





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

بررسی آزمایشگاهی میزان تبخیر آب به وسیله‌ی عناصر شناور روی سطح مخازن ذخیره‌ی
آب در صورت وجود جریان سطحی

دانشجو : امیر رضازاده

استاد راهنما :

دکتر پوریا اکبرزاده

استاد مشاور:

دکتر میلاد امین‌زاده

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۱۳۹۷/۲۸۷/م
تاریخ: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امیر رضازاده با شماره دانشجویی ۹۵۰۶۹۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی میزان کاهش تبخیر آب به وسیله‌ی عناصر شناور روی سطح مخازن ذخیره‌ی آب در صورت وجود جریان سطحی که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی) ☒ (نورده ۴م) مردود ☐			
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☒			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر پوریا اکبرزاده	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	دکتر میلاد امین‌زاده	استادیار	غایب
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمود چهارطاقی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمدحسن کیهانی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر احمد نظری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۳

خداوندا...

هزاران شکر که در کنارمان هستی و قرار و آرام دلهای بیقرارمان. جز تو چه جوییم

و جز تو که را خوانیم که همه تویی و جز تو همه هیچ. لحظاتمان را قرین رحمت و

مهربانیات بفرما و ما را در ادامه راهمان تنها مگذار که یک لحظه بی تو ویرانی

دنیا نیست.

این پایان نامه را تقدیم می‌کنم به پدر و مادرم که از نگاهشان صلابت، از رفتارشان

محبت و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

تقدیر و تشکر

اکنون که به یاری پروردگار و راهنمایی اساتید محترم موفق به پایان این رساله شده‌ام وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند به عمل آورم:

در آغاز از استاد عزیز و بزرگواریم جناب آقای دکتر پوریا اکبرزاده که راهنمایی این پایان‌نامه را به عهده داشته‌اند کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر میلاد امین‌زاده هیئت علمی محترم دانشکده‌ی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان که استاد مشاور بنده در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه بوده‌اند نیز قدردانی می‌نمایم.

و در پایان از تمامی دوستانم که در انجام این پایان‌نامه مرا همراهی نموده و باعث دلگرمی بنده بودند، تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب امیر رضازاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " بررسی آزمایشگاهی میزان تبخیر آب به وسیله عناصر شناور روی سطح مخازن ذخیره‌ی آب در صورت وجود جریان سطحی " تحت راهنمایی دکتر پوریا اکبرزاده متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در طی سال‌های اخیر، رشد جمعیت و توسعه جوامع سبب کاهش منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق دنیا بخصوص در کشورهای خشک و نیمه‌خشک گردیده است. اگر اقدامات لازم جهت مدیریت، استفاده مناسب و کاهش تلفات آب به عمل نیاید، کم‌آبی به تهدیدی بزرگ و جدی برای حیات بشر تبدیل می‌شود. این اقدامات اگر همگانی شوند می‌توانند سهم بسزایی در جلوگیری از تلفات آب داشته باشند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک علت عمده تلفات آب را می‌توان پدیده‌ای به نام تبخیر سطحی دانست که در دماهای پایین‌تر از نقطه جوشش آب اتفاق می‌دهد. بنابراین، یک پدیده‌ی اجتناب‌ناپذیر بوده و با توجه به موقعیت و شرایط آب‌وهوایی کشورها، به‌عنوان یک عامل مهم در میزان تلفات منابع آبی در یک کشور، نقش ایفا می‌کند. یکی از روش‌های عمده در کاهش میزان تبخیر از سطح مخازن روباز که در بسیاری از مناطق گرم و خشک بکار برده می‌شود، استفاده از پوشش‌های فیزیکی می‌باشد. این پوشش‌ها از تماس مستقیم تابش خورشید با سطح آب جلوگیری به عمل آورده و سبب کاهش نرخ تبخیر می‌گردد. در اکثر مطالعاتی که به بررسی میزان کاهش تلفات تبخیر توسط پوشش‌های فیزیکی پرداخته شده است سرعت حرکت سیال آب صفر و راندمان کاهش تبخیر آب در حالت سکون بررسی و برآورد شده است. با توجه به این‌که بسیاری از مخازن آب دارای جریان‌های ورودی و خروجی می‌باشند، بررسی اثرات جریان سطحی روی نرخ تبخیر و همچنین تخمین مناسب میزان تبخیر از سطح این‌گونه مخازن می‌تواند کمک شایانی در جهت مدیریت و کنترل تلفات ناشی از تبخیر باشد. لذا در این پژوهش به مدل‌سازی و بررسی آزمایشگاهی میزان کاهش نرخ تبخیر سطحی توسط پوشش‌های شناور با حضور جریان سطحی پرداخته می‌شود. برای دستیابی به این هدف، از یک مخزن پلی‌اتیلن ۵۰۰ لیتری به‌عنوان حوضچه ذخیره‌سازی آب، شش پروژکتور ۵۰۰ وات اسرام برای شبیه‌سازی تابش خورشید، توپ‌های پلاستیکی با دو چگالی مختلف (مورد اول دارای جرمی حدود ۱۴ گرم بوده و مورد دوم که تا نیمه در آب فرو می‌رود جرمی معادل ۵۰ گرم دارا می‌باشد) در دو رنگ سیاه و سفید به‌عنوان پوشش محافظ

سطح آب، از یک پمپ با دبی ثابت جهت ایجاد جریان سطحی و از یک ماریوت باتل برای اندازه‌گیری میزان تبخیر سطحی مخزن استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بدون پوشش، تبخیر سطحی آب در حالت وجود جریان سطحی تا دبی $6/5$ لیتر بر دقیقه که دبی بهینه نام دارد، نسبت به حالت بدون جریان سطحی کاهش می‌یابد و با افزایش دبی و عبور از دبی بهینه، نرخ تبخیر شروع به افزایش می‌نماید. همچنین در تمامی شرایط وجود و عدم وجود جریان سطحی، نتایج بدست آمده حکایت از آن دارد که پوشش‌های سفیدرنگ به دلیل ضریب انعکاس تشعشعی بالاتر نسبت به پوشش‌های سیاه‌رنگ دارای بالاترین راندمان کاهش تبخیر می‌باشد. به عنوان مثال در دبی 1 لیتر بر دقیقه در شرایط پوشش‌دهی با پوشش‌های شناور با چگالی کم حدود 70 درصد راندمان کاهش تبخیر حاصل شد. نرخ تبخیر در شرایط پوشش‌دهی ترکیبی به صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید با چگالی کم، کمتر از حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه‌رنگ می‌باشد. هنگامی پوشش‌های شناور در اثر افزایش چگالی تا نیمه در آب فرو می‌روند ارتفاع زبری سطح پوشش داده شده کاهش می‌یابد. در نتیجه، ضریب انتقال حرارت محسوس بین آب و هوا افزایش می‌یابد. بنابراین نرخ تبخیر نسبت به حالت استفاده از پوشش‌های سبک افزایش یافته و سبب افت راندمان کاهش تبخیر می‌شود. به عنوان مثال در دبی 1 لیتر بر دقیقه راندمان کاهش تبخیر در شرایط پوشش‌دهی با پوشش‌های سفید با چگالی زیاد حدود 10 درصد نسبت به حالت پوشش‌دهی با پوشش‌های سفید با چگالی کم، کاهش یافت. به منظور تخمین میزان تبخیر آب در حالت جریان سطحی، مدل‌سازی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش در نظر گرفته شد. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد استفاده از روش مدل‌سازی بالانس انرژی با تقریب بسیار خوبی قادر است میزان تبخیر را با داشتن پارامترهای مورد نیاز برای تمامی حالت‌های با پوشش‌دهی، بدون پوشش‌دهی، با حضور جریان سطحی و بدون جریان سطحی پیش‌بینی نماید.

واژه‌های کلیدی: تبخیر سطحی، جریان سطحی، توپ‌های پلاستیکی، پوشش‌های محافظ، دبی بهینه، بالانس انرژی

فهرست

عنوان	صفحه
فصل اول	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- تعریف تبخیر	۳
۳-۱- عوامل موثر در وقوع تبخیر سطحی	۴
۱-۳-۱- تابش خورشید	۴
۲-۳-۱- دمای هوا	۵
۳-۳-۱- رطوبت نسبی	۵
۴-۳-۱- سرعت هوا	۵
۵-۳-۱- فشار اتمسفر	۶
۶-۳-۱- عمق آب	۷
۷-۳-۱- رنگ مایع	۷
۷-۳-۱- غلظت املاح موجود در آب (شوری)	۷
۴-۱- روش‌های کاهش تبخیر در دریاچه‌ها و مخازن	۷
۱-۴-۱- استفاده از پوشش‌های فیزیکی	۸
۱-۴-۱-۱- پوشش شبکه‌ای با قابلیت جابجایی	۸
۲-۴-۱- استفاده از توپ‌های پلاستیکی	۹
۳-۴-۱- استفاده از سقف‌های متحرک و سلول‌های خورشیدی	۱۰
۴-۴-۱- پوشش‌های گنبدی و ورقه‌ای	۱۱
۲-۴-۱- استفاده از پوشش‌های شیمیایی	۱۲
۱-۲-۴-۱- تک‌لایه‌ها	۱۳
۲-۲-۴-۱- پلی‌آکریلامیدها	۱۴
۳-۴-۱- استفاده از بادشکن‌ها	۱۴
۴-۴-۱- تغییر در ساختار ظاهری مخازن آب	۱۵
۵-۱- سوابق اجرا شده در زمینه کاهش تبخیر در ایران	۱۶
۱-۵-۱- ساخت آب انبار و قنات جهت ذخیره‌سازی زیرزمینی آب	۱۶
۲-۵-۱- استفاده از روش آبیاری زیرسطحی در بخش کشاورزی	۱۷

فصل دوم	۱۹
۱-۲- مقدمه	۲۰
۲-۲- پیشینه تحقیق	۲۱
۳-۲- معرفی پژوهش حاضر و نوآوری	۲۵
۴-۲- معرفی تجهیزات، ساختار و روش آزمایش	۲۶
فصل سوم	۳۳
۱-۳- مقدمه	۳۴
۲-۳- روش‌های برآورد تبخیر	۳۴
۱-۲-۳- معادله پنمن-مونتیت	۳۴
۲-۲-۳- معادله پرستلی-تیلور	۳۷
۳-۲-۳- معادله انتقال جرم	۳۷
۳-۳- مدل‌سازی بالانس انرژی	۳۸
فصل چهارم	۴۱
۱-۴- مقدمه	۴۲
۲-۴- نتایج	۴۶
فصل پنجم	۶۷
۱-۵- نتیجه‌گیری	۶۸
۲-۵- پیشنهادات	۶۹
مراجع	۷۰

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) چگونگی آزاد شدن و وارد شدن مولکول های آب به لایه های هوا و وقوع تبخیر از سطح آب [۴].....	۴
شکل (۲-۱) رابطه بین تبخیر از سطح آب با سرعت باد در شرایط آب و هوایی گرم و خشک و مرطوب [۵].....	۷
شکل (۳-۱) تصویر پوشش دهی سطح مخازن آب توسط پوشش های شبکه ای با قابلیت جابجایی [۹].....	۹
شکل (۴-۱) استفاده از توپ های پلاستیکی سیاه رنگ جهت پوشش دهی سطح آب سد لس آنجلس آمریکا [۹].....	۱۰
شکل (۵-۱) تصویری از پوشش دهی سطح آب حوضچه های ذخیره سازی آب در هند توسط پنل های خورشیدی [۹].....	۱۱
شکل (۶-۱) تصویر پوشش دهی سطح مخازن آب با پوشش های گنبدی شکل [۹].....	۱۲
شکل (۷-۱) تصویر پوشش دهی سطح حوضچه های آب توسط ورقه های ترموکل [۲۱].....	۱۲
شکل (۸-۱) تصویر چگونگی قرار گیری واتر سیور روی سطح آب [۸].....	۱۴
شکل (۹-۱) تصویر مربوط به ایجاد بادشکن های زنده اطراف یک برکه ی آب [۹].....	۱۵
شکل (۱۰-۱) تصویر آب انبار ابراهیم خان واقع در شهر کرمان.....	۱۷
شکل (۱۱-۱) تصویر نشان دهنده ی چگونگی آب رسانی به ریشه ی گیاه به روش کوزه ای.....	۱۸
شکل (۱-۲) تصویر واقعی تجهیزات آزمایشگاهی و حالت های مختلف پوشش دهی جهت ارزیابی نرخ کاهش تبخیر سطح.....	۳۰
شکل (۲-۲) تصویر واقعی از برخی تجهیزات کنترلی مورد استفاده در پژوهش حاضر.....	۳۱
شکل (۳-۲) تصویر واقعی از ماریوت باتل مورد استفاده در پژوهش حاضر.....	۳۱
شکل (۴-۲) تصویر واقعی تجهیزات آزمایشگاهی و حالت های مختلف پوشش دهی جهت ارزیابی نرخ کاهش تبخیر سطح.....	۳۲

- شکل (۴-۱) تغییرات رطوبت نسبی هوا به ازای تغییرات دمای هوا تحت حالت بدون پوشش ۴۳
- شکل (۴-۲) تغییرات رطوبت نسبی هوا به ازای تغییرات دمای هوا در سطح مخزن تحت پوشش با توپ‌های سفیدرنگ با چگالی کم ۴۴
- شکل (۴-۳) تغییرات رطوبت نسبی هوا به ازای تغییرات دمای هوا در سطح مخزن تحت پوشش با توپ‌های سفیدرنگ با چگالی زیاد ۴۵
- شکل (۴-۴) نتایج بدست آمده از آزمایش تبخیر سطحی در حالت استفاده از پوشش‌های شناور با چگالی کم برای مقادیر مختلف جریان سطحی ۴۷
- شکل (۴-۵) تصویر نشان‌دهنده میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر به دست آمده تحت هر دو شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی ۴۹
- شکل (۴-۶) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی بالانس انرژی میزان تبخیر (میلی‌متر بر ساعت) برای شرایط بدون پوشش و پوشش‌دهی با توپ‌های سفید با چگالی کم در تمامی هفت دبی جریان سطحی ۵۰
- شکل (۴-۷) پروفیل دمایی شکل گرفته درون ستون آب در سه دبی مختلف (صفر، بهینه، بیشینه) در شرایط بدون پوشش ۵۱
- شکل (۴-۸) تغییرات دمای سه لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت بدون پوشش در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) ۵۴
- شکل (۴-۹) تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفید با چگالی کم در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) ۵۵
- شکل (۴-۱۰) تصویر قرارگیری پوشش‌های شناور با چگالی کم و چگالی زیاد روی سطح آب ۵۶
- شکل (۴-۱۱) نتایج بدست آمده از آزمایش تبخیر سطحی برای مقادیر مختلف جریان سطحی در حالت فرو رفتن پوشش‌ها تا نیمه در آب ۵۶
- شکل (۴-۱۲) تصویر نشان‌دهنده میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر به دست آمده توسط توپ‌های شناور با چگالی زیاد تحت هر دو شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی ۵۸
- شکل (۴-۱۳) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی بالانس انرژی میزان تبخیر (میلی‌متر بر ساعت) برای شرایط بدون پوشش و پوشش‌دهی با توپ‌های سفید با چگالی زیاد در تمامی هفت دبی جریان سطحی ۶۰
- شکل (۴-۱۴) تغییرات دمای سه لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفیدرنگ با چگالی زیاد در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) ۶۱
- شکل (۴-۱۵) تغییرات دمای سه لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه‌رنگ با چگالی کم در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) ۶۲

شکل (۴-۱۶) تغییرات دمای سه لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه‌رنگ با چگالی زیاد در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه)..... ۶۳

شکل (۴-۱۷) تغییرات دمای سه لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت پوشش‌دهی ترکیبی با توپ‌های شناور با چگالی کم در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه)..... ۶۴

شکل (۴-۱۸) تغییرات دمای سه لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت پوشش‌دهی ترکیبی با توپ‌های شناور با چگالی زیاد در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه)..... ۶۵

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۳) ضریب انعکاس تابش موج کوتاه و ضریب صدور آب و پوشش‌های کروی.....	۳۹
جدول (۲-۳) ارتفاع زبری سطح و ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد، رطوبت و دمای هوا برای سطح مخزن بدون پوشش و سطح مخزن تحت پوشش.....	۳۹
جدول (۱-۴) جزئیات مربوط به میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر در هنگام استفاده از توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم در شرایط مختلف برای روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی.....	۴۸
جدول (۲-۴) جزئیات مربوط به میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر در حالت فرو رفتن پوشش‌ها تا نیمه در آب در شرایط مختلف برای روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی.....	۵۷

Symbols		واحد	علائم اختصاری
<i>E</i>	<i>Evaporation rate</i>	$\frac{\text{mm}}{\text{day}}$	نرخ تبخیر
Δ	<i>Slope of saturated vapour pressure at water temperature</i>	$\frac{\text{Pa}}{^{\circ}\text{C}}$	شیب منحنی فشار بخار در دمای آب
<i>R_n</i>	<i>Net radiation</i>	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	تابش خالص
<i>G</i>	<i>The rate of heat stored in water</i>	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	نرخ حرارت ذخیره شده در آب
γ	<i>The psychrometric constant</i>	$\frac{\text{Pa}}{^{\circ}\text{C}}$	ثابت سایکومتریکی
<i>U₂</i>	<i>Wind speed at 2 m height</i>	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	سرعت باد در ارتفاع دو متری
<i>e_s</i>	<i>The saturated vapour pressure in water temperature</i>	Pa	فشار بخار اشباع در دمای آب
<i>e_a</i>	<i>The actual vapour pressure in air temperature</i>	Pa	فشار بخار واقعی در دمای آب
$\bar{T}$	<i>Average temperature of water layers</i>	$^{\circ}\text{C}$	میانگین دمای لایه‌های آب
<i>RH</i>	<i>Relative humidity</i>	%	رطوبت نسبی
ρ_w	<i>Density of water</i>	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	چگالی آب
ρ_a	<i>Density of air</i>	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	چگالی هوا
<i>c_w</i>	<i>The specific heat capacity of water</i>	$\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	ظرفیت گرمایی ویژه آب
<i>Z_j</i>	<i>Depth of water layers</i>	m	عمق لایه‌های آب

ΔT_{wj}	Changes in the temperature of each layer	°C	تغییرات دمایی در هر لایه‌ها
Δt	Duration of radiation	s	مدت زمان تابش
r_w	Reflectance of water surface for solar radiation	—	ضرایب انعکاس تابش موج کوتاه آب
S	Solar radiation	$\frac{W}{m^2}$	تابش خورشیدی (موج کوتاه)
r'_w	Reflectance of water for long-wave radiation	—	ضرایب انعکاس تابش موج بلند آب
ϵ_w	Emittance of water	—	ضریب صدور آب
ϵ_a	Emittance of air	—	ضریب صدور هوا
ϵ_c	Emittance of cover	—	ضریب صدور پوشش
c_p	The specific heat capacity of air in constant pressure	$\frac{kJ}{kgK}$	ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت
L	latent heat of water	$\frac{kJ}{kg}$	گرمای نهان آب
P	The atmospheric pressure	kPa	فشار اتمسفر
α	Taylor coefficient	—	ضریب تیلور
β	Bowen ratio	—	نسبت باون
μ	Mass transfer coefficient	—	ضریب انتقال جرم
A_s	Area of surface reservoir	—	مساحت سطح مخزن

H	<i>The rate of sensible heat transfer</i>	$\frac{W}{m^2}$	نرخ انتقال حرارت محسوس
Q_v	<i>Advection heat transfer</i>	$\frac{W}{m^2}$	نرخ انتقال حرارت بواسطه حرکت سیال
Q_{wall}	<i>Heat losses from reservoir walls</i>	$\frac{W}{m^2}$	نرخ تلفات حرارتی از دیواره‌های مخزن
κ	<i>Von karman constant</i>	—	ثابت ون کارمن
z_0	<i>Surface roughness height</i>	m	ارتفاع زبری سطح
$\bar{q}$	<i>Flow rate</i>	$\frac{lit}{min}$	نرخ جریان
k	<i>Conductivity heat transfer coefficient</i>	$\frac{W}{mK}$	ضریب انتقال حرارت هدایتی

