



مدل سازی و بررسی آزمایشگاهی کاهش تبخیر سطحی آب توسط پوشش های شناور با حضور جریان سطحی

امیر رضازاده^۱، پوریا اکبرزاده^{۱*}، میلاد امین زاده^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۰۵

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۰۳

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۰۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۰۷

کلمات کلیدی:

تبخیر سطحی

جریان سطحی

توپ های شناور

دبی بهینه

بالانس انرژی

خلاصه: امروزه حفظ منابع آب شیرین به دلیل رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و خشکسالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نواحی خشک، بخش قابل توجهی از آب‌های ذخیره شده به دلیل تبخیر از بین می‌رود که پوشاندن سطح مخازن با اجسام شناور، راهکاری ساده و قابل اطمینان برای کاهش تبخیر به‌شمار می‌آید. علی‌رغم مطالعات گسترده روی پوشش‌های شناور، تاثیر آن‌ها در حضور جریان‌های سطحی تاکنون مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است. لذا در این مطالعه به مدل‌سازی و بررسی آزمایشگاهی تاثیر جریان سطحی بر میزان تبخیر مخازن آب پوشیده با اجسام شناور پرداخته می‌شود. بدین منظور از توپ‌های سیاه و سفید برای پوشش‌دهی مخزن و از یک پمپ جهت ایجاد جریان سطحی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان تبخیر تا یک دبی مشخص (دبی بهینه)، کاهش و مجدداً با افزایش دبی، افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی شرایط وجود/عدم وجود جریان، کمترین میزان تبخیر در پوشش‌دهی با توپ‌های سفید رخ می‌دهد. در ضمن پوشش‌دهی به صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید و پوشش با توپ‌های سیاه به ترتیب در رتبه‌های بعدی کاهش تبخیر قرار دارند (بیشترین تبخیر مربوط به حالت بدون پوشش می‌باشد). همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی انرژی نشان می‌دهد که روابط حاکم بر مدل‌سازی، دقت قابل قبولی در تخمین میزان تبخیر برای تمامی حالت‌های بدون پوشش/پوشش‌دهی همراه با وجود/عدم وجود جریان سطحی خواهد داشت.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت جوامع بشری، رشد جمعیت، توسعه صنعت و کشاورزی و تغییرات اقلیمی که با افزایش خشکسالی و کاهش بارندگی‌ها همراه است، تامین آب شیرین به یکی از دغدغه‌های اساسی در بسیاری از نقاط جهان تبدیل شده است. هرچند تبخیر سطحی به خصوص در نواحی خشک و نیمه‌خشک موجب اتلاف بخش قابل توجهی از آب‌های ذخیره شده می‌شود، با این وجود ذخیره آب در مخازن روباز در فصول پربارش یکی از روش‌های قدیمی برای پاسخ به این نیاز بوده است. دلایل اصلی تبخیر سطحی را می‌توان سرعت باد، تابش خورشید، دمای هوا، رطوبت و فشار اتمسفر دانست. لذا امروزه ذخیره‌سازی آب در مخازن زیرزمینی [۱] و [۲]، استفاده از پوشش‌های فیزیکی شناور [۳]، پوشش‌های شیمیایی و پلیمری

[۴] و بادشکن‌ها [۵] از جمله روش‌های رایج برای کاهش تبخیر محسوب می‌شوند. با این وجود، گزارش‌های متعددی بیان داشته‌اند که پوشش‌های فیزیکی، عملکرد بهتر و مؤثرتری نسبت به دیگر راهکارهای کاهش تبخیر سطحی دارند [۶]. این پوشش‌ها به دو نوع ثابت و شناور تقسیم می‌شوند. پوشش‌های ثابت به صورت یکپارچه سطح آب را پوشش می‌دهند و نسبت به پوشش‌های شناور درصد پوشش‌دهی بالاتر و راندمان کاهش تبخیر بهتری دارند ولی از لحاظ بیولوژیکی و زیست‌محیطی به دلیل کم شدن تماس هوا با آب و کاهش نور ورودی به مخزن، کیفیت آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مقابل، وجود شکاف‌های بین پوشش‌های شناور در حین قرارگیری روی سطح آب سبب حفظ کیفیت آب و تداوم حیات آبزیان می‌شود [۷]. پوشش‌های شناور باتوجه به ساختار هندسی، جنس و رنگ (خواص حرارتی و تابشی) عملکرد مختلفی در کاهش تبخیر از خود نشان می‌دهند.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: akbarzad@ut.ac.ir

p.akbarzadeh@shahroodut.ac.ir



نشان می‌دهد که این پوشش‌ها، به ترتیب ۶۴، ۵۰ و ۳۶ درصد، راندمان کاهش تبخیر دارند. اسثان و همکاران [۴] به مقایسه و بررسی تأثیر و درصد نرخ کاهش تبخیر توسط پوشش‌های شیمیایی نسبت به پوشش‌های فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی در شهر کویزنلند^۶ استرالیا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پوشش‌های شیمیایی مشکلاتی از قبیل پارگی و تجمع روی سطح آب در اثر سرعت باد دارند و استفاده از پوشش‌های شناور بهترین و مؤثرترین روش در کنترل و کاهش تبخیر از سطح مخازن است. اسولین و همکاران [۱۳] در ارزیابی پوشش‌های شناور در کنترل و کاهش تبخیر از سطح آب تأثیر قطر شکاف‌های آبی و فواصل بین پوشش‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در استفاده از این پوشش‌ها با قطر شکاف ۱ تا ۵ میلی‌متر در مخازن آب کوچک، نرخ تبخیر سطحی رفتار غیرخطی دارد و کاهش تبخیر متناسب با سطح پوشیده شده نمی‌باشد. کولی [۱۴] به طراحی پوشش‌های شناور از طریق بررسی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش پرداخت. او از پوشش‌هایی نظیر بتن سبک، لاستیک بوتیل^۷ سفیدرنگ و استایروفوم برای انجام این تحقیق استفاده کرد. نتایج او نشان داد که رنگ سفید بهترین رنگ در طراحی پوشش‌های شناور است و استفاده از پوشش یکپارچه با یک شکاف آبی در سطح راندمان کاهش تبخیر بالاتری نسبت به پوشش‌های شناور کوچک با شکاف‌های باز بیشتر دارد. آوارز و همکاران [۳] از پوشش‌های سایه سیاه‌رنگ جهت پوشش‌دهی سطح آب مخازن شهر کارتاژنای^۸ اسپانیا استفاده کردند. آن‌ها سطح آب را به دو صورت تک‌لایه و دولایه پوشش‌دهی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این چیدمان پوشش به ترتیب ۷۵ و ۸۵ درصد از تلفات تبخیر جلوگیری می‌کند.

در کنار انجام مطالعات تجربی، روابط زیادی نیز برای برآورد تقریبی میزان تبخیر از سطح دریاچه‌ها، سدها و دیگر مخازن آب ارائه شده است که بر پایه آنالیز بالانس انرژی روی سطح آب استوار می‌باشد. از جمله پرکاربردترین این روابط می‌توان به رابطه پنمن مونتیت^۹، پرستلی تیلور^{۱۰} و انتقال جرم^{۱۱} اشاره کرد که برای استفاده

امین‌زاده و همکاران [۱] از توپ‌های پلی‌اتیلنی و دیسک‌های استایروفوم^۱ با رنگ‌های سفید و سیاه به‌عنوان پوشش شناور روی مخازن روباز استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که پوشش‌های دیسکی نسبت به توپ‌های شناور عملکرد بهتری در کاهش تبخیر دارند. از دیگر نتایج جذاب این مطالعه عدم تأثیر رنگ پوشش‌ها بر راندمان کاهش تبخیر به‌دلیل خواص حرارتی موارد مورد استفاده به‌عنوان پوشش بود. چادهری و همکاران [۸] ورقه‌های ترموکل^۲ را برای پوشش‌دهی حوضچه‌های آب در یکی از روستاهای هند انتخاب کردند. این نوع پوشش‌ها با توجه به این که در اثر صاعقه دچار آسیب شده بودند با این حال تا ۳۲ درصد از تلفات تبخیر جلوگیری کردند. با توجه به تبخیر سطحی زیاد در استخرهای خورشیدی با غلظت نمک مختلف و محدود بودن استفاده از پوشش‌های کدر، سیلوا و همکاران [۹] از شیشه‌های پلی‌استایرن^۳ برای پوشش‌دهی در این گونه از مخازن آب بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان داد این پوشش‌ها تا ۴۳ درصد در کاهش تبخیر مؤثر می‌باشند. با توجه به پتانسیل و امکانات موجود در یک منطقه گاهی اوقات بجای سرمایه‌گذاری و ساخت پوشش‌های فیزیکی می‌توان از پسماندهای طبیعی برای کاهش تبخیر از سطح آب استفاده کرد. به‌عنوان مثال آلام و همکاران [۱۰] از پوست تنه درخت خرما که در عربستان سعودی به‌عنوان زباله دور ریخته می‌شود برای پوشاندن مخازن روباز در معرض تابش خورشید استفاده کردند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد این پوشش‌ها علاوه بر برداشتن خطر احتمالی برای کیفیت آب، قابلیت کاهش تبخیر تا ۵۸ درصد را دارا می‌باشند. مظاهری و کوپایی [۱۱] جهت ارزیابی نرخ کاهش تبخیر از سطح مخازن آب در مزرعه آموزشی واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان، از سه نوع پوشش پلی‌استایرن، پلی‌کربنات^۴ و پلی‌استایرن با روکش آلومینیوم استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها و تحقیقات آن‌ها نشان داد که این پوشش‌ها به ترتیب ۸۵/۶، ۸۳ و ۷۶/۵ درصد از تلفات تبخیر جلوگیری می‌کنند. بنزاقتا و همکاران [۱۲] از سه پوشش دیگر برای ارزیابی کاهش تبخیر از سطح مخازن استفاده کردند. آن‌ها سطح مخازن روباز در دانشگاه پاترا مالزی^۵ را با حصیر، تخته‌های چوبی چندلایه و ورق گالوانیزه فولادی تحت پوشش قرار دادند. نتایج آن‌ها

6 Queensland
7 Butyl Rubber
8 Cartagena
9 Penman- Monteith
10 Priestley-Taylor
11 Mass Transfer

1 Styrofoam
2 Thermocol
3 Polystyrene
4 Polycarbonate
5 Putra Malaysia

این گونه مخازن به دقت مورد بررسی قرار گیرد و اقدامات لازم جهت کاهش آن صورت پذیرد. بنابراین هدف اصلی مطالعه حاضر مدل سازی و بررسی آزمایشگاهی تبخیر سطحی از مخازن آب پوشیده شده با اجسام شناور در شرایط وجود و عدم وجود جریان سطحی است. در این مقاله، نخست تجهیزات مورد استفاده و جزئیات آزمایش های تبخیر شرح داده و نتایج حاصل از میزان تبخیر در شرایط وجود و عدم وجود جریان سطحی و عملکرد پوشش های شناور کاهنده تبخیر، تجزیه و تحلیل شده است. سپس مدل سازی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش های شناور در شرایط جریان سطحی و عدم جریان سطحی مورد بررسی قرار گرفته تا امکان برآورد تقریبی تبخیر از مخازن روباز تحت شرایط فوق نیز میسر گردد.

