

اثرات تغییر در شرایط هیدرولوژیکی بر روی کیفیت آب مخزن سد ایلام

فرشته نورمحمدی دهبالایی¹، میترا جوان^{2*}، مرتضی افتخاری³ و افشین اقبال زاده²

تاریخ دریافت: 91/03/10 تاریخ پذیرش: 92/04/22

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

² استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی - پژوهشکده تحقیقات پیشرفته آب و فاضلاب، دانشگاه رازی

³ مدیر پژوهشکده منابع آب، موسسه تحقیقات آب

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: javanmi@gmail.com

چکیده

با توجه به اهمیت مخازن در تامین آب شرب و کشاورزی، بررسی کیفیت آب مخازن از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله از مدل دویعدی متوسط‌گیری شده عرضی CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب، دما و پارامترهای کیفی از قبیل اکسیژن محلول و مواد مغذی در مخزن سد ایلام استفاده شده است. پس از شبیه‌سازی تراز سطح آب، دما و اکسیژن محلول به ترتیب در دوره واسنجی با خطای متوسط مطلق $0/73$ و $1/41$ mg/l و در دوره صحت سنجی با خطای متوسط مطلق $1/18$ °C و $1/18$ mg/l شبیه‌سازی گردید که تطابق نسبتاً مناسبی میان نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و داده‌های اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود. پس از واسنجی و صحت سنجی مدل به منظور بررسی تغییرات هیدرولوژیکی بر روی کیفیت آب مخزن دو سناریو براساس سال‌های نرمال و خشک تعریف شد. نتایج سال خشک نشان دهنده یک لایه‌بندی شش ماهه از فروردین تا شهریور می‌باشد. در سال خشک به علت بالارفتن زمان ماند آب در مخزن، غلظت کلروفیل A در تابستان افزایش یافته که باعث تغییر وضعیت مخزن از حالت مزوتروفیک به اوتروفیک می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که نحوه تغییرات اکسیژن محلول مشابه دما می‌باشد. نتایج سال نرمال نشان دهنده یک لایه‌بندی هفت ماهه از فروردین تا مهرماه می‌باشد که در این سال به علت کاهش زمان ماند آب، غلظت کلروفیل A در تابستان کاهش یافته و باعث تغییر وضعیت مخزن از حالت مزوتروفیک به الیگوتروفیک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغییرات هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی عددی، مخزن سد ایلام، CE-QUAL-W2

Effects of Change in Hydrological Conditions on Water Quality in Reservoir of Ilam Dam

F Nourmohammadi dehbalaei¹, M Javan^{*2}, M Eftekhari³ and A Eghbalzadeh²

Received: 30 May 2012 Accepted: 13 July 2013

¹M.Sc Student, Dept. of Civil Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran

²Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Razi Univ. Water and Wastewater Research Center, Razi Univ., Kermanshah, Iran

³Director of Water Resource Institute (WRI), Tehran, Iran

* Corresponding Author Email: javanmi@gmail.com

Abstract

The assessment of water quality in reservoirs is essential because reservoirs are often one of the main sources of water for human consumption and irrigation. In this paper, a two-dimensional, laterally averaged CE-QUAL-W2 model was used to simulate the water surface elevation, water temperature, and water quality parameters such as dissolved oxygen and nutrients in the Ilam dam reservoir. After simulating the water level, the temperature and dissolved oxygen were respectively simulated with an average absolute error 0.76°C and 1.41mg/L during the calibration period and 1.18°C and 1.18 mg/l during the verification period. The model results showed relatively good agreement between the measured and simulated data. After model calibration and validation, in order to investigate the hydrological changes on reservoir water quality, two inflow scenarios were simulated based on the dry and normal years. The results of the dry year indicated a six-month stratification period from April to September. Due to increase of water retention time in the dry years, Chlorophyll A concentrations increased in summer so that the reservoir conditions changed from mesotrophic to eutrophic. A similar pattern was observed between the temperature and dissolved oxygen profiles. In the normal year, stratification period included seven months from April to October. Due to decrease of water retention time in reservoir in the normal year, Chlorophyll A concentrations decreased in summer so that the reservoir conditions changed from mesotrophic to oligotrophic condition.

Keywords: Hydrological Changes, Simulation, Ilam Reservoir, CE-QUAL-W2

حرارتی آب در مخزن می‌گردد. هر دو این رخدادها منجر به آن می‌شود که کیفیت آب خروجی از سد همان کیفیت آب ورودی به مخزن نباشد (نظریها و همکاران

مقدمه

ساخت و بهره برداری از مخازن سدها اصولاً منجر به افزایش زمان ماند آب و ایجاد پدیده لایه‌بندی

بر روی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پیکره‌های آبی مورد بررسی با استفاده از مدل‌سازی، امکان‌پذیر است (افشار و سعادت پور 1388). در بین مدل‌های عددی، مدل دوبعدی متوسط‌گیری شده عرضی CE-QUAL-W2 کاربرد وسیعی برای بررسی و پیش‌بینی خصوصیات کیفی آب‌های سطحی از قبیل دریاچه‌ها، مخازن و مصب‌ها در سراسر جهان پیدا نموده است. فنگ و همکاران (2007) به بررسی اثرات جریان و تغییر شرایط آب و هوایی با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 بر روی مخزن آمیستاد در شهر دل ریو در ایالت تگزاس از ایالات جنوبی ایالات متحده آمریکا پرداختند. پس از واسنجی هیدرودینامیک مدل براساس داده‌های ارتفاع سطح آب و دما در سال 2004، به منظور بررسی تغییرات جریان، پنج سناریو مختلف، در اثر تغییر در جریان ورودی روزانه سال 2004 و بدون تغییر در میزان خروجی تعریف کردند. نتایج آنان نشان داد در تمام سناریوها با تغییر دبی ورودی تغییر کمی در دمای لایه سطحی ایجاد شده و دما در لایه‌های پایین فقط در زمان گردش سالیانه مخزن با یکدیگر متفاوت است و به منظور بررسی تغییرات آب و هوایی در آینده با استفاده از خروجی‌های مدل CCC-GCM نحوه تغییرات آبی دمای مخزن را نشان دادند. چانگ و اوه (2006) به واسنجی و صحت‌سنجی مخزن دائمی چونگ با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداختند. آن‌ها با انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ضریب جانپناه باد¹، ضریب شزی و ضریب انتقال حرارت رسوبات توانستند دمای آب را با خطای متوسط مطلق 0/11 تا 1/19 درجه سلسیوس در دوره واسنجی مدل‌سازی کنند. آن‌ها نشان دادند که در سال‌های با بارش نرمال تاثیر دمای آب ورودی خیلی بیشتر از سال‌های خشک می‌باشد. گلد و همکاران (1998) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 دما را در

2009). لایه‌بندی، اختلاط و متغیرهای دیگر در مخازن به شدت وابسته به زمان ماند آب درون مخزن هستند (جورگنسن و همکاران 2005). کاهش در نرخ جریان ورودی باعث افزایش زمان ماند و تغییر در الگوی جریان می‌گردد (کندی و همکاران 2006). افزایش زمان ماند آب درون مخزن سبب افزایش حالت تغذیه گرایی، زیست توده فیتوپلانکتون‌ها و شدت لایه‌بندی حرارتی می‌گردد (جورگنسن و همکاران 2005). لایه‌بندی حرارتی و تغییرات دمای آب اثرات فراوانی در فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی مخازن دارد. تغییرات دمایی سبب ایجاد تغییر در سطح اکسیژن محلول و تغییرات سینماتیکی عکس‌العمل‌های بیوشیمیایی، اثر فوق‌العاده‌ای بر روی فرآیندهای بیولوژیکی دارند. در یک مخزن لایه‌بندی شده میان لایه مانع از انتقال اکسیژن بین ایپولیمنیون و هیپولیمنیون می‌گردد. بنابراین، در طول فصل تابستان میزان اکسیژن در هیپولیمنیون در سطح پایینی قرار می‌گیرد. کاهش اکسیژن محلول در هیپولیمنیون اثرات جدی بر روی فرآیندهای زیستی، یا از طریق سمیت مستقیم بر روی ماهیان یا ارگانسیم‌های کف و یا سمیت به طور غیر مستقیم از طریق محصولات غیرهوازی مواد معدنی، ایجاد می‌کند. شرایط لایه‌بندی در فصول گرم منجر به رهاسازی فسفر از رسوبات می‌گردد (لیندیم و همکاران 2010).