فصل اول

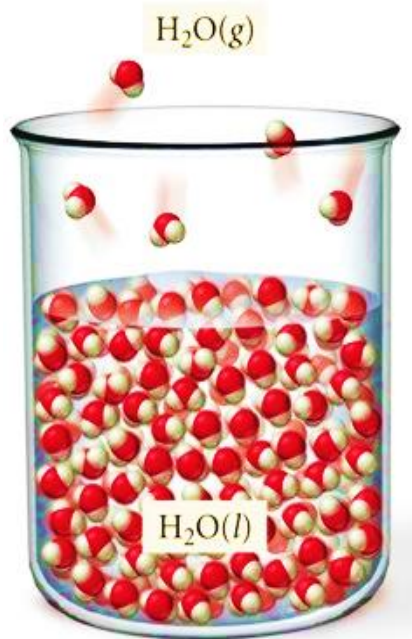
مباحث اولیه پیرامون تبخیر سطحی

در سراسر تاریخ بشر دسترسی مطمئن به آب، یک شرط اولیه و اساسی برای توسعه اجتماعی، اقتصادی و پایداری فرهنگ و تمدن بوده است به گفته کارشناسان، آب دیگر کالای فراوان و فاقد ارزش اقتصادی نیست، بلکه یک کالای بدون جایگزین و با ارزش اقتصادی زیاد در همه زمینه‌های مصرف می‌باشد [۱]. موضوع منابع آب به‌عنوان یک موضوع با اهمیت در صحنه سیاست داخلی کشورها به‌ویژه در مناطق خشک و کم آب جهان از دیرباز همواره مطرح بوده و هم‌اکنون نیز اهمیت خود را حفظ کرده است. افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و پیشرفت صنعت موجب استفاده بی‌رویه از منابع آب و سرازیر شدن مواد میکروبی، شیمیایی و رادیواکتیو به آب‌های کره زمین شده است. لذا با این وجود، تأمین آب سالم کره زمین با خطر جدی مواجه شده است. در حال حاضر ۷۵ درصد سطح کره زمین را آب فراگرفته است. ۹۸ درصد آب‌های کره زمین شور است که اقیانوس‌ها و دریاها را تشکیل می‌دهد. تنها ۲ درصد باقیمانده منابع آب شیرین را تشکیل می‌دهد که بیشتر آن منجمد است و کمتر از ۱ درصد آن، قابل استفاده می‌باشد. توزیع آب شیرین در تمام نقاط جهان یکسان نیست. در بعضی مناطق مثل اروپا، به علت بارندگی فراوان، آب فراوان است و برعکس در بعضی نقاط، همچون کشورهای آسیایی و آفریقایی، بحران کم‌آبی وجود دارد. کارشناسان پیش‌بینی می‌کنند در آینده‌ای نه‌چندان دور به علت نیاز همگانی به آب شیرین و پاک تنش‌ها بر سر مسئله آب بیشتر خواهد بود. ایران مشابه بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان در دهه‌های اخیر کمبود جدی در منابع آب را تجربه کرده و در حال حاضر با بحران آب مواجه است. علاوه بر عواملی چون رشد و توزیع نامتعادل جمعیت، سوء مدیریت منابع آب و ناکارآمدی بخش کشاورزی، بحران آب در ایران ریشه در پدیده‌های محیطی و طبیعی همچون خشک‌سالی‌ها، تغییر الگوهای اقلیمی، افزایش دما و تبخیر سطحی که سهم عمده‌ای را به خود اختصاص می‌دهد، دارد. تبخیر سطحی یکی از خصوصیات بارز آب است که در دماهای پایین‌تر از نقطه جوشش آب اتفاق می‌افتد. در برخی مواقع از آن به‌عنوان یک امتیاز بهره می‌گیرند (مانند آب‌شیرین‌کن‌ها) و در جایی دیگر (مانند سدها) به‌عنوان عامل اصلی تلفات آب از آن یاد شده و در به

حداقل رساندن آن تلاش می‌شود. سرانه آب در ایران حدود ۱۳۰۰ مترمکعب در سال است که در مقایسه با سایر کشورها از سهم کمی برخوردار است. بنابراین، کمبود منابع آب در ایران از سایر نقاط جهان شدیدتر می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که اغلب وسعت ایران را تشکیل می‌دهد بیشتر باران در فصل زمستان می‌بارد. بنابراین باید برای مصرف در مواقع دیگر سال آن را در پشت سدها ذخیره کرد. طبق آمار ذکر شده، در سال ۱۳۹۲ کل حجم ظرفیت سدهای کشور حدود ۴۸ میلیارد مترمکعب است که مقدار قابل تنظیم آن ۳۴ میلیارد مترمکعب می‌باشد [۲]. به علت خشکی هوا، اتلاف تبخیری از سطح مخازن سدها ۶/۲ تا ۸/۴ درصد از حجم کل آب سدها را تشکیل می‌دهد [۳]. بنابراین، لازم است میزان تبخیر از سطح مخازن کاسته شود تا به میزان منابع آبی قابل استفاده در کشور افزوده گردد.

۱-۲- تعریف تبخیر

مولکول‌های آب در شرایط معمولی دارای جرم مشخصی بوده و دارای حرکت ثابتی می‌باشند. اضافه شدن گرما به آب سبب افزایش انرژی مولکول‌های آب و حرکت سریع آن‌ها می‌شود که نتیجه‌ی آن، افزایش فاصله همراه با کاهش نیروی چسبندگی بین مولکول‌ها را به دنبال خواهد داشت. با بیشتر شدن درجه حرارت، مولکول‌های بیشتری در سطح آب تمایل به آزاد شدن و وارد شدن به لایه‌های هوا در نزدیکی سطح آب را دارند (شکل ۱-۱). در علم هواشناسی به فرآیندی که نتیجه آن آزاد شدن مولکول‌های آب و وارد شدن آن‌ها به اتمسفر باشد تبخیر گفته می‌شود. تبخیر در طبیعت را می‌توان همان انتشار بخار آب از یک سطح مرطوب، سطح آزاد آب و اعم از حالت مایع یا جامد در درجه حرارتی پایین‌تر از نقطه‌جوش آب تعریف کرد که به آن تبخیر سطحی اطلاق می‌شود. لذا تبخیر نقش مهمی در میزان آب قابل‌دسترس در یک منطقه دارد.



شکل ۱-۱: چگونگی آزاد شدن و وارد شدن مولکول‌های آب به لایه‌های هوا و وقوع تبخیر از سطح آب [۴].

۱-۳- عوامل مؤثر در وقوع تبخیر سطحی

انرژی مورد نیاز جهت جدا شدن مولکول‌های آب، انتقال و انتشار بخار از سطح تبخیر، تحت تأثیر عواملی همچون تابش خورشید، سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، فشار اتمسفر، عمق آب، رنگ مایع و غلظت املاح موجود در آب می‌باشد که در ادامه به تشریح هر کدام پرداخته خواهد شد.

۱-۳-۱- تابش خورشید

تابش خورشید منبع اصلی انرژی سیاره زمین و عامل اصلی کنترل حیات و آب و هوا در سطح زمین به شمار می‌آید. انرژی خورشید، با کنترل حرارت سطح زمین، پراکندگی زمانی و مکانی رطوبت و فشار را نیز تعیین می‌کند. انرژی تابشی دریافت شده از خورشید، گستره‌ای از طول موج‌هاست که به نام طیف خورشیدی معروف است. در این طیف وسیع، بلندترین امواج (امواج رادیویی) حدود ۱۲۱ برابر امواج کوتاه (گاما) می‌باشند. مقدار کل انرژی خورشیدی که در مدتی معین، به یک سطح مشخص می‌رسد، تحت تأثیر چهار عامل تغییر می‌کند که شامل مقدار انرژی تابشی گسیل شده از خورشید، فاصله خورشید تا زمین، ارتفاع خورشید (یا زاویه تابش خورشید) و سرانجام مدت تابش می‌باشد. تابش خورشید

مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل در تبخیر آب از سطح مخازن روباز می‌باشد. به‌طوری‌که در برخی تحقیقات از آن به‌عنوان تابش تبخیری نام برده می‌شود [۵].

۱-۳-۲- دمای هوا

جهت رخ دادن تبخیر از سطح مخازن، باید انرژی مورد نیاز فراهم شود. چنانچه درجه حرارت سطح مرطوب و هوای مجاور آن زیاد باشد تبخیر با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد. زیرا در دمای بالاتر برای تبخیر هر گرم آب، انرژی کمتری مورد نیاز خواهد بود. از طرف دیگر هر چه درجه حرارت هوای بالای سطح مرطوب گرم‌تر باشد توانایی بیشتری در جذب رطوبت خواهد داشت. هرچند دما به‌عنوان شاخصی از مقدار انرژی خورشیدی است اما چون این امکان وجود دارد که دمای یک منطقه مستقل از مقدار تابش خورشید کم یا زیاد باشد لذا به‌عنوان یک پارامتر مستقل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۳-۳- رطوبت نسبی

سومین عامل مؤثر بر میزان تبخیر رطوبت نسبی هوا می‌باشد. با افزایش میزان خشکی هوا یا کاهش رطوبت موجود در آن، آمادگی اتمسفر جهت پذیرش بخار آب بیشتر می‌گردد. با افزایش رطوبت نسبی در لایه‌ی هم‌جوار سطح تبخیر، میزان انتقال ذرات آب از سطح تبخیر کاهش می‌یابد. زمانی رطوبت نسبی هوا افزایش می‌یابد که درجه حرارت هوا پایین آمده باشد و حتی اگر میزان بخار آب در توده هوا ثابت بماند، کاهش دمای هوا سبب کاهش میزان تبخیر می‌گردد. بنابراین در هوای سرد تبخیر کمتر از هوای گرم می‌باشد که علتش را هم می‌توان در ظرفیت کم پذیرش بخار آب در درجه‌ی اشباع هوای سرد دانست.

۱-۳-۴- سرعت هوا

بلافاصله پس از تبخیر، لایه نازکی از هوا که در حد فاصل سطح مرطوب و هوا قرار گرفته است از بخار آب اشباع می‌شود. انتشار مولکول‌های آب از سطح آزاد آب به طرف لایه‌ی هوای ساکن با نزدیک شدن نقطه اشباع کاهش می‌یابد؛ و سبب افزایش ورود مجدد مولکول‌های آب موجود در هوا به سطح آب می‌شود. بنابراین جهت ادامه‌ی تبخیر بایستی حرکت قابل‌ملاحظه‌ای در هوا برای برداشتن لایه‌ی

هوای مرطوب پایینی در تماس با سطح آب و مخلوط کردن آن با هوای خشک لایه بالایی وجود داشته باشد. بنابراین میزان تبخیر اغلب و همیشه تا حدی تحت تأثیر حرکت مغشوش هوا می‌باشد. رابطه‌ی بین سرعت باد و تبخیر فقط تا محدوده مشخصی وجود خواهد داشت. باد عامل ایجاد تبخیر نیست بلکه سبب برقراری یا افزایش شدت میزان تبخیر تا محدوده مشخصی می‌شود. شکل ۱-۲ رابطه بین نرخ تبخیر با سرعت باد در شرایط آب و هوایی گرم و خشک و مرطوب را نشان می‌دهد. مطابق با شکل در شرایط گرم و خشک به علت دمای بالا، خشکی هوا و رطوبت کم با افزایش سرعت هوا، نرخ تبخیر روند رو به رشدی نسبت به شرایط مرطوب طی می‌نماید [۶].



شکل ۱-۲: رابطه بین تبخیر از سطح آب با سرعت باد در شرایط آب و هوایی گرم و خشک و مرطوب [۶].

۱-۳-۵- فشار اتمسفر

فشار هوا در یک منطقه رابطه معکوسی با میزان ارتفاع آن منطقه از سطح دریا دارد. با کم شدن فشار اتمسفر مولکول‌ها راحت‌تر می‌توانند از سطح مایع خارج شده و بدین ترتیب بر شدت تبخیر افزوده می‌گردد. در ارتفاعات اگرچه فشار هوا کمتر می‌باشد لیکن به سبب کاهش درجه حرارت و افزایش رطوبت نسبی هوا، تبخیر نسبت به دشت‌ها کمتر است.

۱-۳-۶- عمق آب

تابش خورشیدی جذب شده توسط آب تابعی از عمق لایه‌های آن می‌باشد. در یک مخزن روباز در معرض تابش خورشید، سطح آب دارای بیشترین و کف آب کمترین میزان جذب تابش خورشیدی و حرارت را دارند [۷].

۱-۳-۷- رنگ مایع

رنگ مایع تأثیر بسزایی در میزان جذب تابش خورشید دارد. بطوریکه هر چه رنگ آب تیره‌تر باشد انرژی حرارتی بیشتری جذب می‌کند. آب خالص کاملاً شفاف بوده و بیشترین مقدار ضریب انعکاس^۱ تشعشعی را دارا می‌باشد.

۱-۳-۷- غلظت املاح موجود در آب (شوری)

میزان تبخیر با غلظت املاح موجود در آب رابطه معکوس داشته بطوریکه وجود املاح در آب باعث کندی تبخیر می‌شود. برای مثال به ازای هر یک درصد افزایش چگالی آب در اثر شوری، تبخیر به میزان یک درصد کاهش می‌یابد. کاهش تبخیر به علت کاهش فشار بخار آب شور است. به عبارتی فشار بخار آب اشباع در مجاورت آب ناخالص کمتر از آب خالص می‌باشد. بنابراین تبخیر از آب دریا با میانگین شوری 35ppm حدود ۲ تا ۳ درصد کمتر از تبخیر آب خالص می‌باشد [۸].

۱-۴- روش‌های کاهش تبخیر در دریاچه‌ها و مخازن

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد بخش اعظمی از تلفات منابع آبی در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مربوط به تبخیر آب از سطح مخازن روباز می‌باشد. مطابق با تحقیقات تجربی انجام گرفته در زمینه حفظ ذخایر آب، راهکارهای زیادی برای مقابله با تلفات آب ناشی از تبخیر سطحی ارائه شده است که در ذیل به تشریح هر کدام پرداخته خواهد شد.

¹ Albedo Coefficient

۱-۴-۱- استفاده از پوشش‌های فیزیکی

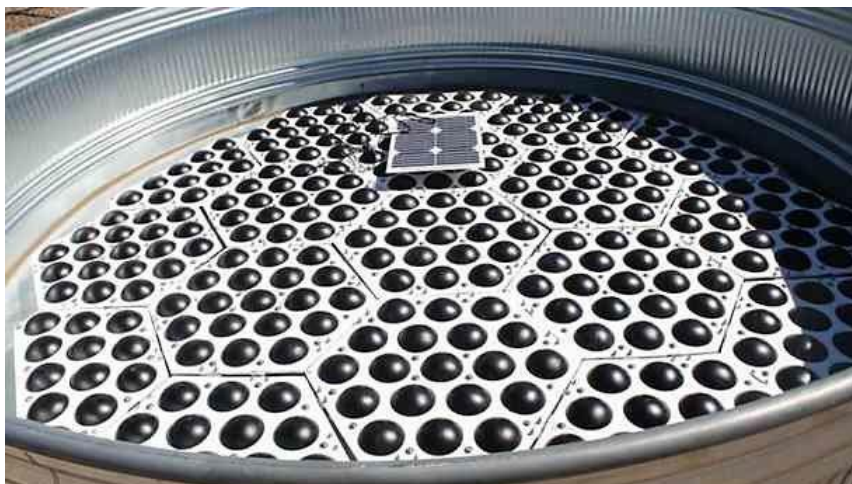
پوشش‌های فیزیکی از تماس مستقیم سطح آب با تابش خورشید جلوگیری می‌کنند. این پوشش‌ها به دو نوع ثابت و شناور تقسیم می‌شوند. پوشش‌های ثابت به‌صورت یکپارچه سطح آب را پوشش می‌دهند. درحالی‌که پوشش‌های شناور به‌دلیل ایجاد دهانه‌های باز در هنگام قرارگیری روی سطح آب، سطح پوشش و راندمان کاهش تبخیر کمتری نسبت به پوشش‌های ثابت دارند. برخی از مدرن‌ترین پوشش‌های فیزیکی که در کشورهای پیشرفته جهت کاهش تبخیر از آن استفاده می‌شود در بخش‌های زیر تشریح می‌شود.

۱-۴-۱-۱- پوشش شبکه‌ای با قابلیت جابجایی

یکی از اختراعات انجام شده در ایالات متحده آمریکا در زمینه جلوگیری از تبخیر آب سدها، یک فناوری موسوم به هگزکاور^۱ است که توسط دانشگاه آریزونا^۲ طراحی شده است. این فناوری چند منظوره است به‌طوری‌که علاوه بر جلوگیری از تبخیر سطحی می‌تواند با استفاده از نور خورشید انرژی تولید کند. مزیت این فناوری نسبت به صفحات خورشیدی هزینه پیاده‌سازی کمتر و امکان پوشش مساحت‌های بیشتر است. قابلیت منحصر به فرد این فناوری، قابلیت جابجایی آن در زمان آبیگری، بارش و افتادن سایه ابرها بر روی آب سد است و با کمک جی پی اس می‌توان مکان آن را تغییر داد. شکل ۱-۳ تصویری از پوشش‌دهی سطح مخازن توسط پوشش‌های شبکه‌ای با قابلیت جابجایی را نشان می‌دهد [۹].

^۱ Hexcover

^۲ University of Arizona



شکل ۱-۳: تصویر پوشش‌دهی سطح مخازن آب توسط پوشش‌های شبکه‌ای با قابلیت جابجایی [۹].

۱-۴-۲- استفاده از توپ‌های پلاستیکی

شاید یکی از ساده‌ترین راه‌های جلوگیری از تبخیر سطحی آب در سدها استفاده از توپ‌های پلاستیکی باشد. در این روش سطح آب با استفاده از توپ‌های پلاستیکی پوشانده می‌شود تا از تابش مستقیم نور خورشید به آب جلوگیری شود و میزان تبخیر کاهش یابد. شکل ۱-۴ استفاده از توپ‌های پلاستیکی سیاه‌رنگ جهت پوشش‌دهی سطح آب سد لس‌آنجلس^۱ آمریکا را نشان می‌دهد [۹]. این توپ‌های سیاه‌رنگ علاوه بر کاهش تبخیر، با جذب حداکثر تابش خورشید در سطح آب، از نفوذ اشعه ماوراء بنفش خورشید که سبب تسریع فرآیندهای شیمیایی در تشکیل برومات (ماده‌ی سرطان‌زا و نقض‌کننده‌ی استانداردهای یک آب آشامیدنی است) درون آب می‌شود جلوگیری به‌عمل می‌آورد.

^۱ Los Angeles Dam



شکل ۱-۴: استفاده از توپ‌های پلاستیکی سیاه‌رنگ جهت پوشش‌دهی سطح آب سد لس‌آنجلس آمریکا [۹].

۱-۴-۳- استفاده از سقف‌های متحرک و سلول‌های خورشیدی

در مناطقی که میزان میانگین بارش و حجم آب ذخیره شده در سد به ندرت از حد معینی عبور می‌کند می‌توان از سقف‌های متحرک و یا سلول‌های خورشیدی برای پوشاندن سطح آب استفاده کرد. این روش تقریباً تمام آب سد را حفظ می‌کند و جلوی تبخیر آب را می‌گیرد و در صورتی که از سلول‌های خورشیدی استفاده شود، تولید انرژی هم انجام می‌شود. مشکلی که این روش دارد این است که در بعضی سدها که مساحت آنها زیاد است هزینه پیاده‌سازی بسیار بالاست و در برخی مناطق که بارش در آنها متغیر می‌باشد، امکان ساخت این سقف‌ها مشکل خواهد بود. شکل ۱-۵ تصویری از پوشش‌دهی سطح آب حوضچه‌های ذخیره‌سازی آب در هند توسط پنل‌های خورشیدی را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۱-۵: تصویری از پوشش‌دهی سطح آب حوضچه‌های ذخیره‌سازی آب در هند توسط پنل‌های خورشیدی [۹].