۲- معرفی تجهیزات، ساختار و روش آزمایش

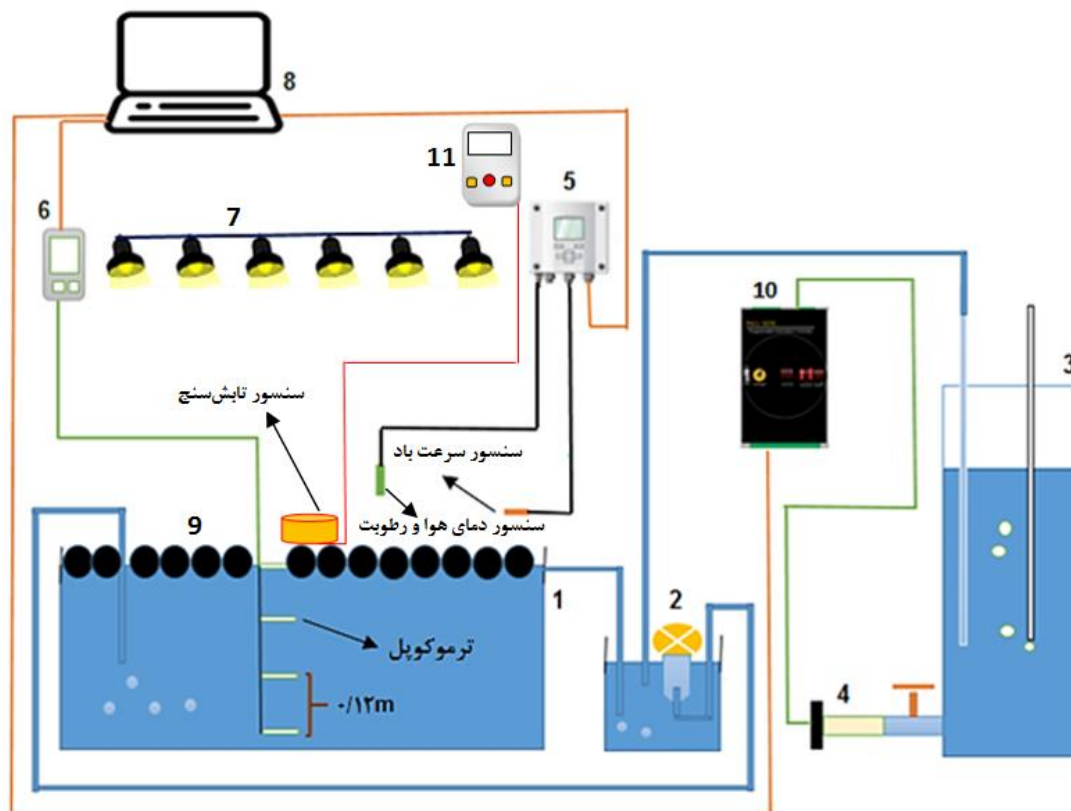
در این بخش به معرفی تجهیزات، ساختار، روش و شرایط حاکم بر آزمایش تبخیر سطحی پرداخته می شود. این آزمایش در آزمایشگاه تخصصی انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است. شکل ۱ تصویر شماتیک تجهیزات و ساختار آزمایش را نمایش می دهد. یک مخزن پلی اتیلن به ابعاد سانتی متر مکعب و ضخامت ۶ میلی متر جهت ذخیره آب مورد استفاده قرار گرفته است. ایجاد جریان سطحی به کمک یک پمپ آب با دبی ثابت انجام می شود. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود یک حسگر فشار در حالت جریان سطحی (به دلیل ثابت بودن ارتفاع آب مخزن) در قسمت پایین ظرف ماریوت^۱ نصب می گردد و هر ده دقیقه تغییرات فشار هیدرواستاتیک که بیانگر نرخ تبخیر است را به صورت جریان الکتریکی به دستگاه ثبت و پردازش داده ها ارسال می کند. دستگاه ثبت و پردازش مدل پی.آ.سی ساخت شرکت فرارو پایا^۲ پس از دریافت مقادیر جریان الکتریکی از حسگر فشار، آن را تبدیل به مقدار معادل فشار هیدرواستاتیک کرده و به نمایشگر جهت ذخیره سازی ارسال می کند. در حالت عدم جریان سطحی حسگر فشار در قسمت پایین مخزن نصب می گردد. لازم به توضیح است که در حالت جریان سطحی ثابت کردن ارتفاع آب درون مخزن، توسط ظرف ماریوت انجام می گیرد. این دستگاه دارای یک خروجی آب و یک لوله مرتبط با هوا می باشد. فشار هوای درون ظرف ماریوت منفی و فشار در انتهای لوله مرتبط با هوا با

از هر کدام از این روابط پارامترهای مختلفی نیازمند می باشد. در اکثر مطالعاتی که از روابط مذکور در جهت ارزیابی نرخ تبخیر سطحی استفاده شده است (نظیر علی و همکاران [۱۶]، گرجی زاده و همکاران [۱۷]، ماسونر و همکاران [۱۸]، سینق و ژو [۱۹] و اسمر و ارگنیزینر [۲۰]) اثر جریان سطحی در نظر گرفته نشده است. در حالی که بسیاری از مخازن آب دارای جریان های سطحی ورودی و خروجی هستند که این جریانات سبب اختلاط حرارتی لایه های سیال می شود و نرخ تبخیر را تحت تأثیر قرار می دهد [۲۱ و ۲۲]. کاکس [۲۳] به بررسی اثرات اختلاط حرارتی لایه های آب بر میزان نرخ تبخیر در مخازن روباز در کشور قبرس پرداخت. تحقیقات او نشان داد که مخلوط کردن لایه های آب توسط دستگاه های همزن پتانسیل کاهش تبخیر از ۱۰ تا ۳۰ درصد را دارد و در فصول خشکسالی می تواند کمک شایانی به حفظ آب در برابر تبخیر سطحی داشته باشد. شرمین و همکاران [۲۴] به مدل سازی عددی تأثیر اختلاط حرارتی لایه ها بر کاهش تبخیر از سطح مخازن روباز با عمق کمتر از بیست متر پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که اختلاط حرارتی کاهش قابل ملاحظه ای از تبخیر حاصل نمی کند و نرخ کاهش تبخیر وابسته به جریان های ورودی و خروجی از دستگاه همزن آب است. آن ها همچنین اعلام کردند از آنجایی که لایه های سطحی با دمای بالا با لایه های پایین تر مخزن با دمای کمتر مخلوط می شوند، پس از گذشت زمان لایه های زیرین آب نیز گرم خواهند شد. چنانچه قرار باشد کاهش قابل ملاحظه ای از تبخیر با استفاده از روش مخلوط سازی لایه های آب به دست آید، بهتر است که لایه های زیرین آب که در اثر انتقال حرارت با لایه های سطحی گرم شده اند جایگزین منابع آبی جدید با دمای پایین تر شوند. فرناندز و همکاران [۲۵] از دستگاه هوادهی برای مخلوط سازی لایه های آب و انتقال اکسیژن به درون آن استفاده کردند. نتایج آن ها نشان داد اگرچه این روش سبب بالا بردن کیفیت آب می شود ولی تأثیر قابل ملاحظه ای در کاهش نرخ تبخیر از سطح مخازن کم عمق ندارد.

همان طور که از تحقیقات و مطالعات ذکر شده پیداست تاکنون مطالعه جامعی روی عملکرد پوشش های شناور کاهنده تبخیر در حضور جریان های سطحی انجام نشده است، این در حالی است که بسیاری از مخازن آب روباز مانند سدها دارای جریان های سطحی ورودی و خروجی می باشند که ضرورت دارد تا میزان تبخیر در

1 Mariotte's bottle

2 PAC 5370, Fararo Paya, Iran



شکل ۱. تصویر شماتیک تجهیزات و ساختار آزمایش: (۱) مخزن پلی اتیلن، (۲) پمپ آب، (۳) ظرف ماریوت، (۴) ترانسسمیتر فشار، (۵) دستگاه اندازه گیری سرعت باد، دما و رطوبت، (۶) دستگاه اندازه گیر دمای لایه های آب، (۷) لامپ های ۵۰۰ وات اسرام، (۸) نمایشگر جهت نمایش و ذخیره سازی مقادیر اندازه گیری شده، (۹) پوشش های شناور و (۱۰) دستگاه ثبت و پردازش فشار (۱۱) دستگاه ثبت و پردازش تابش.

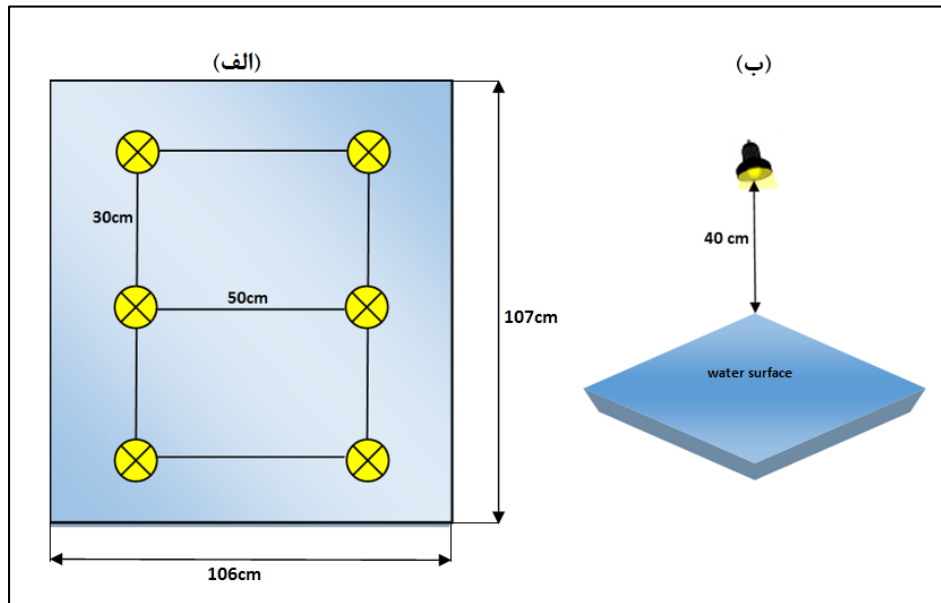
Fig.1: Schematic drawing of the equipment and the experimental set up: (1) Polyethylene reservoir, (2) Pump, (3) Mariott bottle, (4) Pressure transmitter, (5) Psychrometer and Anemometer device, (6) Thermometer, (7) Lamps, (8) Monitor for displaying and storing measured values, (9) Floating covers, (10) Pressure recording and processing device, (11) Pyranometer.