تغییر در فرایندهای طبیعی از جمله تغییرات آب و هوایی و شرایط هیدرولوژیکی و فعالیت‌های انسانی بر روی ساختار لایه‌بندی حرارتی در مخازن اثر می‌گذارد. از جمله اثرات این تغییرات بر روی خصوصیات فیزیکی دریاچه‌ها می‌توان به اثرات آن بر روی ساختار حرارتی و عمق لایه همگن، زمان شروع و پایان لایه‌بندی اشاره نمود که این عوامل به نوبه خود بر روی انتقال مواد مغذی، انتقال رسوبات و فرآیندهای بیولوژیکی اثر می‌گذارند (وانگ و همکاران 2012). امروزه امکان پیش‌بینی اثرات فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی

¹ Wind sheltering coefficient

سد ایلام است. به این منظور، پس از شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول به بررسی اثرات سناریوهای برنامه‌ریزی شده مختلف بر روی لایه‌بندی حرارتی و پارامترهای کیفی با استفاده از مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده عرضی CE-QUAL-W2 پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد ایلام که در جنوب شرقی استان ایلام قرار دارد، از سه زیر حوضه گل‌گل، چاویز و اما تشکیل شده است. این حوضه دارای مختصات جغرافیایی $46^{\circ}20'25''$ تا $48^{\circ}36'58''$ طول شرقی و $33^{\circ}23'53''$ تا $33^{\circ}38'56''$ عرض شمالی می‌باشد. سد مخزنی ایلام از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع از پی 65 متر و طول تاج 162 متر، در 22 کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ایلام و در محل تلاقی سه رودخانه گل‌گل، چاویز و اما واقع شده است. این سد به منظور تامین آب شرب دراز مدت شهر ایلام به میزان 16/8 میلیون مترمکعب در سال با گنجایش 71 میلیون مترمکعب احداث گردیده است. از اهداف دیگر ساخت این سد تامین آب زراعی 6800 هکتار و کنترل و ذخیره سیلاب‌های مخرب رودخانه کنجانچم و بهبود محیط زیست و اکوسیستم منطقه می‌باشد (بی‌نام 1389).

مدل ریاضی

در این مطالعه، از مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت آب در مخزن سد ایلام استفاده شده است. CE-QUAL-W2 مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده عرضی، هیدرودینامیک و کیفیت آب است که نسخه اولیه این مدل در سال 1975 توسط ادینگر² و بوچاک³ با نام LARM (مدل متوسط‌گیری شده عرضی مخازن) توسعه داده شد. این مدل توانایی

مخزن کانونسویل در ایالات متحده شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های دمای بدست آمده در فاصله زمانی آوریل تا نوامبر 1995 که بصورت هفتگی برداشت شده بود، مدل را واسنجی و با داده‌های سال 1988 تا 1994 صحت‌سنجی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل بخوبی توانسته است زمان شروع اختلاط، دوره لایه‌بندی، ضخامت اپیولیمنیون و هیپولیمنیون را در دوره لایه‌بندی و نیز دمای لایه‌ها و تغییرات طولی را شبیه‌سازی کند. وو و همکاران (2004) برای شبیه‌سازی مخزن شیمین در تایوان از مدل CE-QUAL-W2 استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های سال 2000 و 2001، تراز سطح آب، دما و پارامترهای کیفی مانند مواد مغذی، اکسیژن محلول و کلروفیل A را واسنجی و صحت‌سنجی کردند. سپس به شبیه‌سازی کلروفیل A تحت سناریوهای مختلف تخصیص آلاینده پرداختند و نشان دادند که کاهش 90 درصدی تخصیص آلاینده‌ها منجر به تغییر وضعیت مخزن از حالت تغذیه‌گرا به شاداب گردید. ویلیامز (2007) برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول¹ در مخزن پاول در آمریکا از مدل CE-QUAL-W2 استفاده کرد. نظریه‌ها و همکاران (2009) مدل CE-QUAL-W2 را جهت پیش‌بینی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد بختیاری بکار بردند. آن‌ها براساس تغییرات احتمالی در جریان آبدی رودخانه سه سناریو برای سال‌های خشک، نرمال و تر تعریف کردند و نشان دادند که در سال نرمال مخزن دارای یک لایه‌بندی هفت ماهه از اواخر اردیبهشت تا اواخر آذر و در سال خشک دارای یک لایه‌بندی از اواخر فروردین تا اواخر شهریور و مخزن در سال تر به علت عدم تشابه کارکرد با سال‌های خشک و نرمال، تغییرات لایه‌بندی پیش‌بینی شده را ندارد.

هدف از این تحقیق بررسی اثرات تغییر در شرایط هیدرولوژیکی (و به موجب آن تغییر در زمان ماند آب) بر روی لایه‌بندی حرارتی و پارامترهای کیفی آب مخزن

² Edinger

³ Buchak

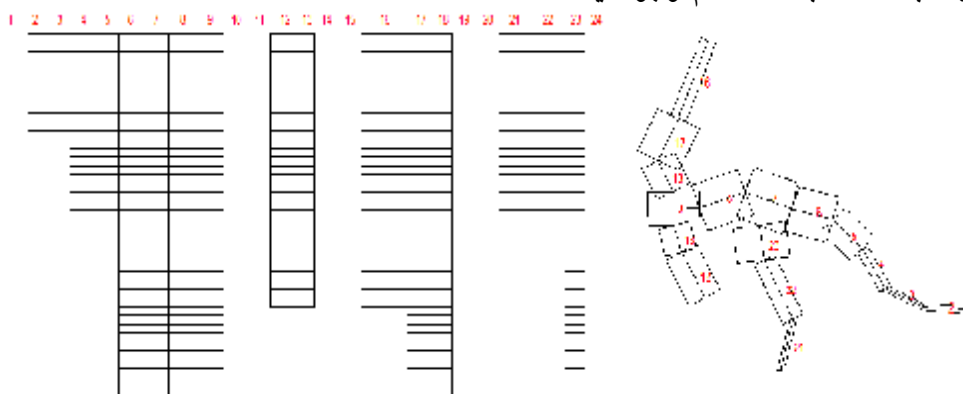
¹ Dissolved oxygen

اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی در محل سد، از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به محل سد یعنی ایستگاه سینوپتیک شهر ایلام که به صورت سه ساعته اندازه‌گیری شده، استفاده شده است. برای تعریف هندسه مخزن، پیکره آبی با چهار انشعاب در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی انشعابات به قطعات 500 تا 700 متری و به لایه‌هایی به عمق یک متر تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل 1). در فایل هندسه مخزن علاوه بر طول، عمق و عرض قطعات، زاویه و چیدمان قرارگیری قطعات، تراز اولیه آب، زبری کف نیز تعریف می‌گردد. مطالعات میدانی انجام شده در مخزن در یک بازه شش ماهه از مرداد تا دی 1388 و در یک بازه سه ماهه از فروردین تا خرداد 1389 در یک نقطه در نزدیکی محل سد و به صورت عمودی انجام شده است. داده‌های سال 1388 برای واسنجی مدل و داده‌های سال 1389 برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شده است. اولین اطلاعات لازم برای مدل‌سازی، دوره و تاریخ آغاز شبیه‌سازی است. شروع مدل‌سازی 12 دی ماه 1387 برابر با اول ژانویه 2009 که در این زمان مخزن در حالت اختلاط کامل قرار دارد، انتخاب گردید. گام زمانی اجرای مدل یک ساعت انتخاب گردید. شرایط مرزی بالادست شامل دبی ورودی، دمای آب ورودی و غلظت پارامترهای کیفی و شرایط مرزی پایین‌دست نیز با دبی خروجی از مخزن به مدل معرفی می‌شود.

شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب، چگالی، سرعت‌های قائم و طولی، دما و پارامترهای کیفی متعدد را دارد. مدل علاوه بر توانایی شبیه‌سازی بیش از 30 پارامتر کیفی دارای قابلیت‌های مهم مانند شبیه‌سازی برای دوره‌های طولانی مدت، مدل‌سازی شاخه‌های متعدد در پیکره‌های آبی با هندسه پیچیده، پیکره‌های آبی متعدد متصل، فاصله‌های متغیر طولی و ارتفاعی در شبکه‌بندی مدل و محاسبات مربوط به پوشش یخ نیز می‌باشد. مدل از شکل متوسط‌گیری شده عرضی معادلات پیوستگی، مومنوم و انتقال استفاده می‌کند. به دلیل فرض همگن بودن جانی، برای پیکره‌های آبی طویل و باریک مناسب است. معادلات حاکم بر آن شامل مومنوم افقی، ارتفاع سطح آب، فشار هیدرواستاتیک، پیوستگی، چگالی آب و انتقال اجزا می‌باشد. این مدل برای مخازن توسعه یافته است، ولی می‌تواند برای رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مصب‌ها و یا ترکیبی از آنها نیز مورد استفاده قرار گیرد (کول و ولز 2008).

اطلاعات اولیه شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی با مدل CE-QUAL-W2 به چهار سری داده شامل پارامترهای هواشناسی، هندسه مخزن، دوره شبیه‌سازی، شرایط مرزی و اولیه نیاز است. داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل درجه حرارت هوا، درجه حرارت نقطه شبنم، پوشش ابر، سرعت و جهت باد است. به علت عدم وجود ایستگاه



شکل 1- پلان قطعه‌بندی و شبکه‌بندی قطعات و لایه‌ها در مدل CE-QUAL-W2.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی هیدرودینامیک

به منظور واسنجی هندسی مدل و رسیدن به منحنی‌های سطح- حجم مخزن در پارامتر عرض مخزن اصلاحاتی انجام شد. پس از انجام واسنجی هندسه مخزن و تطابق هندسه مخزن با منحنی حجم- سطح- ارتفاع واقعی مخزن، برای انجام واسنجی تراز سطح آب با استفاده از داده‌های شرکت مدیریت منابع آب، تراز سطح آب در دوره واسنجی با خطای متوسط مطلق $(AME)^1$ 0/05 متر و در دوره صحت‌سنجی با خطای متوسط مطلق 0/04 متر شبیه‌سازی شد. شکل 2 مقایسه منحنی حجم ارتفاع واقعی با مقادیر شبیه‌سازی شده مخزن سد ایلام را نشان می‌دهد. شکل 3 مقایسه بین ارتفاع سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده را در دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که در دوره واسنجی ارتفاع سطح آب به تدریج کاهش می‌یابد تا اینکه در اواخر ماه‌های پاییز به حداقل مقدار خود می‌رسد. در این دوره میزان برداشت آب از مخزن بیشتر از نرخ ورودی به مخزن می‌باشد. پس از آن در دوره صحت‌سنجی به طور مرتب سطح آب درون مخزن افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود در اواخر بهار در سال 1389 می‌رسد.

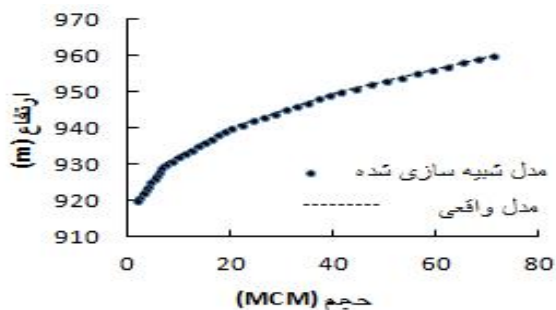
قبل از شبیه‌سازی پروفیل دما، ضرایب انقراض نور با استفاده از داده‌های برداشت شده از عمق دیسک سکی و معادله (1) که توسط ویلیامز و همکارانش در سال 1998 ارائه شده (اعتماد شهیدی و همکاران 2009)، محاسبه شده است که مقادیر بدست آمده از ضرایب انقراض نور با توجه به داده‌های عمق دیسک سکی و معادله (1) در جدول 1 آورده شده که در آن λ ضریب انقراض نور و Z_{secci} عمق دیسک سکی برحسب متر است. براساس اندازه‌گیری‌های درجه حرارت آب سد ایلام و پس از سعی و خطاهای مکرر،

مقادیر نهایی تمامی ضرایبی که بر روی حرارت اثر می‌گذارند مطابق جدول 2 به دست آمده است. در فرآیند واسنجی حرارت و پارامترهای کیفی، سعی شده است انتخاب ضرایب واسنجی براساس ضرایب به کار گرفته شده در موارد مشابه (کول و ولز 2008، افشار و سعادت پور 1388) و استفاده از مقادیر پیش فرض مدل صورت گیرد. شکل 4 و 5 به ترتیب نتایج پروفیل‌های عمودی دمای آب شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده را در دوره واسنجی و صحت‌سنجی و خطاهای مربوطه را نشان می‌دهند.

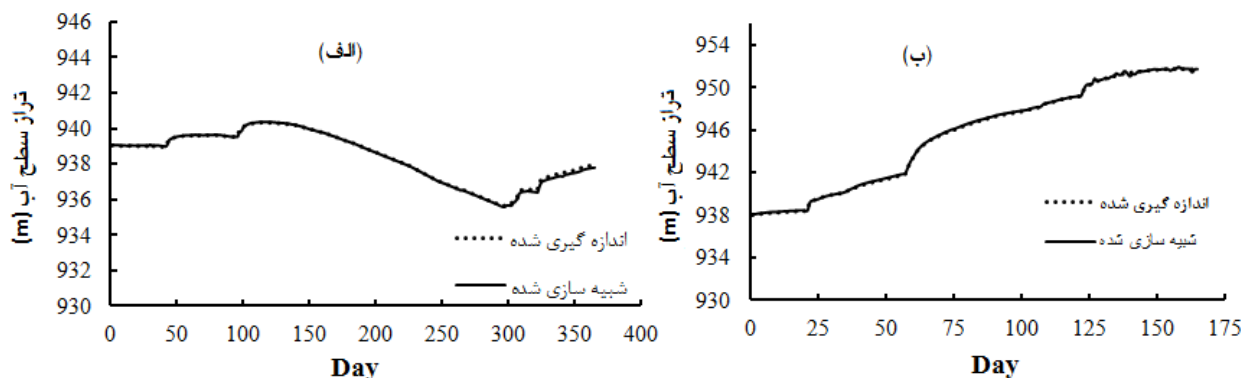
$$\lambda = 1.11 (Z_{secci}^{-0.73}) \quad [1]$$

نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که مدل قادر است دما را در دوره واسنجی با خطای متوسط مطلق $0/73^\circ C$ و در دوره صحت‌سنجی با خطای متوسط مطلق $1/18^\circ C$ شبیه‌سازی کند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده حرارت، لایه‌بندی قابل توجهی در مرداد ماه در مخزن شکل می‌گیرد. دمای آب در لایه‌های سطحی در مرداد ماه به $29/3$ درجه سلسیوس می‌رسد و ترموکلاین از عمق 4 متری مخزن تشکیل شده و اختلاف دما در لایه‌های سطحی و عمیق در این ماه به حدود 13 درجه سلسیوس می‌رسد. با سردتر شدن هوا دما در لایه‌های سطحی کاهش یافته و از شدت لایه‌بندی کاسته شده تا اینکه در مهرماه دما در لایه‌های سطحی به $20/8$ درجه سلسیوس می‌رسد اختلاف دما در لایه‌های سطحی و عمیق به $5/6$ درجه سلسیوس می‌رسد و با کاهش دما، در آذر ماه مخزن به حالت اختلاط کامل می‌رسد.

