

“Research article”

Assessing the impacts of thermal stratification on water quality and strategies for and reducing cold water emissions

Nasim Mosakhani¹, Ahmad Asl Hashemi², Gholam Hossein Safari^{2, 3*}

¹Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

³Health & Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

*Corresponding author: hsafari13@yahoo.com

(Received: 13 January 2025, Accepted: 6 September 2025)

Abstract

Thermal stratification is one of the critical challenges in reservoir management, arising from temperature gradients in the water column that lead to the formation of distinct layers with varying physical and chemical properties. this phenomenon significantly reduces dissolved oxygen levels in deeper water layers and contributes to several environmental issues, including the release of cold water downstream, increased concentrations of heavy metals such as iron and manganese, and the proliferation of cyanobacterial blooms. this article presents a systematic review aimed at collecting, analyzing, and comprehensively evaluating current technologies and methods for mitigating cold-water release from reservoirs caused by thermal stratification. a thorough literature search was conducted using reputable databases such as Web of Science, Scopus, Google Scholar, and specialized databases in water and environmental engineering. Relevant keywords—such as “reservoir destratification,” “cold-water release from dams,” “bubble columns,” “surface mixers,” “multi-level selective withdrawal,” and “GELI technology”—were used in both Persian and English. The study begins by reviewing natural processes of thermal stratification and destratification in reservoirs. It then assesses the impacts of stratification on water quality, including dissolved oxygen depletion, cold-water discharge, elevated heavy metal concentrations, and toxic algal growth. Subsequently, three common technical approaches for mitigating stratification and cold-water release are introduced and compared: selective withdrawal using multi-level intake structures, the use of bubble plume systems, and surface mixing devices. the findings suggest that the selection of an appropriate method depends on reservoir characteristics, management objectives, and implementation costs. among the options, bubble plume systems are often considered an effective and practical solution due to their ability to enhance oxygenation, reduce metal concentrations, and suppress algal blooms.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Thermal stratification, reservoir water quality, cold-water release, cyanobacterial blooms, selective withdrawal, bubble plume systems, surface mixers



سال شانزدهم، شماره ۲
تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۳۷-۱۷

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

"مقاله پژوهشی"

ارزیابی اثرات پدیده لایه‌بندی حرارتی بر کیفیت آب و راهکارهای کاهش انتشار آب

سرد

ارزیابی اثرات پدیده لایه‌بندی حرارتی

نسیم موسی‌خانی^۱، احمد اصل‌هاشمی^۲، غلام حسین صفری^{۳،*}

^۱ کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۲ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۳ مرکز تحقیقات سلامت و محیط‌زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: hsafari13@yahoo.com

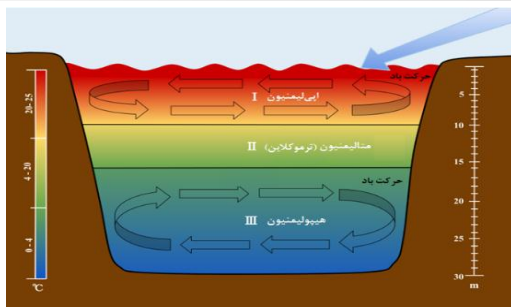
(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵)

چکیده

پدیده لایه‌بندی حرارتی یکی از چالش‌های مهم در مدیریت مخازن سدها است که به واسطه‌ی تغییرات دمایی در ستون آب، منجر به تشکیل لایه‌های جداگانه با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌شود. این فرآیند نه تنها باعث کاهش شدید اکسیژن محلول در لایه‌های عمیق‌تر آب می‌گردد، بلکه منجر به بروز مشکلاتی همچون انتشار آب سرد از مخازن سدها در پایین‌دست، افزایش غلظت فلزات سنگین نظیر آهن و منگنز و شکوفایی سیانوباکتری‌ها می‌شود. این مقاله به صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند طراحی شده است که با هدف جمع‌آوری، تحلیل و ارزیابی جامع فناوری‌ها و روش‌های موجود برای کاهش انتشار آب سرد از سد ناشی از لایه‌بندی در مخازن آب انجام شده است. جستجوی منابع علمی از طریق پایگاه‌های داده معتبر شامل Scopus، Web of Science و Google Scholar و پایگاه‌های تخصصی مهندسی آب و محیط زیست انجام شد. کلمات کلیدی مرتبط با موضوع، از جمله «لایه‌زدایی مخازن»، «انتشار آب سرد از سدها»، «ستون‌های حبابی»، «اختلاط دهنده‌های سطحی»، «برداشت انتخابی چند سطحی» و «فناوری GELI به زبان‌های فارسی و انگلیسی به کار گرفته شدند. در این مقاله، ابتدا فرآیندهای طبیعی لایه‌بندی و لایه‌زدایی در مخازن بررسی شده است. سپس تأثیرات لایه‌بندی بر کیفیت آب از جنبه‌های مختلف، از جمله کاهش اکسیژن محلول، انتشار آب سرد از سدها، افزایش فلزات سنگین، و رشد جلبک‌های سمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، سه راهکار فنی متداول برای کاهش اثرات لایه‌بندی و انتشار آب سرد از مخازن سد شامل: برداشت انتخابی با استفاده از سازه‌های برداشت چندسطحی، استفاده از ستون‌های حباب‌دار، و بهره‌گیری از اختلاط‌دهنده‌های سطحی معرفی و مقایسه شده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب راهکار مناسب باید با توجه به ویژگی‌های مخزن، اهداف مدیریتی، و هزینه‌های اجرایی صورت گیرد. لایه‌زدایی با ستون‌های حباب‌دار، به دلیل توانایی در بهبود اکسیژن، کاهش فلزات و مهار رشد جلبک‌ها، در اغلب موارد گزینه‌ای مؤثر و کاربردی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: لایه‌بندی حرارتی، کیفیت آب مخازن، انتشار آب سرد، شکوفایی سیانوباکتری‌ها، برداشت انتخابی، ستون‌های حباب‌دار، اختلاط دهنده‌های سطحی

مقدمه



شکل (۱): بخش‌های مختلف یک دریاچه لایه‌بندی شده

از آنجا که دمای آب در طول ستون مخزن متفاوت است، در برخی ماه‌های سال در مخازن و دریاچه‌ها، لایه‌بندی حرارتی رخ می‌دهد. این پدیده حرارتی تحت تأثیر عوامل متعددی است و موجب کاهش میزان اکسیژن محلول در دریاچه می‌شود که به تبع آن مشکلاتی چون کاهش کیفیت آب، کاهش جمعیت ماهیان و رشد جلبک‌ها به وجود می‌آید (۴). در هنگام لایه‌بندی حرارتی، اپی‌لیمنیون حاوی اکسیژن فراوان است، متالیمنیون دمای آب را به طور چشمگیری در عمق تغییر می‌دهد و هیپولیمنیون اکسیژن کمی دارد. در لایه‌های بالا و پایین تغییرات دمایی در عمق ناچیز است. به دلیل کمبود اکسیژن در لایه زیرین، جمعیت ماهیان در آن کاهش می‌یابد. با توجه به تغییرات چگالی آب وابسته به دما، در زمان وقوع لایه‌بندی حرارتی، لایه‌بندی چگالی نیز شکل می‌گیرد. در تابستان‌های گرم و زمستان‌های بسیار سرد، لایه‌های سطحی به ترتیب گرم‌تر یا سردتر از ۴ درجه سلسیوس می‌شوند که منجر به قرارگیری لایه‌های سبک‌تر در بالا و تشکیل لایه‌بندی قوی می‌گردد که حتی با تلاطم باد نیز از بین نمی‌رود. این تغییرات دمایی باعث تغییر چگالی آب در عمق شده و در نهایت منجر به ایجاد لایه‌بندی کیفیت آب می‌شود. برای مثال، در تابستان‌ها،

در دهه‌های اخیر و با آغاز قرن جدید، موضوع آب به یکی از دغدغه‌های اساسی مردم جهان، به‌ویژه ساکنان مناطق خشک مانند کشور ما، تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که دسترسی به آب با کمیت و کیفیت مناسب به چالشی مهم بدل شده است (۱). یکی از اهداف اصلی ساخت سدها، ذخیره آب در ماه‌های پرآبی و استفاده بهینه از آن در فصول کم‌آب است. ساخت و بهره‌برداری از مخازن سدها معمولاً منجر به افزایش زمان ماند آب و ایجاد پدیده لایه‌بندی در مخزن می‌شود. لایه‌بندی آب به معنای تشکیل لایه‌هایی از جرم‌های سیال است که به دلیل اختلاف در چگالی، دما و مواد محلول یا معلق شکل می‌گیرد (۲). لایه‌بندی دریاچه‌ها به تمایل تشکیل لایه‌های حرارتی جداگانه در فصل‌های گرم گفته می‌شود. به طور معمول، دریاچه‌های لایه‌بندی‌شده سه لایه مجزا دارند: اپی‌لیمنیون^۱ (لایه گرم بالایی)، ترموکلاین^۲ یا متالیمنیون^۳ (لایه میانی با عمق متغیر در طول روز) و هیپولیمنیون (لایه سرد زیرین که تا کف دریاچه ادامه دارد) (۳). در شکل (۱) بخش‌های جداگانه یک دریاچه لایه‌بندی نشان داده شده است. از مقیاس‌ها برای مرتبط کردن هر بخش از لایه‌بندی به عمق و دمای وابسته به آن استفاده می‌شود. از فلش برای نشان دادن حرکت باد بر روی سطح آب استفاده می‌شود که آغاز گردش در اپی‌لیمنیون و هیپولیمنیون است.