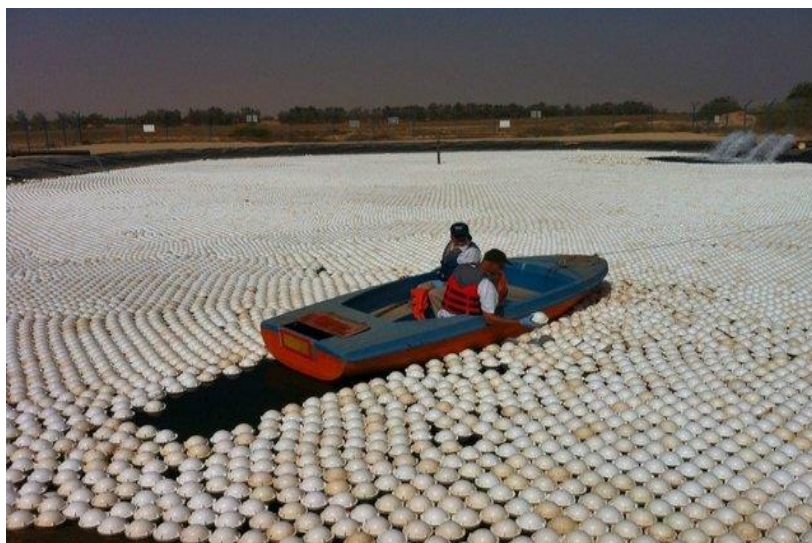
۱-۴-۴- پوشش‌های گنبدی و ورقه‌ای

یکی از روش‌های هزینه‌بر اما بسیار مفید برای جلوگیری از تبخیر آب سدها استفاده از توپ‌های نئوتاپ^۱ است. این پوشش‌ها به صورت زنجیره‌ای از صفحات گنبدی شکل متصل به هم بر روی سطح آب سد قرار می‌گیرند و علاوه بر جلوگیری از تبخیر آب، دمای آب را کاهش داده و از تیره شدن رنگ آب نیز جلوگیری می‌کند. این صفحه‌ها در صورتی که ۸۰ درصد از سطح سد را بپوشانند می‌توانند تا ۷۰ درصد از تبخیر آب جلوگیری کنند و تنها مشکل آنها هزینه بالای آنها می‌باشد. شکل ۱-۶ پوشش‌دهی سطح آب با این گونه پوشش‌ها را در مخازن آب روباز نشان می‌دهد [۹]. نوع دیگری از این پوشش‌ها نیز وجود دارد که ایواپ‌کپ^۲ یا ترموکل^۳ نام دارند. این پوشش‌ها ارزان‌تر هستند و می‌توانند تا حد زیادی جلو تبخیر آب را بگیرند اما مقاومت آنها در برابر وزش باد بسیار کم است. شکل ۱-۷ تصویر پوشش‌دهی سطح حوضچه‌های آب توسط ورقه‌های ترموکل را نشان می‌دهد که در اثر برخورد صاعقه دچار آسیب‌دیدگی شده است [۹].

^۱ Neo Top

^۲ E-vapcap

^۳ Thermocol



شکل ۱-۶: تصویر پوشش‌دهی سطح مخازن آب با پوشش‌های گنبدی شکل [۹].



شکل ۱-۷: تصویر پوشش‌دهی سطح حوضچه‌های آب توسط ورقه‌های ترموکل [۹].

۱-۴-۲- استفاده از پوشش‌های شیمیایی

این پوشش‌ها به دلیل اختلاف چگالی که نسبت به آب دارند یک لایه قوی با ضخامت مشخص روی سطح آب ایجاد می‌نمایند. در نتیجه از سطح آب در برابر تابش خورشید محافظت می‌کنند. پوشش‌های شیمیایی می‌بایست روی رنگ و مزه آب اثر نگذارند، غیر سمی و ارزان بوده و همچنین ممانعتی جهت

تبادلات گازی آب (اکسیژن و گاز کربنیک) بوجود نیاورند. همچنین باید آنقدر انعطاف پذیر و محکم باشند که در مقابل نیروی باد مقاومت کرده و نیز پوشش بوجود آمده طوری باشد که شکافهایی را که در سطح آن (به سبب سقوط قطره باران، پرندگان و یا حشرات) بوجود می آید سریعاً ترمیم و پر نمایند. پوشش‌های شیمیایی به دو نوع تک لایه‌ها و پلی آکریلامیدها تقسیم می‌شوند که در ادامه به تشریح هر یک پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۴-۱- تک لایه‌ها

این محصول که بیش از ۵۰ سال مورد آزمون قرار گرفته یک زنجیره شیمیایی طولانی برای ساختن یک لایه الکلی نازک بر روی سطح آب می‌باشد. از آنجا که این لایه‌ها خود تبخیر می‌گردند باید هر یک الی چهار روز مجدداً اجرا گردند. به‌طور کلی، روش‌های شیمیایی به اندازه روش‌های فیزیکی برای کاهش میزان تبخیر مؤثر نمی‌باشند. این پوشش را در مقیاس کوچک با دست و در مقیاس بزرگ با دستگاه اجرا می‌نمایند. مزیت این محصولات هزینه اولیه و هزینه نگهداری پائین و توانایی اجرا در شرایط مورد نیاز، مثلاً فقط در دوره‌های وجود تبخیر زیاد، می‌باشد. عیب این روش مناسب نبودن برای محیط‌های با باد شدید و تأثیر گذاشتن بر برخی جنبه‌های کیفی آب، از جمله رشد جلبک می‌باشد. امروزه، این پوشش مناسب‌ترین روش برای مخازن بزرگ‌تر از ۱۰ هکتار می‌باشد. از پرکاربردترین پوشش‌های شیمیایی ضد تبخیر می‌توان به واترسیورها^۱ اشاره کرد. شکل ۱-۸ چگونگی قرارگیری واترسیور روی سطح آب را نشان می‌دهد [۱۰]. معمولاً برای بررسی تأثیرات زیست‌محیطی این مواد در اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، درجه حرارت و کدورت توسط حس‌گرهای مناسب صورت می‌گیرد.

^۱ Watersavers



شکل ۸-۱: تصویر چگونگی قرارگیری واترسیور روی سطح آب [۱۰].

۱-۴-۲- پلی آکریلامیدها

پلی آکریلامید^۱ یک نوع از مواد شیمیایی است که مولکول‌های آب را به یکدیگر مقید می‌سازد. این مواد توسط اشعه فرابنفش خورشید تجزیه می‌شوند و نیاز به اجرای مجدد دارند. این روش مقدار کمی از میزان تبخیر را کاهش می‌دهد ولی می‌تواند در هنگام لزوم سریعاً اجرا گردد و محدودیت اندکی برای حیات جانوران ایجاد می‌نماید. این روش برای مناطق پر باد مناسب نبوده و بر روی کیفیت آب نیز اثر سوء خواهد داشت. کارایی این محصول برای کاهش تلفات نشت از بستر مخازن آبی به اثبات رسیده، اما به عنوان روش مناسب برای کاهش تبخیر خود را اثبات ننموده است [۱۱].

۱-۴-۳- استفاده از بادشکن‌ها

بادشکن‌ها با تغییر در سرعت باد، جهت باد و تلاطم هوا در سطح آب به کاهش میزان تبخیر از سطح آب کمک می‌نمایند که به دو صورت زنده و غیرزنده احداث می‌گردند. بادشکن‌های زنده می‌توانند به صورت موانع مصنوعی از جنس فلز، چوب، پلاستیک و یا دیواره‌های سنگی باشند ولی بادشکن‌های زنده معمولاً از یک یا چند ردیف درخت یا درختچه تشکیل گردیده‌اند [۱۲]. در استفاده از بادشکن‌های

^۱ Polyacrylamide

زنده بایستی نکات زیر در نظر گرفته شود. (شکل ۱-۹ نمونه‌ای از بادشکن‌های زنده اطراف یک برکه‌ی آب را نشان می‌دهد [۹]):

- مدت زمانی که طول می‌کشد تا درختان به ارتفاع استاندارد خود برسند باید در نظر گرفته شود تا قبل از آبیگری سد درختان تا حد لازم رشد کرده باشند.
- فاصله درختان از سد نه آنقدر نزدیک باشد که ریشه‌های آنها از آب سد استفاده کنند و نه آنقدر دور باشد که نتوانند شدت وزش باد را کاهش دهند.
- از درختانی استفاده شود که ریشه آنها مستحکم بوده و به حداقل آب نیاز داشته باشد.



شکل ۱-۹: تصویر مربوط به ایجاد بادشکن‌های زنده اطراف یک برکه‌ی آب [۹].

۱-۴-۴- تغییر در ساختار ظاهری مخازن آب

همانطور که پیش‌تر ذکر شد میزان تابش دریافت شده توسط آب تابعی از عمق لایه‌های آب می‌باشد. در برخی سدها که بیشتر بر روی رودهای بزرگ و انشعابات آنها ساخته می‌شود و جمع‌آوری آب باران اولویت کمتری دارد، می‌توان سازه سد را به گونه‌ای طراحی کرد که سطح باز آب در سد به حداقل رسیده و عمق بیشتری برای آب ایجاد کرد. ساخت این نوع سدها بیشتر به جنس زمین و خاک منطقه و محدودیت‌های زیستی و محیطی بستگی دارد.

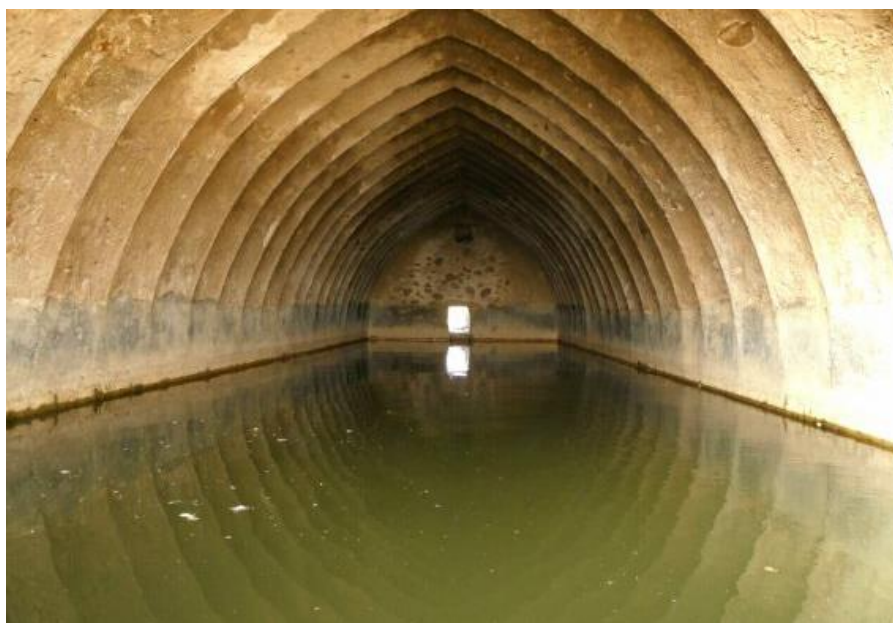
۱-۵- سوابق اجرا شده در زمینه کاهش تبخیر در ایران

استفاده از پوشش‌های فیزیکی، شیمیایی و نصب بادشکن‌ها در مسیر وزش باد در ایران، بیشتر از جنبه‌ی مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته و هنوز بستر اجرایی آن در سدها و مخازن روباز فراهم نشده است. از این رو، از جمله اقداماتی که در ایران در جهت جلوگیری از تلفات آب تاکنون استفاده شده است می‌توان به ساخت آب‌انبارها و قنات‌ها و همچنین آبیاری زیرسطحی در بخش کشاورزی اشاره کرد که در ادامه به تشریح هر کدام پرداخته خواهد شد.

۱-۵-۱- ساخت آب‌انبار و قنات جهت ذخیره‌سازی زیرزمینی آب

ریزش‌های آسمانی در ایران، به جز ناحیه شمالی و سواحل دریای مازندران، در بقیه نواحی بسیار کم است. به همین دلیل، از دیرباز در بیشتر دشت‌های وسیع ایران، برای دسترسی به آب، تلاش چشمگیری صورت گرفته و ایرانیان با بهره جستن از تمامی توانایی‌های خود، ده‌ها کیلومتر قنات حفر می‌کردند. ایرانیان نیز از دیرباز به دلیل خشکی و گرمای بیشتر مناطق کشور آب را ذخیره می‌کردند. در ایران آب‌انبارهای قدیمی در آغاز گودالهایی بوده‌اند که خود به خود از آب باران و سیلاب‌ها پر شده و مردم از آن استفاده می‌کردند. به دلیل خشکی آب و هوای بخش عمده‌ای از کشور ایران و عدم ریزش باران کافی در بیش از شش ماه از سال در اکثر نقاط و در نتیجه فصلی بودن آب رودخانه‌ها و عدم دسترسی به آب، تمهیدات گوناگونی جهت تأمین آب شیرین در فصول خشک سال شده است. احداث بند، قنات و آب‌انبار را می‌توان از این جمله نام برد. در این رابطه، آب‌انبار همانگونه که از نام آن مشخص است، برای ذخیره آب در فصول پر آب و استفاده از آن در بقیه ایام سال می‌باشد. مضافاً اینکه آب‌انبارها ضمن جلوگیری از فاسد شدن آب در هوای آزاد، باعث کاهش دمای آب شده و همچنین از تبخیر شدن آب در اثر تماس مستقیم تابش خورشید و گرمای هوا جلوگیری می‌کردند [۱۳]. نکات عمده‌ای که در قدیم جهت انتخاب محل ساختمان آب‌انبار به دقت رعایت شده است این است که آب‌انبار را در زمین‌های شورزار و گچی و در نزدیکی قبرستان بنا نشده است، بلکه در محلی بنا گشته است که از نظر شیب طبیعی زمین، در مسیر جریان آب باران باشد و بیشترین حجم روان‌آب سطحی و سیلاب

جهت ذخیره سازی به سوی آن هدایت گردد. شکل ۱-۱۰ آب انبار ابراهیم خان واقع در شهر کرمان را نشان می دهد.

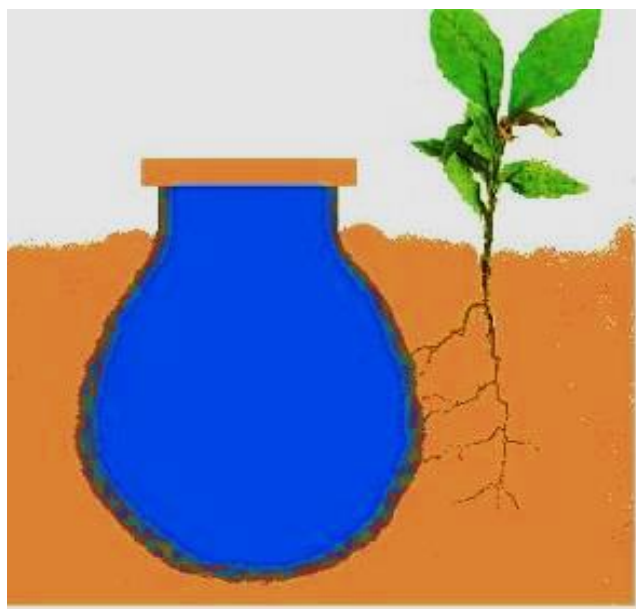


شکل ۱-۱۰: تصویر آب انبار ابراهیم خان واقع در شهر کرمان.

۱-۵-۲- استفاده از روش آبیاری زیرسطحی در بخش کشاورزی

در کشاورزی، بخش بزرگی از تلفات آب، مربوط به تبخیر سطحی آب در فرایند نگهداری و انتقال می باشد. از گذشته تا الآن، بسیاری از کشاورزان در ایران جهت جلوگیری از تبخیر، از روش آبیاری کوزه ای استفاده می کردند. آبیاری کوزه ای از روش های سنتی و قدیمی آبیاری زیرسطحی است که در آن از کوزه های سفالی برای آبیاری استفاده می شود. این روش آبیاری سنتی، کم مصرف و ارزان قیمت بوده و از دیرباز در مناطق خشک و نیمه خشک ایران استفاده می شده است. با هواگیری و آب بندی قسمت بیرون از خاک دهانه کوزه ها و اتصالات و لوله ها برداشت آب از منبع به صورت خودکار تحت نیروی مکش وارد بر دیواره کوزه انجام می شد. این نیرو شامل مکش ریشه می باشد که آب از کوزه با

سرعتی مشخص به بیرون نشتی می‌کند که تحت تأثیر جذب ریشه گیاه است [۱۴]. شکل ۱-۱۱
چگونگی آبرسانی به ریشه‌ی گیاه به روش کوزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۱: تصویر نشان‌دهنده‌ی چگونگی آبرسانی به ریشه‌ی گیاه به روش کوزه‌ای.

فصل دوم

پیشینه، ضرورت و روش انجام تحقیق

۲-۱- مقدمه

ضرورت توجه به تبخیر از نقطه نظر انتقال جرم و انرژی، اهمیت پیدا می‌کند. بسیاری از مناطق دنیا دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک می‌باشند. مشکلات ایجاد شده توسط تلفات آب ذخیره شده در دریاچه‌ها و مخازن به دلیل تبخیر در طی ماه‌های فصل تابستان، به یک موضوع مهم و چالش برانگیز تبدیل شده است [۱۵]. ایران به عنوان کشوری که در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده دارای متوسط سالانه بارندگی حدود یک سوم بارندگی سالانه کره زمین و متوسط تبخیر حدود سه برابر تبخیر سالانه کره زمین می‌باشد [۱۶]. یکی از راه‌های مهم سازگاری با خشکی استفاده بهینه و پایدار از منابع آب است. اهمیت کاهش تبخیر از آنجا آشکار می‌شود که سالانه میلیون‌ها مترمکعب آب شیرین موجود در دریاچه‌ها و مخازن سدها تبخیر شده و به هدر می‌رود؛ بنابراین کاهش تلفات تبخیر از سطح آب می‌تواند یک اقدام اساسی در مبارزه با کم‌آبی در کشور باشد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، استفاده از پوشش‌های فیزیکی، شیمیایی، بادشکن‌ها، ذخیره‌سازی زیرزمینی آب و ... از روش‌های عمده در جهت کاهش تلفات تبخیر بوده که در نقاط مختلف جهان بکار گرفته می‌شود که از این بین، ذخیره‌سازی زیرزمینی آب توسط قنات‌ها و آب‌انبارها در ایران از گذشته تا الآن مورد استفاده قرار گرفته است. ذخیره‌سازی آب در ابعاد بزرگ به وسیله آب‌انبارها و قنات‌ها غیرممکن بوده و خطرات ناشی از ریزش زمین را به دنبال دارد؛ بنابراین توجه و گام برداشتن در جهت استفاده از دیگر راهکارهای کاهش تبخیر یک امری ضروری و مهم در جهت حفظ منابع آبی در ایران خواهد بود. یکی دیگر از مسائل مهم در بحث تبخیر از سطح آزاد آب، ثبت و تخمین مقدار تبخیر است. با برآورد دقیق‌تری از تبخیر، بهتر می‌توان به برنامه‌ریزی‌ها در برداشت آب از یک مخزن، بهینه‌سازی مصرف و اقدام در جهت کاهش تبخیر قدم برداشت. در این فصل، ابتدا به بررسی پیشینه‌ی اقدامات انجام شده در زمینه کاهش تبخیر و روش‌های استفاده شده در جهت تخمین میزان تبخیر پرداخته می‌شود. سپس پژوهش حاضر و اهداف مورد نظر در آن معرفی می‌گردد. در پایان، به معرفی تجهیزات، ساختار و روش آزمایش پرداخته خواهد شد.