¹Average Mean Error



شکل 2- مقایسه نمودار حجم ارتفاع واقعی و شبیه سازی شده مخزن سد ایلام.



شکل 3- مقایسه ارتفاع سطح آب شبیه سازی شده و اندازه گیری شده (الف) دوره واسنجی (ب) دوره صحت سنجی.

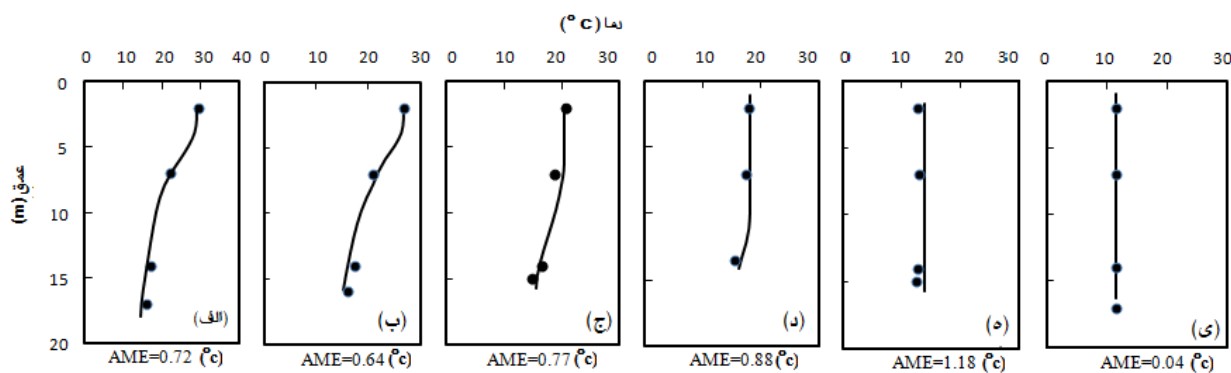
جدول 1- مقادیر ضرایب انقراض نور محاسبه شده از معادله (1).

تاریخ نمونه برداری	عمق دیسک سکی (m)	ضریب انقراض نور (m^{-1})
1388/5/15	1	1/11
1388/5/30	0/95	1/15
1388/6/15	1/2	0/97
1388/6/30	1/3	0/92
1388/7/15	1/5	0/83
1388/7/30	1/45	0/85
1388/8/15	1/10	1/40
1388/8/30	0/8	1/13
1388/9/15	0/8	1/13
1388/9/30	0/6	1/16
1388/10/15	2/2	0/62
1388/10/30	2	0/67

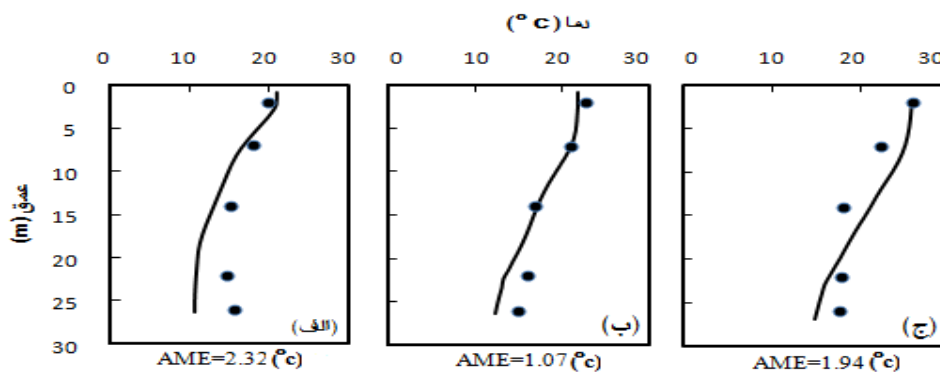
جدول 2- مقادیر نهایی پارامترهای موثر در واسنجی حرارت مخزن سد ایلام.

پارامتر	علامت اختصاری	کول و ولز	مخزن سد ایلام
ویسکوزیته گردابه افقی ($m^2 sec^{-1}$)	AX	1	1
پخش گردابه افقی ($m^2 sec^{-1}$)	DX	1	1
ماکزیم لزجت قائم آشفته ($m^2 sec^{-1}$)	AZ _{max}	0/0001	0/001
ضریب پوشش باد	Wsc	0/85	متغیر
ضریب سایه اندازی	SHD	1	1
ضریب تبخیر a در تابع باد	AFW	9/2	3/4
ضریب تبخیر b در تابع باد	BFW	0/46	1/7
ضریب تبخیر c در تابع باد	CFW	2	2
ضریب تبادل حرارت در کف ($W m^2 sec^{-1}$)	CBHE	0/3	0/5
دمای رسوب ($^{\circ} C$)	TSED	11	14
ضریب اصطکاک کف شزی	Fricc	70	70

شکل 4 - مقایسه پروفیل‌های دمای عمودی شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در سال 1388.



(الف): مردادماه (ب): شهریورماه (ج): مهرماه (د): آبان‌ماه (د): آذرماه (ی): دی‌ماه.



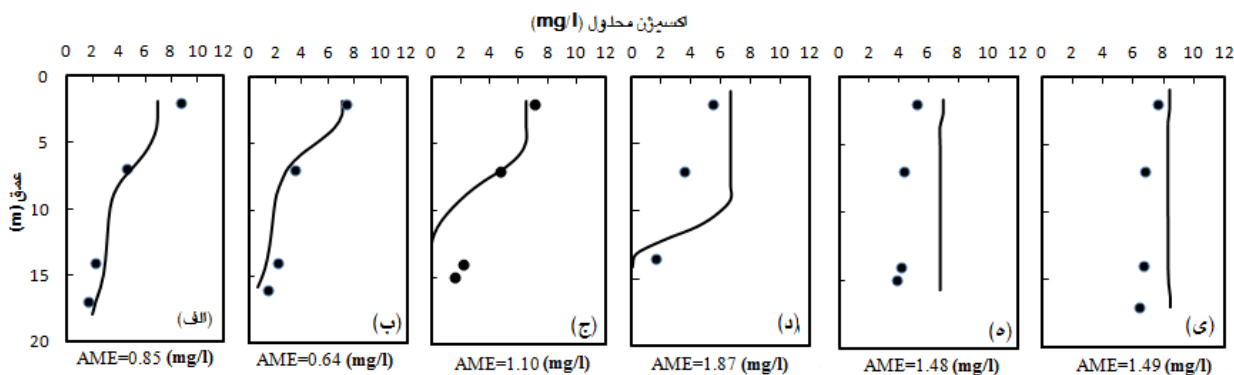
شکل 5 - مقایسه پروفیل‌های دمای عمودی شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در سال 1389

(الف): فروردین ماه (ب): اردیبهشت ماه (ج): خرداد ماه.