¹ Epilimnion

² Metalimnion

³ Hypolimnion

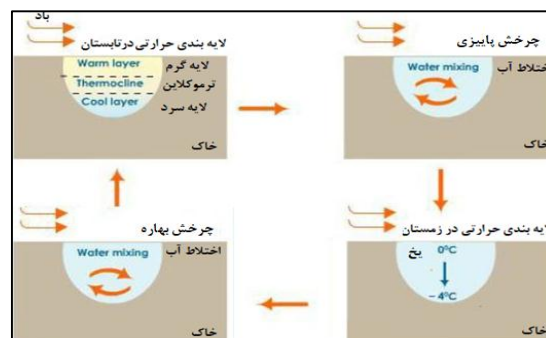
بیش‌تر اکسیژن می‌شود. کاهش غلظت اکسیژن و دمای پایین آب تخلیه‌شده از لایه زیرین ممکن است تأثیرات زیان‌باری بر مصرف‌کنندگان آب در پایین‌دست داشته باشد. شرایط بی‌هوازی، محیط بیوشیمیایی لایه زیرین را به شدت تغییر می‌دهد (۲). تولید سولفید هیدروژن (H_2S)، احیای آهن و منگنز، تولید متان و آزادسازی فسفر از رسوبات از جمله پدیده‌های شایع در این شرایط هستند. تجمع این محصولات واکنش‌های بی‌هوازی می‌تواند اثرات نامطلوبی ایجاد کند؛ سولفید هیدروژن برای آبزیان سمی و منبع بوی نامطبوع است. تخلیه آب بی‌هوازی حاوی سولفید هیدروژن و آمونیاک از لایه زیرین، که در طول چرخش سالانه در کل دریاچه منتشر می‌شود، می‌تواند منجر به مرگ ماهیان شود. همچنین، حضور آهن و منگنز احیاشده موجب ایجاد طعم و بوی نامطلوب در آب شرب می‌شود. در طول چرخش‌های پاییزی و بهاری، مواد مغذی تجمع یافته در لایه زیرین، در کل حجم دریاچه پخش شده و در معرض تابش نور قرار می‌گیرند که باعث شکوفایی جلبک‌ها می‌شود (۲۷).

مواد و روش‌ها

نوع مطالعه

این مقاله به صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند^۱ طراحی شده است که با هدف جمع‌آوری، تحلیل و ارزیابی جامع فناوری‌ها و روش‌های موجود برای کاهش انتشار آب سرد از سدها ناشی از لایه‌بندی در مخازن آب انجام شده است. این نوع مطالعه با گردآوری و بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین، به شناسایی نقاط قوت، ضعف و خلأهای علمی در این

لایه‌بندی حرارتی می‌تواند موجب کاهش شدید اکسیژن محلول در لایه‌های زیرین مخزن شده و به مرگ آبزیان و افت شدید کیفیت آب منجر شود (۵). لایه‌بندی حرارتی در تابستان و زمستان و چرخش بهاره و پاییزی مخازن آب در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): لایه‌بندی حرارتی در تابستان و زمستان و چرخش بهاره و پاییزی مخازن آب

لایه‌بندی حرارتی مانع انتقال اکسیژن از منابع خارجی به داخل مخزن می‌شود و کمبود اکسیژن و ایجاد شرایط بی‌هوازی، فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی مخزن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط، رهاسازی جریان از زیر لایه در زمان لایه‌بندی موجب آزاد شدن جریان آب سردتر نسبت به جریان پایه می‌شود. این جریان آب سرد از مخازن بالادست، به ویژه در فصل گرم تابستان، می‌تواند باعث تقویت یا حتی القای لایه‌بندی در مخازن پایین‌دست گردد (۶). به دلیل سرعت پایین انتقال جرم در لایه میانی، اکسیژن مصرف‌شده در لایه زیرین توسط فرآیندهای بیوشیمیایی جایگزین نمی‌شود. همچنین نفوذ نور به لایه زیرین بسیار محدود است، بنابراین جلبک‌های ته‌نشین شده نمی‌توانند فتوسنتز کنند و در نهایت می‌میرند؛ تجزیه این جلبک‌ها باعث کاهش

¹ Systematic Review

حوزه می‌پردازد و چارچوبی کلی برای درک بهتر و کاربرد عملی فناوری‌ها ارائه می‌دهد.

روش جستجو و گردآوری داده‌ها

جستجوی منابع علمی از طریق پایگاه‌های داده معتبر شامل Google Scholar, Scopus, Web of Science و پایگاه‌های تخصصی مهندسی آب و محیط زیست انجام شد. کلمات کلیدی مرتبط با موضوع، از جمله «لایه زدایی مخازن»، «انتشار آب سرد از سدها»، «ستون‌های حبابی»، «اختلاط دهنده‌های سطحی»، «برداشت انتخابی چند سطحی» و «فناوری GELI» به زبان‌های فارسی و انگلیسی به کار گرفته شدند. مطالعات انتخاب شده در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفتند تا تحولات جدید و پیشرفت‌های فناورانه به طور کامل پوشش داده شوند. علاوه بر مقالات علمی، گزارش‌های فنی، مستندات پروژه‌های اجرایی و منابع مروری نیز در صورت برخورداری از اعتبار و مرتبط بودن، در نظر گرفته شدند.

مقدمه‌ای بر مخازن

مخازن، سازه‌های آبی مصنوعی و بزرگی هستند که با احداث سدها و انسداد جریان طبیعی رودخانه‌ها ایجاد می‌شوند. این مخازن از نظر ویژگی‌های لیمونولوژیکی شباهت زیادی به دریاچه‌های طبیعی دارند (۸). در حالی که دریاچه‌ها معمولاً بر اساس منشأ زمین‌شناسی، وضعیت تغذیه‌ای، رژیم حرارتی یا عملکرد هیدرولوژیکی طبقه‌بندی می‌شوند (۹)، مخازن عمدتاً بر اساس اهداف بهره‌برداری آن‌ها دسته‌بندی می‌گردند (۱۰). رایج‌ترین نوع مخازن، مخازن ذخیره‌سازی هستند که برای نگهداری حجم قابل توجهی آب در طولانی‌مدت طراحی می‌شوند.

اپراتورهای سد، زمان‌بندی و حجم رهاسازی آب را برای اهداف مختلفی مانند آبیاری، تولید برق‌آبی، تأمین آب و کنترل سیلاب مدیریت می‌کنند (۱۱ و ۱۰). علاوه بر این، مخازن اغلب به‌عنوان مکان‌های تفریحی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند که این موضوع می‌تواند بر سیاست‌ها و پروتکل‌های مدیریت آن‌ها تأثیرگذار باشد (۱۲). وضعیت تغذیه‌ای و رژیم‌های حرارتی مخازن تحت تأثیر شرایط اقلیمی، مانند تابش خورشیدی و باد، و نیز ویژگی‌های فیزیکی مخزن مانند ظرفیت ذخیره‌سازی، مساحت سطح و عمق قرار دارد. درک فرآیندهای طبیعی لایه‌بندی حرارتی و لایه زدایی مخازن، برای کنترل و کاهش انتشار آب سرد از سدها در جریان‌های پایین‌دست از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۳ و ۱۲).

لایه‌بندی حرارتی طبیعی مخازن

لایه‌بندی حرارتی در آب‌های بزرگ، پدیده‌ای شناخته‌شده است که بیش از پنجاه سال مورد مطالعه قرار گرفته است. این فرآیند طبیعی، ناشی از تغییرات دما و شیب چگالی عمودی در ستون آب است که تحت تأثیر عوامل محیطی خارجی و جریان‌های ورودی به مخزن شکل می‌گیرد (۱۵ و ۱۴). عواملی مانند تابش مستقیم خورشید (۱۶) و افزایش دمای هوا در فصل تابستان (۱۲) موجب گرم شدن لایه‌های سطحی و در نتیجه ایجاد آب با چگالی کمتر در بالای مخزن می‌شوند. لایه‌بندی به‌ویژه در مخازن عمیق اهمیت دارد، چرا که اختلاط طبیعی معمولاً نمی‌تواند بر کل عمق مخزن غلبه کند (۱۷). این پدیده باعث ایجاد مناطق مجزایی در ستون آب می‌شود که از نظر چگالی و دما با یکدیگر متفاوت هستند. این لایه‌ها به ترتیب از بالا به پایین عبارت‌اند از: اپی‌لیمنئون (لایه

علاوه بر فرایندهای طبیعی، لایه زدایی مصنوعی نیز با استفاده از فناوری‌هایی مانند ستون‌های حباب‌دار به منظور مقابله با اثرات لایه‌بندی انجام می‌شود که در مخازن مختلف در سطح جهان با موفقیت به کار گرفته شده‌اند (۲۱).

اثرات لایه‌بندی در مخازن

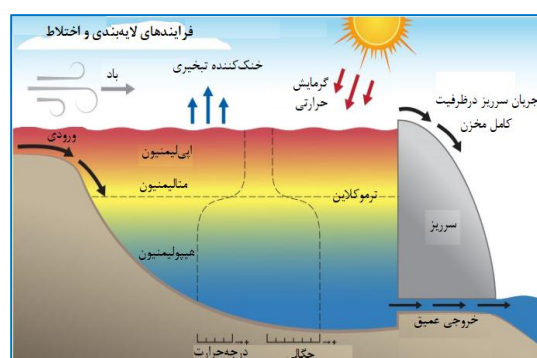
- انتشار آب سرد از سدها

یکی از پیامدهای مهم لایه‌بندی حرارتی در مخازن، بروز پدیده‌ای به نام انتشار آب سرد از سدها است. در اغلب سدها، آب از طریق آب‌گیرهایی که در نزدیکی بستر یا کف مخزن قرار دارند، برداشت می‌شود. در مخازن لایه‌بندی‌شده، این آب عمیق‌تر به‌طور قابل‌توجهی سردتر از آب‌های سطحی و جریان‌های طبیعی پایین‌دست است، به‌ویژه هنگامی که از زیر ترموکلاइन برداشت شود (شکل ۳). رهاسازی این آب سرد می‌تواند دمای رودخانه‌های پایین‌دست را تا صدها کیلومتر تحت تأثیر قرار دهد و به‌عنوان یک مشکل جدی زیست‌محیطی مطرح است. مطالعات انجام‌شده در مخازن استرالیا نشان می‌دهد که در فصل تابستان، اختلاف دمایی بین سطح و بستر می‌تواند بین ۸ تا ۱۲ درجه سلسیوس و در برخی مخازن عمیق‌تر حتی بیش از ۱۲ درجه باشد (۲۱). چنین اختلاف دمایی موجب بروز اثرات محیطی متعددی در پایین‌دست می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از (۲۱ و ۲۲):

- کاهش محسوس دمای رودخانه‌های پایین‌دست در تابستان

کاهش دامنه نوسانات حرارتی روزانه و فصلی اختلال در افزایش طبیعی دمای آب در بهار تأخیر در رسیدن به اوج دمای تابستان تا چند هفته یا ماه افت

سطحی)، متالیمنیون (لایه میانی) و هیپولیمنیون (لایه زیرین). متالیمنیون دارای گرادیان دمایی شدید یا ترموکلاइन است که آب گرم و سبک اپی‌لیمنیون را از آب سرد و سنگین هیپولیمنیون جدا می‌کند (۱۶). این لایه میانی به عنوان مانعی عمل کرده و اختلاط طبیعی در مخزن را محدود می‌سازد (۱۸). فرایندهای لایه‌بندی و اختلاط طبیعی مخازن در شکل (۳) به‌صورت شماتیک نمایش داده شده‌اند.