۲-۲- پیشینه تحقیق

همانطور که ذکر گردید، یکی از دلایل اصلی در کاهش منابع آب شیرین در جهان، تلفات آب ناشی از تبخیر سطحی است که در کشورهای خشک و نیمه خشک سهم قابل توجهی را به خود اختصاص می دهد. از جمله اقداماتی که برای کنترل تبخیر سطحی در جهت حفاظت از آب در فصل قبل به آن اشاره شد، ذخیره سازی آب شیرین در فصول بارانی در مخازن زیرزمینی و بهینه سازی مصرف آن [۱۷]- [۱۸]، استفاده از پوشش های فیزیکی شناور [۱۹]، پوشش های شیمیایی و پلیمری [۱۰] و بادشکن ها به عنوان کاهنده سرعت باد روی سطح آب نام برد. لازم به توضیح است که در استفاده از بادشکن ها ارتفاع و موقعیت نصب آن ها تأثیر زیادی در میزان کاهش تبخیر دارند [۲۰]. با این وجود، گزارش های علمی متعددی بیان داشته اند که پوشش های فیزیکی، عملکرد بهتر و مؤثرتری نسبت به دیگر راهکارهای کاهش تبخیر سطحی دارند [۲۱]. این پوشش ها به دو نوع ثابت و شناور تقسیم می شوند. پوشش های ثابت به صورت یکپارچه سطح آب را پوشش می دهند و نسبت به پوشش های شناور، درصد پوشش دهی بالاتر و راندمان سرکوب تبخیر بهتری دارند ولی از لحاظ بیولوژیکی و زیست محیطی به دلیل کم شدن سطح تماس هوا با آب، کیفیت آب را تحت تأثیر قرار می دهند. در مقابل، وجود دهانه های باز بین پوشش های شناور در حین قرارگیری روی سطح آب سبب حفظ کیفیت آب و تداوم حیات آبزیان می شود [۲۲]. پوشش های شناور از لحاظ ساختار هندسی و رنگ، عملکرد مختلفی در سرکوب تبخیر دارند. امین زاده و همکاران [۱۷] از توپ های پلی اتیلنی و دیسک های استایروفوم با رنگ های سفید و سیاه به عنوان پوشش شناور روی مخازن روباز استفاده کردند. نتایج آزمایشات آن ها نشان داد که پوشش های دیسکی نسبت به توپ های شناور عملکرد بهتری در کاهش تبخیر دارند. از دیگر نتایج جذاب این مطالعه عدم تأثیر رنگ پوشش ها بر راندمان کاهش تبخیر به دلیل خواص حرارتی مواد مورد استفاده به عنوان پوشش بود. چادهری و همکاران [۲۳] ورق های ترموکل را برای پوشش دهی حوضچه های آب در یکی از روستاهای هند انتخاب کردند. این نوع پوشش ها 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 [۲۴] از شیشه‌های پلی استایرن^۱ برای پوشش‌دهی در این گونه از مخازن آب بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان داد این پوشش‌ها تا ۴۳ درصد در سرکوب تبخیر مؤثر می‌باشند. با توجه به پتانسیل و امکانات موجود در یک منطقه گاهی اوقات بجای سرمایه‌گذاری و ساخت پوشش‌های فیزیکی می‌توان از زباله‌های طبیعت برای کاهش تبخیر از سطح آب استفاده کرد. به عنوان مثال آلام و همکاران [۲۵] از پوست تنه‌ی درخت خرما که در عربستان سعودی به‌عنوان زباله دور ریخته می‌شود برای پوشاندن مخازن روباز در معرض تابش خورشید استفاده کردند. نتایج آزمایشگاهی و بیولوژیکی آن‌ها نشان داد این پوشش‌ها علاوه بر نداشتن خطر احتمالی برای کیفیت آب، قابلیت کاهش تبخیر تا ۵۸ درصد را دارا می‌باشند. مظاهری و کوپایی [۲۶] جهت ارزیابی نرخ کاهش تبخیر از سطح مخازن آب در مزرعه آموزشی واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان، از سه نوع پوشش پلی استایرن، پلی کربنات^۲ و پلی استایرن با روکش آلومینیوم استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها و تحقیقات آن‌ها نشان داد که این پوشش‌ها به‌ترتیب ۸۵/۶، ۸۳ و ۷۶/۵ درصد از تلفات تبخیر جلوگیری می‌کنند و پلی کربنات استحکام و عمر بیشتری نسبت دیگر پوشش‌های استفاده‌شده، دارد. بنزاق‌تا و همکاران [۲۷] از سه پوشش دیگر برای ارزیابی کاهش تبخیر از سطح مخازن استفاده کردند. آن‌ها سطح مخازن روباز در دانشگاه پاترا مالزی^۳ را با حصیر، تخته‌های چوبی چندلایه و ورق گالوانیزه شده فولادی تحت پوشش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که این پوشش‌ها، به‌ترتیب ۶۴، ۵۰ و ۳۶ درصد، راندمان سرکوب تبخیر دارند. اسشاتن و همکاران [۱۰] به مقایسه و بررسی تأثیر و درصد نرخ کاهش تبخیر توسط پوشش‌های شیمیایی نسبت به پوشش‌های فیزیکی، در مقیاس آزمایشگاهی در شهر کوئینزلند^۴ استرالیا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پوشش‌های شیمیایی مشکلاتی از قبیل 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

^۱ Polystyrene

^۲ Polycarbonate

^۳ Putra Malaysia

^۴ Queensland

همکاران [۲۸] در ارزیابی پوشش‌های شناور در کنترل و کاهش تبخیر از سطح آب، اندازه قطر دهانه‌ها و فواصل بین پوشش‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در استفاده از این پوشش‌ها با قطر دهانه یک تا پنج هزارم متر در مخازن آب کوچک، نرخ تبخیر سطحی رفتار غیرخطی دارد و متناسب با سطح بدون پوشش نمی‌باشد. کولی [۲۹] به طراحی پوشش‌های شناور از طریق بررسی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش پرداخت. او از پوشش‌هایی نظیر بتن سبک، لاستیک بوتیل^۱ 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 دهانه بازشو، راندمان سرکوب تبخیر بالاتری نسبت به پوشش‌های شناور کوچک با دهانه‌های باز بیشتر، دارد. آلوارز و همکاران [۱۹] از پوشش‌های سایه سیاه‌رنگ، جهت پوشش دهی سطح آب مخازن شهر کارتاژنای^۲ اسپانیا، استفاده کردند. آن‌ها سطح آب را به دو صورت تک لایه 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 مطالعات تجربی انجام شده، 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. ازجمله پرکاربردترین این روابط می‌توان به رابطه‌ی پنمن مونتیت^۳، پرستلی تیلور^۴ و انتقال جرم^۵ اشاره کرد که برای استفاده از هرکدام از این روابط، مقادیر ورودی مختلفی نیازمند می‌باشد. حسنی [۳۰] روش‌های مختلف برآورد تبخیر از سطح آب را در سد الغدیر ساوه، مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که کمترین خطا مربوط به روابط پرستلی تیلور، پنمن مونتیت و انتقال جرم می‌باشد. علی و همکاران [۳۱] از سه روش مذکور، جهت ارزیابی نرخ تبخیر از سطح دریاچه‌ها و مخازن آب در هند استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که پرستلی تیلور، بهترین و دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر در

¹ Butyl rubber

² Cartagena

³ Penman- monteith

⁴ Priestley-Taylor

⁵ Mass transfer

آن مناطق می‌باشد. در راستای نتایج حاصل شده از تحقیقات علی و همکاران [۳۱]، گرجی‌زاده و همکاران [۳۲] نیز استفاده از روش پرستلی تیلور در تخمین میزان تبخیر سطحی آب سد دز خوزستان را یک روش مناسب و نزدیک به واقعیت، اعلام کردند. در صورتی که ماسونر و همکاران [۳۳] هنگامی که از این روش برای اندازه‌گیری تبخیر رودخانه‌ای در ایالت اوکلاهما^۱ مرکزی آمریکا استفاده کردند نتیجه گرفتند که در هنگام خشکی هوا، تبخیر بیشتری از سطح آب برآورد می‌شود و این روش، نمی‌تواند قابل‌اعتماد باشد. سینق و ژو [۳۴] مقادیر ثبت شده از تبخیر سطحی در شمال غربی اونتاریو^۲ کانادا توسط ۴ ایستگاه هواشناسی را با روابط مربوط به انتقال جرم، مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ تبخیر حاصل شده از معادلات انتقال جرم، توافق خوبی با مقادیر ثبت شده دارد. اسمر و ارگنزیئر [۳۵] به بررسی عملکرد رابطه‌ی اصلاح شده پنمن به صورت تابعی از رطوبت، سرعت هوا، شوری آب و دمای هوا در ارزیابی تبخیر از سطح آب دریا، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این رابطه، برآورد قابل قبولی از تبخیر ارائه می‌دهد و استفاده از روابطی چون فرمول دالتون^۳، به دلیل تخمین بیش از حد تبخیر نسبت به مقادیر واقعی، مناسب نمی‌باشد. در اکثر مطالعاتی که از روابط مذکور در جهت ارزیابی نرخ تبخیر سطحی استفاده شده است، اثر جریان سطحی در نظر گرفته نشده است. در حالی که بسیاری از مخازن آب، دارای جریان‌های سطحی ورودی و خروجی هستند که این جریانات سبب اختلاط حرارتی لایه‌های سیال می‌شود و نرخ تبخیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۶ - ۳۷]. کاکس [۳۸] به بررسی اثرات اختلاط حرارتی لایه‌های آب بر میزان نرخ تبخیر در مخازن روباز در کشور قبرس پرداخت. تحقیقات او نشان داد که مخلوط کردن لایه‌های آب توسط دستگاه‌های همزن، پتانسیل کاهش تبخیر از ۱۰ تا ۳۰ درصد دارد و در فصول خشکسالی می‌تواند کمک شایانی به حفظ آب در برابر تبخیر سطحی داشته باشد. شرمین و همکاران [۳۹] به مدل‌سازی عددی تأثیر اختلاط حرارتی لایه‌ها، بر کاهش تبخیر از سطح مخازن روباز با عمق کمتر از بیست متر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاط حرارتی کاهش

¹ Central Oklahoma

² North-western Ontario

³ Dalton

قابل ملاحظه‌ای از تبخیر حاصل نمی‌کند و نرخ کاهش تبخیر وابسته به جریان‌های ورودی و خروجی از دستگاه همزن آب است. آن‌ها همچنین اعلام کردند، از آنجایی که لایه‌های سطحی با دمای بالا با لایه‌های پایین‌تر مخزن با دمای کمتر مخلوط می‌شوند، پس از گذشت زمان، لایه‌های زیرین آب نیز گرم خواهند شد. چنانچه قرار باشد کاهش قابل ملاحظه‌ای از تبخیر با استفاده از روش مخلوط سازی لایه‌های آب بدست آید، بهتر است که لایه‌های زیرین آب که در اثر انتقال حرارت با لایه‌های سطحی گرم شده‌اند جایگزین منابع آبی جدید با دمای پایین‌تر شوند. فرناندز و همکاران [۴۰] از دستگاه هوادهی برای مخلوط‌سازی لایه‌های آب و انتقال اکسیژن به درون آن استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش سبب بالا بردن کیفیت آب می‌شود و تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نرخ تبخیر از سطح مخازن کم‌عمق ندارد.

۳-۲- معرفی پژوهش حاضر و نوآوری

همان‌طور که از تحقیقات و مطالعات ذکر شده پیداست، تبخیر سطحی یکی از مهم‌ترین علل اتلاف منابع آب در جهان می‌باشد. رشد جمعیت و توسعه‌ی جوامع سبب شده است تدابیر و راهکارهای لازم جهت مدیریت و کاهش تبخیر از سدها، مخازن و دیگر ذخیره‌کننده‌های آب با جدّیت دنبال شود. در اکثر مطالعاتی که به بررسی میزان کاهش تلفات تبخیر توسط پوشش‌های فیزیکی پرداخته شده است سرعت حرکت آب صفر و نرخ کاهش تبخیر آب در حالت سکون بررسی و برآورد شده است. با توجه به این‌که بسیاری از مخازن آب دارای جریان‌های ورودی و خروجی می‌باشند، بررسی اثرات جریان سطحی بر روی نرخ تبخیر و همچنین تخمین مناسب میزان تبخیر از سطح این گونه مخازن می‌تواند کمک شایانی در جهت مدیریت و کنترل تلفات باشد؛ بنابراین در پژوهش حاضر به مدل‌سازی و بررسی آزمایشگاهی نرخ تبخیر سطحی از مخازن روباز در شرایط وجود و عدم وجود جریان سطحی پرداخته می‌شود. جهت کاهش تبخیر از توپ‌های شناور با دو چگالی مختلف (نوع اول دارای جرم ۱۴ گرم بوده و نوع دوم که تا نیمه در آب فرو می‌رود دارای جرمی معادل ۶۰ گرم می‌باشد) به‌عنوان پوشش‌های

فیزیکی محافظ سطح آب در دو رنگ سیاه و سفید استفاده می‌شود. هفت نوع دبی مختلف شامل ۱، ۳، ۴/۵، ۶/۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ لیتر بر دقیقه به‌منظور بررسی تأثیر جریان سطحی بر میزان نرخ تبخیر توسط پمپ آب با دبی ثابت ایجاد می‌شود. برای اندازه‌گیری و تنظیم دبی، از یک شیر در خروجی پمپ و یک ظرف پلاستیکی شفاف و مدرج شده ۱ لیتری استفاده می‌شود که با یک زمان‌سنج و تغییر حالت شیر، دبی خروجی از پمپ تنظیم می‌شود. در هر کدام از دبی‌های مذکور، حالت‌های بدون پوشش، پوشش‌دهی با توپ‌های سفید، سیاه و پوشش‌دهی ترکیبی به‌صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید مورد بررسی قرار می‌گیرد تا نرخ تبخیر و راندمان کاهش تبخیر (درصد کاهش تبخیر نسبت به حالت بدون پوشش و بدون جریان) بدست آید. در کلیه‌ی حالت‌های آزمایش‌شده در شرایط جریان سطحی، ارتفاع آب مخزن ذخیره آب ثابت نگه داشته شده و میزان تبخیر توسط یک دستگاه ماریوت باتل^۱ اندازه‌گیری می‌شود. در حقیقت تغییرات ارتفاع آب در ماریوت باتل نمایانگر میزان آب تبخیر شده از سطح مخزن ذخیره آب بوده که همزمان توسط یک خط‌کش و یک ترانسمیتر فشار^۲ با دقت بالا، اندازه‌گیری می‌شود. در پایان به مدل‌سازی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش در شرایط جریان سطحی و عدم جریان سطحی پرداخته می‌شود تا امکان برآورد تقریبی تبخیر از مخازن روباز تحت شرایط فوق، میسر گردد.

۲-۴- معرفی تجهیزات، ساختار و روش آزمایش

در این بخش به معرفی تجهیزات، ساختار، روش و شرایط حاکم بر آزمایش تبخیر سطحی پرداخته می‌شود. این آزمایش در آزمایشگاه تخصصی انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است. شکل ۲-۲ تصویر شماتیک تجهیزات و ساختار آزمایش را نمایش می‌دهد. یک مخزن پلی‌اتیلن به ابعاد ۱۰۶×۱۰۷×۵۰ سانتی‌متر مکعب و ضخامت ۶ میلی‌متر جهت ذخیره آب مورد استفاده قرار گرفته است. جریان سطحی به کمک یک پمپ آب^۳ با دبی ثابت ایجاد می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک

¹ Marriott Bottle.

² Pressure Transmitter.

³ Electro Motogen Sh205, 1/60HP,iran.

ترانسمیتر فشار^۱ در حالت جریان سطحی (به دلیل ثابت بودن ارتفاع آب مخزن) در قسمت پایین ماریوت باتل نصب می گردد و هر ده دقیقه تغییرات فشار هیدرواستاتیک که بیانگر نرخ تبخیر است را به صورت جریان به دستگاه ثبت و پردازش جریان^۲ ارسال می کند. دستگاه ثبت و پردازش جریان پس از دریافت مقادیر جریان از ترانسمیتر فشار، آن را تبدیل به مقدار معادل فشار هیدرواستاتیک کرده و به نمایشگر جهت ذخیره سازی ارسال می کند. در حالت عدم جریان سطحی ترانسمیتر فشار در قسمت پایین مخزن نصب می گردد. لازم به توضیح است که در حالت جریان سطحی ثابت کردن ارتفاع آب درون مخزن، توسط ماریوت باتل انجام می گیرد. این دستگاه دارای یک خروجی آب و یک لوله مرتبط با هوا می باشد. فشار هوا درون ماریوت باتل منفی و فشار هوا در کف لوله مرتبط با هوا با فشار اتمسفر برابر می باشد که وجود حباب دائم در این قسمت حاکی از این قضیه و کارکرد صحیح دستگاه 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، ماریوت باتل به دلیل اینکه با ظرف در ارتباط می باشد، شروع به کار می کند و ارتفاع آب درون ظرف را با کف لوله ی مرتبط با هوا برابر می کند. حباب ها پشت سر هم از کف لوله مرتبط با هوا جدا شده و در سطح آب آزاد می شوند. در نتیجه، فشار هوای منفی درون ماریوت باتل کاهش پیدا کرده و سبب آزاد شدن جریان آبی به اندازه ی مقدار کاهش فشار ایجاد شده، می شود. هنگامی که ارتفاع آب ظرف به حالت ابتدایی خود برمی گردد، حباب دهی به سطح آب متوقف می شود و یک حباب چسبیده به کف لوله باقی می ماند؛ بنابراین ارتفاع آب در ظرف هیچگاه از کف لوله مرتبط با هوا بالاتر نخواهد رفت و برابر با ارتفاع آن از سطح زمین خواهد بود. با ثابت ماندن ارتفاع آب در ظرف، ارتفاع آب مخزن نیز ثابت باقی خواهد ماند. هنگامی که ماریوت باتل مقدار آب تبخیر شده را جبران می کند، تغییرات ارتفاع آب درون آن برابر با میزان تبخیر سطحی ایجاد شده از سطح مخزن خواهد بود. شکل ۲-۲، تصویر واقعی از برخی تجهیزات کنترلی مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان

^۱ PSHH00.1BIIG, Sensys: ± 0.0001 bar accuracy, South Korea.

^۲ PAC 5370, Fararo paya, iran.

می‌دهد. شکل ۲-۳ تصویر واقعی ماریوت باتل مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در استفاده از این دستگاه، به دلیل وجود فشار هوای منفی درون آن، آبندی دستگاه باید به دقت انجام گیرد. در غیر این صورت، حباب در کف لوله مرتبط شده با هوا باقی نخواهد ماند و ارتفاع آب در ظرف بالا آمده و سرریز خواهد کرد. و آزمایش با خطا مواجه خواهد شد. به منظور اندازه‌گیری دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد از دستگاه رطوبت‌سنج و بادسنج^۱ استفاده می‌گردد. که حسگرهای مربوط به این دستگاه در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌اند. این حسگرها در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری از سطح آب نصب می‌شوند و پارامترهای ذکر شده را اندازه‌گیری می‌کنند. دمای آب توسط چهار عدد ترموکوپل^۲ که در عمق‌های ۲۴، ۱۲ و ۳۶ سانتی‌متری از سطح آب نصب شده‌اند اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. شش عدد پروژکتور ۵۰۰ وات اسرام^۳ با اعمال تابش یکنواخت ۶۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع در کل سطح مخزن به عنوان شبیه‌ساز خورشید عمل می‌کنند (طیف تنگستن-هالوژن شبیه به نور خورشید با پیک ۰/۹ میکرومتر در ۳۲۰۰ درجه کلوین است) که جهت یکنواخت کردن میزان تابش اعمال شده روی سطح مخزن، از یک پیرانومتر^۴ استفاده می‌شود. طیف نور خورشید دارای طیف طول‌موج کاملی (غیر طول‌موج‌هایی که در طی مسیر خود تا زمین تضعیف می‌شوند) از رنگ‌ها است و این موضوع باعث می‌شود که هر رنگی، در زیر نور خورشید جلوه و نمای خود را به‌خوبی نشان دهد. منابع نوری مختلف نیز هر کدام طیف‌های خاصی از رنگ‌های متفاوت را تولید می‌نمایند. لامپ‌های مدادی با طیف تنگستن هالوژن با افزایش دمای یک رشته فلزی (مثل تنگستن) اقدام به تولید نور سفید می‌نمایند. این فرآیند مشابه فرآیندی است که در خورشید نیز بر اثر گرمایش سطح آن اتفاق می‌افتد، با این تفاوت که در اینجا دمای جسم سیاه بسیار پایین‌تر است. لذا در این لامپ‌ها ما نوری مشابه نور خورشید، اما با دمای رنگ نور پایین‌تر تولید می‌کنیم. این لامپ‌ها (خصوصاً نوع هالوژن، چون دمای نور پایین‌تری دارد) به‌واقع شبیه‌ترین نور ساخته دست بشر را به نور خورشید تولید می‌کنند. کلیه کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط نمایشگر رایانه

^۱ C310,KIMO:±0.1°C & ±1.5%FS-RH & ±3.05%FS-Vel accuracy, France.

