به بررسی گزینه‌های مبنی بر رویکرد احیا پرداخته شود.

رویکرد احیا

مدلسازی هیدرولیکی جریان و رسوب در کل پهنه تالاب انزلی در قالب یک طرح جامع

در راستای مفاهیم و اصول اولیه نگرش مدیریت یکپارچه منابع آب، مدل‌سازی رفتار تلفیقی منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. درک بیشتر رفتار یک سیستم منابع آب اغلب با استفاده از مدل‌ها حاصل می‌شود. ابزار مدل‌سازی با پیچیدگی متغیر می‌تواند با درک فرآیندهای کلیدی یک سیستم توسعه یابد. یک مدل با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده از طریق پایش

واسنجی شده و می‌تواند به‌عنوان یک وسیله‌ی تصمیم‌گیری و یا شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، اثر بالقوه‌ی یک اقدام بر روی منابع آب می‌تواند قبل از این که اقدام مورد نظر انجام شود، ارزیابی گردد. به طوری که با در دسترس بودن مدل جامع هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان آب و رسوب در تالاب انزلی می‌توان هر تأثیر هر اقدام مدیریتی را پیش از اجرا در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی نمود و یا بر اساس تغییرات موردنظر نسبت به ارائه راهکار طرح و برنامه‌ریزی نمود. زمانی که هدف، بررسی یک مشکل تازه با محدودیت‌های دانش درباره پدیده تحت مطالعه باشد، ایجاد درک از رفتار سیستم، شروعی با ارزش خواهد بود. اگر مکانیزم اصلی و بنیادی از رفتار پدیده درک شده باشد، مدل‌های عددی می‌توانند انتخابی مناسب به منظور منعکس نمودن ظاهر و جنبه‌های چشمگیر از فرایند و نمایانگر رفتار سیستم در مقابل ورودی و خروجی باشند. لذا در جهت افزایش آگاهی از پیامدهای محیط زیستی و جلوگیری از تخریب بیش از حد محیط‌زیست تالاب، شناخت و پیش‌بینی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب در این پهنه آبی ارزشمند ضروری است.

عملیات لایروبی در تالاب

با توجه به انباشت رسوبات در پهنه تالاب انزلی و آبراهه‌های داخلی و کانال خروجی آن در طی سالیان گذشته، یکی از اقدامات مؤثر اما حساس و مهم، عملیات لایروبی و برداشت رسوبات است. از آنجایی که تالاب انزلی به لحاظ سیستم هیدرولیکی، اکولوژیکی و هیدرودینامیکی کاملاً پویا بوده و دارای پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشد، لذا بررسی اثرات مثبت و منفی عملیات لایروبی در هر بخش از تالاب در قالب مطالعات ارزیابی محیط زیستی ضرورت دارد. مطابق با راهکار ارائه شده در بند قبلی، تهیه یک مدل هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جامع از کل تالاب انزلی می‌تواند لزوم، گستره و اولویت‌بندی بخش‌های موردنیاز جهت لایروبی را مشخص نماید، سپس نسبت به نتایج آن‌ها می‌توان به ارزیابی‌های محیط زیستی پرداخت و آثار مثبت و منفی اقدامات در طی فرآیند لایروبی را پیش از اجرا شناسایی و بررسی نمود.

مقابله با گیاهان مهاجم

گونه‌های مهاجم یکی از مهمترین معضلات تالاب انزلی هستند که لازم است هرچه زودتر این مشکل شود. ۱۰۰ عدد از خطرناک ترین گونه‌های مهاجم جهان در تالاب انزلی را (IUCN) ارائه داده است. که نه تنها بیانگر تنوع بسیار زیاد این جانداران و قابلیت جابجایی هوشمندانه آن‌ها هست بلکه نشان دهنده این است که این جانداران می‌توانند زیستگاه جدید ایجاد کنند، گسترش یابند و بر یک ناحیه غالب شوند. امروز در دنیا گونه‌های مهاجم دلیل ثانویه انقراض یا در معرض قرارگیری جانداران در دنیا می‌باشد.