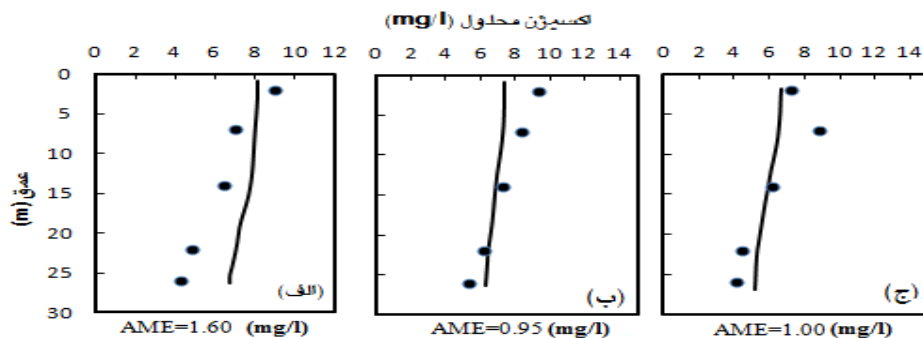
شبیه‌سازی اکسیژن محلول

فرآیندهای مهم اثرگذار بر روی غلظت اکسیژن محلول شامل، انتقال، تجدید و مصرف هستند. انتقال اکسیژن محلول تحت تاثیر هیدرودینامیک مخزن می‌باشد. تایید هیدرودینامیک مخزن از طریق مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و شبیه‌سازی شده دما، شوری و پارامترهای کیفیت آب صورت می‌گیرد. تجدید اکسیژن محلول در مخزن از طریق: هواگیری از طریق باد، غلظت اکسیژن محلول ورودی و فتوسنتز صورت می‌گیرد. هواگیری از طریق باد در مدل با استفاده از معادلات هواگیری محاسبه می‌شود. تمامی معادلات هواگیری ارائه شده تابعی از سرعت باد و عمق آب

هستند (ویلیامز 2007). در واسنجی مدل از معادله هواگیری ارائه شده توسط بنک در سال 1975، استفاده شده است (کول و همکاران 2008). عمل فتوسنتز در فرآیندهای مرتبط با جلبک در مدل گنجانده شده است. از مهمترین منابع مصرف کننده اکسیژن در مخزن، تغییرات انحلال بواسطه دما، تنفس جلبک و نیاز اکسیژن رسوبات (SOD) می‌باشد. شکل 6 و 7 به ترتیب نتایج پروفیل‌های عمودی اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده را در دوره واسنجی و صحت سنجی نشان می‌دهند.



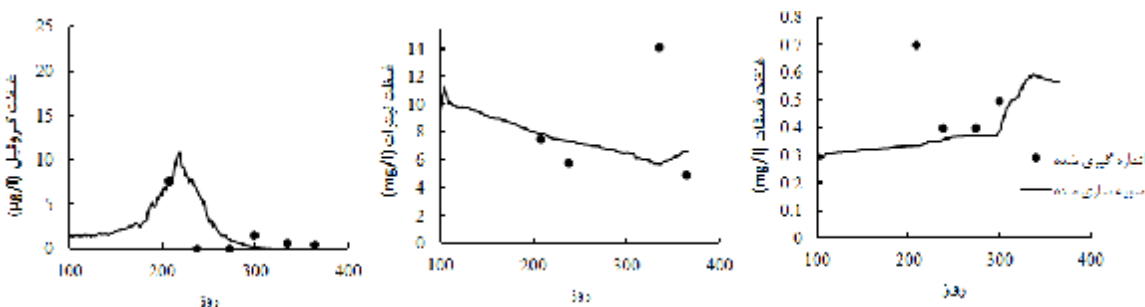
شکل 6 - مقایسه پروفیل‌های عمودی اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده (-) با اندازه‌گیری شده (•) در سال 1388
 الف): مردادماه (ب): شهریورماه (ج): مهرماه (د): آبان ماه (ه): آذر ماه (ی): دی ماه.



شکل 7 - مقایسه پروفیل‌های عمودی اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده (-) با اندازه‌گیری شده (•) در سال 1389
 الف): فروردین ماه (ب): اردیبهشت ماه (ج): خرداد ماه.

شبیه‌سازی پارامترهای کیفی

نتایج مدل‌سازی کیفیت آب با داده‌های اندازه‌گیری شده در عمق 2 متری مخزن و در نزدیکی محل سد در شکل 8 نشان داده شده است. رشد فیتوپلانکتون تحت تاثیر هیدرودینامیک و زمان ماند در مخزن می‌باشد. برای واسنجی پارامتر جلبک، حداکثر نرخ رشد جلبک برای 0/58 1/day و حداکثر نور اشباع $50W/m^2$ کالیبره شده و بقیه پارامترها مقادیر پیش فرض در نظر گرفته



شکل 8 - غلظت کلروفیل A و نیترات و فسفات در عمق 2 متری از سطح آب در طی دوره مدل‌سازی.

در اثر کاهش دبی آب ورودی به مخزن براساس سال خشک، در سناریو دوم به بررسی رفتار مخزن براساس دبی متوسط ورودی به مخزن براساس سال آبی نرمال پرداخته شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرارتی و کیفی مخزن سد ایلام در سال خشک که در شکل 10 ارائه شده‌اند نشان می‌دهند که در ابتدای سال میلادی دمای آب و غلظت اکسیژن محلول به دلیل اختلاط کامل، در تمامی ترازهای مخزن یکسان است. با شروع فصل بهار و گرم شدن هوا، از اوایل فروردین، لایه‌بندی حرارتی در مخزن تشکیل شده، در اثر گرادیان حرارتی بوجود آمده در مخزن ترموکلاین در عمق 3 متری مخزن با ضخامت 3 متر تشکیل شده، با گرمتر شدن هوا، ضخامت لایه ترموکلاین و شدت لایه‌بندی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در تیرماه ضخامت این لایه به 11 متر و تغییرات $15^{\circ}C$ دما در 15 متر بین لایه‌های سطحی و عمیق مشاهده می‌شود. با گذشتن از اواسط تابستان و خنک

