

مطالعات شبیه‌سازی تغییرات کیفی آب مخزن سد لتیان

(دریافت ۸۰/۱۰/۱۶ پذیرش ۸۱/۱۱/۸)

محمد ارحامی* مسعود تجریشی** احمد ابریشم چی***

چکیده

سد لتیان یکی از منابع مهم تأمین آب شرب شهر تهران است، که حدود ۳۰٪ آب شرب شهر را تأمین می‌کند. با توجه به ساخت و سازهای بی‌رویه در اطراف و بالادست مخزن سد و در حوزه رودخانه جاجرود که مهم‌ترین روخانه منتهی به سد می‌باشد و ورود بدون کنترل فاضلاب‌ها و زباله‌های ساکنین به داخل رودخانه، بروز مشکلات زیست محیطی در مخزن سد بسیار محتمل به نظر می‌رسد. بنابراین در این مطالعه بررسی وضعیت کنونی تغییرات کیفی مخزن سد لتیان با شبیه‌سازی تغییرات لایه‌بندی حرارتی، اکسیژن محلول و املاح محلول در آن به وسیله مدل HEC-5Q انجام گرفت. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مخزن سد لتیان دارای یک دوره لایه‌بندی می‌باشد، که از ابتدای سال شروع به شکل گرفتن کرده و در حدود آبان‌ماه اختلاط کامل در مخزن رخ می‌دهد. تغییرات اکسیژن محلول در مخزن بین ۱ تا ۱۲ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد که بحرانی‌ترین حالت آن در اواخر تابستان و در کف مخزن رخ می‌دهد. تغییرات غلظت املاح محلول (TDS) در مخزن سد تقریباً بین ۱۲۵ تا ۲۲۰ میلی‌گرم در لیتر بوده که بیشتر تحت تاثیر بارندگی در حوزه و اختلاط ستون آب در مخزن است. جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل، از نتایج ۸ دوره اندازه‌گیری میدانی از آب مخزن سد لتیان، در طی سال ۱۳۸۱-۱۳۸۰ استفاده شده است.

کلمات کلیدی: لایه‌بندی، شبیه‌سازی کیفی مخزن، سد لتیان، مدل HEC-5Q.

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت، بیش از پیش توجه محققان و برنامه‌ریزان را به مسئله تأمین آب معطوف ساخته است. نگاهی جامع به آمار موجود نشان می‌دهد که علاوه بر مسئله کمبود آب، بحران کیفی آب نیز دامن‌گیر جوامع مختلف شده یا به زودی خواهد شد.

سدها از دیرباز یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب بوده‌اند. ایجاد مخزن سدها اثرات ژرفی بر محیط زیست بالا دست و پایین دست رودخانه و کیفیت آب دارند [۶]. برخی از این اثرات ناشی از فرآیندها و پدیده‌های خاص داخل مخزن می‌باشد [۸]. تغییرات کیفیت آب در دریاچه‌ها و مخازن در نتیجه فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی مواد مختلف از قبیل مواد مغذی، رسوبات و مواد سمی در محیطی کاملاً لایه‌بندی شده اتفاق می‌افتد [۴].

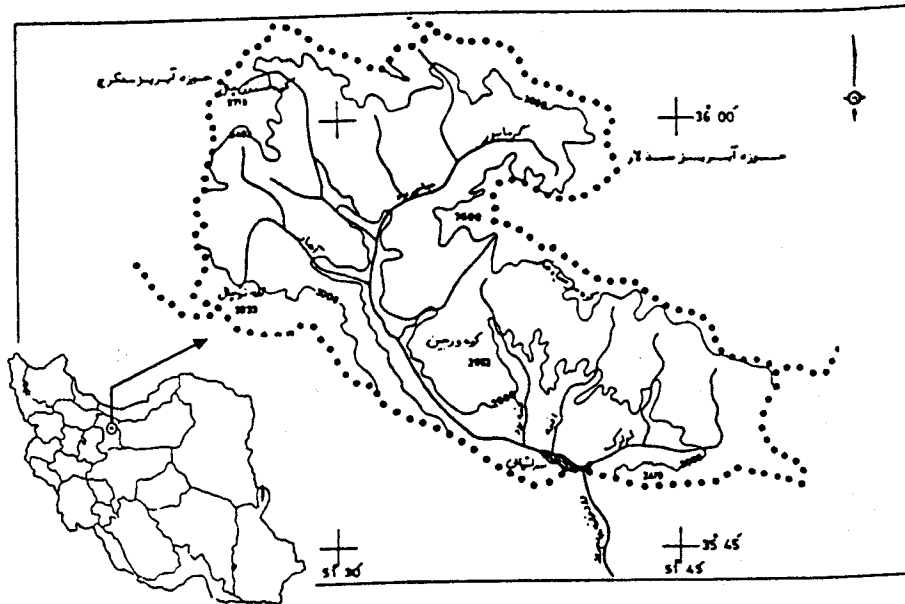
مهم‌ترین پدیده‌ای که موجب تغییرات فصلی کیفیت آب مخازن سدها می‌شود، لایه‌بندی حرارتی است [۳]. این پدیده ممکن است، اثرات نامطلوبی بر کیفیت آب خروجی از مخزن بگذارد. تغییرات شدید دما، چگالی و املاح

محلول در عمق مخزن، کم شدن غلظت اکسیژن محلول، طمع و بوی نامطبوع آب از پیامدهای ایجاد لایه‌بندی حرارتی در مخزن سدهاست [۷].

سد لتیان در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی تهران بر روی رودخانه جاجرود قرار دارد (شکل ۱). ساختمان این سد در سال ۱۳۴۲ آغاز شد و از سال ۱۳۴۶ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هدف از ساخت این سد، تأمین آب شرب شهر تهران و آب کشاورزی و رامین و نیز تولید سالانه، ۶۰۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی جهت شبکه برق سراسری است [۲]. این سد دارای حوزه آبریزی با وسعت ۶۹۸ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۲۳۳۷ متر می‌باشد. بدنه سد از نوع بتنی وزنی (پایه دار) با حداکثر ارتفاع از پی معادل ۱۰۷ متر با مساحت دریاچه در تراز نرمال ۳/۳ کیلومتر مربع می‌باشد. ظرفیت مفید مخزن ۷۰ میلیون مترمکعب و ورودی متوسط سالانه ۴۵۰ میلیون مترمکعب است. از خصوصیات منحصر به فرد این سد وجود ۶ دریاچه آبگیر در ارتفاعات مختلف در برج آبگیر آن است.

* دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست - دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

** استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
*** دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۱- نقشه موقعیت و حوزه آبریز سد لتیان.

کنونی تغییرات کیفی مخزن سد لتیان توسط شبیه‌سازی تغییرات لایه‌بندی حرارتی، اکسیژن محلول و املاح محلول در آن به وسیله مدل HEC-SQ بررسی شده و جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ۸ دوره اندازه‌گیری میدانی از آب مخزن سد لتیان، در طی سال ۱۳۸۰-۱۳۸۱ انجام می‌شود.

جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

جمع‌آوری و پردازش داده‌ها با هدف شبیه‌سازی کیفی مخزن سد لتیان و با توجه به نیاز مدل HEC-SQ انجام شده است [۹]. این داده‌ها شامل داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، دمای آب و مشخصات هندسی مخزن می‌باشد. داده‌های هواشناسی موردنیاز مدل، شامل: تشعشع، دمای متوسط هوا، دمای متوسط نقطه شبنم و سرعت باد به صورت روزانه و متوسط تبخیر و بارندگی ماهیانه می‌باشد [۵]. این داده‌ها از پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه هواشناسی لتیان و اقدسیه به دست آمده است از آنجا که اطلاعات ثبت شده برای تشعشع از سال ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۹ میلادی موجود می‌باشد، با اجرای برنامه HEATX که ورودی‌های آن شامل دمای متوسط هوا، دمای متوسط شبنم، سرعت باد، ابرناکی متوسط، موقعیت جغرافیایی و تراز مخزن است، متوسط روزانه تشعشع و ضریب تبادل حرارتی بین آب و هوا برای دوره زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲ میلادی به دست آمد.