شکل (۳): فرایندهای لایه‌بندی حرارتی طبیعی و اختلاط در مخازن

لایه‌زدایی طبیعی مخازن

مخازن به صورت دوره‌ای تجربه لایه زدایی طبیعی یا اختلاط کامل از طریق فرایندهای فیزیکی مختلفی را دارند. عوامل بیرونی مانند تلاطم باد و جریان‌های ورودی از حوضه آبریز یا رودخانه‌های بالادست، باعث اختلاط مکانیکی و جابجایی آب در مخزن می‌شوند (۱۹). همچنین خنک‌شدن لایه‌های سطحی در شب‌های سرد یا در فصول سرد سال، می‌تواند منجر به اختلاط همرفتی شود (۲۰). واکنش مخزن به این فرایندهای طبیعی وابسته به ویژگی‌های فیزیکی آن (مانند عمق و مساحت) و شرایط آب و هوایی است. معمولاً مخازن عمیق‌تر نسبت به مخازن کم‌عمق، زمان بیش‌تری برای لایه زدایی طبیعی نیاز دارند که این امر به شدت لایه‌بندی حرارتی و حجم مخزن مرتبط است.

انتشار آب سرد از سدها نه تنها یک تهدید برای کیفیت اکولوژیک رودخانه‌هاست، بلکه تأثیرات آن بر تنوع زیستی، پایداری جمعیت‌های ماهی، و کارکردهای اکوسیستم پایین‌دست نیز قابل توجه است.

- کاهش اکسیژن محلول

اکسیژن محلول (DO) یکی از عناصر حیاتی در محیط‌های آبی به‌شمار می‌رود، زیرا در فرآیندهای متابولیک تمامی موجودات هوایی نقش اساسی دارد. کاهش سطح اکسیژن محلول نه تنها بر زیست‌پذیری آب تأثیر منفی دارد، بلکه بر انحلال بسیاری از ترکیبات معدنی اثر می‌گذارد که این ترکیبات می‌توانند کیفیت آب را درون مخزن و در پایین‌دست آن تهدید کنند. در مخازنی که به‌خوبی اختلاط دارند، کاهش تدریجی اکسیژن محلول در عمق معمولاً ناشی از مصرف اکسیژن در فصل مشترک رسوب-آب و در سراسر ستون آب است. با این حال، در مخازنی با اختلاط ضعیف، به‌ویژه در شرایط لایه‌بندی حرارتی، افت اکسیژن به‌شدت تشدید می‌شود. در این وضعیت، شیب چگالی در ترموکلاین مانع از نفوذ آب‌های غنی از اکسیژن سطحی به لایه‌های زیرین شده و از هوادهی مجدد ناحیه هیپولیمنیون جلوگیری می‌کند (۲۱ و ۱۳). اثر لایه‌بندی بر کیفیت آب در یک مخزن در شکل (۴) نشان داده شده است.

در فصل تماس رسوب و آب، واکنش‌های بیوژئوشیمیایی اکسیژن باقی‌مانده را مصرف کرده و شرایط بی‌هوازی (آنوکسیک) ایجاد می‌کنند. این وضعیت منجر به کاهش ناحیه قابل‌زیست برای ماهیان و سایر موجودات می‌شود و احتمال مرگ‌ومیر آن‌ها را

ناگهانی و شدید دما در اثر رهاسازی‌های بزرگ برای تأمین آب یا آبیاری یکی از بارزترین آثار این تغییرات دمایی غیرطبیعی، تأثیر بر زیست‌بوم ماهیان است. فیزیولوژی و رفتار بسیاری از گونه‌های ماهی نسبت به دمای محیط بسیار حساس است، بنابراین انتشار آب سرد از سدها می‌تواند موجب تغییر الگوی پراکنش گونه‌ها شود (۲۲). ساخت سدها می‌تواند به طور قابل توجهی محیط رودخانه پایین‌دست را، در درجه اول از طریق لایه‌بندی حرارتی و متعاقباً انتشار آب سرد تغییر می‌دهد. این تغییرات در دمای آب می‌تواند منجر به تغییر در جانوران رودخانه شود، به‌طوری‌که گونه‌های ماهیان سردآبی جایگزین گونه‌های ماهیان گرم‌آبی می‌شوند (۲۳). چرخه تولیدمثل ماهیان نیز به‌شدت به دمای آب وابسته است. مطالعات بویز^۱ و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد که در حوضه موری-دارلینگ^۲، گونه‌های بومی ماهی دارای دوره‌های مشخص تولیدمثل هستند که با نوسانات طبیعی جریان و دمای آب هماهنگ است. انتشار آب سرد از مخازن سد می‌تواند این چرخه‌ها را مختل کرده و رشد و تولیدمثل را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهد (۲۴). کاهش موفقیت در جذب تخم‌ها و لاروها، و مرگ‌ومیر ناشی از شرایط نامناسب دمایی در پایین‌دست سد، از جمله پیامدهای قابل‌مشاهده انتشار آب سرد از سدها هستند. در پژوهشی دیگر، میچی^۳ و همکاران (۲۰۲۰) اثرات "شوک سرما" را بر گونه‌های ماهی بومی استرالیا بررسی کردند و نشان دادند که افت ناگهانی دما می‌تواند موجب مرگ‌ومیر فوری و تأثیرات بلندمدت بر تمام گونه‌ها شود (۲۵). بنابراین، پدیده

¹ Boys

² Murray Darling Basin

³ Michie

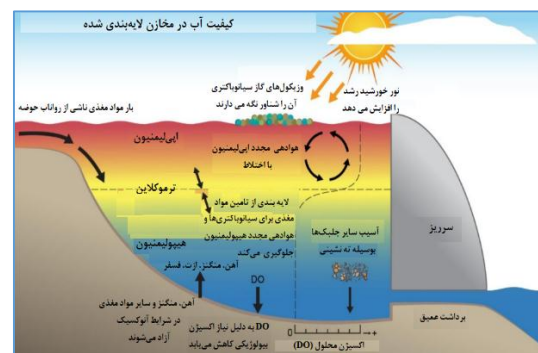
بر این، آهن و منگنز می‌توانند بر اکوسیستم رودخانه‌ها اثر منفی بگذارند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این فلزات باعث استرس اکسیداتیو، آسیب به آبشش ماهیان، و اختلالات هماتولوژیک می‌شوند. همچنین در حوزه کشاورزی، افزایش غلظت آهن در آب آبیاری ممکن است منجر به انسداد و آسیب تجهیزات شده و بر رشد محصولات اثر منفی بگذارد (۳۱ و ۳۰ و ۲۱).

- سیانوباکتری‌ها (جلبک‌های سبز-آبی)

مخازن به‌طور ذاتی محیطی مناسب برای رشد جلبک‌ها هستند. زمان‌ماند طولانی و کاهش فرایندهای اختلاط به دلیل لایه‌بندی حرارتی، شرایطی ایده‌آل برای رشد بیش‌ازحد جلبک‌ها ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، افزایش فتوسنتز در لایه‌های سطحی و تجمع مواد مغذی در لایه‌های میانی و پایینی موجب شکوفایی جلبکی می‌شود (۳۳ و ۳۲). سیانوباکتری‌ها یا جلبک‌های سبز-آبی از جمله گونه‌های غالب در چنین محیط‌هایی هستند که نگرانی‌های زیادی از نظر سلامت آب به‌همراه دارند. این موجودات از توانایی تنظیم شناوری برخوردارند؛ به‌واسطه وجود وزیکول‌های گازی، می‌توانند در شرایط چگالی متغیر مخزن در نزدیکی سطح باقی بمانند و با افزایش دریافت نور و کاهش ته‌نشینی، نسبت به فیتوپلانکتون‌های دیگر برتری پیدا کنند (۳۴ و ۲۱).

شکوفایی سیانوباکتری‌ها و تولید سیانوتوکسین‌ها از مشکلات جهانی در مدیریت منابع آبی به‌شمار می‌رود. این سموم می‌توانند منجر به طعم و بوی ناخوشایند در آب آشامیدنی شوند و از طریق آسیب به کبد (هپاتوتوکسین‌ها)، سیستم عصبی (نوروتوکسین‌ها) و پوست (درماتوکسین‌ها) سلامت انسان را تهدید کنند (۳۵ و ۴۳). انتشار آب سدهای حاوی سیانوباکتری‌ها،

افزایش می‌دهد. همچنین افزایش رشد جلبک‌های سمی و صعود آب‌های فاقد اکسیژن می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم باشد (۲۱). در شرایط آنوکسیک، رسوبات به‌منظور جبران نیاز اکسیژن بیولوژیکی، ترکیبات فلزی نظیر آهن و منگنز را احیا کرده و آن‌ها را به‌صورت محلول آزاد می‌کنند. این فرآیند همراه با رهاسازی سایر مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن، شرایط را برای شکوفایی جلبک‌ها، به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، فراهم می‌کند (۲۷ و ۲۶).



شکل (۴): اثر لایه‌بندی بر کیفیت آب در یک مخزن

- آهن و منگنز

افزایش غلظت آهن (Fe) و منگنز (Mn) از دیگر پیامدهای لایه‌بندی حرارتی و شرایط بی‌هوای در مخازن است که می‌تواند کیفیت آب را در درون مخزن و در پایین‌دست آن تحت تأثیر قرار دهد. حضور این فلزات در آب آشامیدنی موجب افزایش کدورت، تغییر رنگ و بوی نامطلوب می‌شود. اگرچه تأثیر مستقیم آن‌ها بر سلامت انسان در غلظت‌های معمولی نسبتاً محدود است، اما قرارگیری در معرض منگنز به‌ویژه در دُزهای بالا ممکن است با مشکلاتی نظیر اختلالات یادگیری و عصبی مرتبط باشد.

اگرچه این فلزات در تصفیه‌خانه‌های پایین‌دست قابل حذف هستند، اما غلظت بالای آن‌ها هزینه تصفیه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (۲۹ و ۲۸). افزون

برای کاهش اثرات آن‌ها بر کیفیت آب بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد.