در $\pm 3/05\% \text{ FS-Vel}$ رطوبت و $\pm 1/5\% \text{ FS-RH}$ در اندازه گیری سرعت استفاده می گردد. حسگرهای مربوط به دستگاه رطوبت سنج و سرعت سنج در ارتفاع ۳۰ سانتی متری از سطح آب نصب می شوند. دمای آب توسط چهار عدد ترموکوپل^۳ مدل کاتی تی ۳۲۰^۴ ساخت شرکت کیمو با دقت $\pm 0/1$ درجه سانتی گراد که در عمق های صفر، ۱۲ سانتی متری، ۲۴ سانتی متری و ۳۶ سانتی متری از سطح آب نصب شده اند اندازه گیری و ثبت می شود. شش عدد پروژکتور ۵۰۰ وات اسرام^۵ با اعمال تابش یکنواخت ۶۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع در کل سطح مخزن به عنوان شبیه ساز خورشید عمل می کنند (طیف تنگستن-هالوزن شبیه به نور خورشید با پیک ۰/۹

فشار اتمسفر برابر می باشد. هنگامی که دبی خروجی از مخزن به دلیل تبخیر سطحی کاهش می یابد، ارتفاع آب درون ظرفی که پمپ آب در داخل آن قرار داده شده است پایین آمده و در این لحظه، ظرف ماریوت به دلیل این که با ظرف متصل به پمپ در ارتباط می باشد، شروع به کار می کند و ارتفاع آب درون ظرف را با انتهای لوله مرتبط با هوا برابر می کند. هنگامی که ظرف ماریوت مقدار آب تبخیر شده را جبران می کند، تغییرات ارتفاع آب درون آن برابر با میزان تبخیر ایجاد شده از سطح مخزن خواهد بود. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، به منظور اندازه گیری دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد از دستگاه رطوبت سنج و بادسنج مدل سی^۱ ۳۱۰ ساخت شرکت کیمو^۲ با دقت $\pm 0/1$ درجه سانتی گراد در اندازه گیری دما و

3 Thermocouple
4 KTT320
5 Osram

1 C310
2 KIMO



شکل ۲. تصویر شماتیک نحوه آرایش و قرارگیری لامپ‌ها روی سطح آب: (الف) ابعاد و میزان فواصل بین لامپ‌ها (ب) میزان ارتفاع لامپ‌ها از سطح آب.
Fig.2: Schematic drawing of the lamps arrangement above the water surface: (a) Dimensions and spacing between the lamps (b) The height of the lamps from the water surface

۳-مدل‌سازی انرژی

برای مدل‌سازی و اعمال بالانس انرژی در مخازن ذخیره آب، می‌توان از رابطه (۱) که بیانگر تعادل انرژی‌های دریافت‌شده در سطح و انرژی‌های تلف‌شده در سطح و دیواره‌های مخزن می‌باشد، استفاده کرد [۱۴، ۱۶، ۲۶-۲۸]:

$$R_n = \frac{\rho_w LE}{86400} + G + H + \frac{Q_V}{A_S} + \frac{Q_{wall}}{A_S} \quad (1)$$

که R_n ، m^2 نرخ A_S مساحت سطح مخزن ذخیره آب برحسب m^2 نرخ خالص تابش، $L = 226 \frac{kJ}{kg}$ گرمای نهان تبخیر آب، E نرخ تبخیر برحسب $\frac{mm}{day}$ ، G نرخ انتقال حرارت محسوس از سطح به لایه‌های آب (یا حرارت ذخیره‌شده در آب)، H نرخ انتقال حرارت محسوس از سطح آب به هوا، Q_V نرخ انتقال حرارت به واسطه جریان آب (در شرایطی که مخزن دارای جریان ورودی و خروجی باشد) و Q_{wall} تلفات حرارتی از دیواره‌های مخزن می‌باشد. لازم به توضیح است که کلیه واحدهای ذکر نشده در رابطه (۱) وات بر مترمربع می‌باشند. همچنین تابش خالص R_n ، تفاوت بین تابش ورودی و خروجی در سطح آب است که موازنه بین نرخ تابش طول‌موج کوتاه ورودی خالص و تابش طول‌موج بلند خروجی خالص است که به صورت رابطه (۲)

میکرومتر در 3200 درجه کلون است). لازم به توضیح است به منظور اطمینان از یکنواخت شدن تابش روی سطح آب، از یک تابش‌سنج با دقت بالا مدل اس‌ال ۱۰۰۱ ساخت شرکت کیمو با دقت ± 0.5 وات بر متر مربع برای اندازه‌گیری میزان تابش در نقاط مختلف سطح استفاده می‌شود. شکل ۲ تصویر شماتیک مربوط به نحوه آرایش و قرارگیری لامپ‌ها روی سطح آب را نشان می‌دهد. کلیه کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط نمایشگر رایانه نمایش داده شده و در بازه زمانی مشخص ثبت می‌گردند. پوشش سطح توسط 246 عدد توپ پلی‌اتیلنی با جرم 14 گرم و قطر 7 سانتی‌متر که حدود 90 درصد از سطح مخزن را می‌پوشاند انجام می‌شود.

پس از نصب دستگاه‌ها و اطمینان از صحت عملکرد آن‌ها، مخزن پلی‌اتیلن در طی چهار آزمایش بدون پوشش، پوشش‌دهی با توپ‌های سفید، پوشش با توپ‌های سیاه و پوشش‌دهی ترکیبی به صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید، در هر دو حالت جریان سطحی و عدم جریان سطحی، تحت بررسی و کنترل قرار می‌گیرد. مدت‌زمان انجام هر آزمایش حدود شش ساعت می‌باشد. شکل ۳، تصویر واقعی تجهیزات آزمایشگاهی و کلیه حالت‌های پوشش‌دهی مخزن جهت ارزیابی نرخ کاهش تبخیر در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تصویر واقعی تجهیزات آزمایشگاهی و حالت‌های مختلف پوشش‌دهی جهت ارزیابی نرخ کاهش تبخیر سطحی: الف) مخزن بدون پوشش ب) پوشش‌دهی با توپ‌های محافظ سیاه ج) پوشش‌دهی با توپ‌های محافظ سفید د) پوشش‌دهی ترکیبی

Fig.3: The actual image of the laboratory equipment and different covering conditions to evaluate the rate of evaporation reduction: (a) Reservoir without cover (b) Covering with black balls (c) Covering with white balls (d) Mixed covering

می‌بایست تابش خالص در رابطه (۲) به شکل زیر تصحیح گردد [۱۴]:

$$R_n = R_a + [1 - (1-p)r_w - pr_c]S - \sigma[(1-p)\varepsilon_w T_w^4 + p\varepsilon_c T_c^4] - [(1-p)r'_w + pr'_c]R_a \quad (5)$$

که r_c ضریب انعکاس تابش موج کوتاه از سطح پوشش، p درصد پوشش‌دهی سطح، ε_c ضریب صدور پوشش، و r'_c ضریب انعکاس تابش موج بلند از سطح پوشش، T_w دمای سطح آب و T_c دمای سطح پوشش می‌باشد. در اکثر مطالعات مقدار ضریب انعکاس تابش موج بلند از سطح آب (r'_w) ناچیز یا برابر 0.03 و برای تابش موج کوتاه بین 0.03 تا 0.1 در نظر گرفته می‌شود [۳۰-۳۱]. همچنین ضریب انعکاس تابش موج بلند از سطح پوشش (r'_c) به دلیل در دسترس نبودن و کوچک بودن نسبت به دیگر ضرایب در محاسبات لحاظ نمی‌شود [۱۴]. در جدول شماره ۱ ضرایب انعکاس و صدور تابش موج کوتاه برای آب و پوشش‌های کروی شکل ارائه شده است.

نرخ انتقال حرارت محسوس از سطح به لایه‌های آب (یا حرارت ذخیره شده در آب) را می‌توان از رابطه (۶) بدست آورد [۳۲]:

بیان می‌شود [۱۶ و ۱۸]:

$$R_n = (1-r_w)S + R_a - [r'_w R_a + \varepsilon_w \sigma (T_w)^4] \quad (2)$$

که r'_w و r_w به ترتیب ضرایب انعکاس تابش موج کوتاه و موج بلند آب، ε_w ضریب صدور آب، S نرخ تابش موج کوتاه دریافتی، T_a دمای هوا بر حسب کلوین، T_w دمای سطح آب بر حسب کلوین، R_a تابش طول موج بلند اتمسفری است که از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$R_a = \varepsilon_a \sigma (T_a)^4 \quad (3)$$

در رابطه (۳) ε_a ضریب صدور هوا می‌باشد که برای محاسبه آن می‌توان از رابطه (۴) استفاده کرد [۲۹]:

$$\varepsilon_a = 0.919 \times 10^{-5} (T_a)^2 \quad (4)$$

چنانچه از پوشش‌های شناور روی سطح مخزن استفاده شود،

1 Stefan-Boltzman constant

جدول ۲. ارتفاع زبری سطح و ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد، رطوبت و دمای هوا برای سطح مخزن پوشش داده‌شده و بدون پوشش

Table 2: Height of surface roughness and elevation of wind speed, humidity, and air temperature measurement for the reservoir with/without covers

ارتفاع اندازه‌گیری دما و سرعت هوا از سطح آب (m)	ارتفاع زبری سطح آب (m)	
۰/۳	۰/۰۰۰۰۱	سطح آب بدون پوشش
۰/۳	۰/۰۶	سطح آب تحت پوشش

میانگین دمای لایه‌های آب مخزن می‌باشد. از آنجایی که در این آزمایش جریان خروجی از مخزن دوباره وارد مخزن می‌گردد، بعد از مدت زمان کوتاهی اختلاف دمای جریان‌های ورودی و خروجی آب ناچیز شده و بنابراین می‌توان از مقدار Q_r صرف‌نظر کرد. تلفات حرارتی از دیواره‌های مخزن به محیط نیز از رابطه (۹) بدست می‌آید:

$$Q_{wall} = -kA_w \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (9)$$

که $k = 0.38 \frac{W}{mK}$ ضریب هدایت گرمایی دیواره مخزن، ΔT اختلاف دما بین دو طرف دیواره‌ی مخزن و Δx ضخامت دیواره‌های مخزن می‌باشد. بعد از اعمال معادله بالانس انرژی در سطح آب و پوشش و محاسبه نرخ تبخیر، راندمان کاهش تبخیر برای مخازن پوشیده شده را می‌توان از رابطه (۱۰) به‌دست آورد (E_0 نرخ تبخیر از مخزن بدون پوشش در شرایط بدون جریان است) [۶]:

$$\epsilon = 1 - \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (10)$$

۴- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده پیرامون کاهش نرخ تبخیر سطحی آب به‌واسطه استفاده از پوشش‌های شناور با حضور جریان سطحی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در بخش ۱ ذکر گردید، برای دستیابی به این هدف، هفت دبی مختلف شامل ۱، ۳، ۴/۵، ۶/۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ لیتر بر دقیقه توسط پمپ آب ایجاد می‌شود که در هرکدام از دبی‌های مذکور، وضعیت نرخ تبخیر سطحی در حالت‌های بدون پوشش، پوشش‌دهی با توپ‌های سفید، پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه و پوشش‌دهی ترکیبی (به‌صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید) در مدت‌زمان

جدول ۱. ضریب انعکاس تابش موج کوتاه و ضریب صدور آب و پوشش‌های کروی

Table 1: Coefficients of the reflection and emissivity radiation for water and spherical covers.