رودخانه جاجرود از ارتفاعات شمال غربی حوزه (ارتفاع ۴۲۰۰ متری) سرچشمه می‌گیرد و تا محل سد لتیان در ارتفاع ۱۶۰۰ متری چندین شاخه فرعی که مهم‌ترین آنها آب میگون، فشم، آهار، گرمابدر، امامه و کنده رود می‌باشد را زهکشی می‌کند. چهار شاخه ورودی به مخزن سد وجود دارد که سهم نسبی آورد سالیانه هریک از این شاخه‌ها به ترتیب برابر است با: جاجرود ۶۰٪، لوارک ۳۰٪، افجه ۳٪ و گلندوک ۷٪ [۲]. رودخانه جاجرود پس از سد لتیان به طرف جنوب جریان می‌یابد و در بالادست ورامین به رودخانه دماوند ملحق شده و با هم به دشت ورامین تخلیه می‌شوند. از سال ۱۳۷۶ به منظور تامین آب شرب شهر تهران، سالانه به طور متوسط ۸۰ میلیون متر مکعب آب از سد لار از طریق تونل انتقال آب لار - کلان به طول ۲۰ کیلومتر ابتدا به نیروگاه کلان و از آنجا به مخزن سد لتیان انتقال داده شده است، که این میزان در سال‌های اخیر روند رو به رشدی داشته است.

سد لتیان به لحاظ تامین آب شرب شهر تهران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به علت ورود آلودگی نسبتاً زیاد از شاخه‌ی جاجرود و رشد و توسعه قابل ملاحظه شهری و گردشگری در این حوزه، یکی از سدهایی است که به نظر می‌رسد در آینده نزدیک به خصوص با انتقال مستقیم آب از سد لار به تهران با مشکل جدی کیفیتی مواجه گردد. بنابراین در این مطالعه وضعیت

برنامه HEATX یک برنامه‌ی جنبی است که با استفاده از آنالیز روزانه‌ی متغیرهای هواشناختی برای محل مورد نظر، دمای تعادل، ضریب انتقال حرارتی بین آب و هوا و متوسط تشعشع روزانه را محاسبه می‌کند. رابطه‌ی تراز-حجم سطح و مشخصات دریچه‌ها از سازمان آب منطقه‌ای تهران دریافت شد. همچنین برای محاسبه دبی‌های ورودی و خروجی مخزن از داده‌های ثبت شده در محل سد لثیان استفاده شد. دمای آب ورودی توسط رودخانه‌های منتهی به مخزن سد نیز با ایجاد رابطه همبستگی بین دمای اندازه‌گیری شده آب ورودی به مخزن و دمای هوا به دست آمد.

مطالعات میدانی

مطالعات میدانی با هدف واسنجی و اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن سد لثیان انجام پذیرفت. با توجه به ارتفاع و عرض جغرافیایی، این مخزن جزء مخازن با لایه‌بندی فصلی محسوب می‌شود. از این‌رو، مطالعات میدانی، طوری برنامه‌ریزی شد که لایه‌بندی فصل گرم که اوایل بهار شروع می‌شود به همراه اختلاط در اوایل پاییز نمونه برداری شوند. بنابراین در اواخر زمستان و اوایل بهار و هم‌چنین اواخر تابستان و اوایل پاییز، فاصله‌ی نمونه‌برداری‌ها کمتر شده تا زمان دقیق تشکیل لایه بندی و از بین رفتن آن و اختلاط در مخزن را بتوان مشاهده نمود. در سایر مواقع، فاصله‌ی نمونه برداری‌ها به گونه‌ای زمان‌بندی شد که تغییرات عمق ترموکلاین و تغییرات عمقی پارامترهای کیفی را بتوان مشاهده کرد، بدین ترتیب نمونه‌برداری‌ها طی ۸ نوبت با فواصل حدود ۵۰ روز از شهریور ۸۰ آغاز شد. (تاریخ‌های ۸۰/۶/۱۴، ۸۰/۸/۲، ۸۰/۱۲/۵، ۸۰/۱۲/۲۷، ۸۱/۲/۱۳، ۸۱/۴/۲۴، ۸۱/۶/۶ و ۸۱/۸/۱۹). در هر نوبت، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری در سه نقطه‌ی مخزن یعنی پشت بدنه‌ی سد، محل ورودی و اتصال جاجرود به مخزن و محل اتصال شاخه لوارک به مخزن انجام شد (شکل ۲). نتایج اندازه‌گیری‌ها در پشت بدنه‌ی سد در شکل ۳ نشان داده شده است.

HEC5-Q تلفیق بخشی از مدول‌های مخزن و کیفی رودخانه از مدل WQRRS با مدل شبیه‌سازی جریان یک سیستم چند مخزن-رودخانه چند منظوره (HEC-5Q) است، که مخصوصاً برای تعیین آثار مورد انتظار و یا آثار

تاریخی بهره‌برداری از مخازن عظیم تدوین شده‌است. مدل، راهبرد مدیریتی بهترین آب را از نظر کمی و کیفی با توجه به موارد و اهداف بهره‌برداری، مانند: کنترل سیلاب، برقابی، نیازهای آبی و برداشت‌های کشاورزی تعریف می‌کند. مدول شبیه‌سازی کیفی آب این برنامه شامل دما و پارامترهای پایستار و ناپایستار، از قبیل اکسیژن محلول می‌باشد. هم‌چنین توزیع قائم دما و سایر پارامترهای کیفی توسط مدول شبیه‌سازی کیفی انجام می‌شود.

تحلیل حرارتی، مبنای تحلیل کیفی و نقطه‌ی شروع آن می‌باشد، در مدل مزبور براساس پایستاری یا بقای انرژی گرمایی، این تحلیل انجام می‌شود که منتج به معادلات دیفرانسیل دینامیک حرارت در هر المان می‌شود:

(۱)

$$V \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta Z \cdot Q_z \frac{\partial T}{\partial t} + \Delta Z \cdot A_z \cdot D_z \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + Q_i \cdot T_i - Q_o \cdot T + \frac{A_h H}{\rho C} - T \frac{\partial V}{\partial t}$$

V : حجم المان سیال (m^3)

Z : مختصات عمقی (m)

T : دمای واقعی آب ($^{\circ}C$)

T_i : دمای آب ورودی ($^{\circ}C$)

Q_z : جریان بین المانی ($\frac{m^3}{s}$)

Q_i : جریان ورودی جانبی ($\frac{m^3}{s}$)

D_z : ضرایب بخش موثر ($\frac{m^2}{s}$)

Q_o : جریان خروجی جانبی از المان ($\frac{m^3}{s}$)

A_z : مساحت سطح المان عمود بر جهت جریان (m^2)

A_h : مساحت سطح المان (m^2)

H : منابع و مصارف گرمای خارجی ($KCal/m^2 \cdot s$)

ρ : چگالی آب (kg/m^3)