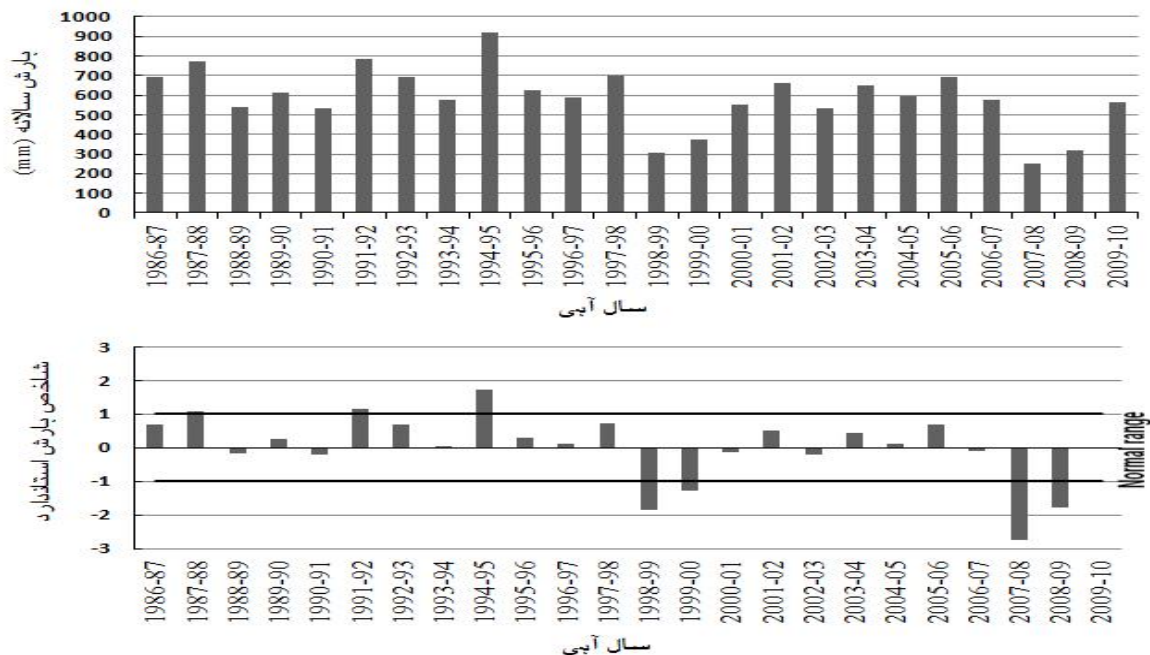
سناریوهای مدیریتی

شاخص بارش استاندارد¹ (SPI) یکی از مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های پیشنهاد شده برای مطالعه خشکسالی و ترسالی است که امروزه در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص در سال 1993 توسط مککی و همکارانش معرفی و برای اولین بار آن را در ایالت کلرادو مورد استفاده قرار دادند (بذرافشان و همکاران 1390). نتایج بررسی تغییرات بارندگی سالانه از سال آبی 66-1365 تا 90-1389 در شکل 9 ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از روش شاخص بارش استاندارد سال آبی 87-1386 به عنوان خشک‌ترین سال و سال آبی 84-1383 به عنوان سال آبی نرمال در نظر گرفته شده است. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، براساس تغییرات شرایط هیدرولوژیکی بر روی مخزن سد، دو سناریو تعریف شد. سناریو اول به بررسی رفتار مخزن

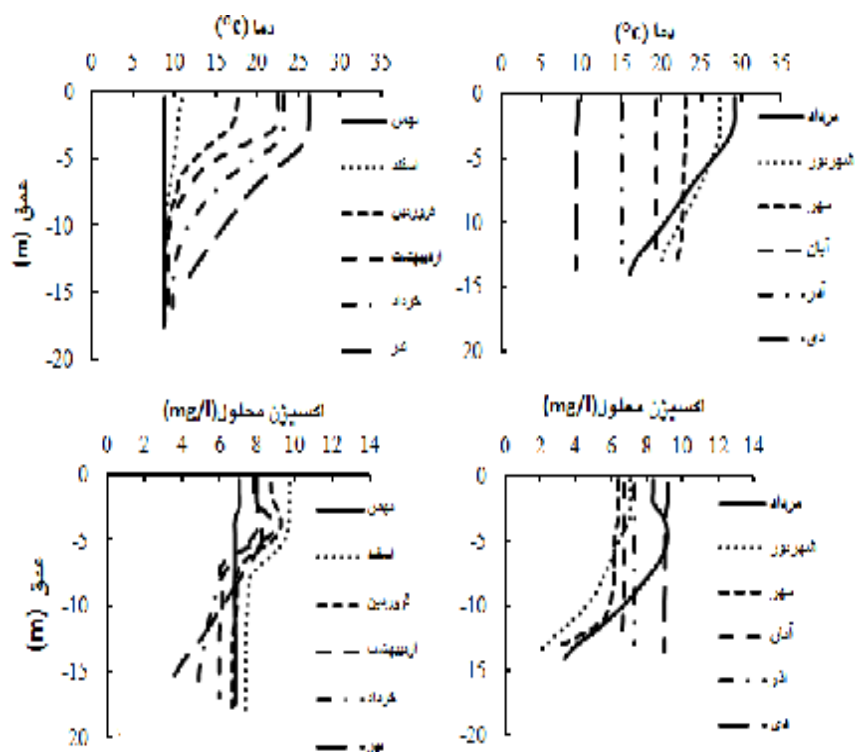
¹ Standardized Precipitation Index

اختلاط در مخزن سد اتفاق می‌افتد و غلظت اکسیژن محلول نیز در تمام عمق مخزن یکنواخت می‌شود. مخزن از نوع مونومکتیک گرم بوده و در مدت 6 ماه از سال لایه‌بندی در مخزن و در بقیه اوقات سال اختلاط در مخزن مشاهده می‌شود. یکی از عوامل کنترل کننده رشد جلبک‌ها، زمان ماند آب درون مخزن است که در سال خشک به علت بالا رفتن زمان ماند آب، غلظت کلروفیل A در ماه‌های گرم سال نسبت به زمان مشابه در سال 1388 تقریباً 4 برابر شده و باعث تغییر وضعیت مخزن از حالت مزوتروفیک به اوتروفیک می‌گردد (شکل 11). غلظت کلروفیل A در لایه‌های سطحی بین 0/001 تا 21/8 میکروگرم بر لیتر تغییر می‌کند. با گرم شدن هوا غلظت کلروفیل A افزایش می‌یابد و با سرد شدن هوا غلظت کلروفیل A کاهش می‌یابد.

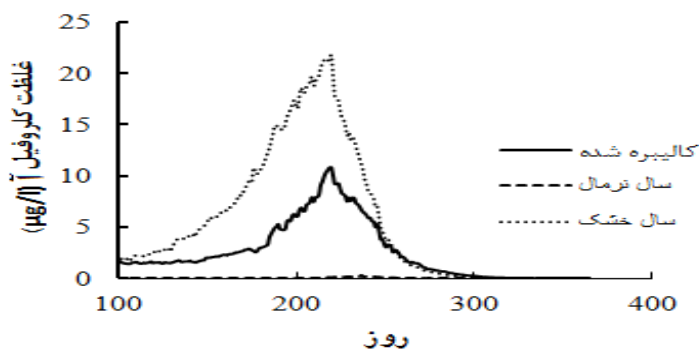
شدن هوا، ترموکلاین شروع به پایین رفتن می‌کند و در نیمه شهریورماه در عمق 9 متری مخزن تشکیل می‌شود. حداکثر دما در لایه سطحی در مرداد ماه به 29 درجه سلسیوس می‌رسد. لایه‌بندی حرارتی تا نیمه شهریور ماه ادامه دارد. همزمان با شروع لایه‌بندی حرارتی در مخزن غلظت اکسیژن محلول در عمق مخزن کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در فصل تابستان، مقدار اکسیژن محلول در لایه‌های پایینی کمتر از مقدار مجاز آن (5 mg/l) می‌شود و منجر به ایجاد شرایط بی‌هوازی در مخزن می‌گردد. در این فصل ترموکلاین مانع از انتقال اکسیژن از لایه‌های بالاتر به لایه‌های پایینی می‌شود. دامنه تغییرات اکسیژن محلول در لایه‌های مخزن بین 2 تا 9 میلی گرم در لیتر می‌باشد. تغییرات ساختار لایه‌بندی اکسیژن محلول مشابه لایه‌بندی حرارتی در مخزن می‌باشد. با آغاز دوره سرما مجدداً



شکل 9- تغییرات بارش سالانه و شاخص بارش استاندارد.



شکل 10- تغییرات لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول در سال خشک.



شکل 11- تغییرات غلظت کلروفیل A در سال‌های خشک و نرمال.