ضریب انعکاس (R)	ضریب صدور (E)	
۰/۰۳	۰/۹۵	آب
۰/۱۵	۰/۹۸	توپ‌های محافظ (سیاه)
۰/۶۵	۰/۸۵	توپ‌های محافظ (سفید)

$$G = \rho_w c_w \sum_{j=1}^N Z_j \frac{\Delta T_{wj}}{\Delta t} \quad (6)$$

که $\rho_w = 998 \frac{kg}{m^3}$ چگالی آب، $c_w = 4.18 \frac{kJ}{kgK}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب، N تعداد لایه‌های آب، Z_j عمق لایه‌های آب (در این مطالعه دمای آب در چهار لایه مختلف و در عمق‌های صفر، ۰/۱۲، ۰/۲۴ و ۰/۳۶ متر از سطح آزاد مخزن اندازه‌گیری شده است) و ΔT_{wj} تغییرات دمایی هر لایه در طول زمان آزمایش (Δt) می‌باشند. نرخ انتقال حرارت محسوس از سطح آب به هوا (H) مطابق رابطه (۷)، برابر است با [۱۴ و ۳۳]:

$$H = \frac{\rho_a c_p \kappa^2 U [(1-p)T_w + pT_c - T_a]}{\ln^2 \frac{z}{z_0}} \quad (7)$$

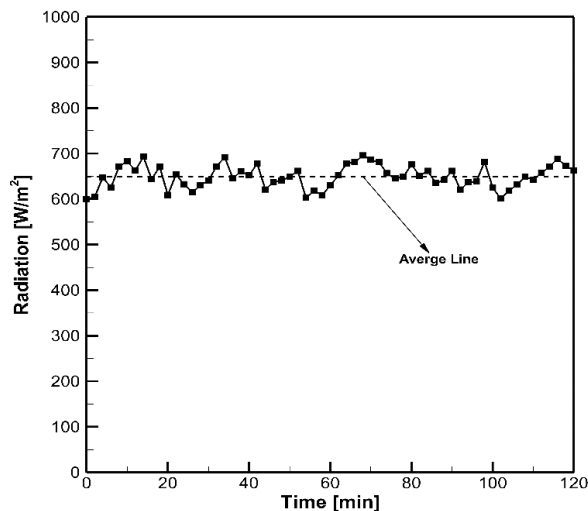
که $\rho_a = 1.225 \frac{kg}{m^3}$ چگالی هوا، $c_p = 1.012 \frac{kJ}{kgK}$ ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت، $\kappa = 0.44$ ثابت ون کارمن، U سرعت هوا در ارتفاع Z برحسب $\frac{m}{s}$ و z_0 زبری سطح می‌باشد که در جدول ۲ برای سطوح بدون پوشش و سطوح تحت پوشش با توپ‌های شناور ذکر گردیده است.

همان‌طور که ذکر گردید جریان‌های ورودی و خروجی به مخزن می‌تواند حرارت ذخیره‌شده درون آب را تحت تأثیر قرار دهد بنابراین برای محاسبه نرخ انتقال حرارت وارد شده به مخزن از طریق جریان‌های ورودی و خروجی از رابطه (۸) استفاده می‌شود [۱ و ۳۴]:

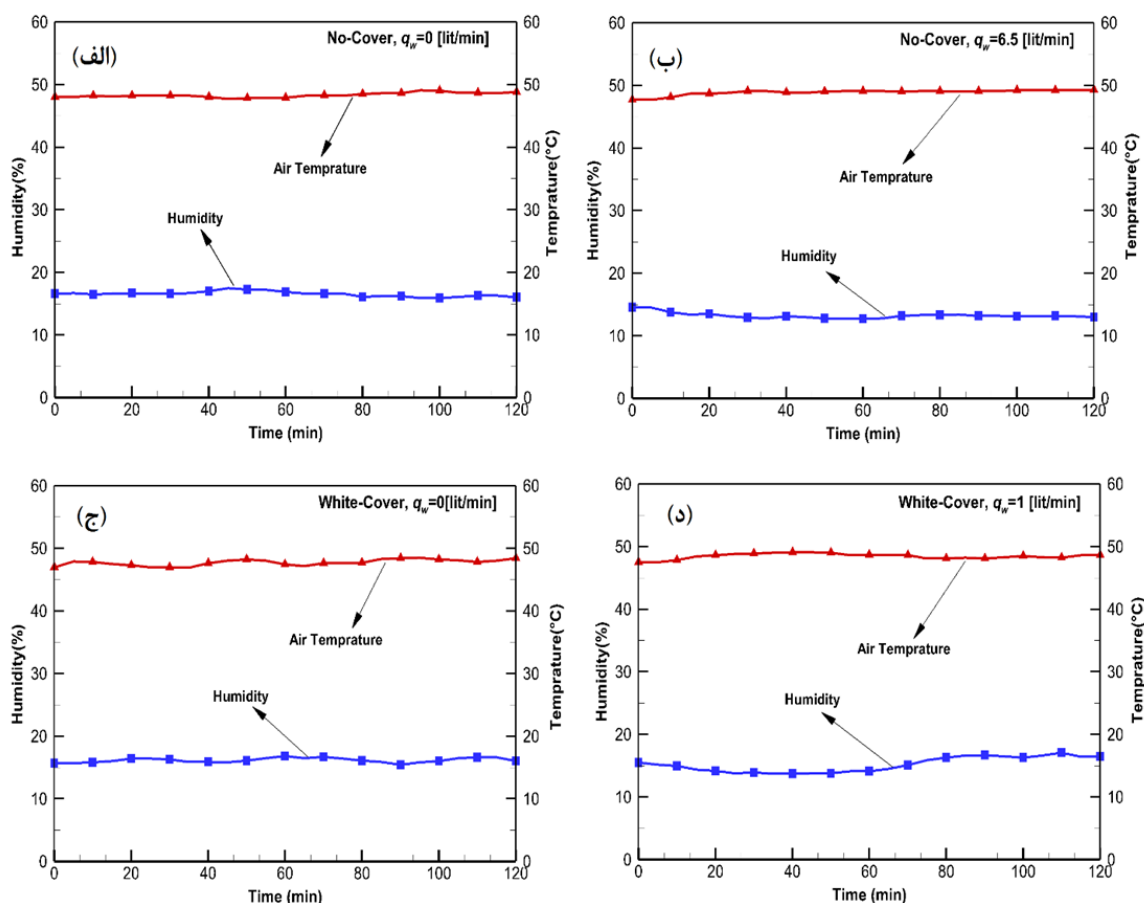
$$Q_r = \sum_i \rho_w c_w q_{wi} (T_i - \bar{T}) - \sum_e \rho_w c_w q_{we} (T_e - \bar{T}) \quad (8)$$

که T_i و T_e به ترتیب دمای جریان‌های ورودی و خروجی آب، q_{wi} و q_{we} به ترتیب دبی جریان‌های ورودی و خروجی آب و \bar{T}

شش ساعت مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در تمامی این آزمایش‌ها حدود چهار ساعت اول برای ایجاد حالت تعادل در شرایط محیطی (دما و رطوبت نسبی در ارتفاع Z) و حدود دو ساعت آخر برای ثبت داده‌ها و اندازه‌گیری میزان تبخیر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ میزان تابش اعمال شده روی سطح مخزن در شرایط تعادل را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحاتی که در بخش ۲ به آن اشاره شد، دامنه تغییرات تابش بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع می‌باشد. به‌طور کلی در آزمایش‌های مربوط به تبخیر سطحی، پایدار بودن و ایجاد تعادل در یک سیستم آزمایشگاهی، منوط به پایداری شرایط محیطی نظیر رطوبت نسبی و دمای هوا در نزدیکی سطح آب می‌باشد. البته ثابت نگه‌داشتن این دو مولفه در مدت زمان طولانی در عمل تقریباً غیر ممکن است (به دلیل تغییرات سیستم گرمایش و سرمایش آزمایشگاه‌ها

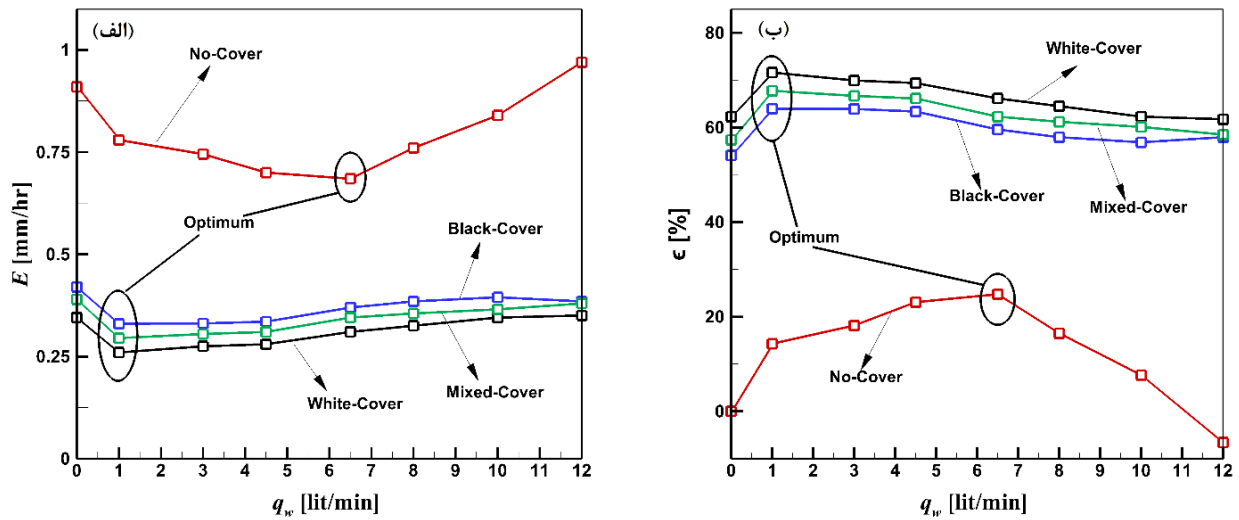


شکل ۴. تصویر میزان تابش اعمال شده به سطح مخزن تحت شرایط تعادل.
Fig. 4: Image of the amount of the radiation applied to the reservoir surface under equilibrium conditions



شکل ۵: تغییرات رطوبت نسبی و دمای هوا روی سطح آب در دو ساعت انتهایی آزمایش: (الف) حالت بدون پوشش و بدون جریان سطحی (ب) حالت بدون پوشش با دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه (ج) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ در دبی ۱ لیتر بر دقیقه (د) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ و بدون جریان سطحی (د) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ در دبی ۱ لیتر بر دقیقه

Fig. 5: Relative humidity and air temperature changes on the water surface in the last two hours of the experiment: (a) No cover and no flow condition (b) No cover condition with 6.5 lit/min surface flow-rate (c) Coverage mode with white balls without surface flow (d) Coverage mode with white balls with 1 lit/min surface flow-rate.