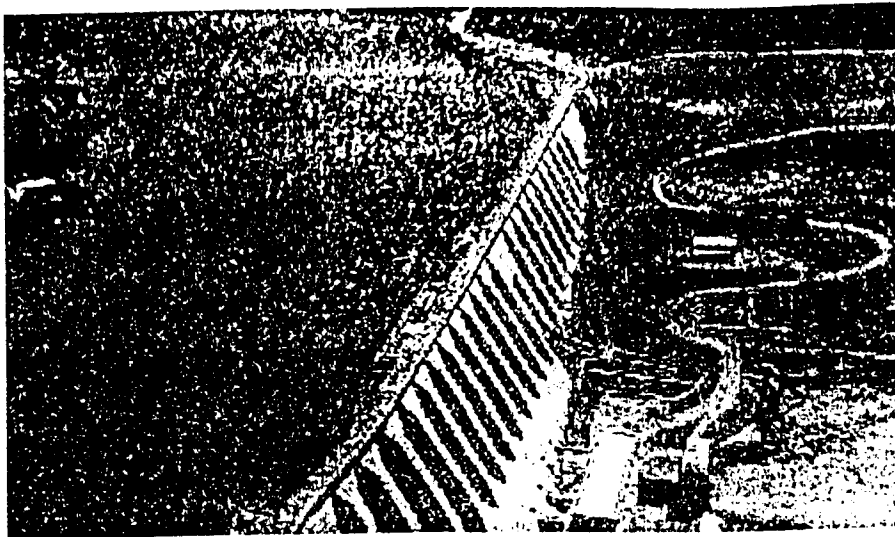
C : ضریب گرمای ویژه آب ($KCal/kg \cdot ^{\circ}C$)

ΔZ : ضخامت المان (m)

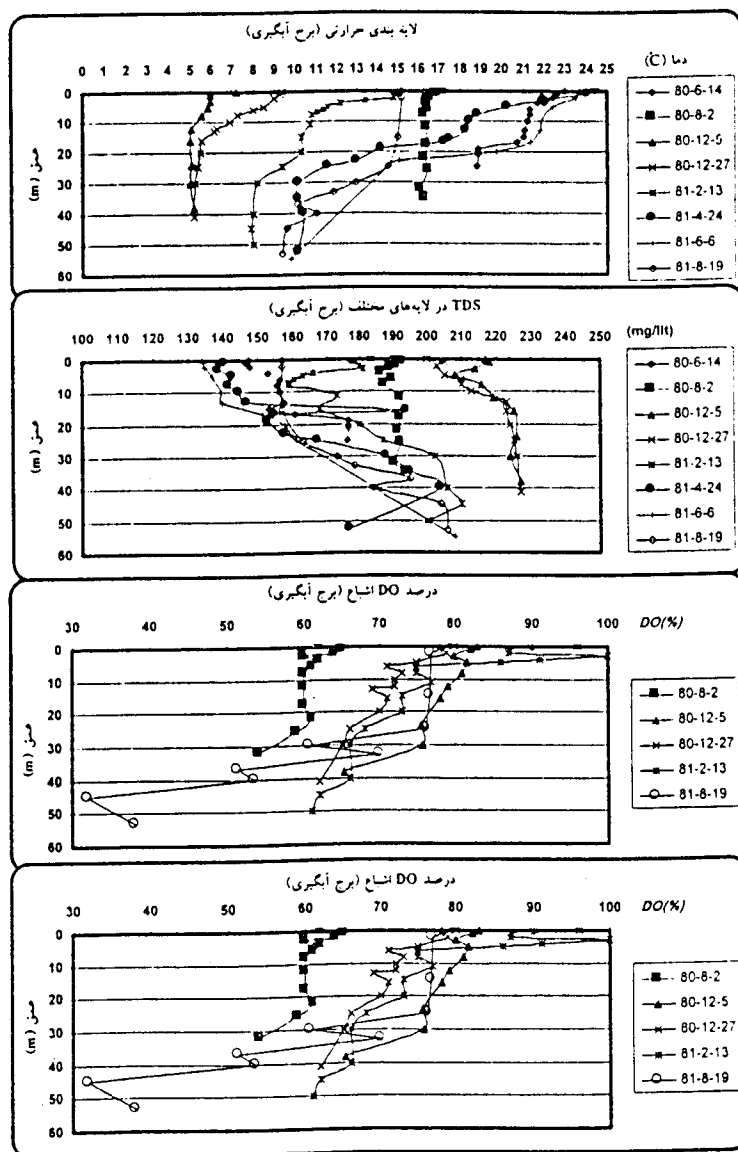
i : شماره المان

t : زمان

روش مدل‌سازی کیفی بر این فرض استوار است که تغییرات هر مؤلفه شیمیایی یا بیولوژیکی را می‌توان به وسیله قانون بقای جرم و اصول سینتیک بیان کرد. معادلات



شکل ۲- نمایی از سد لتیان.



شکل ۳ - نمودار تغییرات زمانی دما، املاح محلول و اکسیژن محلول در عمق مخزن در پشت بدنه سد لتیان.

حاکم بر پارامترهای کیفی آب به مانند DO، TDS مشابه معادلات حاکم بر تحلیل حرارتی ولی با اندک اصلاحاتی، قابل شبیه‌سازی می‌باشند. اگر در معادله ۱، متغیر T به عنوان غلظت پارامتر مورد نظر در نظر گرفته شود، با تغییرات زیر به راحتی می‌توان به مدل‌سازی کیفی نیز دست یافت:

(۱) $\frac{A_{H_2O}}{\rho.C}$ که ترم به دست آوردن یا از دست دادن حرارت توزیع شده است، در شبیه‌سازی کیفی برای اجزای پایستار حذف و برای مابقی اجزا (غیرپایستارها به جز DO) با یک فرمولاسیون ساده معرف زوال سینتیکی درجه اول، جایگزین شود (۲) برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول، ترم $(-K_1T)$ با یک ترم هوادهی درجه اول مانند $SO - (DO_{sat} - DO) K_2$ ، جایگزین شود که A_{H_2O} مساحت سطح المان، K_2 نرخ هوادهی مخزن، DO_{sat} غلظت اکسیژن محلول اشباع در دمای استاندارد، DO غلظت موجود اکسیژن محلول و SO نیاز اکسیژنی رسوبات و لجن کف مخزن برای المان انتهایی متصل به کف مخزن می‌باشد.

تحلیل حساسیت مدل HEC-5Q

پارامترهای استفاده شده در حساسیت سنجی مدل با توجه به روابط استفاده شده در شبیه‌سازی کیفی توسط مدل HEC-5Q، انتخاب شد. این پارامترها به همراه نتایج تحلیل حساسیت آنها در جدول ۱ ارائه گردیده است. لازم به یاد آوری است که تأثیرگذاری پارامترهای مختلف تا حد زیادی تابع زمان مطالعات می‌باشد. به عبارتی در فصول مختلف که پدیده لایه‌بندی در حال شکل‌گیری و یا اضمحلال است، اهمیت این پارامترها می‌تواند متفاوت باشد. از این رو با توجه به روند تغییر ساختار لایه بندی حرارتی که از مطالعات میدانی به دست آمد، حساسیت مدل در اواسط هر فصل (۱۵ آبان، ۱۵ بهمن، ۱۵ اردیبهشت و ۱۵ مرداد) بررسی شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که:

تأثیر عمق سکی در ضریب جذب عمقی تشعشع (k_1) یا (η) وارد شده و کاهش آن منجر به کاهش انرژی جذب شده در ستون آب و افزایش آن تأثیر برعکس دارد، این پارامتر در ازدیاد عمق رولایه و گرم‌شدن زیرلایه تأثیر

بسیاری دارد.

اگر ضریب جذب سطحی تشعشع (β) افزایش یابد، باید انتظار داشت که عمق رولایه بیشتر شده و دمای زیرلایه نیز افزایش می‌یابد. این ضریب نیز مانند تشعشع می‌تواند باعث تأخیر یا تعجیل در تشکیل یا تخریب لایه‌بندی شود.

عمق جذب سطحی تشعشع در حقیقت عمقی است که در آن به میزان β ، تشعشع ورودی جذب سطح آب مخزن می‌گردد. میزان پیشنهادی این ضریب توسط مدل HEC-5Q، ۰/۶ متر می‌باشد [۶]. بدیهی است تأثیر این پارامتر فقط در زمانی که لایه‌بندی شکل گرفته، مشهود می‌باشد.