متر مشاهده می‌شود و حداکثر دمای لایه سطحی در مرداد ماه به 30/1 درجه سلسیوس می‌رسد. لایه‌بندی حرارتی تا مهر ماه ادامه می‌یابد. از اواسط آبان زوال لایه‌بندی شروع شده و در آذر ماه مجدداً اختلاط در مخزن ایجاد شده است. در سال نرمال، در مدت 7 ماه از سال لایه‌بندی در مخزن مشاهده می‌شود. شکل نشان می‌دهد که نحوه تغییرات اکسیژن محلول مشابه

شکل 12 نشان می‌دهد که در سال نرمال مشابه سال خشک در ابتدای سال میلادی اختلاط در مخزن اتفاق افتاده و لایه‌بندی در فروردین ماه شروع شده اما لایه‌ها (ایپولیمنیون، متالیمنیون، هیپولیمنیون) از هم متمایز نیستند. با گرمتر شدن هوا، لایه‌بندی شدیدتر شده تا اینکه در مرداد ماه به حداکثر مقدار خود می‌رسد به نحوی که تغییرات 15/3 درجه ای دما در 32

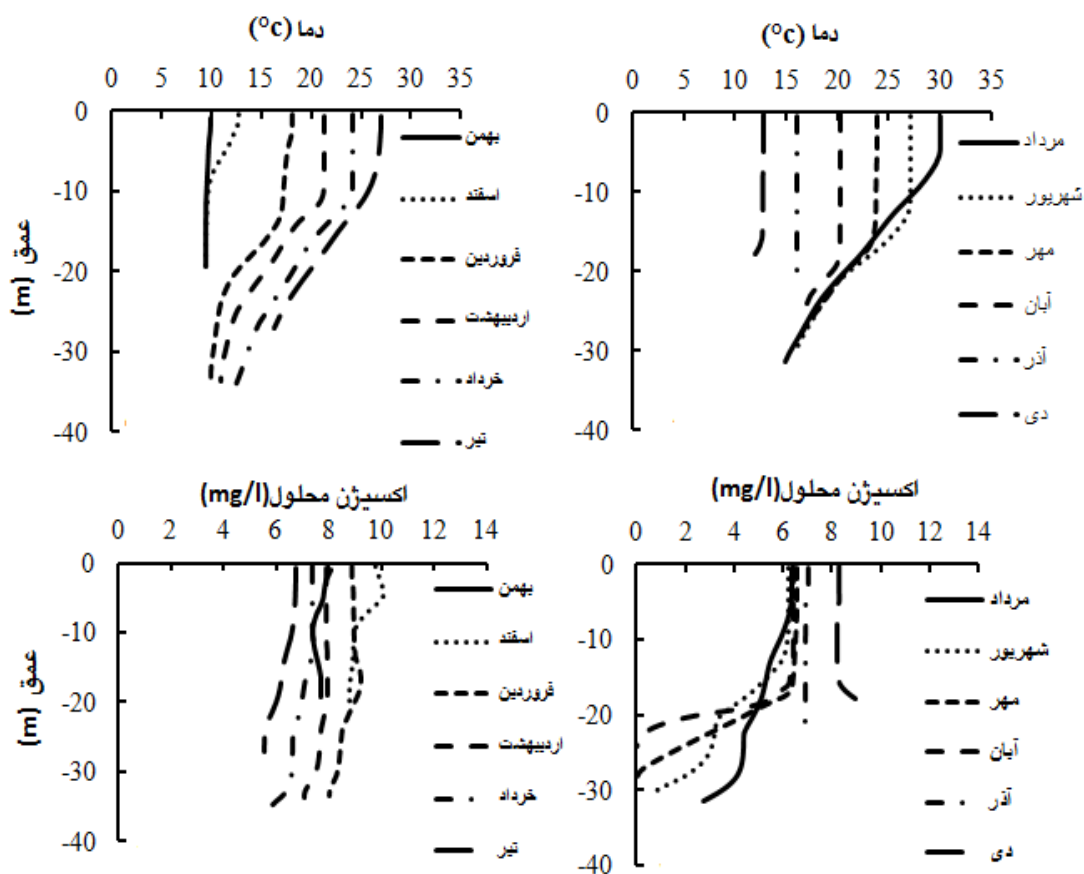
سناریوهای اجرا شده زمان شروع لایه‌بندی تغییر نکرده اما زمان پایان آن متغیر است. مطابق با نتایج بدست آمده در مخزن سد ایلام نیز در اثر اجرای سناریوها زمان شروع لایه‌بندی یکسان اما زمان پایان آن متفاوت است. فنگ و همکاران (2007) پس از واسنجی هیدرودینامیک مدل مخزن آمیستاد به منظور بررسی تغییرات جریان، پنج سناریو مختلف، در اثر تغییر در جریان ورودی روزانه و بدون تغییر در میزان خروجی تعریف کردند. آن‌ها نشان دادند زمانی که جریان ورودی به مخزن کاهش می‌یابد، گردش در مخزن نسبت به زمانی که جریان ورودی به مخزن افزایش یافته یک ماه زودتر اتفاق می‌افتد. گردش در مخزن سد ایلام نیز در سال خشک یک ماه زودتر از سال نرمال اتفاق می‌افتد. در مدل مخزن آمیستاد داده‌های هواشناسی در تمام سناریوها ثابت در نظر گرفته شد، به همین دلیل تغییرات کمی در دما در لایه سطحی مشاهده گردید. در مخزن سد ایلام در دو سناریو اجرا شده از اطلاعات هواشناسی مربوط به هر کدام از این سال‌ها استفاده شده است. مطالعه خیامی و همکاران (1388) با هدف بررسی چگونگی روند تغییرات شرایط کیفی مخزن سد طرق در شهر مشهد با استفاده از مدل هیدرودینامیکی یک بعدی DYRESM انجام پذیرفته است. بدین منظور از منحنی‌های میانگین متحرک سه و پنج ساله دبی جریان، برای تعیین دوره شبیه‌سازی استفاده شده است ولی در تحقیق حاضر از شاخص SPI برای تعیین دوره‌های ترسالی و خشکسالی استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که در سال تر به علت بالا بودن تراز سطح آب لایه‌بندی حرارتی به صورت کامل و در سال خشک به علت پایین آمدن تراز آب لایه‌بندی حرارتی جزئی در مخزن ایجاد می‌گردد که با نتایج بدست آمده در مخزن سد ایلام متفاوت است. در تحقیق دیگری که توسط نظریها و همکاران (2009) انجام شد، به بررسی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد در دست احداث بختیاری پرداختند. آن‌ها

دما می‌باشد و مقدار آن بین 0 تا 9/7 میلی‌گرم در لیتر در نوسان می‌باشد. از اسفندماه میزان اکسیژن محلول در لایه‌های پایینی، کاهش می‌یابد تا اینکه در تیرماه مقدار اکسیژن محلول در لایه‌های پایینی کمتر از مقدار مجاز شده، اما هنوز شرایط بی‌هوازی کاملاً حاکم نشده است. میزان اکسیژن محلول در لایه‌های پایینی خصوصاً در تیرماه و مردادماه هشدار دهنده و نزدیک به شرایط بی‌هوازی می‌شود. شرایط بی‌هوازی در کف مخزن از شهریور تا آبان ادامه می‌یابد و در آذر ماه هم‌زمان با ایجاد اختلاط در مخزن، میزان اکسیژن محلول نیز در عمق مخزن یکنواخت می‌شود. در سال نرمال به علت پایین آمدن زمان ماند در مخزن غلظت کلروفیل A در تابستان کاهش می‌یابد و باعث تغییر وضعیت مخزن از حالت مزوتروفیک به اولیگوتروفیک می‌گردد (شکل 11). با توجه به اثرات تشدید کننده زمان ماند طولانی بر روی رشد جلبک‌ها در مخزن سد ایلام، کنترل زمان ماند آب درون مخزن، گام مهمی در بهبود کیفیت آب درون مخزن می‌تواند باشد. در سال خشک و نرمال در فصل تابستان به علت تشکیل لایه‌بندی حرارتی در مخزن، ترموکلاین مانع از انتقال اکسیژن از لایه‌های بالاتر به لایه‌های پایین‌تر می‌گردد، که این امر منجر به توسعه شرایط بی‌هوازی در مخزن در لایه‌های پایینی می‌گردد. السی (2008) نیز در بررسی‌های خود در مورد اثرات لایه‌بندی حرارتی و اختلاط بر روی کیفیت آب به این موضوع اشاره کرد.