شکل ۶. نتایج بدست آمده از آزمایش تبخیر سطحی برای مقادیر مختلف جریان سطحی. (الف) میزان تبخیر سطحی برای دو ساعت آخر از مجموع شش ساعت زمان آزمایش. (ب) راندمان کاهش تبخیر. در اینجا میزان تبخیر از سطح پوشیده نشده در شرایط بدون جریان (یعنی مقدار $E_0 = 0.68$ [mm/hr]) به عنوان نرخ تبخیر مرجع برای محاسبه راندمان در رابطه (۱۰) استفاده شده است.

Fig. 6: Results obtained by the surface evaporation test for various surface flow-rates. (a) Surface evaporation for the last two hours from total of six hours of experiment (b) Evaporation reduction efficiency. Here the evaporation from covered surfaces in no-flow condition (i.e.,) is used as the reference evaporation to calculate the efficiency in equation (10).

می‌شد استفاده از پوشش‌های شناور تأثیر قابل توجهی در کاهش میزان تبخیر سطحی دارند، به گونه‌ای که پوشش‌های سفیدرنگ در دبی ۱ لیتر بر دقیقه (به‌عنوان مثال)، حدود ۷۱/۵ درصد در بهبود راندمان کاهش تبخیر نقش ایفا خواهند کرد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از پوشش‌های سفیدرنگ به دلیل داشتن ضریب جذب تشعشعی پایین‌تر و ضریب انعکاس تابش موج کوتاه بزرگتر (τ_c) نقش مؤثرتری در کاهش میزان تبخیر در مقایسه با پوشش‌های سیاه‌رنگ خواهند داشت. لازم به توضیح است که مطابق نمودارهای رسم شده در شکل ۶ افزایش مقدار دبی سطحی ابتدا میزان تبخیر کاهش یافته (به عبارتی راندمان کاهش تبخیر افزایش می‌یابد) و سپس از یک دبی به بعد (که دبی بهینه معرفی شده است) میزان تبخیر افزایش می‌یابد. این ویژگی برای حالت بدون پوشش کاملاً مشهود و چشم‌گیر است، به گونه‌ای که میزان تبخیر از ۰/۹۱۵ میلی‌متر بر ساعت برای مخزن بدون جریان به حدود ۰/۶۸۵ میلی‌متر بر ساعت برای مخزن تحت دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه کاهش می‌یابد. این افزایش ۲۵/۱ درصدی راندمان کاهش تبخیر نشان می‌دهد که ایجاد جریان سطحی می‌تواند به عنوان راهکار موثری برای حفظ منابع

در طول شبانه روز، ایزوله نبودن محیط آزمایشگاهی با محیط بیرون و غیره). لذا می‌بایست در حدود ۶ ساعت اولیه روز که ثابت نگه داشتن دو مولفه مذکور تقریباً میسر است، فرایند انجام یک آزمایش را تکمیل کرد. شکل ۵ وضعیت پایداری و تعادل این دو مولفه مذکور را برای چهار نمونه از آزمایش‌های انجام شده، یعنی (الف) حالت بدون پوشش و بدون جریان سطحی (ب) حالت بدون پوشش با دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه (ج) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ و بدون جریان سطحی و (د) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ در دبی ۱ لیتر بر دقیقه را در دو ساعت انتهایی آزمایش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد رطوبت نسبی به‌طور متوسط در حدود ۱۶ درصد و دمای آب روی ۳۰ سانتی‌متری سطح آب به‌طور متوسط در حدود ۴۷ درجه سانتی‌گراد به تعادل رسیده‌اند.

نتایج مربوط به میزان تبخیر، حاصل از داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۶ نمایش داده شده است. شکل ۶ (الف) میزان تبخیر سطحی برای دو ساعت آخر از مجموع شش ساعت زمان آزمایش بر حسب میلی‌متر بر ساعت (E) و شکل ۶ (ب) راندمان کاهش تبخیر را برای هر چهار حالت پوشش‌دهی نشان می‌دهد. همانگونه که پیش‌بینی

جدول ۳. جزئیات مربوط به میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر در شرایط مختلف برای روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی

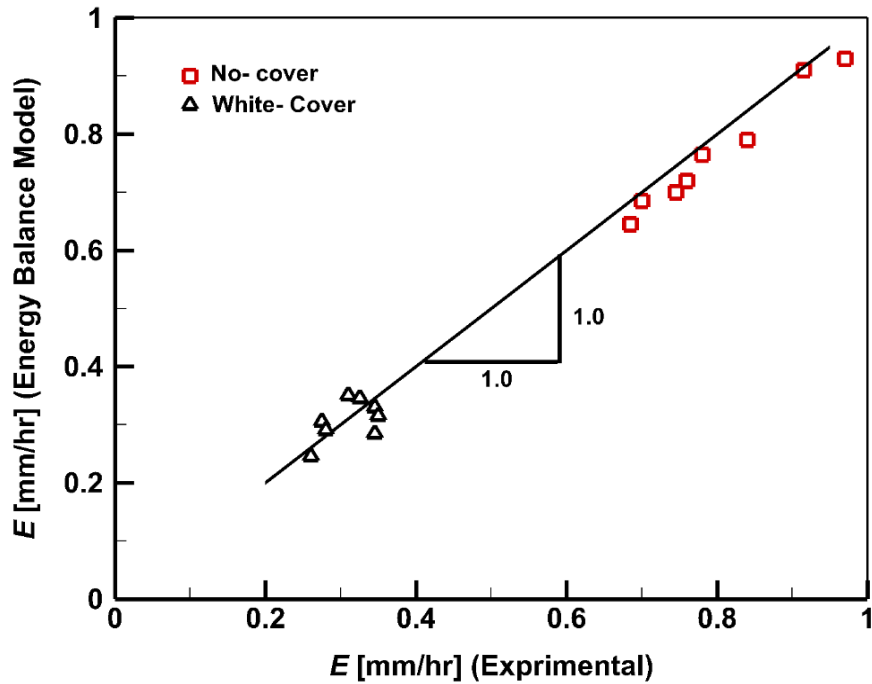
Table 3: Details of the surface evaporation rate and evaporation reduction efficiency in different conditions for experimental and modeling methods

پوشش ترکیبی		پوشش سیاه		پوشش سفید		بدون پوشش		$q_w [1/min]$	
$E [mm/hr]$	$\epsilon [%]$	$E [mm/hr]$	$\epsilon [%]$	$E [mm/hr]$	$\epsilon [%]$	$E [mm/hr]$	$\epsilon [%]$		
۰/۳۹۰	۵۷/۳	۰/۴۲۰	۵۴/۱	۰/۳۴۵	۶۲/۳	۰/۹۱۵	-	۰	نتایج آزمایشگاهی
۰/۲۹۵	۶۷/۷	۰/۳۳۰	۶۳/۹	۰/۲۶۰	۷۱/۵	۰/۷۸۰	۱۴/۷	۱	
۰/۳۰۵	۶۶/۵	۰/۳۳۰	۶۳/۸	۰/۲۷۵	۷۰/۱۰	۰/۷۴۵	۱۸/۲	۳	
۰/۳۱۰	۶۶/۱	۰/۳۳۵	۶۳/۳	۰/۲۸۰	۶۹/۳	۰/۷۰۰	۲۰/۲	۴/۵	
۰/۳۴۵	۶۲/۲	۰/۳۷	۵۹/۵	۰/۳۱۰	۶۶/۱	۰/۶۸۵	۲۵/۱	۶/۵	
۰/۳۵۵	۶۱/۰	۰/۳۸۵	۵۷/۶	۰/۳۲۵	۶۴/۵	۰/۷۶۰	۱۶/۵	۸	
۰/۳۶۵	۶۰/۱	۰/۳۹۵	۵۶/۸	۰/۳۴۵	۶۲/۳	۰/۸۴۰	۸/۲	۱۰	
۰/۳۸۰	۵۸/۴	۰/۴۰۰	۵۸/۰	۰/۳۵۰	۶۰/۱۰	۰/۹۷۰	-۶/۱	۱۲	
۰/۳۷۰	۵۹/۳	۰/۴۳۵	۵۲/۲	۰/۳۳۰	۶۳/۷	۰/۹۱۰	-	۰	
۰/۲۶۰	۷۱/۴	۰/۳۵۵	۶۱/۰	۰/۲۴۵	۷۲/۹	۰/۷۶۵	۱۵/۹	۱	نتایج مدل‌سازی
۰/۳۵۰	۶۱/۵	۰/۳۳۵	۶۳/۱	۰/۳۰۵	۶۶/۴	۰/۷۰۰	۲۳/۱	۳	
۰/۳۴۰	۶۲/۶	۰/۳۵	۶۱/۵	۰/۲۹۰	۶۸/۰	۰/۶۸۵	۲۴/۷	۴/۵	
۰/۳۸۰	۵۸/۲	۰/۴۰۵	۵۵/۴	۰/۳۵۰	۶۱/۵	۰/۶۴۵	۲۹/۱	۶/۵	
۰/۳۶۵	۵۹/۶	۰/۴۱۵	۵۴/۵	۰/۳۴۵	۶۱/۸	۰/۷۲۰	۲۱/۱	۸	
۰/۳۰۰	۶۷/۱۰	۰/۳۴۰	۶۲/۶	۰/۲۸۵	۶۸/۶	۰/۷۹۰	۱۳/۱	۱۰	
۰/۴۲۰	۵۳/۸	۰/۴۵۵	۴۹/۸	۰/۳۱۵	۶۵/۴	۰/۹۳۰	-۲/۱	۱۲	

و مدل‌سازی آورده شده است. دقت مناسب و قابل قبول روش مدل‌سازی در تخمین میزان تبخیر سطحی نیز در این شکل مشاهده می‌گردد. جدول ۴ جزئیات مربوط به میزان خطای مطلق (AR) بر حسب میلی‌متر و درصد خطای نسبی (RE) بر حسب درصد بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، متوسط خطای روش مدل‌سازی برای همه دی‌های سطحی برای حالت بدون پوشش، پوشش با توپ‌های سفید، پوشش با توپ‌های سیاه و پوشش با توپ‌های ترکیبی به ترتیب، ۳/۹۷۹، ۸/۸۸۱، ۷/۷۵۸ و ۱۰/۳۴۰ درصد می‌باشد. در اینجا، به مواردی نظیر دقت دستگاه‌ها و خطاهای اندازه‌گیری، تقریبات مندرج در جدول ۱ و مقادیر مورد استفاده برای خواص فیزیکی آب و هوا می‌توان به‌عنوان دلایل اصلی و مهم خطای بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی اشاره نمود.