راهکارهای مدیریت و کاهش اثرات لایه‌بندی

مدیریت اثرات منفی لایه‌بندی حرارتی در مخازن به‌عنوان یکی از چالش‌های کلیدی در بهره‌برداری پایدار از منابع آبی مطرح است. تمرکز اصلی راهبردهای مدیریتی، کاهش پیامدهای ناشی از انتشار آب سرد از سدها در آبراهه‌های پایین‌دست و بهبود کیفیت آب رهانده از مخازن است. سه فناوری اصلی که به‌طور گسترده برای مقابله با آثار لایه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از (۲۱):

- برداشت انتخابی^۱ از طریق دریچه‌های چندسطحی
- لایه‌زدایی مصنوعی با استفاده از سیستم‌های ستون
حبابی^۲

- لایه‌زدایی مصنوعی با بهره‌گیری از همزن‌های
سطحی^۳

هر سه روش می‌توانند در کاهش انتشار آب سرد از سدها و بهبود سایر پارامترهای کیفی آب مؤثر باشند، اما در عین حال دارای هزینه‌ها، محدودیت‌ها و معایب خاص خود هستند. برداشت‌های چندسطحی عمدتاً بر کنترل کیفیت جریان‌های خروجی پایین‌دست تمرکز دارند و معمولاً تأثیر محدودی بر کیفیت درون‌مخزنی دارند، در حالی که فناوری‌های لایه‌زدایی مصنوعی، با تمرکز بر داخل مخزن، به بهبود ساختار گرادیان دما و اکسیژن در تمام ستون آب کمک می‌کنند. در ادامه، سه راهکار فوق از نظر عملکرد، مزایا، محدودیت‌ها و ملاحظات اجرایی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت آب پایین‌دست داشته باشد. سیانوتوکسین‌ها در آب آبیاری می‌توانند بر رشد و نمو گیاهان زراعی تأثیر بگذارند (۳۶). آب‌های آلوده به سیانوباکتری‌ها هنگام تخلیه از سدها ممکن است کیفیت آب پایین‌دست را به‌شدت کاهش دهند. این سموم در آب آبیاری نیز می‌توانند بر رشد محصولات زراعی اثر گذاشته و در بافت گیاهان یا خاک باقی بمانند که در نهایت، زنجیره غذایی انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین، مرگ‌ومیر گسترده در بین ماهیان و سایر آبزیان نیز از پیامدهای مستقیم سیانوتوکسین‌ها است؛ به‌طوری‌که تخمین زده می‌شود حدود ۷۰٪ از سیانوباکتری‌ها توانایی تولید سموم کشنده برای حیوانات و مضر برای انسان را دارن (۳۷). از نظر اقتصادی، شکوفایی سیانوباکتری‌ها هزینه‌های سنگینی را به جوامع تحمیل می‌کند، از جمله (۳۸ و ۳۹):

خسارات تفریحی (بیش از ۱ میلیارد دلار در سال در ایالات متحده)

هزینه‌های تصفیه آب (تا ۸۱۳ میلیون دلار آمریکا در سال)

تعطیلی تأسیسات تصفیه (با خسارتی بیش از ۱۳۰ میلیون یوان در دریاچه تای‌هو، چین)

هزینه‌های پایش و کنترل بار مواد مغذی در حوضه آبریز

پیش‌بینی می‌شود که تغییرات اقلیمی و گسترش استفاده از زمین اثرات سیانوباکتری‌ها را تشدید کند، از این‌رو اجرای راهبردهای کارآمد در مدیریت مخازن

¹ Multi-Level Offtake; MLO

² Bubble Plume

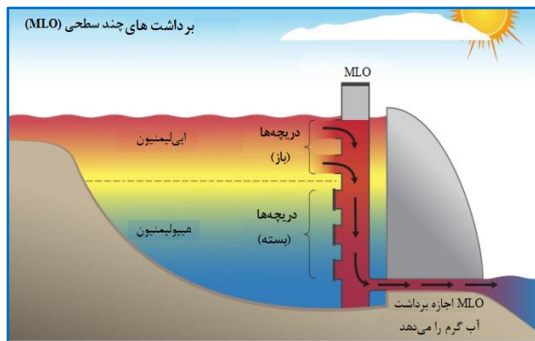
³ Surface Mixers

- لایه زدایی مخازن آب با استفاده از برداشت انتخابی از مخزن

سیستم برداشت چندسطحی یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای مدیریت کیفیت جریان خروجی از سدهاست. این سیستم‌ها امکان برداشت آب از عمق‌های مختلف مخزن را فراهم می‌کنند، به نحوی که می‌توان از برداشت آب سرد از ناحیه هیپولیمنیون جلوگیری کرد یا مانع از تخلیه سیانوباکتری‌های سطحی شد (۲۴و۴۰).

اگرچه برداشت انتخابی بیش‌تر برای سدهایی که پیش‌تر به تجهیزات چندسطحی مجهز شده‌اند

قابل‌اجراست، اما مقاوم‌سازی سازه‌های قدیمی نیز امکان‌پذیر است، هرچند با هزینه بالا همراه است (۴۲-۴۰). نمونه‌ای از نحوه عملکرد این روش در شکل (۵) و مزایا و معایب آن در جدول (۱) ارائه شده‌اند.



شکل (۵): استفاده از برداشت‌های چند سطحی در مخازن

جدول (۱): مزایا و معایب برداشت‌های چند سطحی (۴۳-۴۰ و ۲۴ و ۱۹)

مزایا	معایب
برداشت انتخابی از آب‌های گرم بالای ترموکلاین می‌تواند انتشار آب سرد از سد را به محیط پایین‌دست کاهش دهد.	مقاوم‌سازی یک سد با MLO به‌طور قابل‌توجهی گران‌تر از سایر استراتژی‌های جایگزین است. به همین دلیل، معمولاً به‌عنوان یک گزینه پرهزینه برای کاهش انتشار آب سرد از سدها تلقی می‌شود.
می‌توان از برداشت انتخابی برای جلوگیری از آب هیپولیمنیون بی‌کیفیت استفاده کرد.	برداشت‌های بزرگ‌تر می‌توانند منجر به ورود و خروج آب‌های ناخواسته شود که ممکن است مزایای MLO را کاهش دهد.
برداشت انتخابی می‌تواند برای جلوگیری از تخلیه سیانوباکتری‌های سمی به محیط پایین‌دست، با برداشت از آب‌های زیر سطح استفاده شود.	با توجه به اینکه هر نقطه برداشت به‌سرعت جریان خاصی محدود می‌شود، حجم برداشت ممکن است توسط دما و الزامات کیفیت آب محدود شود. زمان و نیروی کار برای جابجایی دریچه‌ها برای تنظیم تغییرات در ساختار لایه‌بندی و سطوح مخزن موردنیاز است. ممکن است برای تنظیم نیاز به یک روز کارگر داشته باشد.
برداشت‌های چند سطحی از نظر تئوری می‌توانند به‌عنوان وسیله‌ای برای بازیابی جریان‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرند.	بسته به عمق تخلیه ممکن است تعمیر و نگهداری پیچیده و سخت باشد.
برداشت عمیق انتخابی می‌تواند برای افزایش اختلاط عمودی استفاده شود که ممکن است کیفیت کلی آب در مخزن را بهبود بخشد.	برداشت آب از لایه‌های خاص در یک مخزن ممکن است آب‌های ایده آل برای زندگی ماهی‌ها را تخلیه کند و منجر به کشتن ماهی‌ها شود.
هزینه عملیاتی کمتر از سایر گزینه‌ها	

- هزینه‌ها

افزودن سامانه برداشت چندسطحی به سدها اغلب پرهزینه‌ترین گزینه در میان روش‌های مدیریت لایه‌بندی محسوب می‌شود. عمده هزینه‌ها مربوط به سرمایه اولیه بوده و بسته به اندازه مخزن، نیاز به

غواصان بیش‌تر و تجهیزات پیشرفته‌تر دارد. هزینه‌های بهره‌برداری شامل نیروی انسانی، باز و بسته کردن شیرها در سطوح مختلف، و نگهداری دوره‌ای است که نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری ناچیز تلقی می‌شود (۴۴و۴۲و۴۰).

ملاحظات طراحی و بهره‌برداری

طراحی مؤثر سیستم برداشت چندسطحی نیازمند درک دقیق از ویژگی‌های فیزیکی مخزن، شدت لایه‌بندی، حجم جریان خروجی و کیفیت مطلوب آب در پایین‌دست است (شکل ۶). ملاحظات کلیدی در این زمینه عبارت‌اند از:

- برداشت از بالای ترموکلاین می‌تواند در کاهش انتشار آب سرد از سدها و جلوگیری از رهاسازی آب با اکسیژن محلول پایین و غلظت بالای آهن و منگنز مؤثر باشد (۲۱).

- در حضور سیانوباکتری‌های سمی در لایه سطحی، برداشت چندسطحی ممکن است اثربخشی خود را در کاهش آلودگی از دست بدهد (۴۱).

- سطح پایین مخزن یا لایه‌بندی شدید می‌تواند موجب محدود شدن گزینه‌های برداشت مؤثر شود، به‌ویژه زمانی که تنها برخی از دریچه‌ها فعال باقی می‌مانند و کیفیت یا حجم جریان خروجی را به خطر می‌اندازند (۴۵ و ۴۱).

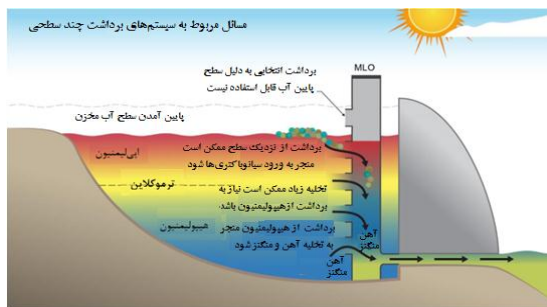
- برداشت بیش از حد ممکن است منجر به بالا آمدن ناخواسته لایه‌های بی‌کیفیت و رهاسازی جلبک‌های سمی یا فلزات سنگین به محیط پایین‌دست شود (۲۴).

- هزینه اولیه نصب یک سیستم برداشت چندسطحی بسیار بالاست، اما هزینه‌های بهره‌برداری معمولاً پایین‌تر از سایر فناوری‌های لایه‌زدایی است و دربرگیرنده نگهداری ساده و عمر مفید بالاست (۲۱).

- اتوماسیون فرآیند برداشت می‌تواند بهره‌وری سیستم را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد، اگرچه ممکن است هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را افزایش دهد.

- این فناوری بیش‌تر بر خروجی پایین‌دست تمرکز دارد و تأثیر مستقیم چندانی بر بهبود کیفیت درون‌مخزنی ندارد. برداشت آب با کیفیت بالا از مخزن ممکن است شرایط زیستی برای گونه‌های آبی در داخل مخزن را تضعیف کند (۴۶).