مقدار حداقل ضریب پایداری (E_{min}) در شروع واژگونی لایه‌بندی حرارتی مخزن مهم است. افزایش آن باعث می‌شود لایه بندی حرارتی سریع‌تر شکل گرفته و زمان اختلاط آب پشت مخزن را به تأخیر می‌اندازد.

ضریب پایداری بحرانی لایه‌بندی (E_c) بر محل تشکیل ترموکلاین و عمق رولایه تأثیر گذار می‌باشد. تأثیر این پارامتر بیشتر پس از تشکیل لایه بندی حرارتی در مخزن محسوس می‌باشد.

A_1 یک ضریب تجربی است که در محاسبه ضریب دیفیوژن در رولایه و زیر لایه به روش پایداری مؤثر است. تغییر این پارامتر نسبت به سایر پارامترها تأثیر بیشتری در دمای اعماق مخزن دارد.

A_3 یک ضریب تجربی است که در محاسبه ضریب دیفیوژن در میان لایه به روش پایداری مؤثر است. تغییر این پارامتر تأثیر زیادی در دمای اعماق مخزن ندارد. با تغییر ۵۰ درصدی این ضریب، تفاوت محرز در ساختار لایه‌بندی حرارتی دیده نشد.

افزایش تشعشع موج کوتاه باعث زیاد شدن عمق رولایه و کاهش گرادیان حرارتی در ترموکلاین و طبیعتاً افزایش دمای زیرلایه می‌شود. تأثیر این پارامتر به حدی است که می‌تواند زمان واژگونی یا تشکیل کامل لایه‌بندی را دچار تغییر کند. با توجه به این که میزان تشعشع در تابستان حداکثر می‌باشد، تغییر آن طبیعتاً منجر به افزایش بیشتر تأثیر آن در ساختار لایه‌بندی حرارتی می‌شود.

جدول ۱- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن (۸۰/۷/۱ تا ۸۱/۶/۳۱).

پارامتر	میزان تغییر پارامتر (%)	حداکثر مطلق اختلاف در میزان دما با تغییر پارامتر (°C)			
		۸۱/۵/۱۵	۸۱/۲/۱۵	۸۰/۱۱/۱۵	۸۰/۸/۱۵
عمق سکی	+۵۰	۰/۸	-۰/۳	۰	۰/۱
	-۵۰	-۰/۶	-۰/۴	۰	-۰/۱
ضریب جذب تشعشع سطحی (β)	+۵۰	-۰/۳	-۰/۳	۰	-۰/۱
	-۵۰	۰/۲	۰/۲	-۰/۱	۰/۱
عمق جذب تشعشع سطحی	+۵۰	۰/۲	۰/۱	-۰/۷	۰
	-۵۰	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۷	۰
حداقل ضریب پایداری لایه‌بندی (E _{min})	+۵۰	۰/۲	۰/۲	-۰/۱	۰
	-۵۰	-۰/۱	-۰/۲	-۰/۱	۰
ضریب پایداری بحرانی لایه‌بندی (E _c)	+۵۰	-۰/۲	۰/۱	-۰/۱	۰
	-۵۰	-۱/۱	۰/۱	-۰/۱	-۰/۱
A ₁ sq.m/s	+۵۰	۲/۱	۰/۷	-۰/۱	۰/۱
	-۵۰	-۲/۷	-۰/۸	۰	-۰/۶
A ₃ sq.m/s	+۵۰	۰	۰	-۰/۷	۰
	-۵۰	۰	۰	-۰/۷	۰
تشعشع موج کوتاه	-۵۰	-۱/۶	-۱	-۰/۱	-۰/۱
	+۵۰	+۴/۳	+۰/۲	۰	۰
دمای آب جریان ورودی	-۵۰	-۰/۷	۰	۰	۰
	+۵۰	+۵/۱	+۱/۷	+۰/۶	۰
پروفیل اولیه دما در شروع شبیه‌سازی	-۵۰	۰	۰	-۰/۲	-۱/۵
	+۵۰	۰	۰	+۰/۱	+۱/۴
تأثیر پارامتر TDS بر ساختار لایه‌بندی حرارتی	-۱۰۰	۰	۰	۰	۰

با توجه به ضرایب فوق‌الذکر نتایج واسنجی دمای آب در اعماق مخزن سد در مقایسه با اندازه‌گیری‌های موجود در جدول ۳ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ ملاحظه می‌شود که برای ۱۱۹ مورد اندازه‌گیری دمای آب در اعماق مختلف مخزن، جذر میانگین مربع خطاها ۱/۴۸ درجه‌ی سانتی‌گراد، برای ۱۱۶ مورد اندازه‌گیری املاح محلول در اعماق مخزن، جذر میانگین مربع خطاها ۱۱ mg/L می‌باشد و برای ۹۱ مورد اندازه‌گیری غلظت اکسیژن محلول در اعماق آب مخزن، جذر میانگین مربع خطاها ۱/۱۲ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. خطای شبیه‌سازی برای روزهایی که تراز مخزن افزایش می‌یابد و هنگامی که لایه‌بندی شکل گرفته بیشتر از سایر روزها می‌باشد، که این خطا عمدتاً ناشی از خطا در محاسبه ضریب دیفیوژن که کنترل‌کننده انتقال جرم و دما در اعماق است، می‌باشد. در ضمن خطای شبیه‌سازی

دمای آب ورودی تأثیر مهم و بسزایی در نتایج شبیه‌سازی دارد. گرم شدن آب ورودی با توجه به توزیع آن در ساختار لایه‌بندی حرارتی باعث گرم‌تر شدن کل مخزن می‌شود، آب سرد سنگین نیز به صورت جریان زیرلایه منجر به سرد شدن زیرلایه خواهد شد. پروفیل اولیه دما در شروع شبیه‌سازی بیشتر در نتایج ابتدای دوره شبیه‌سازی موثر می‌باشد.

واسنجی مدل

واسنجی مدل با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی انجام گرفته در مطالعات سال ۱۳۸۱-۱۳۸۰ و دو اندازه‌گیری در سال ۱۳۷۶ انجام گرفته است. مقایسه نتایج مدل با نتایج اندازه‌گیری‌ها در شکل‌های ۴ الی ۶ ارائه شده است. مقادیر استفاده شده برای برخی پارامترهای مهم در مدل واسنجی شده شبیه‌سازی مخزن سد لتیان در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مقدار پارامترها در مدل واسنجی شده شبیه سازی حرارتی مخزن سد لتیان.

عمق نوری (m)	β (%)	E_{crit} kg/cu.m/m	E_{min} kg/cu.m/m	A_3 sq.m/s	A_1 sq.m/s	عمق سکی (m)	تراز مخزن در شروع شبیه سازی (m)
۰/۶	۴۵	۹E-۵	۰/۰۱	۰/۷	۵E-۵	۳	۱۶۰۴

جدول ۳- نتایج واسنجی شبیه سازی لایه بندی حرارتی در مخزن سد لتیان.