راهکارهای سازه‌ای به منظور کنترل یا تنظیم سطح آب در پهنه آبی تالاب

با توجه به حساسیت موجود در ارتباط با وضعیت و شرایط کمی و کیفی آب در تالاب انزلی، ارائه هرگونه راهکار سازه‌ای به منظور کنترل و تنظیم تراز سطح آب و افزایش زمان ماند آب در داخل پهنه تالاب بدون بررسی میزان تأثیرات مثبت و منفی آن با استفاده از مدل‌های عددی و یا ارزیابی‌های محیط زیستی و اقتصادی-اجتماعی توجیه نخواهد داشت. چرا که هرچند عملیات عمرانی در داخل تالاب با فرایندهای زیستی سازگار نبوده، احداث هرگونه سازه در داخل تالاب قبل از کنترل رسوب ورودی به تالاب، تأثیر عکس خواهد داشت. همچنین علاوه بر تحت تأثیر قرار دادن تردد قایق‌ها، مسائل و مشکلات اقتصادی-اجتماعی را برای جوامع بومی در پی خواهد داشت. از طرف دیگر، نمی‌توان به طور قطع اذعان کرد که یک سازه تا چه اندازه و به چه وسعتی می‌تواند شرایط هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان و رسوب را در تالاب بهبود بخشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با تغییر تراز سطح آب و تراز کف تالاب، شرایط هیدرولیکی تالاب تغییر خواهد کرد لذا با

اجرای راهکارهای پیشنهادی در دو رویکرد پیشگیری و احیا، می‌توان به بهبود وضعیت تالاب انزلی از نظر عمق و تراز سطح آب دست یافت. رویکرد پیشگیری شامل کنترل فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های تالاب، احیای سدهای رسوب‌گیر، عملیات بیولوژیکی و مکانیکی آبخیزداری، احداث بندهای اصلاحی در رودخانه‌ها و مدیریت آلاینده‌های ورودی به تالاب است. این اقدامات به کنترل فرسایش در سطح حوضه، کاهش بار رسوبی ورودی به تالاب و کاهش رسوبگذاری و بهبود کیفیت آب کمک می‌کنند. از سوی دیگر، رویکرد احیا شامل مدلسازی هیدرولیکی جریان و رسوب، عملیات لایروبی، مقابله با گیاهان مهاجم و ارائه راهکارهای سازه‌ای برای تنظیم سطح آب است. این اقدامات به افزایش عمق تالاب، بهبود جریان آب و احیای اکوسیستم تالاب کمک می‌کنند. اجرای این راهکارها نه تنها باعث افزایش ظرفیت ذخیره آب و کاهش خطر سیلاب می‌شود، بلکه به حفظ تنوع زیستی و بهبود شرایط محیط زیستی تالاب نیز منجر خواهد شد. اما نکته مهم این است که اقدامات سازه‌ای باید در اولویت آخر قرار گیرد چرا که بدون کنترل رسوب ورودی به تالاب، احداث سازه عملاً رسوب‌گذاری در تالاب را افزایش داده و شرایط تالاب را بحرانی‌تر می‌کند.

به طور کلی با توجه به پیچیدگی‌های اکولوژیکی و هیدرولیکی تالاب انزلی، اجرای این راهکارها نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، مشارکت ذینفعان و نظارت مستمر است. مدلسازی جامع هیدرولیکی و هیدرودینامیکی تالاب به عنوان ابزاری کلیدی، امکان ارزیابی اثرات اقدامات مدیریتی قبل از اجرا را فراهم می‌کند و از بروز پیامدهای منفی محیط زیستی جلوگیری می‌نماید. علاوه بر این، لایروبی و مقابله با گیاهان مهاجم به عنوان اقدامات ضروری، نیازمند ارزیابی‌های دقیق محیط زیستی و اقتصادی-اجتماعی هستند تا اطمینان حاصل شود که این اقدامات به نفع اکوسیستم تالاب و جوامع محلی است. در نهایت، این پروژه نشان می‌دهد که با مدیریت یکپارچه و اجرای راهکارهای پیشنهادی، می‌توان به احیای تالاب انزلی به عنوان یک اکوسیستم ارزشمند و حیاتی برای منطقه و کشور دست یافت و پایداری بلندمدت آن را تضمین کرد.