- برخی طراحی‌ها ممکن است با هدف افزایش اختلاط عمودی در مخزن، برداشت عمیق‌تری را پیشنهاد دهند، ولی ممکن است این اقدام با اهداف کیفی خروجی مانند دمای خاص یا کاهش آلاینده‌ها در تضاد باشد (۴۳ و ۱۹).

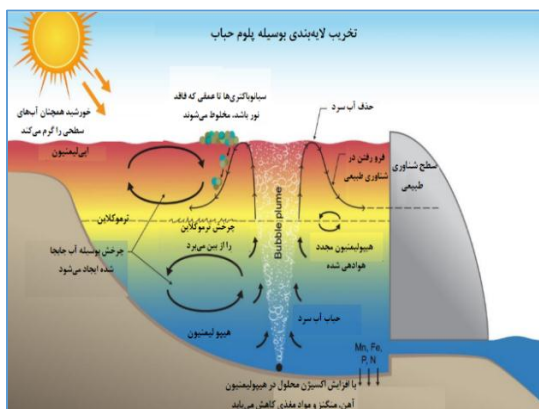


شکل (۶): مسائل بالقوه‌ای که باید در طراحی سیستم‌های برداشت چند سطحی در نظر گرفته شود

- لایه‌زدایی مخازن آب با استفاده از ستون‌های حباب‌دار

لایه‌زدایی مصنوعی یکی از راهکارهای رایج و مؤثر برای کاهش اثرات لایه‌بندی حرارتی در مخازن آب به شمار می‌رود. در این میان، استفاده از ستون‌های حباب‌دار به دلیل هزینه پایین، عملکرد مناسب و سادگی نصب، به‌عنوان یکی از رایج‌ترین فناوری‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (۴۷ و ۴۰). این سیستم در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است و شامل پمپاژ هوای فشرده از طریق شبکه لوله‌ای به دیفیوزرهایی است که در اعماق مخزن نصب می‌شوند. حباب‌های هوا از عمق به سطح صعود کرده و در این فرآیند، آب سرد هیپولیمنیون را با آب‌های سطحی گرم‌تر ترکیب

نظیر حجم مخزن، نرخ جریان هوا، موقعیت دیفیوزرها، عمق نصب و مدت زمان بهره‌برداری، بر کارایی سیستم و هزینه‌های آن اثرگذارند. بازده مکانیکی این سیستم‌ها معمولاً پایین بوده و به‌ندرت از ۱۵ درصد فراتر می‌رود (۲۱).



شکل (۷): لایه زدایی مخازن با استفاده از ستون حباب‌دار

می‌کنند، در نتیجه ساختار گرادیان چگالی شکسته و لایه‌بندی حرارتی تضعیف می‌شود (۲۱).

تفاوت میان سیستم‌های لایه‌زدایی و سیستم‌های هوادهی حائز اهمیت است؛ چرا که سیستم‌های هوادهی هیپولیمنیتیک با هدف تأمین اکسیژن برای هیپولیمنیون طراحی شده‌اند و تأثیری بر لایه‌بندی حرارتی ندارند (۴۳). مزایا و معایب این روش در جدول (۲) آمده است.

هزینه‌ها

در مقایسه با سایر روش‌ها، لایه‌زدایی با ستون‌های حباب‌دار از نظر هزینه سرمایه اولیه مقرون‌به‌صرفه‌تر است، اما مصرف برق بالا برای راه‌اندازی کمپرسورها می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد. عواملی

جدول (۲): مزایا و معایب لایه زدایی مصنوعی با استفاده از ستون‌های حباب‌دار (۵۰-۴۷، ۴۰، ۴۳، ۳۴، ۱۲)

مزایا	معایب
با مخلوط کردن فیزیکی آب‌های سطحی اشباع‌شده در کف مخزن، اکسیژن را به آب‌های هیپولیمنیون بدون اکسیژن بازگردانید.	گردش آب‌های بدون اکسیژن و غنی از مواد مغذی به لایه‌های بالایی یک مخزن می‌تواند افزایش سیانوباکتری‌ها و شکوفه‌های جلبکی را با فراهم کردن مواد مغذی برای رشد آن‌ها تسهیل کند.
مهار آزاد شدن آهن، منگنز و سایر مواد مغذی از رسوبات با بازگرداندن اکسیژن به آب‌های هیپولیمنیون.	سیانوباکتری‌های سمی ممکن است در عمق خروجی مخلوط شوند که در غیر این صورت از آن جلوگیری می‌کند و منجر به تخلیه جلبک‌های سمی در پایین‌دست می‌شود.
می‌تواند یک روش مؤثر برای کنترل رشد سیانوباکتری باشد. اختلاط در ستون آب، مزیت شناوری سیانوباکتری‌ها را از بین می‌برد و با انتقال جلبک‌ها به اعماق کم‌نور، سرعت رشد را کاهش می‌دهد.	اختلاط متناوب یا ناکافی می‌تواند منجر به شرایط مطلوب برای رشد سیانوباکتری شود.
لایه زدایی با استفاده از ستون حباب‌دار به کاهش pH آب مخزن نسبت داده می‌شود که باعث افزایش رشد جلبک سبز می‌شود که در مقایسه با سیانوباکتری‌ها مطلوب است.	هزینه‌های عملیاتی برای مخازن بزرگ‌تر و عمیق‌تر به‌طور قابل توجهی به دلیل حجم آب موردنیاز برای لایه زدایی افزایش می‌یابد.
ثابت شده است که در توزیع مجدد دما در سرتاسر ستون آب، افزایش دمای آب عمیق در مخازن و کاهش انتشار آب سرد از سدها به دلیل خروج در آبگیری‌های عمیق مؤثر است.	ممکن است محدودیت‌هایی برای مخازن بسیار بزرگ بر اساس توان موجود برای سایتی که سیستم در آن نصب شده است وجود داشته باشد.
به‌عنوان یک جایگزین کم‌هزینه برای مقاوم‌سازی MLO، بر اساس سرمایه‌گذاری اولیه تلقی می‌شود. با این حال هزینه عملیاتی باید در این مقایسه‌ها در نظر گرفته شود.	تعمیر و نگهداری سیستم می‌تواند مشکل باشد، زیرا اکثر شبکه لوله‌کشی معمولاً نزدیک بستر مخزن متصل می‌شود.

ادامه جدول (۲):

لایه زدایی می‌تواند برافزایش بودجه گرمایی مخزن، با مخلوط کردن آب‌های سرد هیپولیمنیون به سطح تأثیر داشته باشد. این امر می‌تواند کارایی کلی سیستم را در گرم کردن مخزن و کاهش انتشار آب سرد از سدها افزایش دهد.

لایه زدایی سریع می‌تواند منجر به کاهش اکسیژن به دلیل اختلاط آب‌های هیپولیمتیک و رسوبات BOD بالا شود. این می‌تواند منجر به کشتار ماهی شود

- ملاحظات طراحی و بهره‌برداری

طراحی، نصب، بهره‌برداری و هزینه این سیستم‌ها به عوامل متعددی از جمله اندازه مخزن، نوع مخزن و اهداف موردنظر از لایه زدایی مرتبط است. یک نمای کلی از مسائل بالقوه مرتبط با سیستم‌های ستون حباب مورد استفاده برای لایه زدایی حرارتی در مخازن در شکل (۸) نشان داده شده است. نکات کلیدی در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم‌ها عبارت‌اند از:

- گرم شدن هیپولیمنیون ممکن است به کاهش انتشار آب سرد از سدها کمک کند، اما موجب افزایش تقاضای اکسیژن و در نتیجه افت DO در کل ستون آب می‌شود (۴۰ و ۲۱).

- در مخازن کوچک، سیستم‌های حباب‌دار اثربخش‌تر هستند ولی احتمال شکوفایی سیانوباکتری‌ها وجود دارد؛ در حالی که در مخازن بزرگ، اثربخشی در کنترل جلبک‌ها بیش‌تر است (۲۱).

- کنترل سیانوباکتری‌ها در مخازن کم‌عمق با این سیستم دشوار است (۴۰ و ۲۱).

- قرارگیری دیفیوزرها بسیار نزدیک به بستر می‌تواند موجب آشفته‌گی رسوبات و افزایش کدورت شود. فاصله حداقل یک متری توصیه می‌شود (۲۲).

- لایه‌زدایی باید پیش از آغاز لایه‌بندی آغاز شود تا از هزینه‌های بالای شکست ساختار لایه‌بندی قوی اجتناب گردد (۵۲ و ۲۱).

- بهره‌گیری از کمپرسورهای سرعت متغیر (VSD)^۱ می‌تواند در بهینه‌سازی عملکرد سیستم مؤثر باشد (۵۳).

- استفاده متناوب از سیستم در برخی شرایط ممکن است اثربخش باشد، اما می‌تواند به افزایش سیانوباکتری‌ها منجر شود (۳۴ و ۲۱).

- به‌کارگیری چرخه‌های عملیاتی متنوع (پیوسته و متناوب) برای مقابله با سازگاری سیانوباکتری‌ها با شرایط محیطی پیشنهاد می‌شود (۲۱).

- شرایط اقلیمی و تغییرات سطح آب باید در طراحی لحاظ گردد (۱۹).

- استفاده از انرژی خورشیدی برای مخازن دورافتاده می‌تواند گزینه‌ای اقتصادی باشد (۲۱).

- تعمیر و نگهداری لوله‌های مستغرق دشوار است و باید از پیش برای آن برنامه‌ریزی شود (۲۱).

^۱ Variable Speed Drive

- ملاحظات طراحی و بهره‌برداری

موارد قابل توجه در بهره‌برداری از اختلاط‌دهنده‌های سطحی شامل موارد زیر است:

اثربخشی این سیستم‌ها در مخازن کوچک یا عمیق محدود است (۵۵).

استفاده از لوله مکش برای هدایت جریان به عمق، به‌ویژه در مخازن بزرگ، ضروری است (۲۱).

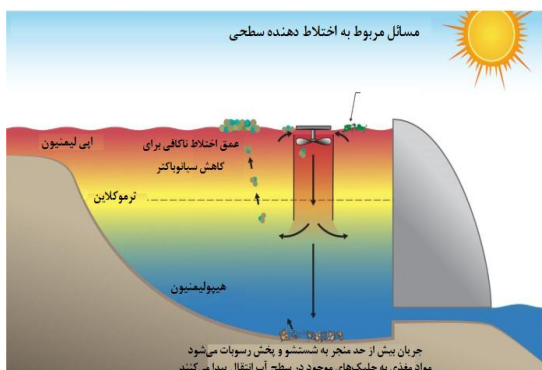
نزدیکی بیش از حد جریان به بستر موجب افزایش کدورت و کاهش کیفیت آب می‌شود (۲۱).