Root MSE			MSE			تعداد اندازه گیریها			تاریخ
TDS (mg/L)	DO (mg/L)	T (°C)	TDS	DO	T	TDS	DO	T	
۱۸	-	۱/۳۳	۳۲۶/۹۰	-	۱/۷۸	۱۲	۰	۱۲	۷۶/۴/۱۵
۱۵/۶۹	۱/۹۴	۱/۵۰	۲۴۶/۳۲	۳/۷۶	۲/۲۶	۱۱	۱۱	۱۱	۷۶/۶/۲۵
۷/۶۳	۱/۵۸	۰/۸۴	۵۸/۱۴	۲/۴۹	۰/۷۱	۱۳	۱۵	۱۵	۸۰/۶/۱۴
۷/۸۴	۰/۷۷	۰/۴	۶۱/۴۶	۰/۵۹	۰/۱۶	۱۳	۱۳	۱۳	۸۰/۸/۲
۶/۶۹	۰/۷۹	۰/۹۴	۴۴/۷۶	۰/۶۳	۰/۸۸	۱۰	۱۰	۱۰	۸۰/۱۲/۵
۵/۹۹	۰/۶۲	۰/۴۴	۳۵/۹۵	۰/۳۹	۰/۱۹	۱۴	۱۴	۱۴	۸۰/۱۲/۲۷
۱۰/۹۶	۰/۷۹	۱/۷۳	۱۲۰/۱۹	۰/۶۲	۲/۹۹	۱۸	۱۸	۱۸	۸۰/۲/۱۳
۱۳/۲۵	-	۲/۳۲	۱۷۵/۶۵	-	۵/۳۹	۱۵	۰	۱۶	۸۱/۴/۲۴
۸/۲۷	۰/۷۶	۲/۰۵	۶۸/۳۳	۰/۵۸	۴/۲۲	۱۰	۱۰	۱۰	۸۱/۶/۶
۱۱/۶۰	۱/۱۲	۱/۴۸	۱۲۱/۰۸	۱/۲۷	۲/۱۹	۱۱۶	۹۱	۱۱۹	کل

جدول ۴- نتایج اعتبار سنجی مدل.

Root MSE	MSE	پارامتر	تعداد اندازه گیریها	تاریخ
۲/۴۴ (°C)	۵/۹۷	Temp	۱۰	۸۱/۸/۱۹
۱/۰۱ (mg/L)	۱/۰۴	DO		
۲۴/۲۱ (mg/L)	۵۸۶/۵۶	TDS		

اکسیژن محلول در شهریور ماه بیشتر از سایر مواقع سال است. علت آن افزایش مصرف اکسیژن محلول آب در اثر تجزیه مواد آلی در این ماه می باشد که این اثر در این شبیه سازی به خوبی در نظر گرفته نشده است.

اعتبار سنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل واسنجی شده، از مقادیر اندازه گیری شده در تاریخ ۸/۸/۱۹ استفاده شده است. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر به دست آمده از مدل شبیه سازی برای دما، اکسیژن محلول و املاح محلول با استفاده از مدل HEC-5Q در این روز در شکل ۷ و جدول ۴ ارائه شده است.

شبیه سازی کیفی مخزن سد توسط مدل HEC-5Q

شبیه سازی کیفی مخزن سد لتیان با فرض یک بعدی بودن مخزن انجام شده است، که این فرض با توجه به شکل ۸ تایید می گردد. در این مقاله، شبیه سازی برای لایه بندی حرارتی، اکسیژن محلول و املاح محلول (TDS) انجام شده است. دوره شبیه سازی در نظر گرفته شده از اردیبهشت سال ۱۳۷۶ تا آبان ۱۳۸۱ (می سال ۱۹۹۷ تا اکتبر سال ۲۰۰۲ میلادی) است. این دوره به این دلیل انتخاب شده است که شروع آن قبل از شروع خشک سالی بوده و دوره خشک سالی را در بر گرفته و دوباره به سال آبی ۸۱-۸۰ که نسبتاً پر آب است ختم می گردد. در ضمن زمان شروع شبیه سازی و پایان آن به گونه ای انتخاب شده که دو اندازه گیری انجام شده در مطالعات میدانی قبلی موجود در سال ۱۳۷۶ شمسی [۲] و مطالعات میدانی جدید انجام شده در سال ۸۱-۱۳۸۰ را شامل می شود.

تحلیل نتایج شبیه سازی کیفی در مخزن سد لتیان

به منظور دست یابی به تحلیل جزئی تر و دقیق تر برای بازه زمانی یک سال، مقادیر به دست آمده از نتایج شبیه سازی در نمودارهای ۶ ماهه در شکل ۹ ارائه شده است. بازه زمانی ترسیم شده سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰ می باشد. نتایج این مدل سازی نشان می دهد که:

مخزن سد لتیان دارای یک دوره لایه بندی حرارتی می باشد که در اواخر اسفند یا اوایل فروردین ماه با توجه به شرایط

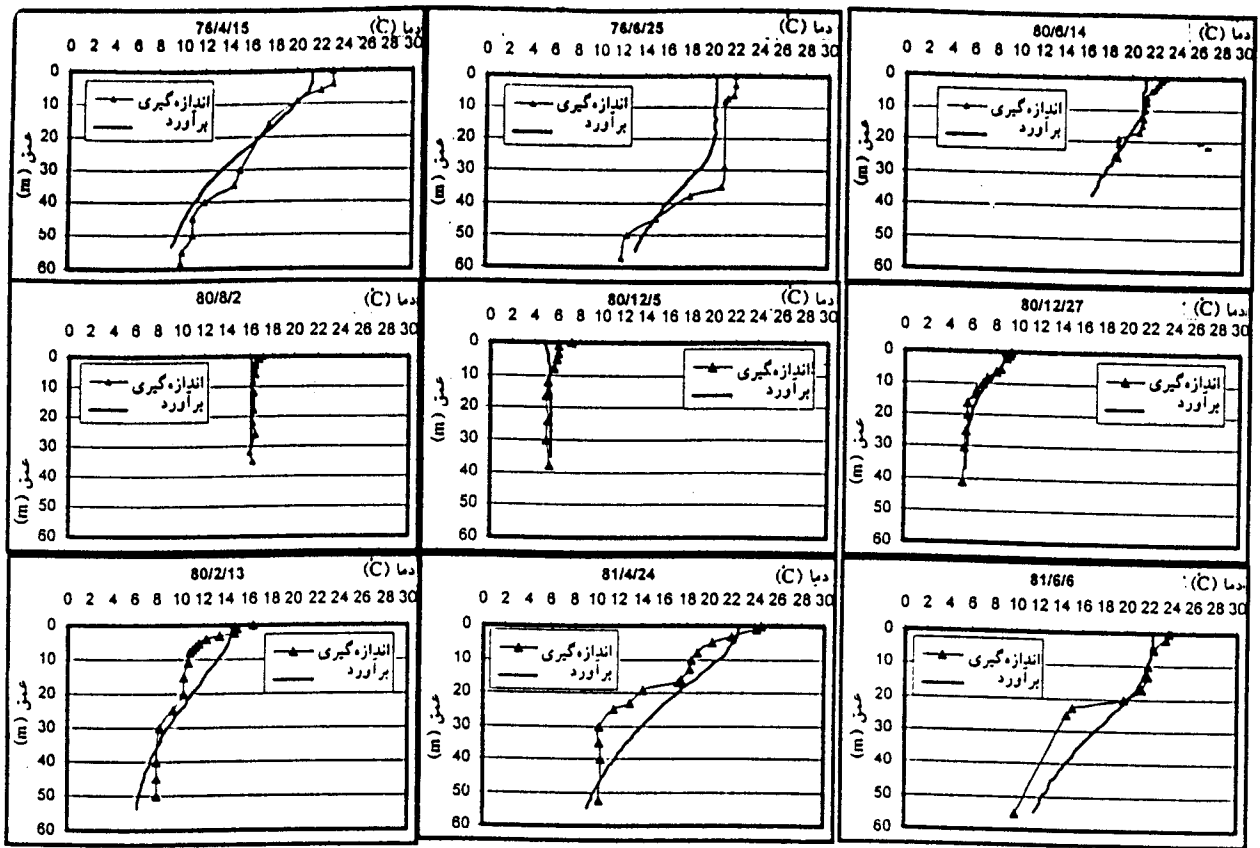
حاکم شروع به شکل گرفتن کرده و حدوداً در اواخر مهر ماه و اوایل آبان ماه از بین رفته و اختلاط در مخزن رخ می دهد. تا اواخر زمستان مخزن در همین حالت اختلاط باقی می ماند. در جدول ۵ زمان های اختلاط و شکل گیری لایه بندی برای سال های شبیه سازی شده از نتایج مدل استخراج و ارائه گردیده است.