انرژی تابشی جذب شده توسط آب تابعی از عمق لایه‌های آن می‌باشد. بطوری‌که سطح تماس آب با هوا دارای بیشترین مقدار جذب انرژی تابشی می‌باشد و دیگر لایه‌ها به‌ترتیب عمق سهم کمتری از آن دریافت می‌کنند. هنگامی‌که ستون آب بدون حرکت باشد به

آبی ذخیره شده بدون صرف هزینه‌های تامین پوشش‌های شناور در نظر گرفته شود. برای توجیه و تفسیر این پدیده لازم است نتایج مربوط به تغییرات دما در لایه‌های مختلف آب ارائه و مورد تحلیل قرار گرفته شود که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد. جزئیات دقیق مربوط به میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر به تفکیک حالت‌های آزمایش شده در جدول ۳ به‌همراه نتایج حاصل از مدل‌سازی نیز ارائه شده است. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌گردد، استفاده از روش مدل‌سازی بالانس انرژی با تقریب بسیار خوبی قادر است میزان تبخیر را با داشتن دمای سطح و دمای متوسط لایه‌های آب برای تمامی حالت‌های با پوشش‌دهی، بدون پوشش‌دهی، با حضور جریان سطحی و بدون جریان سطحی پیش‌بینی نماید. به همین منظور شکل ۷ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی بالانس انرژی میزان تبخیر (میلی‌متر بر ساعت) برای شرایط بدون پوشش و پوشش‌دهی با توپ‌های سفید در تمامی هفت دی‌جریان سطحی را در یک نمودار یک-به-یک نمایش می‌دهد. در این شکل خط مستقیم رسم شده با شیب ۱:۱ جهت برآورد میزان اختلاف روش آزمایشگاهی



شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی بالانس انرژی میزان تبخیر (میلی متر بر ساعت) برای شرایط بدون پوشش و پوشش دهی با توپ های سفید در تمامی هفت دبی جریان سطحی

Fig. 7: Comparison of experimental and energy balance modeling results of the evaporation test for no cover and coverage mode with white balls in all seven surface flow-rates

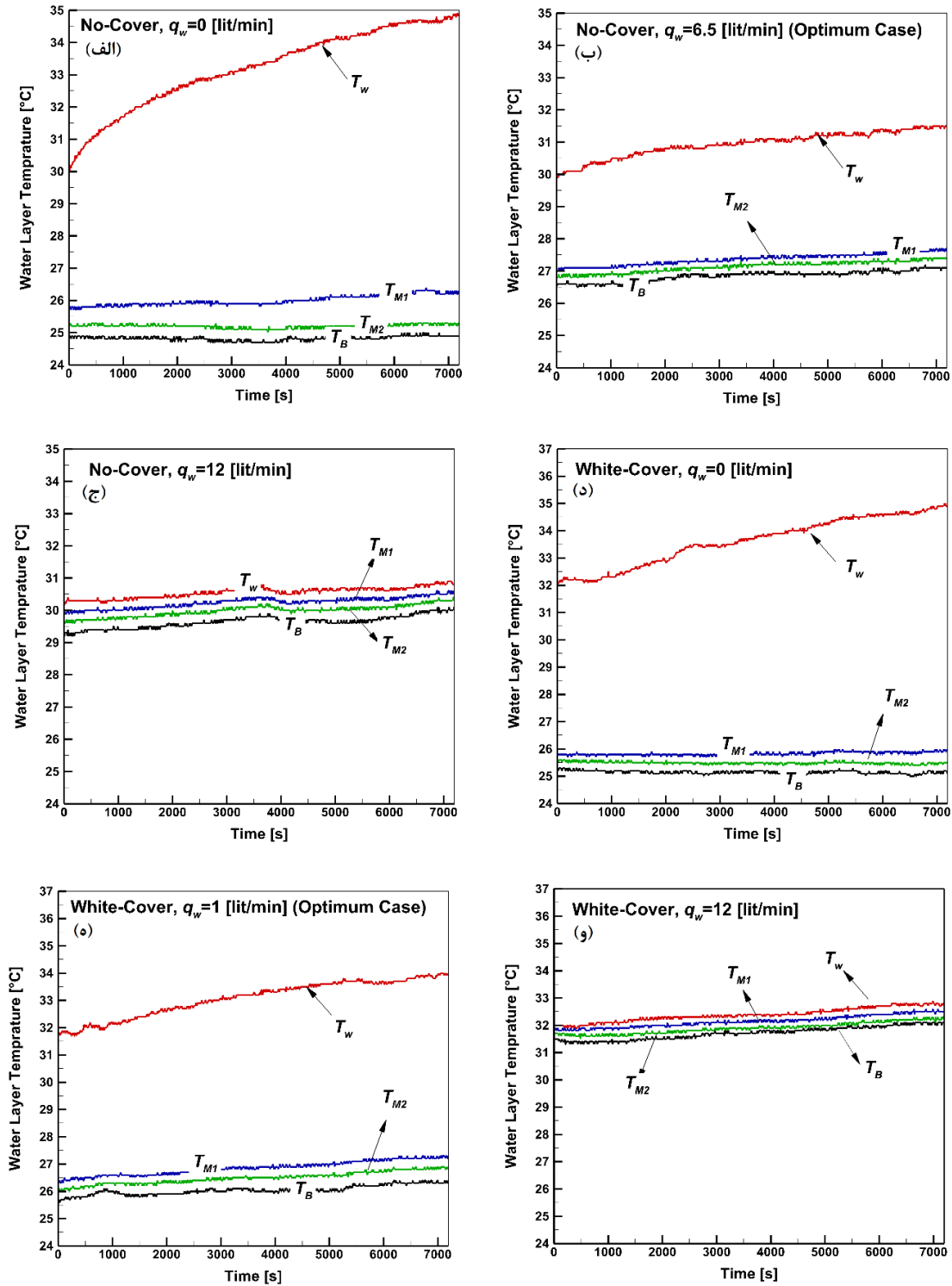
جدول ۴. جزئیات مربوط به میزان خطای مطلق و درصد خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی.

Table 4: Details of absolute and relative errors between experimental and modeling results

پوشش ترکیبی		پوشش سیاه		پوشش سفید		بدون پوشش		$q_w [l/min]$
$RE [%]$	$AR [mm]$	$RE [%]$	$AR [mm]$	$RE [%]$	$AR [mm]$	$RE [%]$	$AR [mm]$	
۵/۱۲۸	۰/۰۲۰	۳/۵۷۱	۰/۰۱۵	۴/۳۴۸	۰/۰۱۵	۰/۵۴۶	۰/۰۰۵	۰
۱۱/۸۶۴	۰/۰۳۵	۷/۵۷۶	۰/۰۲۵	۵/۷۶۹	۰/۰۱۵	۱/۹۲۳	۰/۰۱۵	۱
۱۴/۷۵۴	۰/۰۴۵	۱/۵۱۵	۰/۰۰۵	۱۰/۹۰۹	۰/۰۳۰	۶/۰۴۰	۰/۰۴۵	۳
۹/۶۷۷	۰/۰۳۰	۴/۴۷۸	۰/۰۱۵	۳/۵۷۱	۰/۰۱۰	۲/۱۴۳	۰/۰۱۵	۴/۵
۱۰/۱۴۵	۰/۰۳۵	۹/۴۵۹	۰/۰۳۵	۱۲/۹۰۳	۰/۰۴۰	۵/۸۳۹	۰/۰۴۰	۶/۵
۲/۸۱۷	۰/۰۱۰	۷/۷۹۲	۰/۰۳۰	۶/۱۵۴	۰/۰۲۰	۵/۲۶۳	۰/۰۴۰	۸
۱۷/۸۰۸	۰/۰۶۵	۱۳/۹۲۴	۰/۰۵۵	۱۷/۳۹۱	۰/۰۶۰	۵/۹۵۲	۰/۰۵۰	۱۰
۱۰/۵۲۶	۰/۰۴۰	۱۳/۷۵۰	۰/۰۵۵	۱۰/۰۰۰	۰/۰۳۵	۴/۱۲۴	۰/۰۴۰	۱۲
۱۰/۳۴۰	۰/۰۳۵	۷/۷۵۸	۰/۰۲۹	۸/۸۸۱	۰/۰۲۸	۳/۹۷۹	۰/۰۳۱	متوسط

دارند (هایپولیمنیون^۲) شده و از نفوذ اکسیژن هوا و انرژی تابشی به لایه های زیرین ممانعت می کند. بدین ترتیب با ادامه تابش، دمای لایه فوقانی افزایش یافته و اختلاف آن با دمای لایه های زیرین بیشتر

دلیل افزایش دما در سطح، لایه ای با ضخامت مشخص و با چگالی کم در سطح آب ایجاد می شود. این لایه فوقانی (اپیلیمنیون^۱) حائل برای لایه های زیرین که به دلیل داشتن دمای پایین تر، چگالی بیشتری نیز



شکل ۸. تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول آزمایش: (الف) حالت بدون پوشش و عدم جریان سطحی (ب) حالت بدون پوشش در دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه (ج) حالت بدون پوشش در دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه (د) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ و عدم جریان سطحی (ه) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ در دبی ۱ لیتر بر دقیقه (و) حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ در دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه (در اینجا T_w دمای سطح آب و T_{M1} ، T_{M2} و T_B به ترتیب دمای آب در فاصله ۱۲، ۲۴ و ۳۶ سانتی‌متری از سطح آب می‌باشد).

Fig. 8: Variations in the temperature of the four different layers measured during the test, (a) No cover and no flow condition (b) No cover condition with 6.5 lit/min surface flow-rate (c) No cover condition with 12 lit/min surface flow-rate (d) Coverage mode with white balls without surface flow (e) Coverage mode with white balls with 1 l/m surface flow-rate (f) Coverage mode with white balls with 12 lit/min surface flow-rate. (Here T_w is the water surface temperature and T_{M1} , T_{M2} , and T_B are the water temperature at distances 12, 24, and 36 cm from water surface, respectively.)

شرح زیر ارائه گردد.