تأثیر این سیستم‌ها عمدتاً موضعی است و برای مقیاس‌های بزرگ اثربخشی کم‌تری دارند (۲۱).

نوسانات سطح آب و بارگذاری موجی باید در طراحی لحاظ شوند (۲۱).

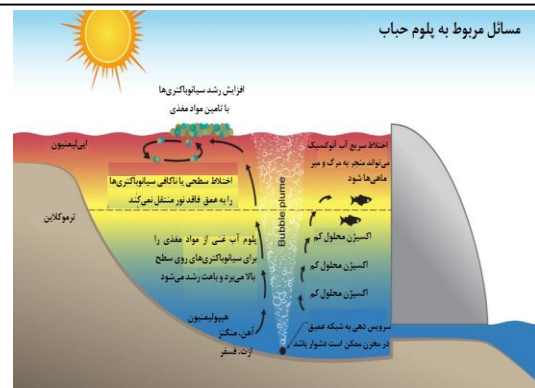
در مکان‌های عمومی، رعایت ایمنی کاربران و محافظت از تجهیزات اهمیت دارد (۲۱).

این سیستم به‌عنوان راهکار مستقل برای مخازن بزرگ توصیه نمی‌شود، اما می‌تواند در ترکیب با ستون‌های حباب‌دار به ارتقاء عملکرد مدیریت لایه‌بندی کمک کند (۲۱).



شکل (۹): مسائل بالقوه‌ای که باید در طراحی اختلاط دهنده

سطحی در نظر گرفته



شکل (۸): مسائل بالقوه‌ای که باید در طراحی ستون حباب در نظر گرفته

- لایه زدایی مخازن آب با استفاده از اختلاط دهنده

سطحی

روش دیگر لایه‌زدایی، استفاده از اختلاط‌دهنده‌هایی است که در نزدیکی سطح مخزن نصب می‌شوند. این سیستم‌ها معمولاً شامل پروانه‌هایی هستند که آب را به عمق پرتاب می‌کنند و موجب اختلاط لایه‌های بالایی با لایه‌های پایینی می‌شوند. شکل (۹) سازوکار این سیستم را نشان می‌دهد (۴۸ و ۲۱). این اختلاط موضعی موجب برهم‌زدن ساختار گرادیان حرارتی در محدوده اطراف دستگاه می‌شود.

(۲۱ و ۵۴). جدول (۳) مزایا و معایب اختلاط دهنده‌های سطحی را برای کاهش انتشار آب سرد از سدها و سایر مسائل کیفیت آب نشان می‌دهد.

- هزینه‌ها

در مقایسه با ستون‌های حباب‌دار، این روش به دلیل مصرف انرژی کم‌تر و راندمان مکانیکی بالاتر، کم‌هزینه‌تر تلقی می‌شود (۲۱).

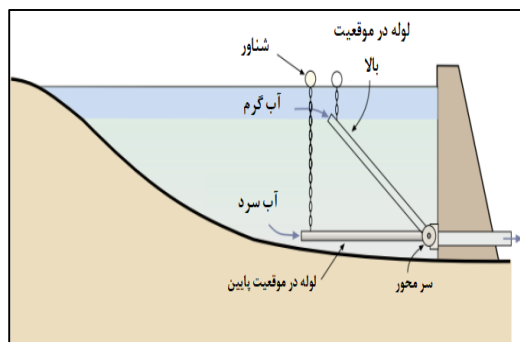
جدول (۳): مزایا و معایب لایه زدایی لایه‌بندی مصنوعی با استفاده از اختلاط دهنده سطحی (۵۵ و ۲۱)

مزایا	معایب
یک روش مؤثر برای لایه زدایی محلی است. بسته به هدف سیستم، یک اختلاط دهنده سطحی ممکن است برای مخلوط کردن آب در اطراف یک خروجی (برداشت) کافی باشد.	جت‌هایی که در نزدیکی بستر مخزن نفوذ می‌کنند ممکن است رسوبات کف را فرسایش داده و مجدداً معلق کنند.
با توجه به اینکه بیشتر این سیستم در سطح مخزن قابل دسترسی است، احتمالاً تعمیر و نگهداری سیستم به‌طور قابل توجهی آسان‌تر از گزینه‌های جایگزین خواهد بود.	می‌تواند منجر به سلول‌های چرخشی موضعی شود و بنابراین برای لایه زدایی کل مخزن بی‌اثر باشد.
لوله‌های مکشی اجازه اختلاط را تا عمق دلخواه می‌دهند که می‌تواند برای کنترل سیانوباکتری‌ها مفید باشد. مخلوط کردن جلبک‌های اثرات موضعی ممکن است منجر به اثرات منفی در سایر قسمت‌های مخزن سمی در یک عمق خاص می‌تواند قرار گرفتن در معرض نور را به‌عنوان مثال در تأمین مواد مغذی برای جلبک‌های سمی گردد محدود کرده و رشد را مهار کند.	
	جت‌های محصور نشده از پمپ‌های سطحی بدون لوله کشش ممکن است به دلیل از دست رفتن انرژی جنبشی از طریق تلاطم ایجادشده در نتیجه حباب شدن آب اطراف، مؤثر نباشند.
	مدل‌سازی مخازن خاص نشان داده است که پمپ‌های سطحی ممکن است هیچ سودی برای کنترل جلبک در مقایسه با ستون‌های حباب‌دار نداشته باشند
	اثر منفی سرکوب گونه‌های مطلوب جلبک و همچنین سیانوباکتری‌ها

گزینه‌های دیگر لایه زدایی مخازن آب

- آبیگرهای شناور^۱

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، آبیگرهای شناور (ترانیون) از لوله‌های خروجی لولایی بهره می‌برند که امکان برداشت آب از عمق‌های مختلف مخزن را فراهم می‌کند. با این حال، قطر محدود این لوله‌ها ظرفیت تخلیه سیستم را محدود می‌کند؛ بنابراین، این آبیگرها برای مخازن ذخیره آب آبیاری مناسب نیستند. همچنین کاربرد آنها در مخازن عمیق به دلیل محدودیت طول لوله (معمولاً ۲۵ تا ۳۰ متر) محدود می‌شود (۲۱).



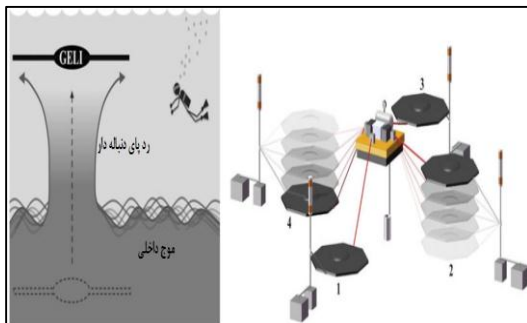
شکل (۱۰): آبیگرهای شناور

- مانع معلق (غشای جداکننده)^۲

مانع معلق ساخته شده از پلیمرهای مقاوم می‌تواند به صورت معلق یا غوطه‌ور در اطراف سد قرار گیرد تا از انتشار آب سرد از سدها جلوگیری کند. این مانع نفوذناپذیر به آب، جریان‌های آب در زمان رهاسازی‌های پایین‌دست را به روی یا زیر خود هدایت می‌کند (۲۱). با لنگر انداختن این مانع از کف

² Suspended curtain¹ Floating intakes

طراحی شده است. این سیستم شامل یک دیسک بزرگ و مسطح است که به صورت عمودی در ستون آب حرکت می‌کند و آب سرد را همراه خود می‌کشد. هوای فشرده توسط کمپرسوری ساحلی به کیسه هوایی متصل به دیسک فرستاده می‌شود و باعث شناوری آن می‌گردد. سپس هوا در سطح آزاد شده و دیسک به کف مخزن بازمی‌گردد و آب گرم سطحی را همراه خود به پایین می‌برد [۵۸، ۵۹]. شکل (۱۲) این فناوری را نمایش می‌دهد.

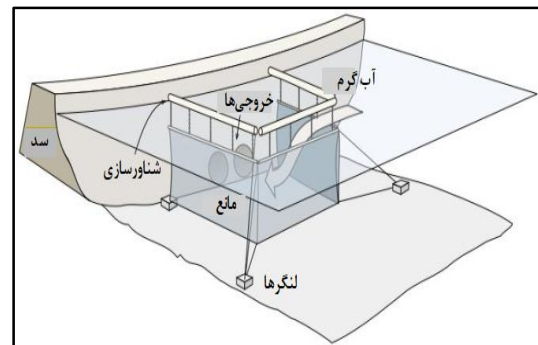


شکل (۱۲): فناوری لایه زدایی از طریق GELI

نتیجه‌گیری

انتشار آب سرد از سدها یکی از چالش‌های مهم مدیریت مخازن و سدهاست. علاوه بر هزینه‌های بالای فناوری‌های رایج کاهش آلودگی، لایه‌بندی در مخازن باعث بروز مشکلات کیفی متعددی در آب مخزن و پایین‌دست می‌شود که کارایی این فناوری‌ها را محدود می‌کند. در این مطالعه، سه استراتژی رایج کاهش انتشار آب سرد از سدها بررسی شد: برداشت انتخابی از طریق ساختار چند سطحی، لایه زدایی مصنوعی با ستون‌های حبایی و اختلاط دهنده‌های سطحی مکانیکی. مزایا، معایب و نکات طراحی و اجرایی هر روش به طور خلاصه ارائه شده و همچنین تأثیرات

مخزن به سمت بالا، آب گرم سطحی به سمت خروجی‌ها هدایت شده و از انتشار آب سرد از سدها پایین‌دست کاسته می‌شود. برعکس، مانع ممکن است از کف مخزن آویزان شود و با کشیده شدن به سمت سطح، از انتشار جلبک‌های سمی سطحی به پایین‌دست جلوگیری کند (۵۷ و ۵۶). شکل (۱۱) نمونه‌ای از مانع معلق یا غوطه‌ور را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): مانع غوطه‌ور/ معلق

- حوضچه آرامش^۱

حوضچه‌های آرامش با هدف کاهش انتشار آب سرد از سدها طراحی شده‌اند تا آب رهاشده قبل از تخلیه، به دمای مطلوب برسد. آب در یک حوضچه بزرگ و کم‌عمق جمع شده و تا رسیدن به تعادل حرارتی نگه داشته می‌شود، سپس تخلیه می‌گردد. محدودیت اصلی این روش، حجم رهاسازی در مخزن است، زیرا رهاسازی‌های بزرگ نیازمند حوضچه‌هایی با ظرفیت بسیار زیاد و غیرعملی هستند [۲۱].