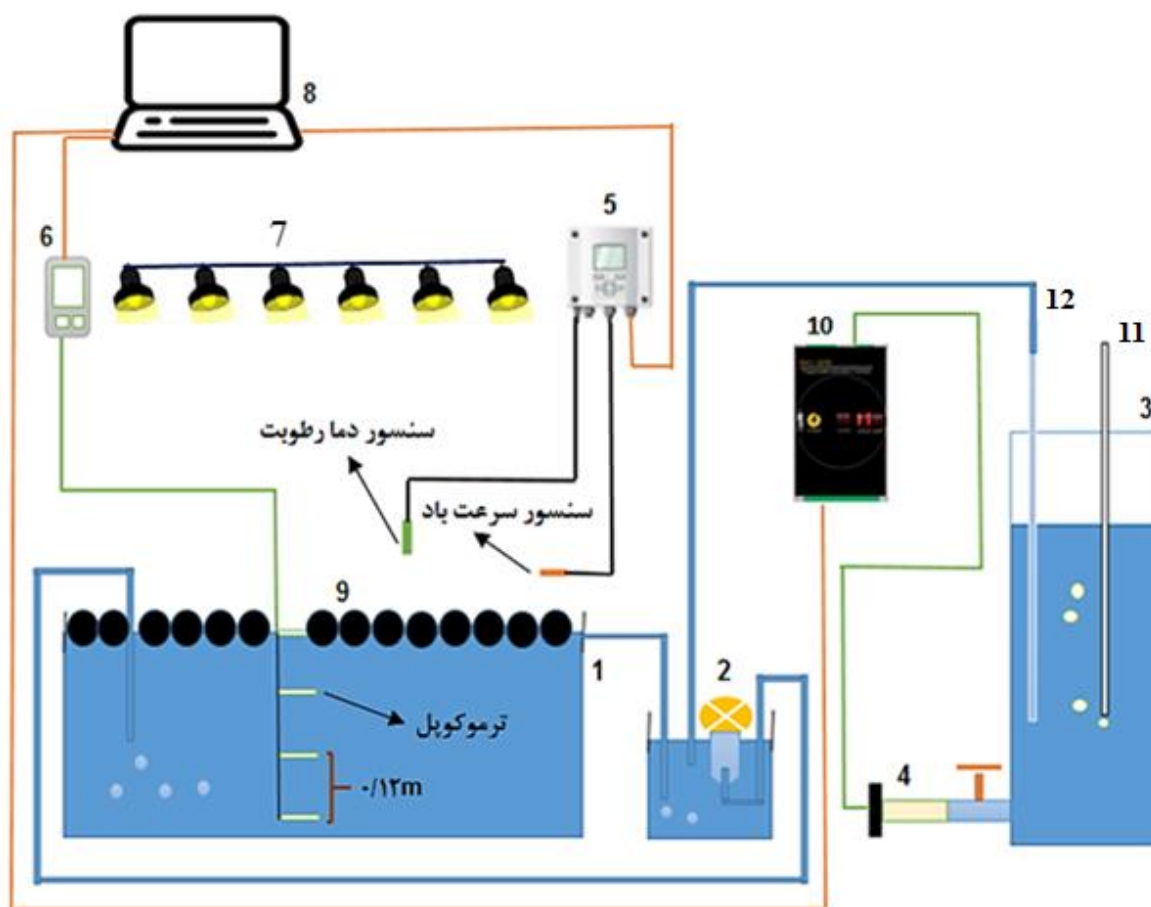
^۲ KTT320,KIMO:±0.1°C accuracy, France.

^۳ Osram,64702eco,500w,Germany.

^۴ SL100 KIMO: 0 – 1300 w/m² range , ±0.5 w/m² accuracy, France.

نمایش داده شده و در بازه‌ی زمانی مشخص ثبت می‌گردند. پوشش سطح توسط ۲۴۶ عدد توپ پلی اتیلنی با قطر ۷ سانتی‌متر که حدود ۹۰ درصد از سطح مخزن را می‌پوشانند 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 به‌صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید، در هر دو حالت جریان سطحی و عدم جریان سطحی، تحت بررسی و کنترل قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که بعد از انجام آزمایش‌های فوق با توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم، با تزریق آب به داخل پوشش‌ها توسط یک سرنگ آب، جرم آن‌ها از ۱۴ گرم به ۵۰ گرم افزایش پیدا می‌کند تا اثر تغییرات چگالی پوشش‌ها بر میزان کاهش تبخیر مشخص گردد. مدت‌زمان اندازه‌گیری تبخیر، دو ساعت بوده و جهت ایجاد شرایط یکسان، آزمایش‌ها به‌صورت پشت سر هم انجام می‌شود. شکل ۲-۴ تصویر واقعی تجهیزات آزمایشگاهی و کلیه‌ی حالت‌های پوشش‌دهی مخزن جهت ارزیابی نرخ کاهش تبخیر در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱: تصویر شماتیک تجهیزات و ساختار آزمایش: (۱) مخزن پلی اتیلن (۲) پمپ آب (۳) ماریوت باتل (۴) ترانسسمیتر فشار (۵) دستگاه اندازه گیری سرعت باد و دما 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 (۱۰) دستگاه ثبت و پردازش فشار (۱۱) لوله ی مرتبط با هوا (۱۲) لوله ی خروجی آب.



شکل ۲-۲: تصویر برخی از تجهیزات کنترلی مورد استفاده در پژوهش حاضر: (الف) دستگاه ثبت و پردازش جریان (ب) دستگاه اندازه‌گیر دمای لایه‌های آب (ج) ترانسمیتر فشار (د) تابش‌سنج (ه) دستگاه اندازه‌گیر سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی (و) حسگرهای دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد.



شکل ۲-۳: تصویر واقعی از ماریوت باتل مورد استفاده در پژوهش حاضر.



شکل ۲-۴: 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.

فصل سوم

مدل سازی بالانس انرژی

۳-۱- مقدمه

همانطور که در فصل قبل ذکر گردید روش‌های زیادی برای تخمین نرخ تبخیر از سطح مخازن آب روباز ارائه شده است. اکثر این روابط بر پایه‌ی بالانس انرژی در سطح آب استوار می‌باشند. در یک منطقه تعیین روش برآورد تبخیر از سطح آب با توجه به مقادیر ورودی در دسترس انجام می‌گیرد؛ بنابراین ممکن است مقدار حاصل شده از تخمین نرخ تبخیر با آنچه در واقعیت اتفاق افتاده تفاوت زیادی داشته باشند. لذا در این فصل ابتدا به بررسی روش‌های پرکاربرد محاسبه‌ی نرخ تبخیر پرداخته می‌شود. سپس جهت ارزیابی دقیق‌تر نرخ تبخیر در شرایط جریان سطحی و عدم جریان سطحی که در این تحقیق به بررسی آن پرداخته می‌شود، مدل‌سازی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش با در نظر گرفتن کلیه‌ی پارامترهای تأثیرگذار بر روی تبخیر در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲- روش‌های برآورد تبخیر

روش‌های تجربی زیادی جهت ارزیابی تبخیر از سطح آب ارائه شده است که از پرکاربردترین این روابط که به آن‌ها اشاره شد معادلات پنمن-مونتیت، پرستلی-تیلور و انتقال جرم می‌باشد که در ادامه به تشریح هر کدام پرداخته خواهد شد.

۳-۲-۱- معادله پنمن-مونتیت

در ماه مه سال ۱۹۹۰ میلادی، سازمان خواربار و کشاورزی (فائو) هیأت مشورتی از کارشناسان و محققان را با همکاری کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان جهانی هواشناسی تشکیل داد تا ضمن بازنگری روش‌های این سازمان در زمینه نیاز آبی گیاهان، روش‌ها را تجدیدنظر و روزآمد کنند. در گردهمایی کارشناسان، بر استفاده از روش ترکیبی پنمن-مونتیت به‌عنوان یک روش استاندارد روزآمد برای برآورد تبخیر مرجع توافق و روش‌هایی نیز، برای محاسبه پارامترهای مختلف پیشنهاد شد. معادله پنمن-مونتیت به‌صورت معادله (۳-۱) بیان می‌شود [۶ و ۴۱]:

$$E = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (۱-۳)$$

که E نرخ تبخیر بر حسب $(\frac{\text{mm}}{\text{day}})$ ، G نرخ حرارت ذخیره شده در آب $(\frac{\text{W}}{\text{m}^2})$ ، R_n نرخ خالص تابش خورشید $(\frac{\text{W}}{\text{m}^2})$ ، ثابت سایکرومتریک^۱ γ $(\frac{\text{Pa}}{^\circ\text{C}})$ ، شیب منحنی فشار بخار Δ $(\frac{\text{Pa}}{^\circ\text{C}})$ ، e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و واقعی (Pa) و U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین $(\frac{\text{m}}{\text{s}})$ می باشد.

برای محاسبه ی فشار بخار اشباع e_s می توان از معادله (۲-۳) استفاده کرد که به صورت زیر بیان می شود [۳۱]:

$$e_s = 0.6108 \exp\left(\frac{17.269\bar{T}}{\bar{T} + 237.3}\right) \quad (۲-۳)$$

که $\bar{T}$ میانگین دمای لایه های آب $(^\circ\text{C})$ می باشد. فشار بخار واقعی نیز از معادله (۳-۳) بدست می آید [۳۱]:

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \quad (۳-۳)$$

که $e^0(T_{min})$ و $e^0(T_{max})$ به ترتیب فشار بخار واقعی هوا (kPa) در کمترین و بیشترین دما و RH_{min} و RH_{max} به ترتیب مینیمم و ماکزیمم رطوبت نسبی هوا در حداقل و حداکثر دما شبانه روز (%) می باشد. نرخ انتقال حرارت محسوس از سطح به لایه های آب (یا حرارت ذخیره شده در آب) را می توان از معادله (۴-۳) بدست آورد [۴۲]:

$$G = \rho_w c_w \sum_{j=1}^N Z_j \frac{\Delta T_{wj}}{\Delta t} \quad (۴-۳)$$

^۱ psychrometric constant

که $\rho_w = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ چگالی آب، $c_w = 4.18 \frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب، N تعداد لایه‌های آب، Z_j عمق لایه‌های آب، و ΔT_{wj} تغییرات دمایی هر لایه در طول زمان آزمایش (Δt) می‌باشند. تابش خالص R_n ، تفاوت بین تابش ورودی و خروجی در سطح آب است که موازنه بین انرژی جذب، منعکس و منتشرشده یا تفاوت بین نرخ تابش طول‌موج کوتاه ورودی خالص و تابش طول‌موج بلند خروجی خالص است که از معادله (۵-۳) بدست می‌آید [۳۱-۳۳]:

$$R_n = (1 - r_w)S + R_a - [r'_w R_a + \varepsilon_w \sigma (T_a + 273.15)^4] \quad (۵-۳)$$

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، T_a دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)، $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ ثابت استفان بولتزمن^۱ و R_a تابش اتمسفری می‌باشد که از معادله (۶-۳) بدست می‌آید:

$$R_a = \varepsilon_a \sigma (T_a + 273.15)^4 \quad (۶-۳)$$

در معادله (۶-۳) ε_a ضریب صدور هوا می‌باشد که برای محاسبه‌ی آن می‌توان از معادله (۷-۳) استفاده کرد [۴۳]:

$$\varepsilon_a = 0.919 \times 10^{-5} (T_a + 273.15)^2 \quad (۷-۳)$$

که T_a دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$) می‌باشد. برای بدست آوردن ثابت سایکرومتریک از معادله (۸-۳) استفاده می‌شود [۳۱]:

$$\gamma = \frac{c_p \times P}{0.622 \times 1000 \times L} \quad (۸-۳)$$

که $c_p = 1.012 \frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}$ ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت، $L = 2260 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$ گرمای نهان تبخیر آب و P فشار هوا (kPa) می‌باشد. در صورت مشخص نبودن میزان فشار اتمسفر در یک منطقه می‌توان از معادله (۹-۳) جهت محاسبه‌ی آن استفاده کرد [۳۱]:

$$P = 101.3 \left[\frac{293 - 0.006z}{293} \right]^{5.26} \quad (۹-۳)$$

^۱ Stefan-Boltzman constant

که Z ارتفاع از سطح دریا (m) می باشد. شیب منحنی فشار بخار را نیز می توان از معادله (۳-۱۰) بدست آورد [۳۱]:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(\bar{T} + 237.3)^2} \quad (۳-۱۰)$$

۳-۲-۲- معادله پرستلی تیلور

روش پرستلی تیلور توسط آقای تیلور در سال ۱۹۷۲ به منظور ارزیابی تبخیر از سطح دریاچه ها ارائه گردید که به صورت معادله (۳-۱۱) به صورت زیر بیان می شود [۳۱]:

$$E = \frac{1}{\lambda} \alpha \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G) \quad (۳-۱۱)$$

که α ضریب بدون بعد تیلور می باشد که برای محاسبه آن از معادله (۳-۱۲) استفاده می شود:

$$\alpha = \left[\frac{\Delta + \gamma}{\Delta \{1 + \beta\}} \right] \quad (۳-۱۲)$$

که β نسبت باون^۱ می باشد و از معادله (۳-۱۳) بدست می آید:

$$\beta = \frac{cP}{100} \left[\frac{\bar{T} - T_a}{e_s - e_a} \right] \quad (۳-۱۳)$$

که $0.58 \leq c \leq 0.66$ ثابت تجربی (بدون بعد) می باشد [۴۴].

۳-۲-۳- معادله انتقال جرم

روش انتقال جرم تابعی از میزان سرعت باد در سطح آب می باشد و به صورت معادله (۳-۱۴) بیان می شود [۴۲]:

$$E = \mu U_2 [e_s - e_a] \quad (۳-۱۴)$$

μ ضریب انتقال جرم می باشد که برای محاسبه آن از معادله (۳-۱۵) استفاده می شود [۲۹]:

¹ Bowen ratio

$$\mu = 2.909 A_s^{-0.05} \quad (۱۵-۳)$$

که A_s مساحت سطح مخزن (m^2) می باشد.

۳-۳- مدل سازی بالانس انرژی

استفاده از روش های تجربی ممکن است به دلیل عدم در دسترس بودن پارامترهای مورد نیاز برآورد تبخیر در یک منطقه، نتایج نامناسبی از میزان تبخیر از سطح آب در شرایط پوشش و بدون پوشش ارائه دهد. بنابراین در این بخش به مدل سازی و بررسی دقیق تر انرژی های ورودی و خروجی از سطح آب در هر دو شرایط جریان سطحی و عدم جریان سطحی پرداخته می شود.

برای مدل سازی و اعمال بالانس انرژی در مخازن ذخیره آب، می توان از معادله (۱۶-۳) که بیانگر تعادل انرژی های دریافت شده در سطح و انرژی های تلف شده در سطح و دیواره های مخزن می باشد، استفاده کرد [۲۴ و ۲۹]:

$$R_n = \frac{\rho_w L E}{86400} + G + H + \frac{Q_V}{A_s} + \frac{Q_{wall}}{A_s} \quad (۱۶-۳)$$

که H نرخ انتقال حرارت محسوس از هوا به سطح آب، Q_V نرخ انتقال حرارت به واسطه حرکت سیال (در شرایطی که مخزن دارای جریان ورودی و خروجی باشد) و Q_{wall} تلفات حرارتی از دیواره های مخزن می باشد. (کلیه ی واحدها وات بر متر مربع می باشد). چنانچه از پوشش های شناور روی سطح مخزن ذخیره آب استفاده شود، می بایست تابش خالص در معادله (۱۷-۳) به شکل زیر تصحیح گردد [۲۹]:

$$R_n = R_a + [1 - (1 - p)r_w - pr_c]S - \sigma[(1 - p)\varepsilon_w T_w^4 + p\varepsilon_c T_c^4] - [(1 - p)r'_w + pr'_c]R_a \quad (۱۷-۳)$$

که r_c ضریب انعکاس تابش موج کوتاه از سطح پوشش، p درصد پوشش دهی 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 می باشد. در اکثر مطالعات مقدار ضریب انعکاس تابش موج بلند از سطح آب (r'_w) ناچیز یا برابر

۰/۰۳ و برای تابش موج کوتاه بین ۰/۰۳ تا ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود [۴۵-۴۶]. 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 [۲۹]. در جدول ۱-۳ ضرایب انعکاس و صدور تابش موج کوتاه برای آب و پوشش‌های کروی شکل ارائه شده است. نرخ انتقال حرارت محسوس از هوا به سطح آب (H) مطابق با معادله (۱۸-۳)، برابر است با [۲۹ و ۴۷]:

$$H = \frac{\rho_a c_p \kappa^2 U [T_a - (1 - p)T_w + pT_c]}{\ln^2 \frac{Z}{Z_0}} \quad (18-3)$$

جدول ۱-۳. ضریب انعکاس تابش موج کوتاه و ضریب صدور آب و پوشش‌های کروی.

ضریب انعکاس (۲)	ضریب صدور (۴)	
۰/۰۳ [۴۶]	۰/۹۵ [۴۲]	آب
۰/۱۵ [۱۷]	۰/۹۸ [۴۲]	توپ‌های محافظ (سیاه)
۰/۶۵ [۱۷]	۰/۸۵ [۲۹]	توپ‌های محافظ (سفید)

که $\rho_a = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ چگالی هوا، $\kappa = 0.44$ ثابت ون کارمن^۱، U سرعت هوا در ارتفاع Z برحسب $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ و Z_0 زبری سطح می‌باشد که در جدول ۲-۳ برای سطوح بدون پوشش و سطوح تحت پوشش با توپ‌های شناور ذکر گردیده است.