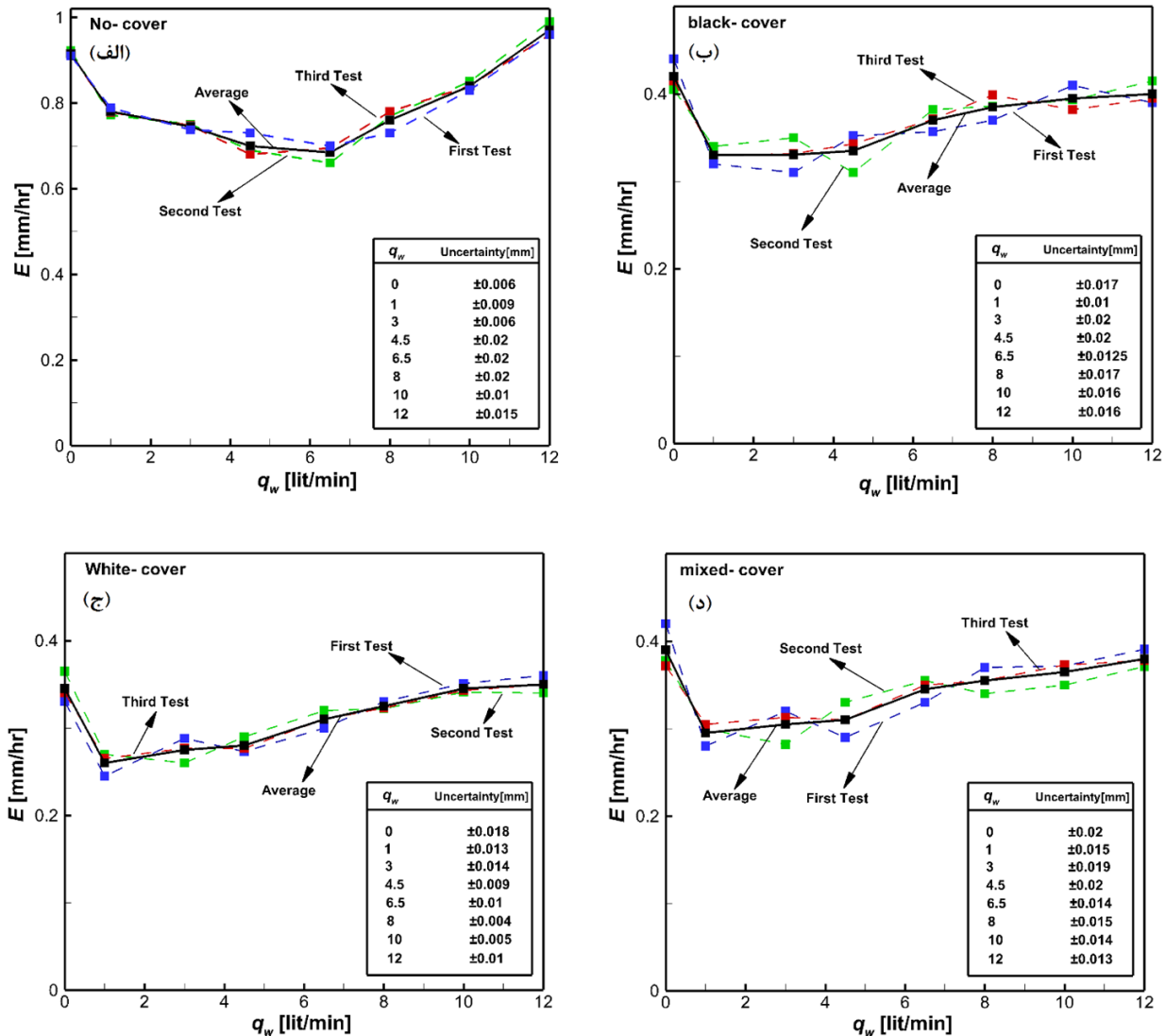
با ایجاد جریان سطحی برای آب، هوای ساکن روی مخزن به دلیل شرط مرزی بدون لغزش^۱ وادار به حرکت شده و لایه مرزی آیرودینامیکی آن به ضخامت δ_v تشکیل می‌گردد. از آنجا که ضخامت این لایه مرزی متناسب است با عکس سرعت هوا در نزدیکی سطح [۳۵]، با افزایش دبی جریان سطحی ضخامت δ_v کاهش می‌یابد. باتوجه به اینکه ضخامت لایه مرزی انتقال جرم عبارت است از $\delta_m = Sc^{-1/3} \delta_v$ (که در آن Sc عدد بدون بعد اشمیت^۲ است)، کاهش δ_v موجب کاهش δ_m و در نتیجه افزایش گرادیان غلظت بخار بین سطح و جریان هوا و در نهایت افزایش نرخ تبخیر می‌گردد. از طرفی مطابق با نتایج امین‌زاده و اور [۳۶] و حقیقی و اور [۳۷] ضریب انتقال حرارت محسوس^۳ بین سطح و هوا با عکس ضخامت لایه مرزی متناسب می‌باشد. بنابراین با افزایش دبی جریان سطحی میزان انتقال حرارت محسوس بین آب و هوا برای حالتی که دمای سطح پایین تر از دمای جریان هوا است (غالباً در تابستان) افزایش یافته و بدین ترتیب انرژی موردنیاز برای افزایش نرخ تبخیر فراهم می‌شود. بنابراین با فاصله گرفتن از دبی بهینه نقش افزایش میزان تبخیر در اثر کاهش ضخامت لایه مرزی از نقش اختلاط لایه‌های آب در کاهش میزان تبخیر سبقت گرفته و در نهایت راندمان تبخیر را کاهش می‌دهد.

شکل ۹ نتایج مربوط به میزان تبخیر در شرایط مختلف آزمایشگاهی ((الف) بدون پوشش‌دهی، (ب) پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه‌رنگ، (ج) پوشش‌دهی با سفیدرنگ و (د) پوشش‌دهی ترکیبی) را برای سه تکرار و همچنین مقدار میانگین این سه تکرار را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، میزان عدم قطعیت برای مقادیر تبخیر سطحی را می‌توان در جداول ارائه شده برای هر کدام از حالت‌های آزمایش در شکل ۹ مشاهده کرد که بیشترین مقدار محاسبه شده در حدود ± 0.02 میلی‌متر می‌باشد. این عدم قطعیت موجود را می‌توان به عواملی چون دشوار بودن ایجاد شرایط محیطی یکسان در بین تکرار آزمایش‌ها و همچنین عواملی نظیر دقت دستگاه‌ها و خطاهای اندازه‌گیری نسبت داد.

۵- نتیجه‌گیری

خواهد شد. بنابراین تبخیر سطحی به‌واسطه دمای زیاد لایه فوقانی افزایش و کیفیت آب در لایه‌های زیرین، به‌دلیل عدم دریافت اکسیژن کافی کاهش خواهد یافت. با کم شدن اکسیژن در لایه‌های زیرین آب حیات آبیان نیز به خطر خواهد افتاد. حال اگر بتوان این لایه‌ها را به نحوی مخلوط کرد که لایه اپیلیم‌نیون گرم و لایه‌های هایپولیم‌نیون خنک با هم ترکیب شده و این اختلاف دما را کاهش داد (به عبارتی لایه فوقانی را خنک کرد)، می‌توان علاوه بر کاهش میزان تبخیر، سبب نفوذ اکسیژن هوا به عمق لایه‌های آب شده و کیفیت آب را نیز بهبود بخشید [۲۳]. با توجه به تحقیقات تجربی انجام شده در زمینه کاهش تبخیر که در بخش مقدمه نیز توضیح داده شد، استفاده از دستگاه‌های هوادهی و تجهیزاتی نظیر پمپ‌ها، دو رویکرد رایج برای اختلاط لایه‌بندی حرارتی ستون آب مخازن و بهبود کیفیت آب می‌باشند. البته اختلاط لایه‌های حرارتی در مخازن بزرگ به صورت مصنوعی (یعنی استفاده از سیستم پمپاژ یا سیستم‌های هوادهی) مستلزم دریافت انرژی زیادی است که باید در پژوهشی جداگانه، امکان‌سنجی آن را مورد بحث و بررسی قرار داد. شکل ۸ تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای دو حالت بدون پوشش و با پوشش‌دهی با توپ سفید در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) نمایش می‌دهد. در این شکل T_w دمای سطح آب و T_{M1} ، T_{M2} و T_B به ترتیب دمای آب در فاصله ۱۲ سانتی‌متری، ۲۴ سانتی‌متری و ۳۶ سانتی‌متری از سطح می‌باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، با افزایش دبی جریان سطحی اختلاط لایه‌های اپیلیم‌نیون و هایپولیم‌نیون برای هر دو حالت بدون پوشش و با پوشش‌دهی بیشتر شده و در نتیجه دمای لایه فوقانی کاهش و دمای لایه‌های زیرین افزایش یافته‌اند (به‌عبارتی دیگر اختلاف دمای لایه‌های مختلف نسبت به یکدیگر کاهش می‌یابد). این شرایط (کاهش دمای لایه فوقانی) تا رسیدن به دبی بهینه (که در شکل ۶ نمایش داده شده است) به‌دلیل توضیحات فوق، باعث کاهش تبخیر سطحی می‌گردد. نکته قابل توجه این است که با افزایش دبی جریان و عبور از دبی بهینه با وجود بروز اختلاط بیشتر در لایه‌های آب و کاهش دمای لایه فوقانی مشاهده می‌گردد که میزان تبخیر روند افزایشی پیدا خواهد کرد. برای تحلیل این پدیده لازم است درخصوص لایه‌مرزی هوای ایجاد شده روی سطح مخزن توضیحات بیشتری به

- 1 No slip boundary condition
- 2 Schmidt number
- 3 Sensible heat flux coefficient



شکل ۹. نتایج مربوط به عدم قطعیت در سه تکرار انجام آزمایش تبخیر سطحی: (الف) حالت بدون پوشش (ب) حالت پوشش دهی با توپ‌های سیاه‌رنگ (ج) حالت پوشش دهی با توپ‌های سفیدرنگ (د) حالت پوشش دهی ترکیبی به صورت مخلوط مساوی از توپ‌های سیاه و سفید.

Fig. 9: Uncertainty results in three replications of evaporation test: (a) No cover condition (b) Covered with black balls; (c) Covered with white balls; (d) Combination covering by an equal mixture of black and white balls.