- لایه زدایی مصنوعی با فناوری GELI^۲

فناوری برگرداننده دریاچه حباب تدریجی (GELI) نمونه‌ای نوین از لایه زدایی مصنوعی است که به منظور کاهش مصرف انرژی ستون‌های حبایی مرسوم

^۱ Stilling basin

^۲ Gradual Entrainment Lake Inverter

لایه‌بندی بر کیفیت آب از جمله انتشار آب سرد از سدها، کاهش اکسیژن محلول، افزایش آهن و منگنز، و شکوفایی سیانوباکتری‌ها بررسی شده است.

اختلاط دهنده‌های سطحی به دلیل تأثیر محدود بر کل شرایط مخزن و پایین‌دست، کم‌اثرترین روش لایه زدایی حرارتی محسوب می‌شوند. این دستگاه‌ها معمولاً اثرات موضعی دارند و ممکن است برای مدیریت کل مخزن مناسب نباشند. همچنین محدودیت طراحی آن‌ها با افزایش اندازه و عمق مخزن بیشتر می‌شود. با این حال، اختلاط دهنده‌های سطحی می‌توانند در مخازن کوچک‌تر با تخلیه کم‌عمق، به عنوان راهکاری مقرون‌به‌صرفه و کاربردی برای اختلاط موضعی مورد استفاده قرار گیرند. آنها همچنین قابلیت پمپاژ آب گرم‌تر به عمق تخلیه در رویدادهای رهاسازی را دارند و می‌توانند به عنوان مکملی برای دیگر استراتژی‌های مدیریتی مانند کنترل رشد سیانوباکتری‌ها به کار روند. این روش هزینه سرمایه‌گذاری پایین و هزینه عملیاتی متوسطی دارد، اما به عنوان راه‌حلی محدود شناخته می‌شود.

لایه زدایی با ستون‌های حبابی، جامع‌ترین و موفق‌ترین روش از نظر کاربرد عملی است. این سیستم‌ها برای بهبود شرایط حرارتی و کیفیت اکسیژن محلول در کل ستون آب، کاهش غلظت آهن و منگنز و کنترل رشد سیانوباکتری‌ها به کار گرفته شده‌اند و به خوبی طراحی و بهینه شده‌اند. با این حال، به دلیل تأثیر عوامل متعدد، جای پیشرفت در طراحی و بهره‌برداری آن‌ها وجود دارد. یکی از نگرانی‌های مهم، احتمال افزایش رشد سیانوباکتری‌ها به دلیل انتقال مواد مغذی به سطح و همچنین گرم شدن کف مخزن است که ممکن است اکسیژن محلول را کاهش دهد. از نظر

هزینه، سرمایه‌گذاری اولیه این سیستم‌ها نسبتاً پایین است اما هزینه‌های عملیاتی آنها بالا بوده و به‌ویژه در مخازن بزرگ و عمیق که نیاز به انرژی زیادی برای لایه زدایی مؤثر وجود دارد، قابل توجه است. توصیه می‌شود پیش از اجرا، مدل‌سازی و بهینه‌سازی استراتژی‌های عملیاتی انجام شود تا امکان‌سنجی و کارایی سیستم بهبود یابد.

برداشت انتخابی با ساختار چند سطحی، گران‌ترین گزینه از نظر سرمایه‌گذاری است. با این حال، باید هزینه‌های طول عمر و نگهداری این روش در مقایسه با ستون‌های حبابی مورد توجه قرار گیرد. در سدهای بزرگ که هزینه‌های عملیاتی ستون‌های حبابی بالا است، ممکن است هزینه مقاوم‌سازی ساختار چند سطحی کمتر باشد. همچنین، هزینه ساخت برداشت چند سطحی با افزایش اندازه مخزن افزایش می‌یابد و کیفیت پایین آب مخزن می‌تواند هزینه‌ها را به شدت بالا ببرد. برداشت چند سطحی نسبت به سایر روش‌های لایه زدایی، اثرات مخرب کمتری بر محیط مخزن دارد. درک دقیق حجم و الگوی رهاسازی و شرایط مخزن برای بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها و ارزیابی ارزش آنها حیاتی است. به طور کلی، مقاوم‌سازی برداشت چند سطحی گزینه‌ای مؤثر اما محدود، با هزینه سرمایه‌گذاری بالا و هزینه عملیاتی پایین برای کاهش انتشار آب سرد از سدها محسوب می‌شود. موفقیت این اقدامات باید بر اساس بهبود همزمان انتشار آب سرد از سدها، کیفیت آب و کنترل سیانوباکتری‌ها سنجیده شود که معمولاً در تضاد با یکدیگر هستند. حفظ یک ستون آب غیر طبقه‌بندی شده، کلید موفقیت در بهبود همزمان این پارامترها است. در نهایت با توجه به پیچیدگی مسائل مربوط به

کیفیت آب، به ویژه دما، اکسیژن محلول و غلظت فلزات و جلبک‌ها، به مدیران کمک می‌کند تا وضعیت مخزن را به صورت دقیق رصد کرده و در صورت لزوم، سریعاً واکنش نشان دهند.

- توسعه فناوری‌های کم‌مصرف و خودکار: به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی، توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین با مصرف انرژی کمتر و قابلیت خودکارسازی عملیات، از اولویت‌های مهم است.

- آموزش و توانمندسازی تیم‌های بهره‌برداری: آموزش متخصصان و بهره‌برداران مخازن در زمینه کاربرد صحیح فناوری‌ها، مدیریت بهینه و تحلیل داده‌های پایش، نقش مهمی در موفقیت پروژه‌ها دارد.

- توجه به شرایط زیست‌محیطی و اکولوژیکی: در طراحی و اجرای هر فناوری، باید تأثیرات زیست‌محیطی و اکولوژیکی به دقت ارزیابی شده و راهکارهای کاهش اثرات منفی در نظر گرفته شود.

- حفظ ستون آب غیر طبقه‌بندی شده: از مهم‌ترین اهداف مدیریت انتشار آب سرد از سدها حفظ ستون آب غیر طبقه‌بندی شده در مخزن است که به عنوان شاخص کلیدی موفقیت شناخته می‌شود و به بهبود همزمان پارامترهای مختلف کیفیت آب کمک می‌کند.

منابع

- [1] Nazrehia M., Danaei A., Hashemi SH., Izad Doostda, AH., 2011, Prediction of thermal stratification of the dam under construction in Bakhtiari using the CE-QUAL-W2 model, Environment, 36 1-8.
- [2] Fazeli M., Attari J., Hashemi S.H., Jumaegi A., 2011, Investigation of methods to prevent thermal stratification in the Larian Dam Lake (first stage of feasibility study), Tehran

انتشار آب سرد از سدها و محدودیت‌های هر یک از فناوری‌های موجود، پیشنهاد می‌شود که:

- در مخازن بزرگ و عمیق با بودجه و امکانات مناسب، استفاده از ستون‌های حبابی به عنوان راهکار اصلی به کار گرفته شود و بهره‌برداری آن‌ها با کمک مدل‌سازی و پایش دقیق بهینه شود.

- در مخازن کوچک‌تر یا با نیاز به اختلاط موضعی، اختلاط دهنده‌های سطحی به عنوان راهکار مکمل و مقرون‌به‌صرفه استفاده شود.

- در شرایطی که کیفیت آب مخزن بسیار بحرانی است و هزینه‌های عملیاتی بالاست، برداشت انتخابی چند سطحی به عنوان گزینه‌ای مؤثر و پایدار مدنظر قرار گیرد.

- در نهایت، مدیریت موفق کیفیت آب مخازن نیازمند رویکرد جامع، انعطاف‌پذیر و مبتنی بر پایش مستمر است که بتواند فناوری‌های مختلف را متناسب با شرایط و نیازهای خاص هر مخزن تلفیق و بهینه‌سازی کند.

اجرای این راهکارها علاوه بر بهبود کیفیت آب، می‌تواند به حفظ اکوسیستم‌های پایین‌دست، افزایش طول عمر سدها و بهبود بهره‌وری منابع آبی منجر شود.

پیشنهادات عملیاتی و اجرایی

مدل‌سازی و بهینه‌سازی پیش از اجرا:

پیشنهاد می‌شود پیش از اجرای هر فناوری، مطالعات مدل‌سازی دقیق انجام شود تا ابعاد، محل نصب، زمانبندی بهره‌برداری و پارامترهای عملیاتی بهینه تعیین شوند. این امر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش اثربخشی می‌شود.