جدول ۲-۳. ارتفاع زبری سطح و ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد، رطوبت و دمای هوا برای سطح مخزن بدون پوشش و سطوح تحت پوشش

ارتفاع زبری سطح آب (m)	ارتفاع اندازه‌گیری دما و سرعت هوا از سطح آب (m)	
۰/۰۰۰۰۱ [۴۵]	۰/۳	سطح آب بدون پوشش
۰/۰۶	۰/۳	پوشش با توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم
۰/۰۳۵	۰/۳	پوشش با توپ‌های پلاستیکی با چگالی زیاد

^۱ Von karman constant

جریان‌های ورودی و خروجی به مخزن می‌تواند حرارت ذخیره‌شده درون آب را تحت تأثیر قرار دهد بنابراین برای محاسبه‌ی نرخ انتقال حرارت وارد شده به مخزن از طریق جریان‌های ورودی و خروجی از معادله (۱۹-۳) استفاده می‌شود [۱۷ و ۴۸]:

$$Q_V = \sum_i \rho_w c_w \bar{q}_i (T_i - \bar{T}) - \sum_e \rho_w c_w \bar{q}_e (T_e - \bar{T}) \quad (۱۹-۳)$$

که T_i و T_e به ترتیب دمای جریان‌های ورودی و خروجی آب، $\bar{q}_i$ و $\bar{q}_e$ به ترتیب دبی جریان‌های ورودی و خروجی آب از مخزن می‌باشد. از آنجایی که 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_V صرف‌نظر کرد و تأثیر جریان‌های ورودی و خروجی را در تغییرات حرارت ذخیره شده درون لایه‌های آب مخزن (معادله ۴-۳) مورد بررسی و محاسبه قرار داد. در حالت جریان سطحی تلفات حرارتی از دیواره‌های مخزن به محیط نیز از معادله (۲۰-۳) بدست می‌آید:

$$Q_{wall} = -k A_w \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (۲۰-۳)$$

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 محاسبه‌ی نرخ تبخیر، راندمان کاهش تبخیر را می‌توان از معادله (۲۱-۳) بدست آورد [۲۱]:

$$\epsilon = 1 - \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (۲۱-۳)$$

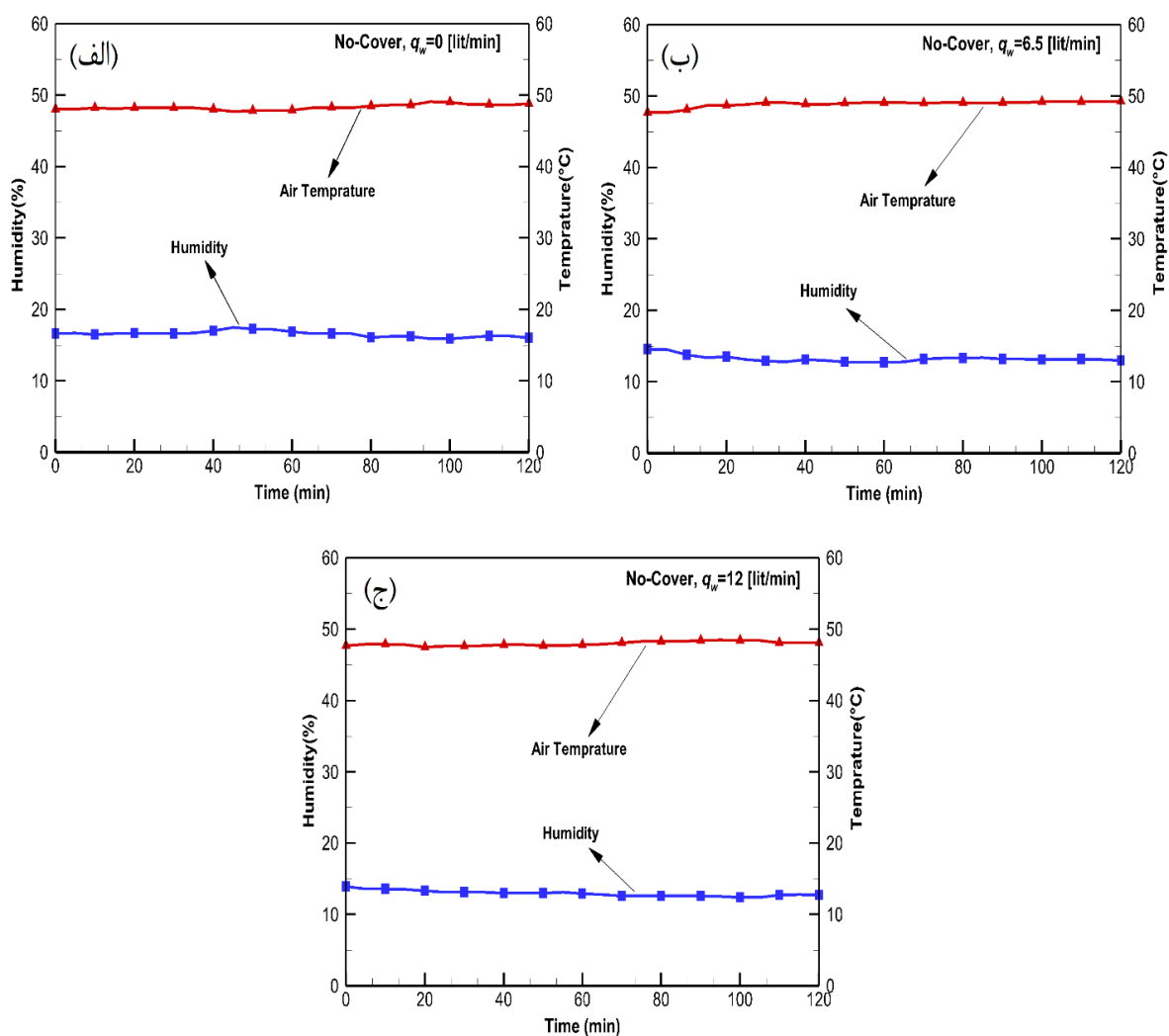
که E_0 نرخ تبخیر از مخزن بدون پوشش در شرایط بدون جریان می‌باشد.

فصل چہارم

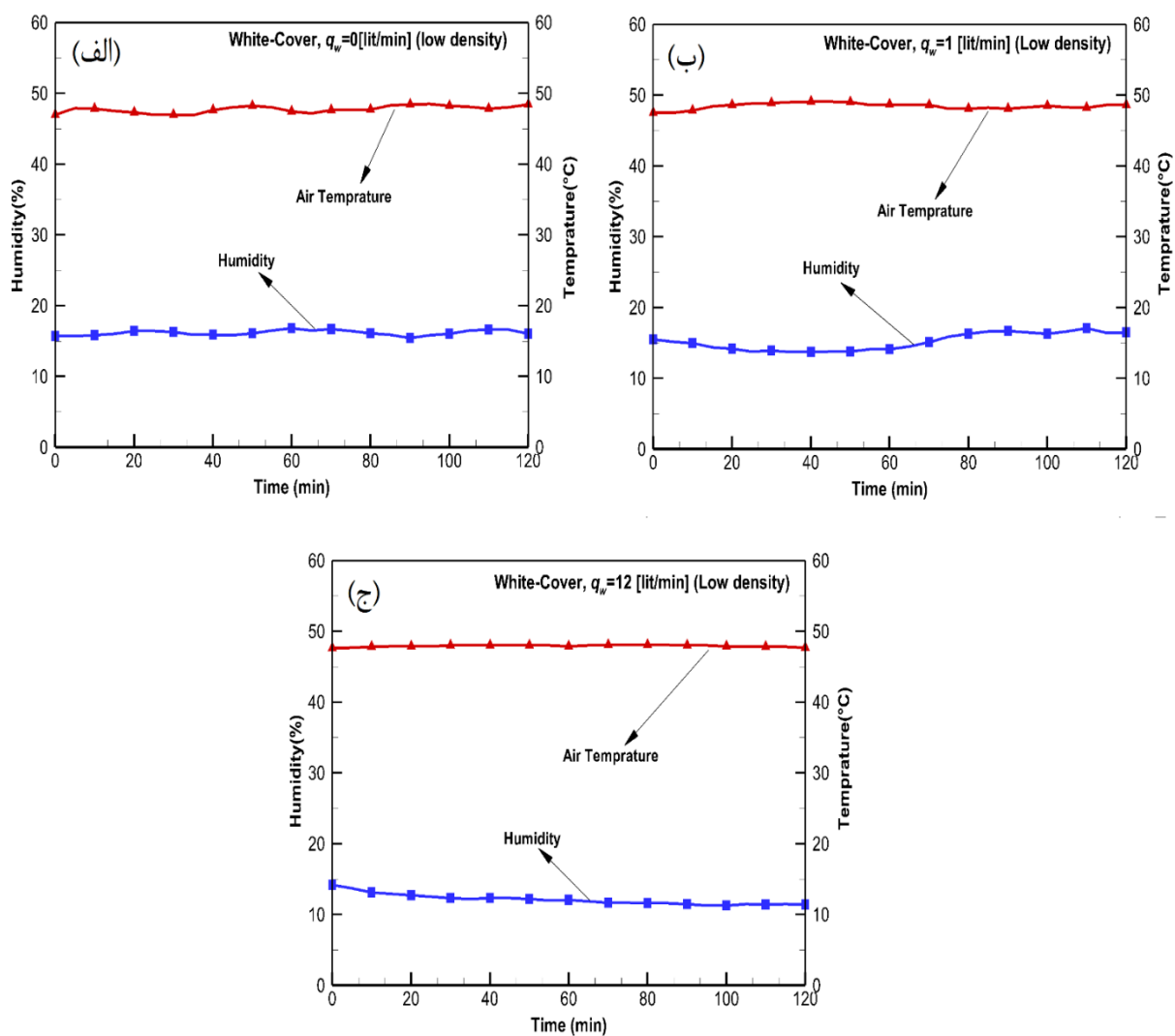
نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

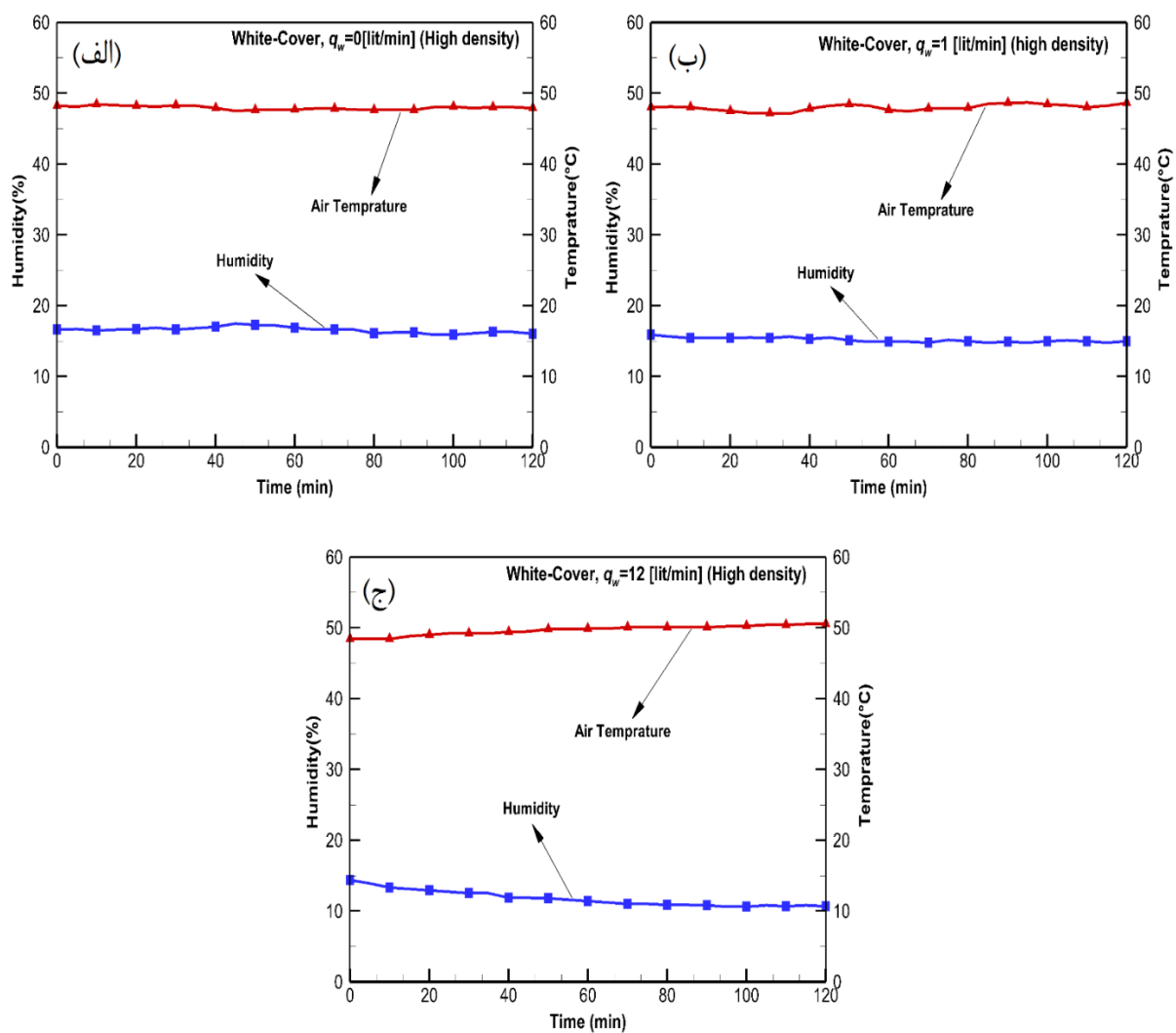
در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج بدست آمده از میزان کاهش نرخ تبخیر سطحی آب به واسطه استفاده از پوشش‌های شناور (توپ‌های پلاستیکی) با دو چگالی مختلف با حضور جریان سطحی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در فصل دوم ذکر گردید، به منظور بررسی میزان تبخیر در شرایط جریان سطحی هفت دبی مختلف شامل ۱، ۳، ۴/۵، ۶/۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ لیتر بر دقیقه توسط پمپ آب ایجاد شد 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) برای هر دو نوع پوشش (چگالی کم و چگالی زیاد)، در مدت‌زمان شش ساعت مورد آزمایش قرار گرفت. لازم به توضیح است که توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم دارای جرمی معادل ۱۴ گرم و توپ‌های پلاستیکی با چگالی زیاد که تا نیمه در آب فرو می‌روند دارای جرمی معادل ۵۰ گرم می‌باشند. 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 (۷۲۰۰ ثانیه) برای ثبت داده‌ها و اندازه‌گیری میزان تبخیر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴-۱، ۴-۲ و ۴-۳ به ترتیب تغییرات رطوبت نسبی هوا به ازای تغییرات دمای هوا در سطح آب تحت شرایط بدون پوشش و پوشش با توپ‌های سفید با چگالی کم و چگالی زیاد در سه دبی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در فصل اول به آن اشاره شد، زمانی رطوبت نسبی هوا افزایش می‌یابد که درجه حرارت هوا پایین آمده باشد. با توجه به اشکال فوق این قضیه کاملاً مشهود است.



شکل ۴-۱: تغییرات رطوبت نسبی هوا به ازای تغییرات دمای هوا تحت حالت بدون پوشش در سه دبی مختلف: (الف) حالت بدون پوشش و بدون جریان سطحی (ب) حالت بدون پوشش با دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه (ج) حالت بدون پوشش با دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.



شکل ۴-۲: تغییرات رطوبت نسبی هوا به ازای تغییرات دمای هوا تحت حالت پوشش دهی با توپ های سفید با چگالی کم در سه دبی مختلف: (الف) بدون جریان سطحی (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.

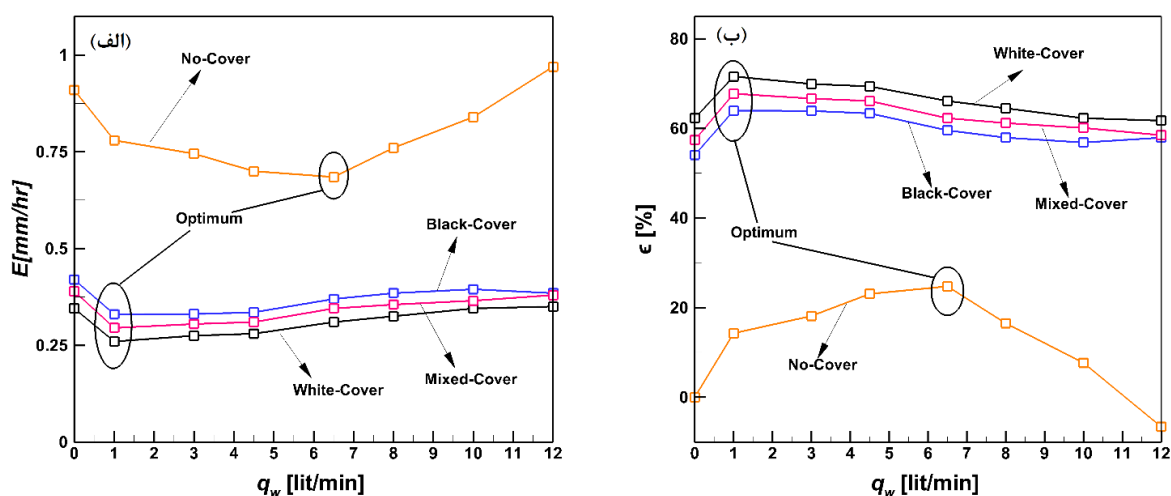


شکل ۳-۴: تغییرات رطوبت نسبی هوا به ازای تغییرات دمای هوا تحت حالت پوشش دهی با توپ های سفید با چگالی زیاد در سه دبی مختلف: (الف) بدون جریان سطحی (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.

۴-۲- نتایج

نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی در حالت استفاده از پوشش‌های شناور با چگالی کم در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است. شکل ۴-۴ (الف) میزان تبخیر سطحی برای دو ساعت آخر از مجموع شش ساعت زمان آزمایش بر حسب میلی‌متر بر ساعت و شکل ۴-۴ (ب) راندمان کاهش تبخیر را برای هر چهار حالت پوشش‌دهی نشان می‌دهد. همانگونه که پیش‌بینی 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 (به عنوان مثال)، در 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 (r_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 ۴-۴ با 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 ۱/۸۳ میلی‌متر برای مخزن بدون جریان به حدود ۱/۳۷ میلی‌متر برای مخزن تحت دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه کاهش می‌یابد. این افزایش ۲۵/۱ درصدی راندمان کاهش تبخیر نشان می‌دهد که ایجاد دبی سطحی می‌تواند راهکار مناسبی برای حفظ منابع آبی مخازن ذخیره آب، بدون صرف هزینه‌های سنگین 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 در هنگام استفاده از توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم به تفکیک حالت‌های آزمایش شده در جدول ۴-۱ به همراه نتایج حاصل شده از مدل‌سازی ریاضی 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 پارامترهای موردنیاز برای تمامی حالت‌های با پوشش‌دهی، بدون پوشش‌دهی، با حضور جریان سطحی و بدون جریان سطحی پیش‌بینی نماید. در شکل ۴-۵ میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر به‌دست آمده توسط پوشش‌های شناور با چگالی کم تحت هر دو شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: نتایج به‌دست آمده از آزمایش تبخیر سطحی در حالت استفاده از پوشش‌های شناور با چگالی کم برای مقادیر مختلف جریان سطحی. (الف) میزان تبخیر سطحی برای دو ساعت آخر از مجموع شش ساعت آزمایش (ب) راندمان کاهش تبخیر.

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. هنگامی که ستون آب بدون حرکت باشد، به دلیل افزایش دما در سطح، لایه‌ای با ضخامت مشخص و با چگالی کم در سطح آب ایجاد می‌شود. این لایه فوقانی (اپیلیمنیون^۱) حائل برای لایه‌های زیرین که به دلیل داشتن دمای پایین‌تر، چگالی بیشتری نیز دارند (هایپولیمنیون^۲) شده و از نفوذ انرژی تابشی به لایه‌های زیرین ممانعت می‌کند. بدین ترتیب با ادامه تابش، دمای لایه فوقانی

¹ Epilimnion

² Hypolimnion

افزایش یافته و اختلاف آن با دمای لایه‌های زیرین بیشتر خواهد شد (لایه‌بندی حرارتی)^۱؛ بنابراین

تبخیر سطحی به واسطه دمای زیاد لایه فوقانی افزایش خواهد یافت [۳۸].

جدول ۴-۱: جزئیات مربوط به میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر در هنگام استفاده از توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم در شرایط مختلف برای روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی.