با تشکیل تدریجی لایه بندی حرارتی، گرادیان حرارتی نیز در سطح مخزن ایجاد می شود. با افزایش دمای هوا و انرژی حرارتی جذب شده، عمق تشکیل ترموکلاین افزایش می یابد و حداکثر تا حدود ۳۰ متر می رسد.

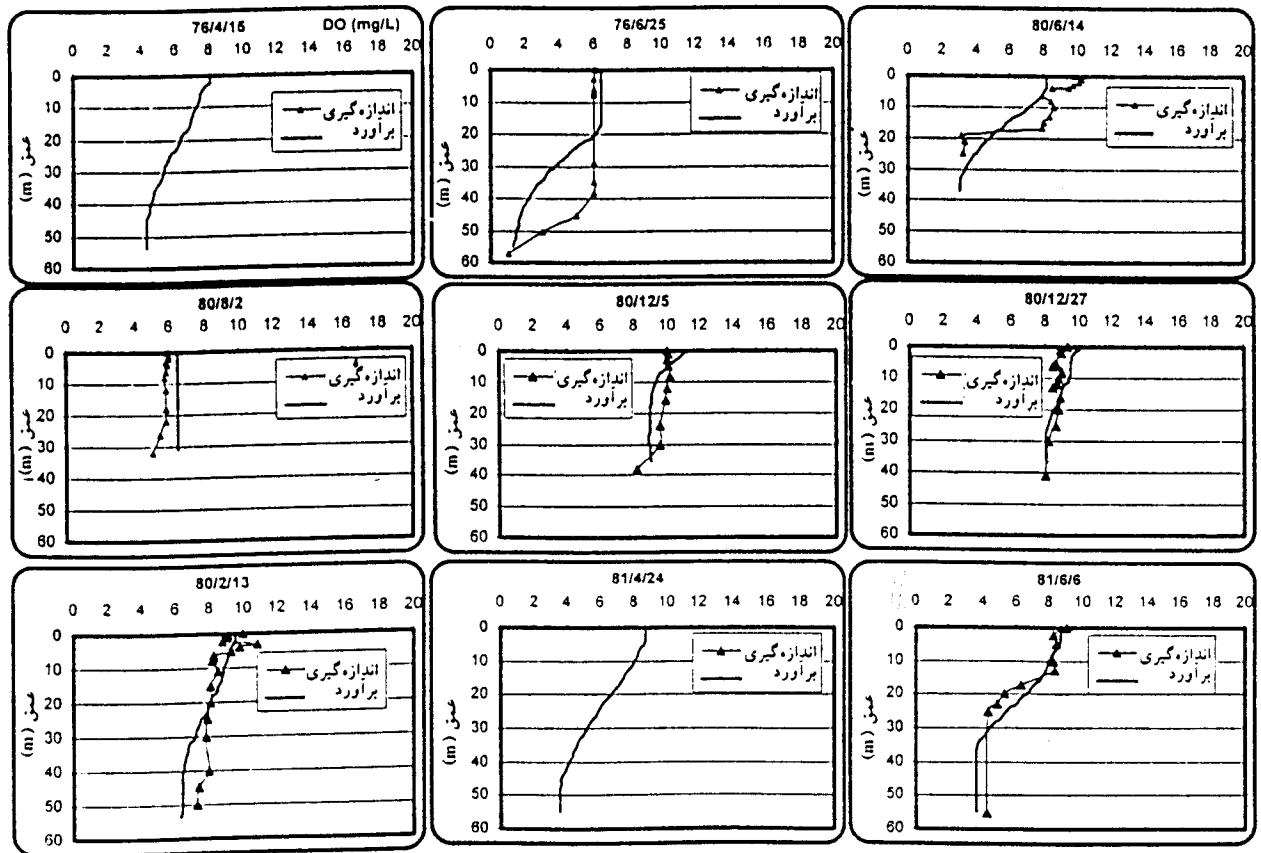
در زمانی که مخزن در حالت لایه بندی شده می باشد، اختلاف دما در اعماق مخزن به حدود 15°C می رسد که این مسئله با توجه به تغییرات موجود در نمودارهای املاح محلول و اکسیژن محلول در اعماق بیان کننده اختلاف شدید میان خصوصیات کیفی رو لایه و زیر لایه در این زمان می باشد.

نحوه تغییرات اکسیژن محلول در اعماق مشابه دما بوده و تقریباً بین ۱ تا ۱۲ میلی گرم در لیتر نوسان می کند. شرایط بی هوازی هنوز کاملاً حاکم نشده ولی غلظت اکسیژن محلول در کف مخزن خصوصاً در تابستان (اواخر مرداد و اوایل شهریور) هشدار دهنده و نزدیک به شرایط بی هوازی می باشد و در فصل زمستان (اسفند ماه) به بالاترین میزان خود می رسد.

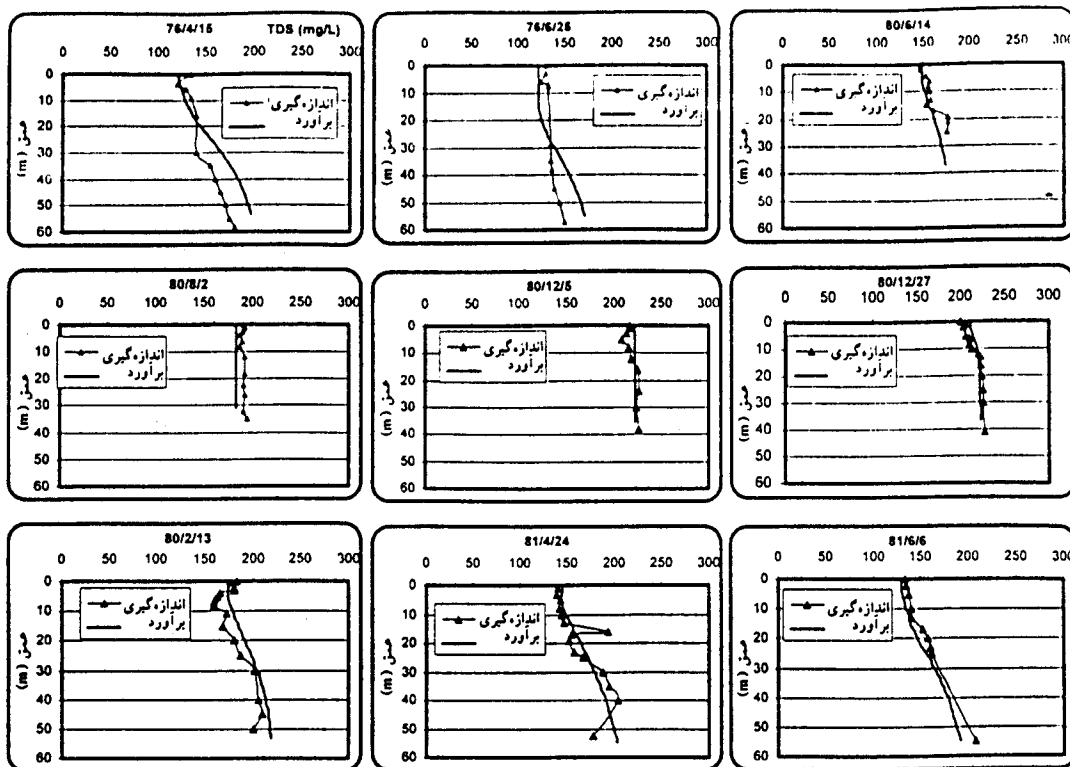
به طور نسبی روند تغییرات غلظت اکسیژن محلول در اعماق مخزن در طول سال برخلاف دما می باشد. به این صورت که غلظت اکسیژن محلول در اعماق مخزن در شش ماهه اول سال یعنی از فروردین تا شهریور کاهش یافته و در شش ماهه دوم روند برعکس شده و از مهر تا اسفند غلظت اکسیژن محلول در اعماق مخزن افزایش می یابد. وضعیت خوب اکسیژن محلول در مخزن سد لتیان در اسفند و فروردین ناشی از غلظت بالای اکسیژن در آب رودهای منتهی به مخزن سد، خصوصاً رود جاجرود که بیشتر در این مواقع سال آب ناشی از ذوب برف در آن جریان دارد می باشد. وضعیت نامطلوب اکسیژن در کف مخزن در اواخر تابستان، ناشی از تجزیه مواد آلی در مخزن سد می باشد که با افزایش تجمع این لجن در کف مخزن و افزایش دما غلظت اکسیژن محلول در این دوره کاهش می یابد. غلظت اکسیژن محلول در کف در این فصل به