- پایش و کنترل مستمر کیفیت آب: پیاده‌سازی سیستم‌های پایش لحظه‌ای پارامترهای

- JR., Mitrovic, SM., 2019, Mitigation of cold-water thermal pollution downstream of a large dam with the use of a novel thermal curtain. *River Research and Applications*, 35855-66.
- [14] Chaaya, FC., Miller, BM., 2023, Pindari Dam cold water pollution mitigation through artificial destratification–Monitoring network recommendations. WRL Technical Report 2022/19, UNSW Water Research Laboratory.
- [15] Winton, RS., Calamita, E., Wehrli, B., 2019, Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. *Biogeosciences*, 16(8):1657-71.
- [16] Huttula, T., 2012, Stratification in Lakes, in *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*, 743–747.
- [17] Gibbs, MM., Howard-Williams, C., Sherman, B., Brookes, JD., Ibelings, BW., 2019, Physical processes for in-lake restoration: Destratification and mixing. *InLake Restoration Handbook: A New Zealand Perspective*, 165-205. Cham: Springer International Publishing.
- [18] Masunaga, E., Komuro, S., 2020, Stratification and mixing processes associated with hypoxia in a shallow lake (Lake Kasumigaura, Japan). *Limnology*, (2):173-86.
- [19] Li, N., Huang, T., Li, Y., Si, F., Zhang, H., Wen, G., 2020, Inducing an extended naturally complete mixing period in a stratified reservoir via artificial destratification. *Science of the Total Environment*, 745 140958.
- [20] Masunaga, E., Komuro, S., 2020, Stratification and mixing processes associated with hypoxia in a shallow lake (Lake Kasumigaura, Japan). *Limnology*, 21173-86.
- [21] Chaaya, FC., Miller, B., 2022, A review of artificial destratification techniques for cold water pollution mitigation. Available in: <https://www.unsw.edu.au/content/dam/pdfs/engineering/civil/environmental/waterresearchlaboratory/publications/WRL-TR2021-17>.
- [22] Ryan, T., Webb, A., Lennie, R., Lyon, J., 2001, Status of cold-water releases from Victorian dams. Arthur Rylah Institute, Department of Natural Resources and Environment, Melbourne, 61.
- [23] Hayes, DB., Dodd, HO., Lessard, JO., 2008, Effects of small dams on coldwater stream fish communities. In *American Fisheries Society Symposium*, 49 1791, American Fisheries Society.
- Regional Water Joint Stock Company, (in Persian).
- [3] Woolway, RI., Merchant, CJ., 2019, Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, 12271-6.
- [4] Houshmand-Ayini, A., 2011, Investigation of the stratification phenomenon in reservoirs and methods for preventing it, First Regional on Civil Engineering, Joibar (In Persian).
- [5] Water Science Engineering Specialized Association, Thermal Stratification, 2012, available in <http://aterse.ir> (In Persian).
- [6] Zargarpour, H., Gharavi, M., Jafar, D., 2007, Thermal stratification in successive reservoirs - a case study of Karun 1, 2 and 3 dam reservoirs, *Iranian Water Resources Research*, 3 (In Persian).
- [7] Mohammadnejad, B., Bayramali, P., Navid B., 2015, Simulation of nutrient orientation of Mahabad Dam reservoir using two-dimensional CE-QUAL-W2 model. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, University of Tabriz, 44 107-115. (In Persian).
- [8] Hayes, NM., Deemer, BR., Corman, JR., Razavi, NR., Strock, KE., 2017, Key differences between lakes and reservoirs modify climate signals: A case for a new conceptual model. *Limnology and Oceanography Letters*, 247-62.
- [9] Bengtsson, L., 2012, Classification of Lakes from Hydrological Function, in *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*, 163–164.
- [10] Herschy, RW., 2012, Dams, Classification, in *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 200–207.
- [11] Poff, NL., Hart, DD., 2002, How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal: an ecological classification of dams is needed to characterize how the tremendous variation in the size, operational mode, age, and number of dams in a river basin influences the potential for restoring regulated rivers via dam removal. *BioScience*, 52659-68.
- [12] Miles, NG., West, RJ., 2011, The use of an aeration system to prevent thermal stratification of a freshwater impoundment and its effect on downstream fish assemblages. *Journal of fish Biology*, 78945-52.
- [13] Gray, R., Jones, HA., Hitchcock, JN., Hardwick, L., Pepper, D., Lugg, A., Seymour,

- cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology*, 50 407-22.
- [33] Ma, WX., Huang, TL., Li, X., 2015, Study of the application of the water-lifting aerators to improve the water quality of a stratified, eutrophicated reservoir. *Ecological Engineering*, 83 281-90.
- [34] Visser, PM., Ibelings, BW., Bormans, M., Huisman, J., 2016, Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology*, 50 423-41.
- [35] dos-Santos-Silva, RD., Severiano, JS., de-Oliveira, DA., Mendes, CF., Barbosa, VV., Chia, MA., de-Lucena-Barbosa, JE., 2020, Spatio-temporal variation of cyanobacteria and cyanotoxins in public supply reservoirs of the semi-arid region of Brazil. *Journal of Limnology*, 79.
- [36] Manning, SR., Nobles, DR., 2017, Impact of global warming on water toxicity: cyanotoxins. *Current Opinion in Food Science*, 18 14-20.
- [37] Lee, S., Jiang, X., Manubolu, M., Riedl, K., Ludsins, SA., Martin, JF., Lee, J., 2017, Fresh produce and their soils accumulate cyanotoxins from irrigation water: Implications for public health and food security. *Food research international*, 102 234-45.
- [38] Hamilton, DP., Wood, SA., Dietrich, DR., Puddick, J., 2014, Costs of harmful blooms of freshwater cyanobacteria. *Cyanobacteria: An economic perspective*, 10 245-56.
- [39] Hamilton, DP., Salmaso, N., Paerl, HW., 2016, Mitigating harmful cyanobacterial blooms: strategies for control of nitrogen and phosphorus loads. *Aquatic Ecology*, 50 351-66.
- [40] Slavin, EI., Wain, DJ., Bryant, LD., Amani, M., Perkins, RG., Blenkinsopp, C., Simoncelli, S., Hurley, S., 2022, The effects of surface mixers on stratification, dissolved oxygen, and cyanobacteria in a shallow eutrophic reservoir. *Water Resources Research*, 58(7): e2021WR030068.
- [41] Preece, R., 2004, Cold water pollution below dams in New South Wales: a desktop assessment. Water management Division, Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources.
- [42] Olden, JD., Naiman, RJ., 2010, Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying
- [24] Boys, C., Miles, N., Rayner, T., 2009, Scoping options for the ecological assessment of cold-water pollution mitigation downstream of Keepit Dam, Namoi River. Murray–Darling Basin Authority, NSW Department of Primary Industries.
- [25] Michie, LE., Thiem, JD., Boys, CA., 2020, Mitrovic SM. The effects of cold shock on freshwater fish larvae and early-stage juveniles: implications for river management. *Conservation physiology*, 8 coaa092.
- [26] Bryant, LD., Hsu-Kim, H., Gantzer, PA., Little, JC., 2011, Solving the problem at the source: controlling Mn release at the sediment-water interface via hypolimnetic oxygenation. *Water Research*, 45 6381-92.
- [27] Beutel, MW., Leonard, TM., Dent, SR., Moore, BC., 2008, Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn, and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an oligo-mesotrophic lake. *Water research*, 42 1953-62.
- [28] Munger, ZW., Carey, CC., Gerling, AB., Hamre, KD., Doubek, JP., Klepatzki, SD., McClure, RP., Schreiber, ME., 2016, Effectiveness of hypolimnetic oxygenation for preventing accumulation of Fe and Mn in a drinking water reservoir. *Water Research*, 106 1-4.
- [29] Khan, K., Wasserman, GA., Liu, X., Ahmed, E., Parvez, F., Slavkovich, V., Levy, D., Mey, J., van-Geen, A., Graziano, JH., Factor-Litvak, P., 2012, Manganese exposure from drinking water and children's academic achievement. *Neurotoxicology*, 33 91-7.
- [30] Vieira, MC., Torronteras, R., Córdoba, F., Canalejo, A., 2012, Acute toxicity of manganese in goldfish *Carassius auratus* is associated with oxidative stress and organ specific antioxidant responses. *Ecotoxicology and environmental safety*, 78 212-7.
- [31] Hedayati, A., Hoseini, SM., Ghelichpour, M., 2014, Acute toxicity of waterborne manganese to *Rutilus caspicus* (Yakovlev, 1870)–gill histopathology, immune indices, oxidative condition, and saltwater resistance. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 96 1535-45.
- [32] Bormans, M., Maršálek, B., Jančula, D., 2016, Controlling internal phosphorus loading in lakes by physical methods to reduce

- School of Engineering Science, Environment, Engineering and Technology, Griffith University, 6-27.
- [51] Becker, A., Herschel, A., Wilhelm, C., 2006, Biological effects of incomplete destratification of hypertrophic freshwater reservoir. *Hydrobiologia*, 559 85-100.
- [52] Lewis, DM., 2004, Surface mixers for destratification and management of *Anabaena circinalis*, Ph.D. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, University of Adelaide, 221-234.
- [53] Sahoo, GB., Luketina, D., 2003, Bubbler design for reservoir destratification. *Marine and freshwater research*, 54 271-85.
- [54] Cannon, S., 2020, *Reservoir Management: A Practical Guide*. John Wiley & Sons, 17-34.
- [55] Lawson, R., Anderson, MA., 2007, Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake. *Water research*, 41 4457-67.
- [56] Gray, R., 2016, Effectiveness of cold-water pollution mitigation at Burrendong Dam using an innovative thermal curtain. *University of Technology Sydney (Australia)*, 35-48.
- [57] Mejica, BN., Ebert, DA., 2023, Tanaka SK, Deas ML. Managing cyanobacteria with a water quality control curtain in Iron Gate Reservoir, California. *Lake and Reservoir Management*, 39 291-310.
- [58] Smith, CA., Read, JS., Vander-Zanden, MJ., 2018, Evaluating the "Gradual Entrainment Lake Inverter" (GELI) artificial mixing technology for lake and reservoir management. *Lake and Reservoir Management*, 34 232-43.
- [59] Read, JS., Shade, A., Wu, CH., Gorzalski, A., McMahon, KD., 2011, "Gradual Entrainment Lake Inverter" (GELI): A novel device for experimental lake mixing. *Limnology and Oceanography: Methods*, 9 14-28.
- dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 55 86-107.
- [43] Li, N., Huang, T., Mao, X., Zhang, H., Li, K., Wen, G., Lv, X., Deng, L., 2019, Controlling reduced iron and manganese in a drinking water reservoir by hypolimnetic aeration and artificial destratification. *Science of the Total Environment*, 685 497-507.
- [44] Sherman, B., Todd, CR., Koehn, JD., Ryan, T., 2007, Modelling the impact and potential mitigation of cold-water pollution on Murray cod populations downstream of Hume Dam, Australia. *River Research and Applications*, 23 377-89.
- [45] Ingleton, T., Kobayashi, T., Sanderson, B., Patra, R., Macinnis-Ng, CM., Hindmarsh, B., Bowling, LC., 2008, Investigations of the temporal variation of cyanobacterial and other phytoplanktonic cells at the offtake of a large reservoir, and their survival following passage through it. *Hydrobiologia*, 603 221-40.
- [46] Martin, J., Higgins, J., Edinger, J., 2014, Gordon J. *Energy Production and Reservoir Water Quality*. American Society of Civil Engineers.
- [47] Bryant, LD., Gantzer, PA., Little, JC., 2013, Increased sediment oxygen uptake caused by oxygenation-induced hypolimnetic mixing. *Water research, Management-Deep Reservoir Circulation*. In 7th annual WIOA NSW water industry operations conference. Exhibition Park in Canberra 84-91.
- [48] Elliott, S., Swan, D., 2013, *Source Water Management - Deep Reservoir Circulation*, in 7th Annual WIOA NSW Water Industry Operations Conference and Exhibition, 84-91
- [49] Bryant, LD., Hsu-Kim, H., Gantzer, PA., Little, JC., 2011, Solving the problem at the source: controlling Mn release at the sediment-water interface via hypolimnetic oxygenation. *Water Research*, 45 6381-92.
- [50] Helfer, F., 2012, Influence of air-bubble plumes and effects of climate change on reservoir evaporation, Ph.D. Thesis, Griffith