وانگ و همکاران (2012) به بررسی اثرات تغییر در شرایط هیدرولوژیکی و آب و هوایی بر روی لایه‌بندی حرارتی در مخزن لیکسی در چین پرداختند. برای مشخص کردن اثرات تغییر در شرایط هیدرولوژیکی و آب و هوایی از مدل هیدرودینامیک سه بعدی ELCOM استفاده کردند. مشابه با مخزن سد ایلام پس از واسنجی و صحت سنجی مدل برای نشان دادن پاسخ سیستم به تغییرات در شرایط هیدرولوژیکی و آب و هوایی سناریوهای مختلفی را اجرا نمودند. در تمام

نرمال و تر تعریف کردند. لایه‌بندی حرارتی در سال خشک مشابه با مخزن سد ایلام از فروردین ماه شروع و تا شهریور ماه ادامه دارد. نتایج لایه‌بندی حرارتی برای سال نرمال نیز نشان از یک لایه‌بندی هفت ماهه دارد که از لحاظ شروع و پایان زمان لایه‌بندی حرارتی با مخزن سد ایلام متفاوت است.

به دلیل عدم شکل‌گیری مخزن و عدم وجود اطلاعات در مورد تراز آب و دمای آب مخزن، واسنجی مدل را انجام ندادند ولی در مخزن سد ایلام واسنجی و صحت‌سنجی مدل براساس داده‌های اندازه‌گیری شده ارتفاع سطح آب، دما و اکسیژن محلول در سال 1388 و 1389 انجام گرفت. آن‌ها براساس تغییرات احتمالی دبی رودخانه بختیاری سه سناریو برای سال‌های خشک،



شکل 12- تغییرات لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول در سال نرمال.

داده‌های فروردین تا خرداد 1389 انجام گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان دهنده رخداد پدیده واژگونی در مخزن سد ایلام در آذر ماه می‌باشد. با گرم شدن هوا، غلظت کلروفیل A افزایش می‌یابد و در مرداد ماه به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن با کاهش دما روند کاهشی می‌یابد. تغییرات ساختار لایه‌بندی اکسیژن

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت آب در مخزن سد ایلام از مدل دوبعدی متوسط‌گیری شده عرضی CE-QUAL-W2 استفاده شده است. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های مرداد تا دی‌ماه 1388 و صحت‌سنجی مدل با استفاده از

تشکیل می‌گردد. به علت پایین بودن عمق آب مخزن در سال خشک، گردش مخزن از مهر شروع شده است. در این سال به علت بالا رفتن زمان ماند غلظت کلروفیل A در ماه‌های گرم سال افزایش یافته و باعث تغییر وضعیت مخزن از حالت مزوتروفیک به اوتروفیک می‌شود، در نتیجه شرایط کیفی مناسب را به لحاظ رنگ، طعم و بو برای مصارف مختلف، بخصوص آشامیدن، ندارد. در سال نرمال، لایه‌بندی در مخزن اتفاق افتاده اما لایه‌ها (ایپولیمینون، متالیمینون، هیپولیمینون) از هم متمایز نیستند. مشابه نتایج سال خشک، تغییرات ساختار لایه‌بندی اکسیژن محلول مشابه لایه‌بندی حرارتی در مخزن می‌باشد. در این سال گردش در آذر ماه اتفاق می‌افتد و به علت زمان ماند کم (کمتر از یکسال) غلظت کلروفیل A کاهش یافته و باعث تغییر وضعیت مخزن از حالت مزوتروفیک به الیگوتروفیک می‌شود.

محلول مشابه لایه‌بندی حرارتی در مخزن می‌باشد و در زمان لایه‌بندی، مقدار اکسیژن محلول در لایه‌های پایینی کمتر از مقدار مجاز آن (5 mg/l) می‌باشد که این امر منجر به ایجاد شرایط بی‌هوایی در لایه‌های پایینی مخزن می‌گردد. در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات شرایط هیدرولوژیکی بر روی مخزن سد، پس از واسنجی و صحت سنجی مدل، دو سناریو تعریف شد. سناریو اول به بررسی رفتار مخزن در اثر کاهش دبی آب ورودی به مخزن و افزایش زمان ماند و در سناریو دوم به بررسی رفتار مخزن براساس دبی متوسط ورودی به مخزن و کاهش زمان ماند پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده از سناریوهای سال خشک و نرمال مشاهده می‌شود که شدت لایه‌بندی در سال خشک به علت زمان ماند طولانی، بیشتر و مدت زمان آن کوتاه‌تر است. لایه‌بندی حرارتی در مخزن به صورت کامل تشکیل شده و سه لایه حرارتی مجزا

منابع مورد استفاده

- افشار ع و سعادت پور م، 1388. تغذیه گرایي مخازن سدها: مدل‌سازی دوبعدی مخزن سد کرخه. مجله آب و فاضلاب، جلد سوم، شماره 71، صفحه‌های 80 تا 93.
- بذرافشان ا، محسنی ساروی م، ملکیان آ و معینی ا، 1390. بررسی وضعیت خشکسالی استان گلستان با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI). فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد 18، شماره 3، صفحه‌های 395 تا 407.
- بی‌نام، 1389. گزارش مطالعات تکمیلی آب شرب سد ایلام، مهندسین مشاور مه‌اب قدس.
- خیامی م، دانش ش، خدائشناس س و داوری ک، 1388. شبیه سازی شرایط کیفی مخازن سدها (مطالعه موردی - مخزن سد طرق). مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 23، شماره 1، صفحه‌های 17 تا 29.
- Chung SW and Oh Jk, 2006. Calibration of CE-QUAL-W2 for a monomictic reservoir in a monsoon climate area. *Water Science and Technology* 54(11-12): 29-37.
- Cole TM and Wells SA, 2008. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6. Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland.
- Elci C, 2008. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. *limnology* 9 (2): 135-142.
- Etemad-Shahidi A, Afshar A, Alikia H and Moshfeghi H, 2009. Total dissolved solid modeling; Karkheh reservoir case example. *International Journal of Environmental Research* 3(4): 671-680.
- Fang X, Shrestha R, Groeger A, Lin CJ and Jao M, 2007. Simulation of impact of streamflow and climate conditions on Amistad reservoir. *Contemporary Water Research and Education* 137 (1): 14-20.
- Gelda RK, Owens EM, and Effler SW, 1998. Calibration, verification, and an application of a two-dimensional hydrothermal model [CE-QUAL-W2(t)] for Cannonsville Reservoir. *Lake and Reservoir Management* 14 (2-3): 186-196.

- Jorgensen SE, Loffler H, Rast W and Straskraba M, 2005. Lake and Reservoir Manegment. Elsevier Science Ltd, Amsterdam, Holland.
- Kennedy MG, Ahlfeld DP, Schmidt DP and Tobiason JE, 2006. Three-dimensional modeling for estimation of hydraulic retention time in a reservoir. *Environmental Engineering* 132 (9): 976-984.
- Lindim C, Hayterb EJ, Pinhoc JLS and Vieirad JMP, 2010. Modeling thermal structure variations in a stratified reservoir. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 5-8 July, Ottawa, Canada
- Nazariha M, Danaei E, Hashemi SH and Izad Doustdar AH, 2009. Prediction of thermal stratification in proposed Bakhtyari reservoir with CE-QUAL-W2. Pp. 3941-3948 *World Environmental and Water Resources Congress*. 17-21 May, Kansas City, Missouri.
- Wang S, Qian X, Han BP, Luo LC and Hamilton DP, 2012. Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China. *Water Research* 46 (8): 2591-2604.
- Williams NT, 2007. Modeling dissolved oxygen in Lake Powell using CE-UAL-W2. M.Sc.Thessis, Brigham Young University.
- Wu R-S, Liu W-C, and Hsieh W-H, 2004. Eutrophication modeling in Shihmen reservoir. Taiwan. *Environmental Science and Health Part A* 39(6): 1455-1477.