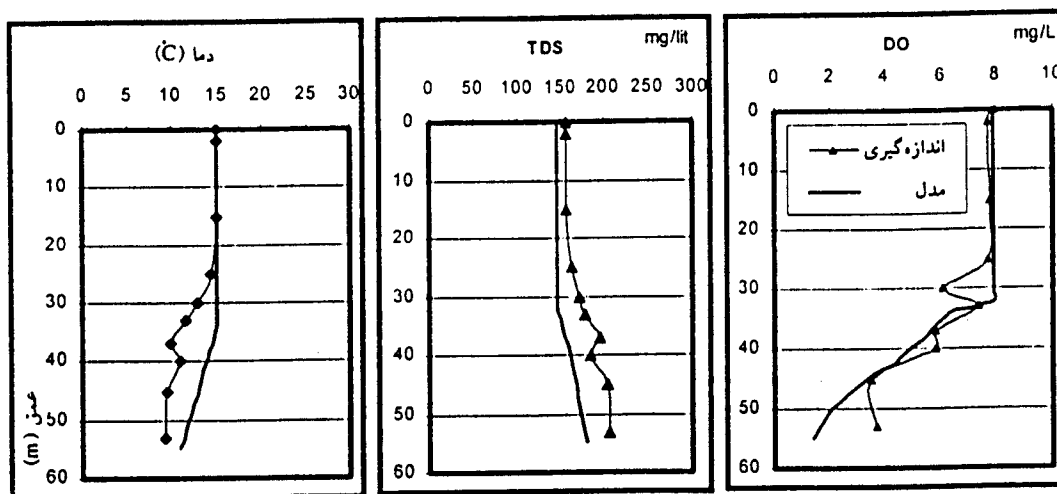
شکل ۴- نتایج واسنجی لایه بندی حرارتی مخزن سد لتیان.



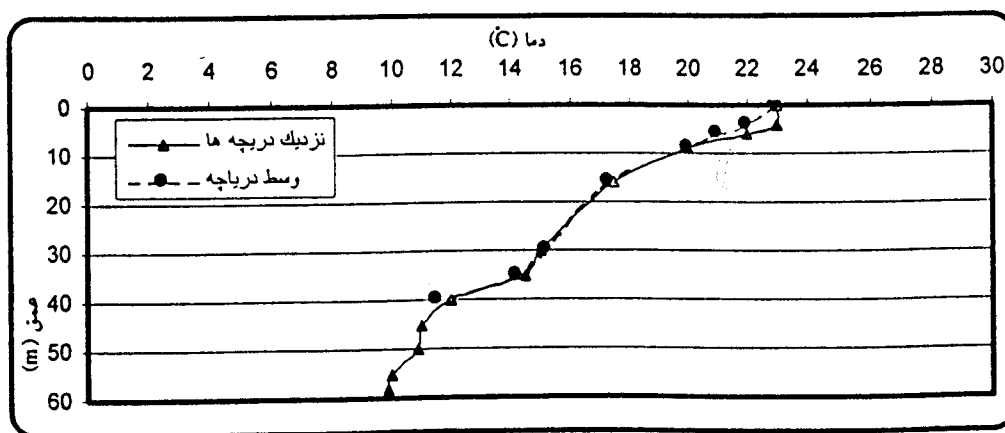
شکل ۵- نتایج واسنجی لایه بندی اکسیژن در مخزن سد لتیان.



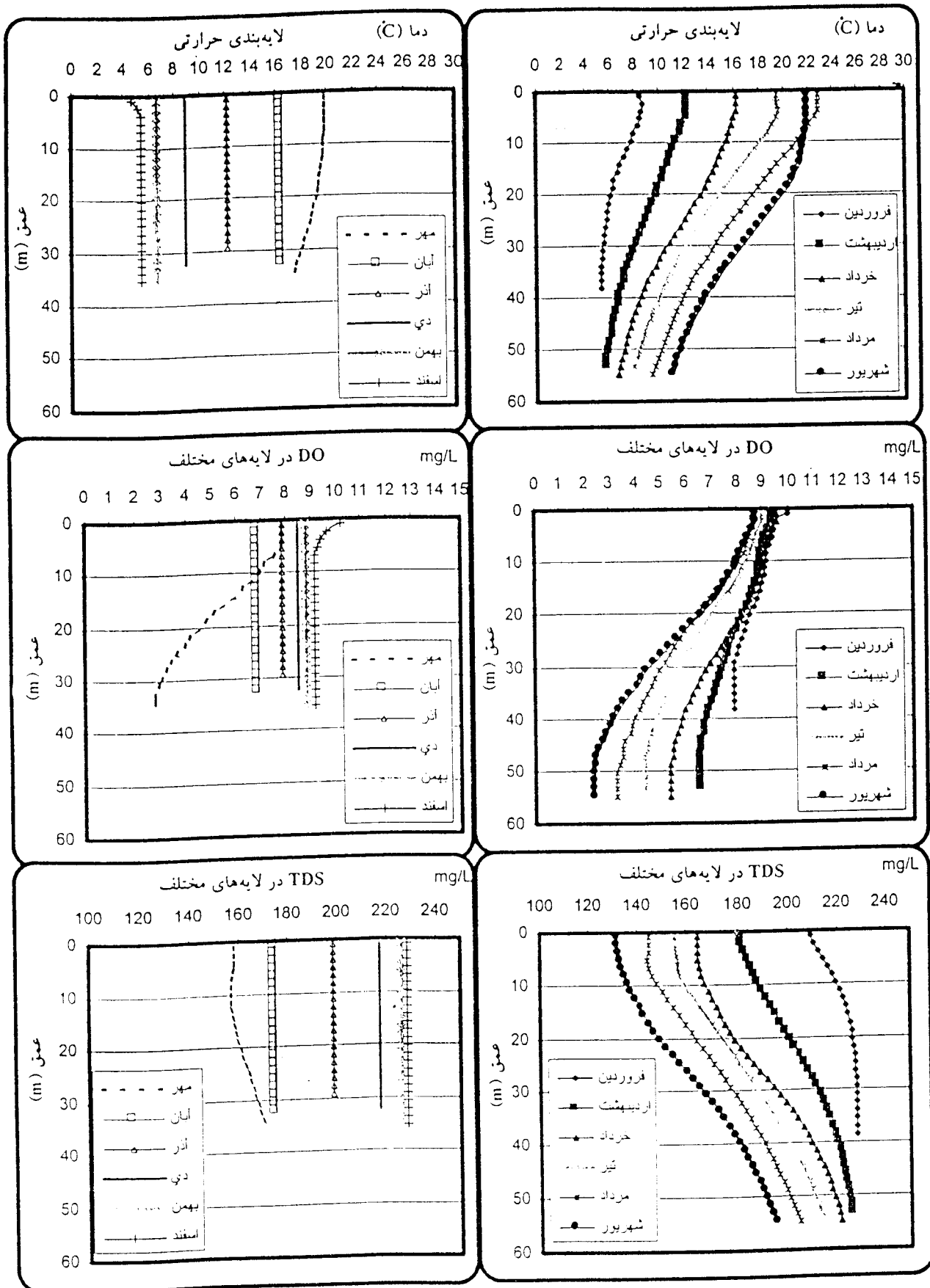
شکل ۶- نتایج واسنجی لایه بندی املاح محلول در مخزن سد لتیان.