می‌گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پوشش‌های سفیدرنگ به دلیل داشتن ضریب جذب تشعشعی پایین‌تر و ضریب انعکاس تابش موج کوتاه بزرگتر نقش مؤثرتری در کاهش میزان تبخیر در مقایسه با پوشش‌های سیاه‌رنگ دارند. بطوری‌که پوشش‌های سفیدرنگ در ۱ لیتر بر دقیقه (به‌عنوان مثال)، در حدود ۷۱/۵ درصد در بهبود راندمان کاهش تبخیر نقش ایفا می‌کنند. لازم به ذکر است که استفاده از چیدمان ترکیبی به صورت مخلوط مساوی از توپ‌های سیاه و سفید راندمان کاهش تبخیر بیشتری نسبت به پوشش دهی با توپ‌های سیاه حاصل خواهد کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تبخیر سطحی

در این مطالعه به بررسی میزان تبخیر سطحی از مخازن روباز تحت شرایط جریان سطحی و عدم جریان سطحی در حضور توپ‌های محافظ به‌عنوان پوشش‌های شناور در کاهش نرخ تبخیر از سطح آب پرداخته می‌شود. برای دستیابی به این هدف، هفت دبی مختلف شامل ۱، ۳، ۴/۵، ۶/۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ لیتر بر دقیقه توسط یک پمپ آب ایجاد می‌شود که در هر کدام از دبی‌های مذکور، وضعیت نرخ تبخیر سطحی در حالت‌های بدون پوشش، پوشش دهی با توپ‌های سفید، پوشش دهی با توپ‌های سیاه و پوشش دهی ترکیبی (به صورت مخلوط مساوی از توپ‌های سیاه و سفید) در مدت زمان شش ساعت مورد آزمایش قرار

- suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements, *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7) (2018) 4015-4032
- [2] I.H. Elsebaie, H. Fouli, M. Amin, Evaporation reduction from open water tanks using palm-frond covers: Effects of tank shape and coverage pattern, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(7) (2017) 2977-2983
- [3] V.M. Álvarez, A. Baille, J.M. Martínez. Effect of black polyethylene shade covers on the evaporation rate of agricultural reservoirs, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4(4) (2006) 280-288
- [4] P. Schouten, S. Putland, C.J. Lemckert, A.V. Parisi, N. Downs, Alternative methods for the reduction of evaporation: practical exercises for the science classroom, *Physics Education*, 47(2) (2012) 202-210
- [5] F. Helfer, H. Zhang, C. Lemckert, Evaporation reduction by windbreaks: Overview, modelling and efficiency, *Urban Water Security Research Alliance Technical Report*, (16) (2010) 1-15
- [6] S. Assouline, K. Narkis, D. Or, Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers, *Water Resources Research*, 47(7) (2011) 1-8
- [7] X. Yao, H. Zhang, C. Lemckert, A. Brook, P. Schouten, Evaporation reduction by suspended and floating covers: overview, modelling and efficiency, *Urban Water Security Research Alliance Technical Report*, (28) (2010) 1-13
- [8] N. Chaudhari, N.D. Chaudhari, Use of thermocol sheet as floating cover to reduce evaporation loss in farm pond, 20th International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering, IIT Roorkee, India, (2015)
- [9] C. Silva, D. González, F. Suárez, An experimental and numerical study of evaporation reduction in a salt-gradient solar pond using floating discs, *Solar Energy*, 142 (2017) 204-214
- [10] S. Alam, A.A. AlShaikh, Use of palm fronds as

آب در حالت وجود جریان سطحی تا یک دبی مشخص که دبی بهینه نام دارد، کاهش می‌یابد و با افزایش دبی و عبور از دبی بهینه، نرخ تبخیر مجدداً شروع به افزایش می‌نماید. درحقیقت، با افزایش دبی جریان سطحی اختلاط لایه‌های اپیلیم‌نیون و هایپولیم‌نیون برای هر دو حالت بدون پوشش و با پوشش‌دهی بیشتر می‌شود و در نتیجه دمای لایه فوقانی کاهش و دمای لایه‌های زیرین افزایش می‌یابد. این شرایط (کاهش دمای لایه فوقانی) تا رسیدن به دبی بهینه سبب کاهش تبخیر سطحی می‌گردد. با این وجود با افزایش و عبور از دبی بهینه، نقش کاهش ضخامت لایه مرزی در افزایش میزان تبخیر از نقش اختلاط لایه‌های آب در کاهش میزان تبخیر سبقت گرفته و در نهایت راندمان تبخیر را کاهش خواهد داد. همچنین در این تحقیق به منظور برآورد تقریبی تبخیر از سطح مخازن تحت شرایط آزمایش‌شده، از مدل‌سازی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش استفاده شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد استفاده از روش مدل‌سازی بالانس انرژی با تقریب بسیار خوبی قادر است میزان تبخیر را با داشتن دمای سطح و دمای متوسط لایه‌های آب برای تمامی حالت‌های با پوشش‌دهی، بدون پوشش‌دهی، با حضور جریان سطحی و بدون جریان سطحی پیش‌بینی نماید. مطابق محاسبات انجام شده، متوسط خطای روش مدل‌سازی (برای همه دبی‌های سطحی) برای حالت بدون پوشش، پوشش با توپ‌های سفید، پوشش با توپ‌های سیاه و پوشش با توپ‌های ترکیبی به ترتیب، ۳/۹۷۹، ۸/۸۸۱، ۷/۷۵۸ و ۱۰/۳۴۰ درصد می‌باشد. همچنین در این مطالعه، میزان عدم قطعیت برای مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر سطحی (در سه تکرار آزمایش) نیز محاسبه گردید که بیشترین مقدار محاسبه شده در حدود $\pm 0.2/0$ میلی‌متر می‌باشد.

هر چند نتایج آزمایشگاهی حاصل، بیانگر آن است که جریان‌های سطحی با دبی مناسب می‌تواند راندمان اجسام شناور در کاهش تبخیر را افزایش دهد، ذکر این نکته ضروری است که محدودیت‌های آزمایشگاهی و امکانات موجود مانع از بررسی تاثیرات شرایط جریان (عمق نفوذ و سطح اثر) و ابعاد مخزن (به ویژه عمق) بر راندمان کاهش تبخیر گردید. از این‌رو اندازه‌گیری در شرایط طبیعی و مدل‌سازی‌های هیدرودینامیکی برای تایید نتایج و ارائه چهاچوب‌های طراحی برای استفاده از این روش به منظور کاهش تبخیر ضروری می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Aminzadeh, P. Lehmann, D. Or, Evaporation

- [21] F. Helfer, H. Zhang, C. Lemckert, Evaporation reduction from farm dams using air-bubble plume destratification, IWA World Congress on Water, Climate and Energy, Dublin-Ireland, (13 May 2012) 13-18.
- [22] M. Van Dijk, S. Van Vuuren, Destratification induced by bubble plumes as a means to reduce evaporation from open impoundments, *Water SA*, 35(2) (2009) 157-167
- [23] C.W. Cox, Water supply enhancement in Cyprus through evaporation reduction, Massachusetts Institute of Technology, USA, Doctoral dissertation, (1999) 76-87
- [24] B. Sherman, C. Lemckert, H. Zhang, The impact of artificial destratification on reservoir evaporation, Urban Water Security Research Alliance Technical Report, 23(4) (2010) 333-350
- [25] R. Fernandez, M. Bonansea, A. Cosavella, F. Monarde, M. Ferreyra, J. Bresciano, Technology, Effects of bubbling operations on a thermally stratified reservoir: Implications for water quality amelioration, *Water Science and Technology*, 66(12) (2012) 2722-2730
- [26] M. Fekih, A. Bourabaa, S. Mohamed, Evaluation of two methods for estimation of evaporation from Dams water in arid and semi-arid areas in Algeria, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2(1) (2013) 2319-4847
- [27] M.E. Jensen, Estimating evaporation from water surfaces, *Proceedings of the CSU/ARS Evapotranspiration Workshop*, (15 March 2010) 1-27
- [28] Z. Xing, L. Chow, F. R. Meng, H.W. Rees, L. Steve, J. Monteith, Validating evapotranspiration equations using Bowen ratio in New Brunswick, *Sensors*, 8(1) (2008) 412-428
- [29] W.C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381) (1963) 339-348
- [30] B. Gallego-Elvira, A. Baille, B. Martin-Gorriiz, J. Maestre-Valero, V. Martinez-Alvarez, Evaluation of evaporation estimation methods for a covered shaded cover for evaporation reduction to improve water storage efficiency, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 25(1) (2013) 55-58
- [11] E. Mazaheri, J. Abedi Kupai, Reducing evaporation from water pools using floating coatings, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(3) (2018) 597-605. (in Persian)
- [12] M.A. Benzaghta, T.A. Mohammed, A.H. Ghazali, M.A.M. Soom, Testing of evaporation reduction methods in humid climates. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 166(4) (2013) 207
- [13] S. Assouline, K. Narkis, D. Or, Evaporation from partially covered water surfaces, *Water resources research*, 46(10) (2010) 1-12
- [14] K.R. Cooley, Energy relationships in the design of floating covers for evaporation reduction, *Water resources research*, 6(3) (1970) 717-727
- [15] A. Hassani, Assessment of methods for estimating evaporation rates for the reservoir of Saveh dam (al-Ghadir), *Iranian Water Resources Research*, 9(1) (2013) 15-35. (in Persian)
- [16] S. Ali, N.C. Ghosh, R. Singh, Evaluating best evaporation estimate model for water surface evaporation in semi-arid region, *Hydrological Processes*, 22(8) (2008) 1093-1106
- [17] A. Gorgizadeh, Determination the uncertainty of evaporation from large dams in subsequent periods under climate change conditions, *Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, Master's dissertation*, (2014) 22-28. (in Persian)
- [18] J.R. Masoner, D.I. Stannard, A comparison of methods for estimating open-water evaporation in small wetlands, *Wetlands*, 30(3) (2010) 513-524
- [19] V. Singh, C.Y. Xu, Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation, *Hydrological Processes*, 11(3) (1997) 311-323
- [20] B. Asmar, P. Ergenzinger, Estimation of evaporation from the Dead Sea, *Hydrological Processes*, 13(17) (1999) 2743-2750

- in lakes: analytical and laboratory studies, *Water Resources Research*, 5(2) (1969) 484-495
- [35] E. Haghighi, D. Or, 2013. Evaporation from porous surfaces into turbulent airflows: coupling eddy characteristics with pore scale vapor diffusion, *Water Resources Research*, 49(12) (2003), 8432-8442
- [36] M. Aminzadeh, D. Or, Energy partitioning dynamics of drying terrestrial surfaces, *Journal of Hydrology*, 519 (2014) 1257-1270
- [37] E. Haghighi, D. Or, Interactions of bluff-body obstacles with turbulent airflows affecting evaporative fluxes from porous surfaces, *Journal of Hydrology*, 530 (2015) 103-116
- reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain), *Journal of Hydrology*, 458 (2012) 59-67
- [31] C. Van Bavel, Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification, *Water Resources Research*, 2(3) (1966) 455-467
- [32] M.T. Moreo, A. Swancar, Evaporation from Lake Mead, Nevada and Arizona, March 2010 through February 2012, US Geological Survey Scientific Investigations Report, 40 (2013) 5229
- [33] B. Henderson-Sellers, Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review, *Reviews of Geophysics*, 24(3) (1986) 625-649
- [34] J.M. Dake, D.R. Harleman, Thermal stratification