فهرست منابع

- جاودان خرد، ا. اسماعیل ساری، ع. و بهرامی فر، ن. (۱۳۹۰). بررسی بقایای آفتکش‌های آلی پایدار در رسوبات تالاب بین‌المللی انزلی، ایران. *نشریه محیط شناسی*، ۳۵(۵۷): ۲۳-۳۵.
- زبردست، ل. و جعفری، ه. (۱۳۹۰). ارزیابی روند تغییرات تالاب انزلی با استفاده از سنجش‌ازدور و ارائه راه‌حل مدیریتی. *نشریه محیط‌شناسی*، ۳۷(۵۷): ۴۴-۵۷.
- شکوهی، ع.، مدبری، ه. و منجزی، ح. (۱۴۰۱). ارزیابی تأثیر رهاسازی جریان بر اساس دستورالعمل‌های زیست محیطی رودخانه‌ها بر بیلان آبی تالاب انزلی. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۱۲(۲): ۳۱-۴۹.
- عاشوری، ع. و عبدوس، ا. (۱۳۹۱). زیستگاه‌های تالابی مهم پرندگان آبی‌زی گیلان. *رشت: کتیبه گیل*.
- مدبری، ه. و شکوهی، ع. (۱۳۹۸). تعیین نیازآبی زیست محیطی تالاب انزلی با استفاده از روش‌های اکوهیدرولوژیکی. *مجله تحقیقات منابع آب/ایران*، ۱۵(۳): ۹۱-۱۰۴.
- مدبری، ه. و شکوهی، ع. (۱۳۹۹). ارزیابی اثرات بهره‌برداری از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بر حیات تالاب انزلی. *مجله آبیاری زهکشی*، ۱۴(۶): ۱۹۳۹-۱۹۵۳.
- میرزاجانی، ع. خداپرست، ح. بابایی، ه. عابدینی، ع. و دادی قندی، ع. (۱۳۸۸). روند فراغنی شدن تالاب انزلی با استفاده از اطلاعات ده‌ساله ۱۳۸۱-۱۳۷۱. *نشریه محیط‌شناسی*، ۳۵(۵۲): ۶۵-۷۳.

Agarwal, A., M. S. delos Angeles, R. Bhatia, I. Chéret, S. Davila-Poblete, M. Falkenmark, F. G. Villarreal, T. Jønch-Clausen, M. A. Kadi, and J. Kindler. (2004). *Integrated Water Resources Management*, Global Water Partnership, Denmark.

Arthington, A.H., S.O. Brizga and M.J. Kennard. (1998). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: best practice framework. Report OP 25/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation, Canberra.

- Guo, H. C., Liu, L., Huang, G. H., Fuller, G. A., Zou, R., & Yin, Y. Y. (2001). A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin. *Journal of Environmental Management*, 61(1), 93–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jema.2000.0400>
- JICA, DOE, MOJA. (2005). The study on integrated management for ecosystem conservation of the Anzali Wetland in the Islamic Republic of Iran, (Vol. II: Maim report), Nippon Koei Co. 150p.
- Mostert, E., E. Van Beek, N. W. M. Bouman, E. Hey, H. H. G. Savenije & W. A. H. Thissen, (2000). River Basin Management and Planning. In Mostert, E. (ed), River Basin management; Proceedings of the International Workshop' (The Hage, 27-29 October 1999). UNESCO, 24-55.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity. *Water International*, 29(3), 307–317. <https://doi.org/10.1080/02508060408691785>
- Wałęga, A., Kędzior, R., Skalski, T., & Młyński, D. (2025). A Global hydrological index describes ecological conditions in rivers: A new approach to environmental flow calculation reflecting macroinvertebrate requirements. *Ecological Indicators*, 170, 113082. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113082>
- Wan, F., Zhang, F., Zheng, X., & Xiao, L. (2022). Study on ecological water demand and ecological water supplement in wuliangsu lake. *Water*, 14(8), 1262.
- Yang, T., Wang, S., Li, X., Wu, T., Li, L., & Chen, J. (2018). River habitat assessment for ecological restoration of Wei River Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 17077–17090. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1774-z>
- Yang, Y., Yin, X., & Yang, Z. (2016). Environmental flow management strategies based on the integration of water quantity and quality, a case study of the Baiyangdian Wetland, China. *Ecological Engineering*, 96, 150–161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.018>