شکل ۷- اعتبار سنجی مدل: مقایسه نتایج مدل با مقادیر اندازه گیری شده در تاریخ ۱۳۹۱/۸/۱۹.



شکل ۸- بررسی فرض یک بعدی بودن مخزن سد لتیان (اندازه گیری در تاریخ ۱۳۷۶/۴/۱۵).



شکل ۹- تغییرات سالانه ساختار لایه‌بندی حرارتی، اکسیژن محلول و املاح محلول در مخزن سد لتیان با توجه به نتایج شبیه‌سازی کیفی برای سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰.

جدول ۵- زمان‌های اختلاط و شکل‌گیری لایه بندی در مخزن سد لتیان با توجه به نتایج مدل‌سازی

سال آبی	زمان اختلاط	زمان شکل‌گیری لایه بندی
۱۳۷۶-۱۳۷۷	۱۳۷۶/۸/۱۵	۱۳۷۷/۱/۱
۱۳۷۷-۱۳۷۸	۱۳۷۷/۷/۱۵	۱۳۷۸/۱/۱۱
۱۳۷۸-۱۳۷۹	۱۳۷۸/۸/۲۰	۱۳۷۹/۱/۷
۱۳۷۹-۱۳۸۰	۱۳۷۹/۸/۱۶	۱۳۸۰/۱/۱
۱۳۸۰-۱۳۸۱	۱۳۸۰/۷/۲۵	۱۳۸۰/۱۲/۲۶

افزایش می‌یابد و هنگامی که لایه بندی شکل گرفته بیشتر از سایر روزها می‌باشد که این خطا عمدتاً ناشی از محاسبه ضریب دیفیوژن که کنترل‌کننده انتقال جرم و دما در اعماق است می‌باشد.

مخزن سد لتیان دارای یک دوره لایه بندی می‌باشد که در اواخر اسفند یا اوایل فروردین ماه با توجه به شرایط حاکم شروع به شکل‌گرفتن کرده و حدوداً در اواخر مهر ماه و اوایل آبان‌ماه باز هم بسته به شرایط از بین رفته و اختلاط در مخزن رخ می‌دهد که تا اواخر زمستان مخزن در همین حالت اختلاط می‌باشد. تغییرات شدید خصوصیات آب در عمق مخزن در زمانی که شرایط لایه‌بندی بر مخزن حاکم است ملاحظه می‌شود که برای اکسیژن محلول اختلاف غلظت در اعماق به ۷ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد، بنابراین عمق برداشت تأثیر زیادی در کیفیت آب خروجی دارد.

غلظت اکسیژن محلول تقریباً بین ۱ تا ۱۲ میلی‌گرم در لیتر نوسان می‌کند. شرایط بی‌هوایی هنوز کاملاً حاکم نشده ولی غلظت اکسیژن محلول در کف مخزن خصوصاً در تابستان (اواخر مرداد و اوایل شهریور) هشدار دهنده و نزدیک به شرایط بی‌هوایی می‌باشد و در فصل زمستان (اسفند ماه) به بالاترین میزان خود می‌رسد. وضعیت خوب اکسیژن محلول در مخزن سد لتیان در اسفند ماه و فروردین ماه ناشی از غلظت بالای اکسیژن در آب رودهای منتهی به مخزن سد خصوصاً رود جاجرود که بیشتر در این مواقع سال آب ناشی از ذوب برف در آن جریان دارد، می‌باشد. وضعیت نامطلوب اکسیژن در اواخر تابستان ناشی از ورود مواد آلی به مخزن سد توسط سرشاخه جاجرود است که با افزایش تأثیر لجن کف بر غلظت اکسیژن

پایین‌ترین میزان خود می‌رسد که این امر با بالا بودن گرادیان لایه بندی توأم شده و در صورت تداوم می‌تواند غلظت اکسیژن محلول در مخزن خصوصاً در لایه‌های نزدیک به کف مخزن را بحرانی کند. در زمان تشکیل لایه بندی حرارتی حداکثر تا حدود ۷ میلی‌گرم در لیتر اختلاف در غلظت اکسیژن محلول در اعماق مخزن دیده می‌شود که این امر در اواخر تابستان رخ می‌دهد. ضمن توجه به نمودار لایه بندی اکسیژن محلول، یک کاهش در غلظت اکسیژن محلول در کف مخزن مشاهده می‌شود که می‌تواند در اثر مصرف اکسیژن توسط لجن کف مخزن سد باشد.

تغییرات ساختار لایه‌بندی TDS در اعماق، عکس لایه بندی دما بوده و تغییرات این پارامتر تقریباً بین ۱۱۵ تا ۲۲۰ میلی‌گرم در لیتر نوسان می‌کند.

غلظت TDS در مرداد ماه و در لایه بالایی به حداقل خود می‌رسد و در فصولی که بارندگی شدید می‌شود غلظت آن بیشتر می‌شود که این نوسان بیان‌کننده این است که غلظت املاح محلول در مخزن لتیان بیشتر تحت تأثیر غلظت TDS در ورودی‌ها و واژگونی آب سد و اختلاط آب در اعماق مخزن سد لتیان دارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج واسنجی مدل، برای ۱۱۹ مورد اندازه‌گیری دمای آب در اعماق مخزن، جذر میانگین مربع خطاها، ۱/۴۸ درجه سانتی‌گراد، برای ۱۱۶ مورد اندازه‌گیری املاح محلول، جذر میانگین مربع خطاها ۱۱ mg/L و برای ۹۱ مورد اندازه‌گیری غلظت اکسیژن محلول، جذر میانگین مربع خطاها ۱/۱۲ میلی‌گرم در لیتر است. خطای شبیه‌سازی برای روزهایی که عمق مخزن

لایه بالایی به حداقل خود می رسد و در فصولی که بارندگی شدید است غلظت آن بیشتر می شود که این نوسان بیان کننده این است که غلظت املاح محلول در مخزن لثیان بیشتر تحت تأثیر غلظت TDS در ورودی ها و اختلاط در ستون آب می باشد.

محلول و بالا بودن گرادیان لایه بندی در این فصل گرم سال توأم می گردد و در صورت تداوم می تواند غلظت اکسیژن محلول در مخزن خصوصا در کف را بحرانی کند. تغییرات غلظت املاح محلول تقریباً بین ۱۱۵ تا ۲۲۰ میلی گرم در لیتر است و غلظت TDS در مرداد ماه و در

منابع و مراجع

- ۱- شیعی، ک.، (۱۳۷۵). "رتنار شهری در مخازن سدها"، طرح تحقیقات کاربردی وزارت نیرو، ص ۱۴ و ۱۵-۲.
- ۲- مقامی نیک، ح.، (زمستان ۱۳۷۶). "مدل ریاضی بهره برداری کیفی از مخازن با توجه به لایه بندی حرارتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ص ۳۱-۲۹.
- 3- Chapra, Steven C., (1997). "Surface Water-Quality Modeling", MC Graw-Hill, pp.276-293. 560-575, 577-588.
- 4- Goldman C.R. and Horne, A.J., (1983). "Limnology", McGraw-Hill.
- 5- Hydrologic Engineering Center U.S. Army Corps of Engineering , (1986). "Simulation Of Flood Control And conservation Systems-Appendix On Water Quality Analysis : HEC-5Q", September.
- 6- I.C.O.L.D., (1994). "Dams And Environment, Water Quality And Climate", Bulletin 96, pp.4-75.
- 7- Krenkel, P. A., Novothy, V., (1980). "Water Quality Management", Academic Press INC., Orlando, Florida.
- 8- Orlob, G.T., "Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs", John Wiley & Sons, 1983.
- 9- Wong, T.H.F., N.B. Wellington, "Modeling Water Resources Systems Using HEC-5Q", The Institution of Engineering Australia, Conference on Hydraulic In Civil Engineering, 1990.