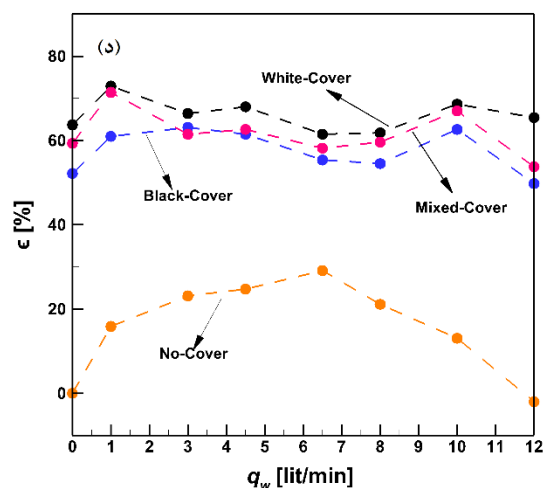
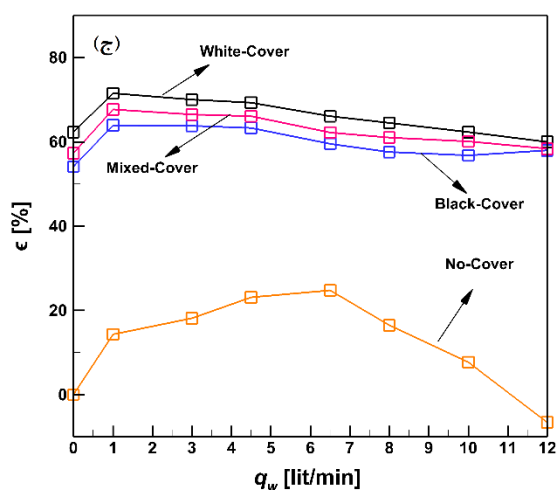
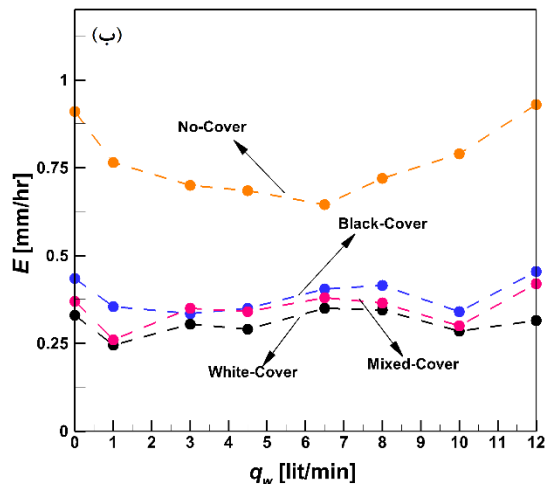
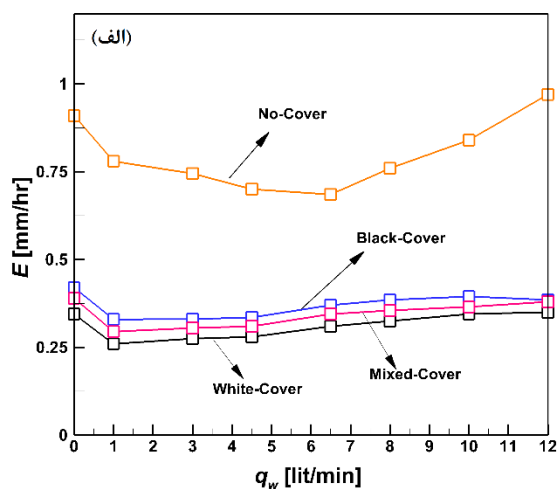
پوشش ترکیبی		پوشش سیاه		پوشش سفید		بدون پوشش		q_w [l/min]	نتایج آزمایشگاهی
E [mm/hr]	ϵ [%]	E [mm/hr]	ϵ [%]	E [mm/hr]	ϵ [%]	E [mm/hr]	ϵ [%]		
۰/۳۹	۵۷/۳	۰/۴۲	۵۴/۱	۰/۳۴۵	۶۲/۳	۰/۹۱۵	-	۰	
۰/۲۹۵	۶۷/۷	۰/۳۳	۶۳/۹	۰/۲۶	۷۱/۵	۰/۷۸	۱۴/۷	۱	
۰/۳۰۵	۶۶/۵	۰/۳۳۰۵	۶۳/۸	۰/۲۷۵	۰/۷۰	۰/۷۴۵	۱۸/۲	۳	
۰/۳۱	۶۶/۱	۰/۳۳۵	۶۳/۳	۰/۲۸	۶۹/۳	۰/۷	۲۰/۲	۴/۵	
۰/۳۴۵	۶۲/۲	۰/۳۷	۵۹/۵	۰/۳۱	۶۶/۱	۰/۶۸۵	۲۵/۱	۶/۵	
۰/۳۵۵	۶۱	۰/۳۸۵	۵۷/۶	۰/۳۲۵	۶۴/۵	۰/۷۶	۱۶/۵	۸	
۰/۳۶۵	۶۰/۱	۰/۳۹۵	۵۶/۸	۰/۳۴۵	۶۲/۳	۰/۸۴	۸/۲	۱۰	
۰/۳۸	۵۸/۴	۰/۳۸۵	۵۸	۰/۳۵	۶۰	۰/۹۷	-۶/۱	۱۲	
۰/۳۷	۵۹/۳	۰/۴۳۵	۵۲/۲	۰/۳۳	۶۳/۷	۰/۹۱	-	۰	نتایج مدل‌سازی
۰/۲۶	۷۱/۴	۰/۳۵۵	۶۱	۰/۲۴۵	۷۲/۹	۰/۷۶۵	۱۵/۹	۱	
۰/۳۵	۶۱/۵	۰/۳۳۵	۶۳/۱	۰/۳۰۵	۶۶/۴	۰/۷	۲۳/۱	۳	
۰/۳۴	۶۲/۶	۰/۳۵	۶۱/۵	۰/۲۹	۶۸	۰/۶۸۵	۲۴/۷	۴/۵	
۰/۳۸	۵۸/۲	۰/۴۰۵	۵۵/۴	۰/۳۵	۶۱/۵	۰/۶۴۵	۲۹/۱	۶/۵	
۰/۳۶۵	۵۹/۶	۰/۴۱۵	۵۴/۵	۰/۳۴۵	۶۱/۸	۰/۷۲	۲۱/۱	۸	
۰/۳	۶۷	۰/۳۴	۶۲/۶	۰/۲۸۵	۶۸/۶	۰/۷۹	۱۳/۱	۱۰	
۰/۴۲	۵۳/۸	۰/۴۵۵	۴۹/۸	۰/۳۱۵	۶۵/۴	۰/۹۳	-۲	۱۲	

با توجه به شکل ۴-۵، می‌توان مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی بالانس انرژی میزان تبخیر

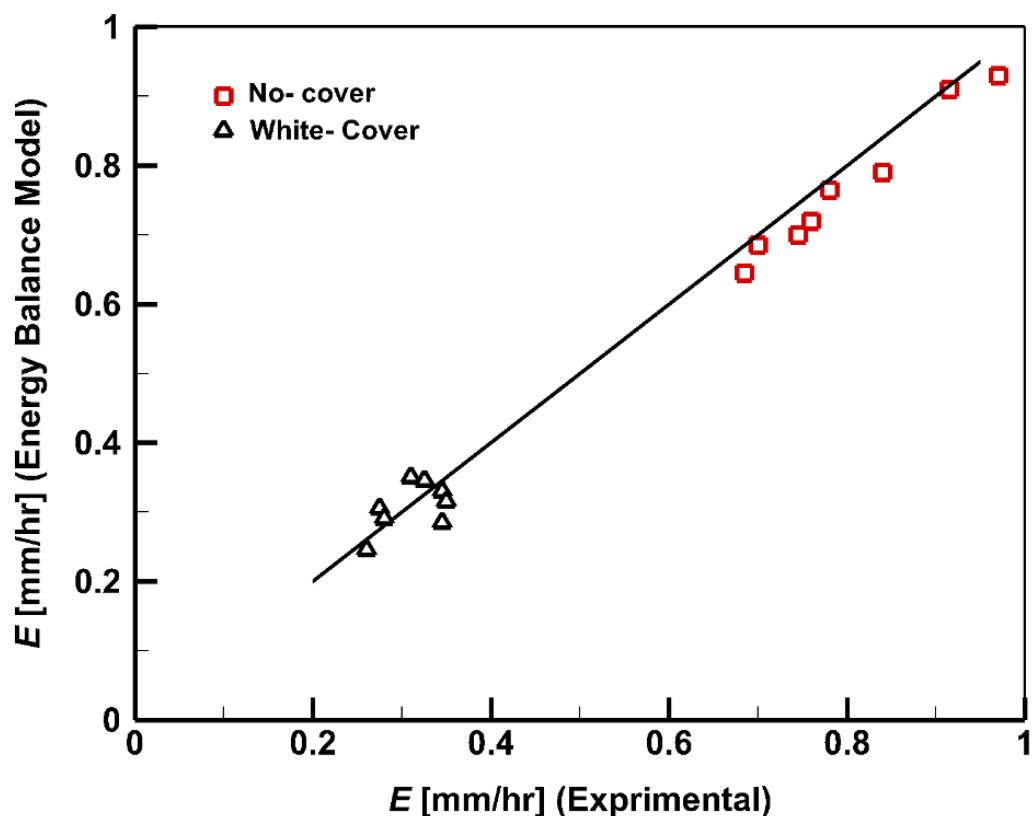
(میلی‌متر بر ساعت) برای شرایط بدون پوشش و پوشش‌دهی با توپ‌های سفید با چگالی کم در تمامی

هفت دبی جریان سطحی را به صورت شکل ۴-۶ نشان داد.

¹ Thermal Stratification

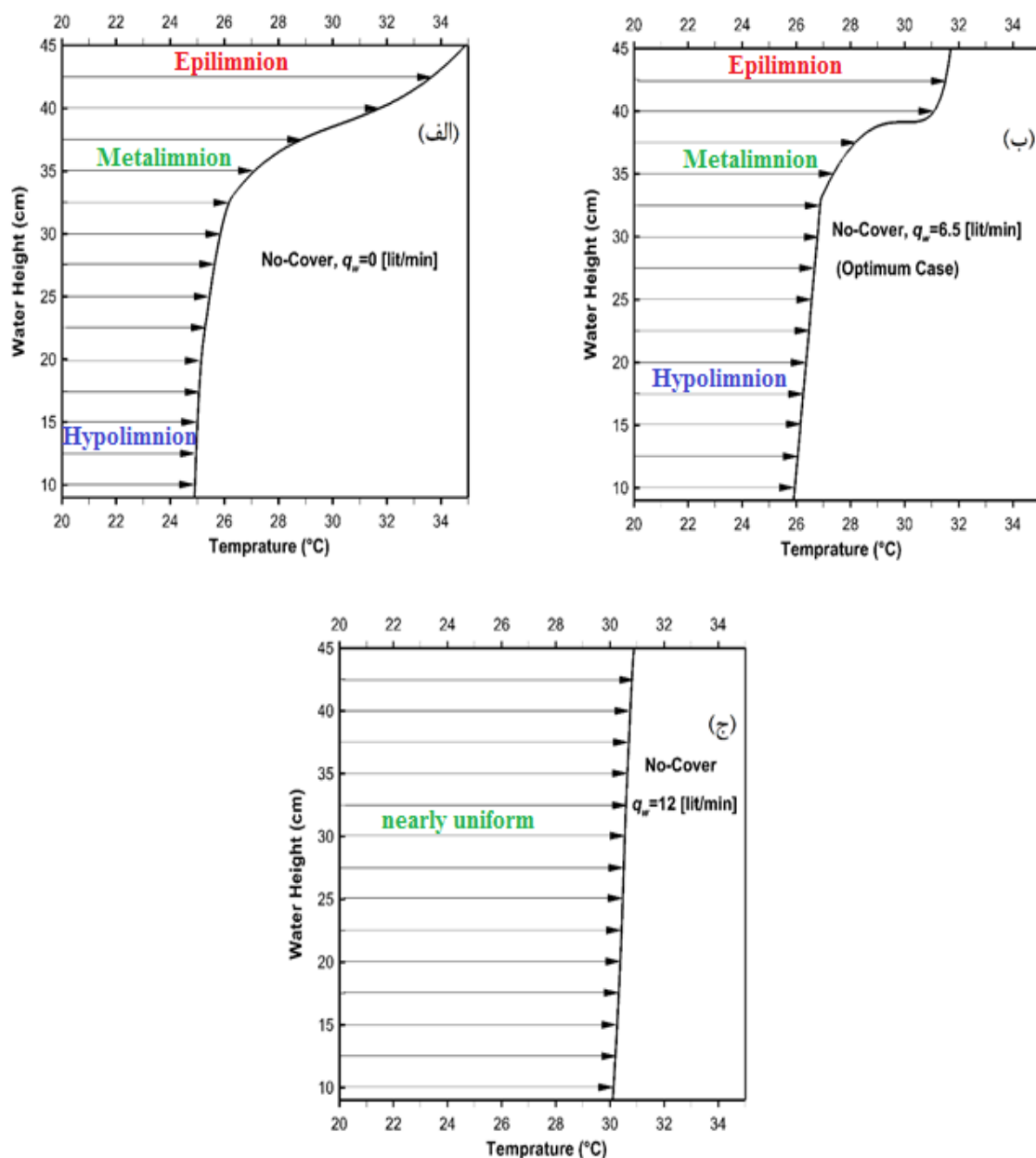


شکل ۴-۵: تصویر نشان‌دهنده میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر به‌دست آمده توسط پوشش‌های با چگالی کم تحت هر دو شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی. (الف) میزان تبخیر سطحی در حالت آزمایشگاهی (ب) میزان تبخیر سطحی در حالت مدل‌سازی (ج) راندمان کاهش تبخیر سطحی در حالت آزمایشگاهی (د) راندمان کاهش تبخیر سطحی در حالت مدل‌سازی.



شکل ۴-۶: 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 با چگالی کم در تمامی هفت دبی جریان سطحی.

حال اگر بتوان این لایه ها را به نحوی مخلوط کرد که لایه ی اپیلیم نیون گرم و لایه های هایپولیم نیون خنک با هم ترکیب شده و این اختلاف دما را کاهش داد (به عبارتی لایه فوقانی را خنک کرد)، می توان میزان تبخیر سطحی را بهبود بخشید. در توافق با نتایج دیک و همکاران [۴۶] پروفیل دمایی شکل گرفته درون ستون آب در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) در شرایط بدون پوشش را می توان به صورت شکل ۴-۷ نشان داد. همانطور که از شکل ۴-۷ مشاهده می شود، در حالت بدون جریان لایه بندی حرارتی درون آب شکل گرفته است بطوری که دمای سطح آب حدوداً به $34/8$ درجه سانتی رسیده است در حالی که هرچه از سطح به سمت لایه های زیرین پیش می رویم دمای لایه ها کمتر شده تا اینکه دمای لایه ی زیرین به حدود 25 درجه سانتی گراد رسیده است.



شکل ۴-۷: پروفیل دمایی شکل گرفته درون ستون آب در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) در شرایط بدون پوشش: (الف) بدون جریان سطحی (ب) دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.

شکل ۴-۸ تغییرات دمای سه لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت بدون پوشش در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) و شکل ۴-۹ تغییرات دمای سه لایه مذکور را برای حالت پوشش‌دهی با توپ سفید با چگالی کم در سه دبی نامبرده شده نمایش می‌دهد.

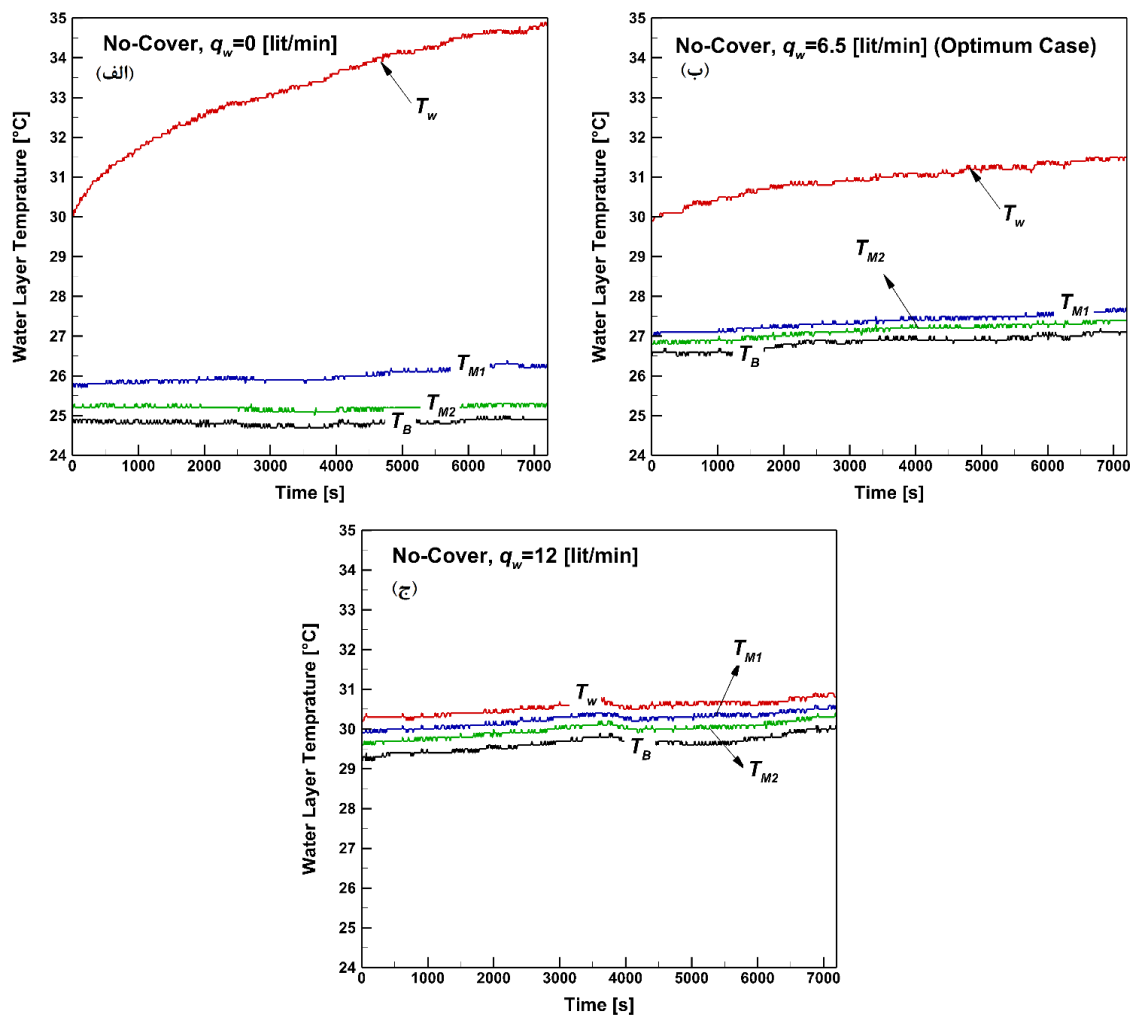
در شکل ۴-۸ و ۴-۹، T_w دمای سطح آب و T_{M1} ، T_{M2} و T_B به ترتیب دمای آب در فاصله ۱۲ سانتی متری، ۲۴ سانتی متری و ۳۶ سانتی متری از سطح می باشد. همانطور که در این دو شکل و همچنین شکل ۴-۷ ملاحظه می گردد، با افزایش دبی جریان سطحی اختلاط لایه های اپیلیمنیون و هایپولیمنیون برای هر دو حالت بدون پوشش و با پوشش دهی بیشتر شده و در نتیجه دمای لایه فوقانی کاهش و دمای لایه های زیرین افزایش یافته اند (به عبارتی دیگر اختلاف دمای لایه های مختلف نسبت به یکدیگر کاهش می یابد). این شرایط (کاهش دمای لایه فوقانی) تا رسیدن به دبی بهینه (که در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است) به دلیل توضیحات فوق باعث کاهش تبخیر سطحی می گردد. نکته قابل توجه این است که با افزایش دبی جریان و عبور از دبی بهینه با وجود بروز اختلاط بیشتر در لایه های آب و کاهش دمای لایه فوقانی مشاهده می گردد که میزان تبخیر روند افزایشی پیدا خواهد کرد. برای تحلیل این پدیده لازم است در خصوص لایه مرزی هوا ایجاد شده روی سطح مخزن توضیحات بیشتری به 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 می گردد. از آنجا که ضخامت این لایه مرزی متناسب است با عکس سرعت هوا در نزدیکی سطح [۴۹]، با افزایش دبی جریان سطحی ضخامت δ_v کاهش می یابد. باتوجه به اینکه ضخامت لایه مرزی انتقال جرم عبارت است از [۵۰]:

$$\delta_m = Sc^{(-\frac{1}{3})} \delta_v \quad (۱-۴)$$

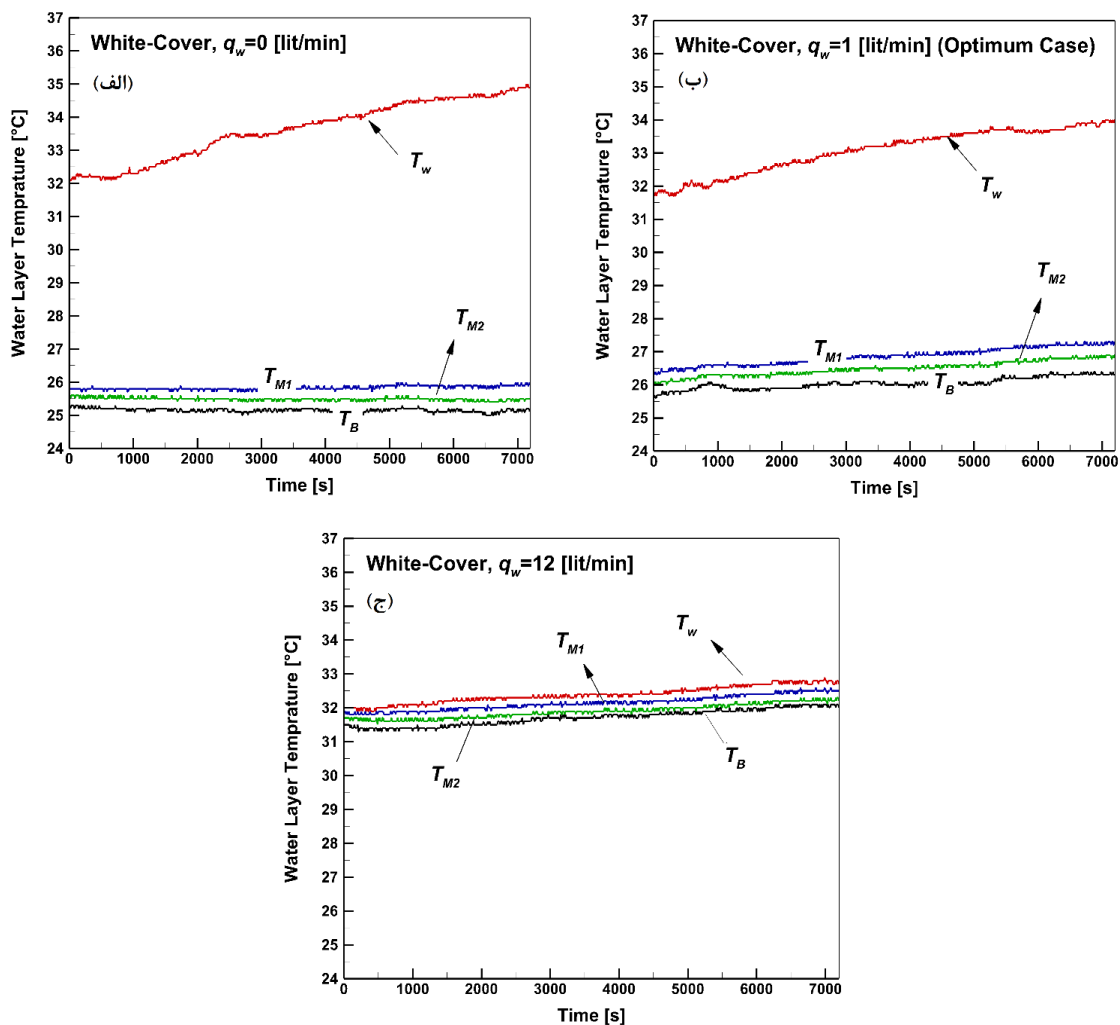
(که در آن Sc عدد بدون بعد اشمیت است)، کاهش δ_v موجب کاهش δ_m و در نتیجه افزایش گرادیان غلظت بخار بین سطح و جریان هوا و در نهایت افزایش نرخ تبخیر می گردد. از طرفی مطابق با نتایج امین زاده و اور [۵۱] و حقیقی و اور [۵۲] ضریب انتقال حرارت محسوس بین سطح آب و هوا با عکس ضخامت لایه مرزی متناسب می باشد. بنابراین 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)

¹ No Slip

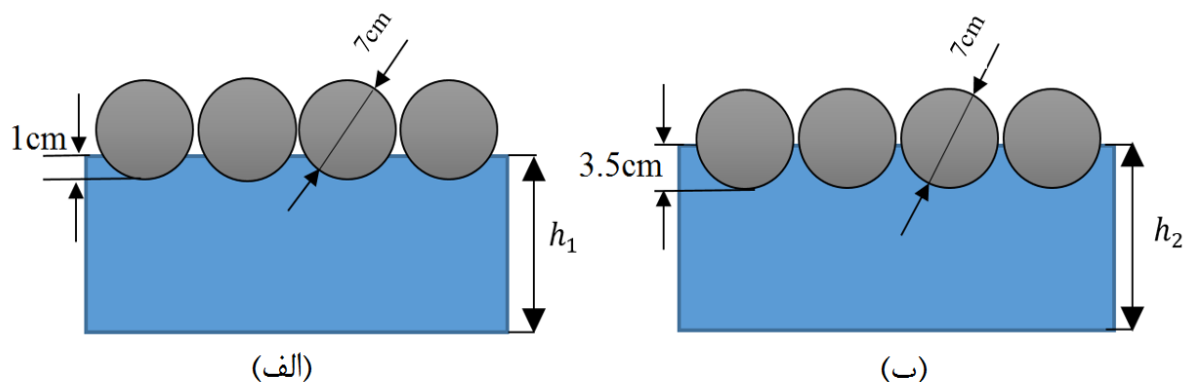
افزایش یافته و بدین ترتیب انرژی موردنیاز برای افزایش نرخ تبخیر فراهم می شود. بنابراین با فاصله گرفتن از دبی بهینه نقش افزایش میزان تبخیر در اثر کاهش ضخامت لایه مرزی از نقش اختلاط لایه‌های آب در کاهش میزان تبخیر سبقت گرفته و در نهایت راندمان تبخیر را کاهش می‌دهد. هنگامی که پوشش‌ها در اثر افزایش چگالی تا نیمه در آب فرو می‌روند، ارتفاع زبری سطح پوشش داده شده کاهش پیدا می‌کند. با کم شدن مقدار ارتفاع زبری سطح، ضریب انتقال حرارت محسوس بین آب و هوا افزایش پیدا می‌کند. بنابراین میزان تبخیر افزایش یافته و راندمان کاهش تبخیر کاهش پیدا می‌کند. شکل ۴-۱۰ (الف) تصویر قرارگیری توپ‌های شناور با چگالی کم روی سطح آب نشان می‌دهد که حدود ۱ سانتی‌متر از پوشش درون آب فرو می‌رود و شکل ۴-۱۰ (ب) تصویر قرارگیری توپ‌های شناور با چگالی زیاد را روی سطح آب نشان می‌دهد که این پوشش در هنگام قرارگیری روی سطح آب، حدود ۳/۵ سانتی‌متر درون آب فرو می‌رود. نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی در حالتی که پوشش‌ها تا نیمه در آب فرو می‌روند در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. شکل ۴-۱۱ (الف) میزان تبخیر سطحی برای دو ساعت آخر از مجموع شش ساعت زمان آزمایش بر حسب میلی‌متر بر ساعت و شکل ۴-۱۱ (ب) راندمان کاهش تبخیر را برای هر چهار حالت پوشش‌دهی را نشان می‌دهد.



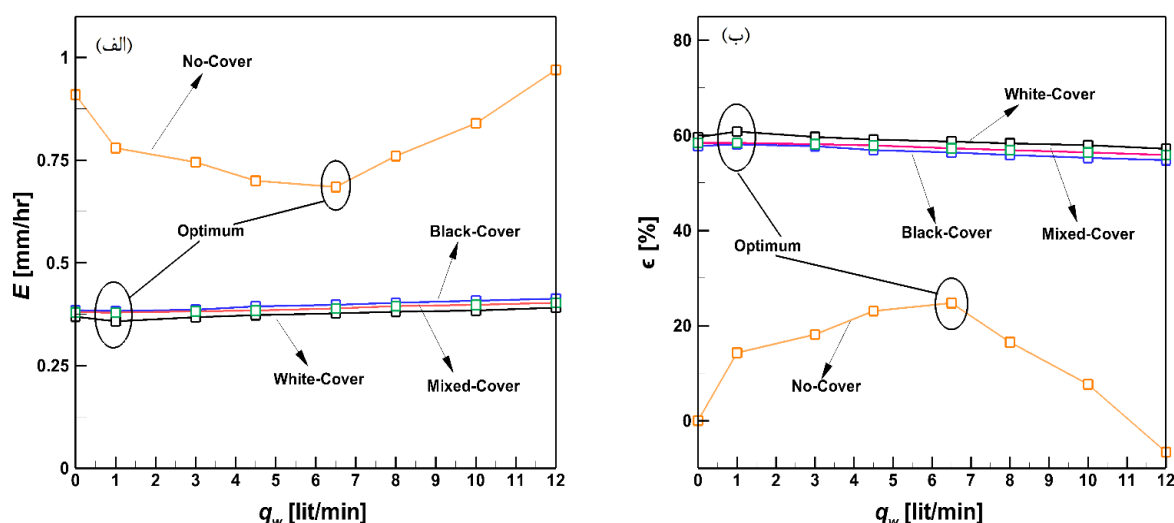
شکل ۴-۸: تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت بدون پوشش در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه): (الف) بدون جریان (ب) دبی ۶/۵ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه. T_w دمای سطح آب و T_{M1} , T_{M2} و T_B به ترتیب دمای آب در فاصله ۱۲ سانتی‌متری، ۲۴ سانتی‌متری و ۳۶ سانتی‌متری از سطح می‌باشد.



شکل ۴-۹: تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت پوشش‌دهی با توپ سفید با چگالی کم در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه): (الف) بدون جریان (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه 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.



شکل ۴-۱۰: تصویر قرارگیری پوشش‌های شناور با چگالی کم و چگالی زیاد روی سطح آب. (الف) پوشش‌دهی با توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم (ب) پوشش‌دهی با توپ‌های پلاستیکی با چگالی زیاد



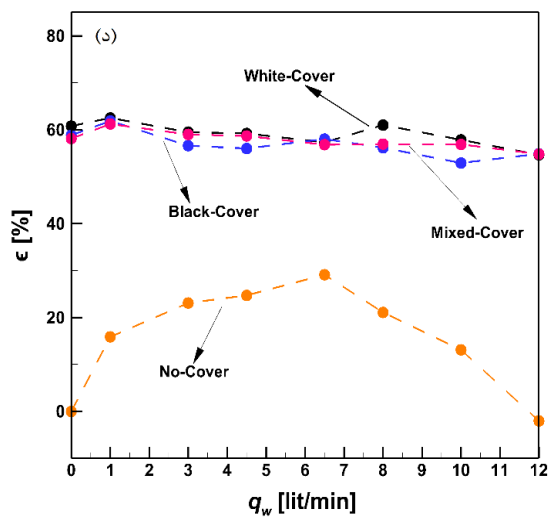
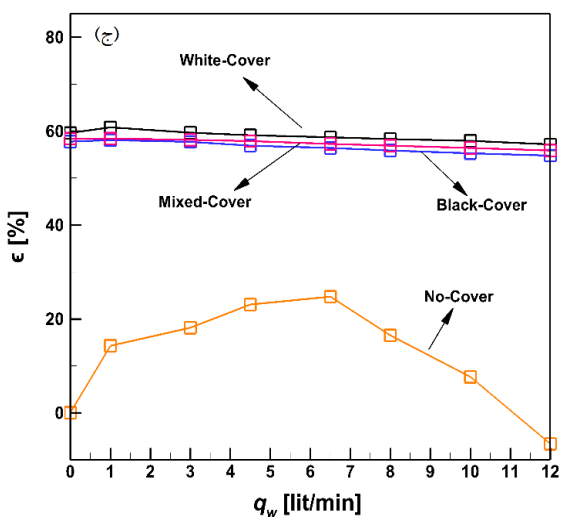
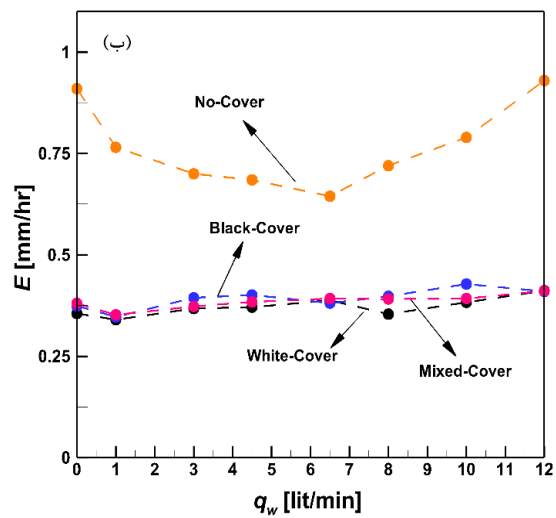
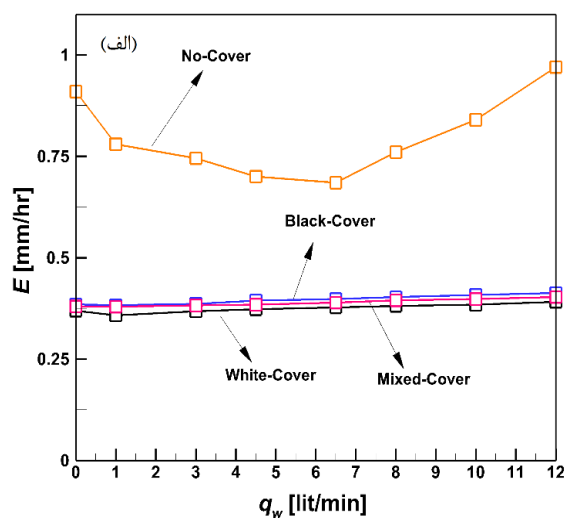
شکل ۴-۱۱: نتایج بدست آمده از آزمایش تبخیر سطحی برای مقادیر مختلف جریان سطحی در حالت فرو رفتن پوشش‌ها تا نیمه در آب. (الف) میزان تبخیر سطحی برای دو ساعت آخر از مجموع شش ساعت آزمایش (ب) راندمان کاهش تبخیر.

همانطور که در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود، هنگامی که توپ‌های شناور روی سطح آب، در اثر افزایش چگالی تا نیمه در آب فرو می‌روند میزان تبخیر افزایش یافته است. جزئیات دقیق مربوط به میزان تبخیر و راندمان کاهش در حالتی که پوشش‌ها تا نیمه در آب فرو می‌روند به تفکیک حالت‌های آزمایش شده در جدول ۴-۲ به همراه نتایج حاصل شده از مدل‌سازی ریاضی نیز ارائه شده است. همانطور

که در این جدول ملاحظه می‌گردد استفاده از روش مدل‌سازی بالانس انرژی برای پوشش‌های با چگالی بیشتر نیز مانند حالت استفاده از پوشش‌های با چگالی کم میزان تبخیر را با تقریب بسیار خوبی با داشتن پارامترهای موردنیاز برای تمامی حالت‌های با پوشش‌دهی، بدون پوشش‌دهی، با حضور جریان سطحی و بدون جریان سطحی قادر است پیش‌بینی نماید. شکل ۴-۱۲ میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر به‌دست آمده تحت هر دو شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

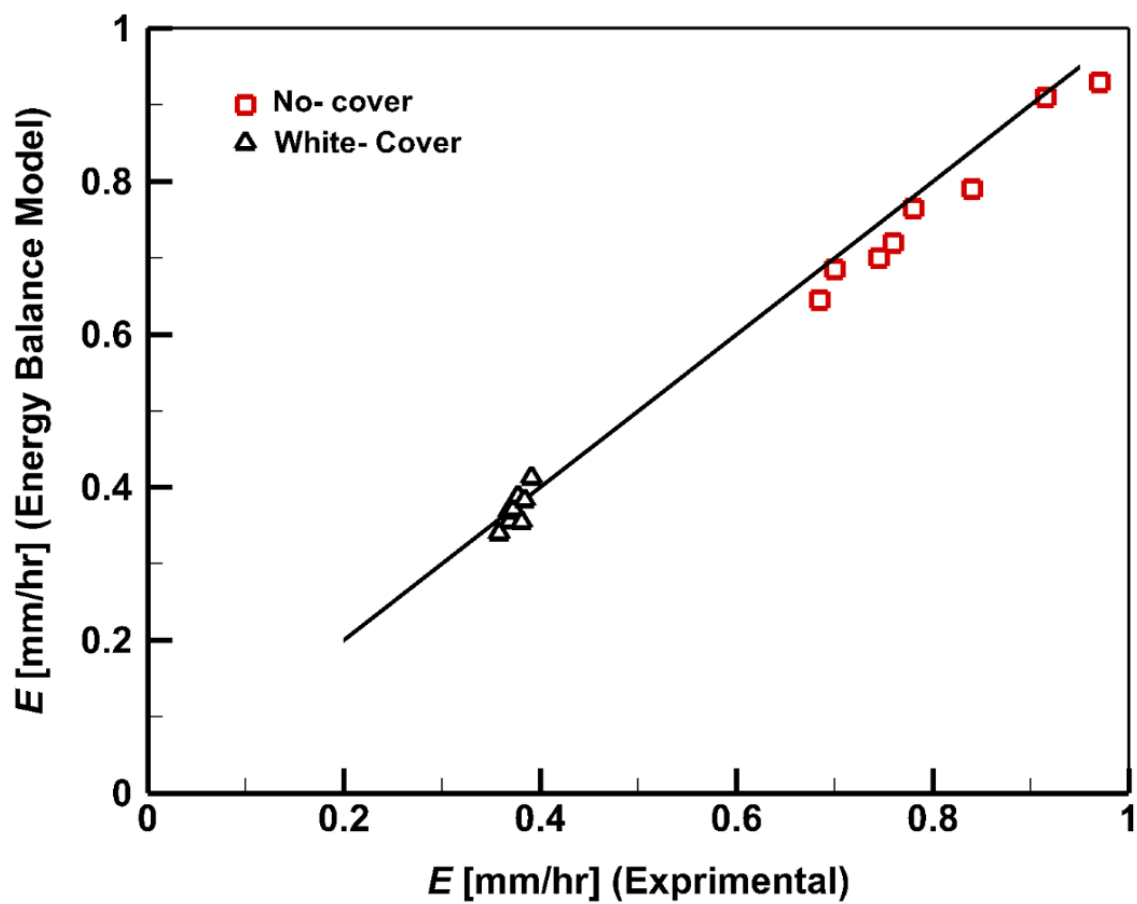
جدول ۴-۲: جزئیات مربوط به میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر در حالت فرو رفتن پوشش‌ها تا نیمه در آب در شرایط مختلف برای روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی.

پوشش ترکیبی		پوشش سیاه		پوشش سفید		q_w [l/min]	نتایج آزمایشگاهی
E [mm/hr]	ϵ [%]	E [mm/hr]	ϵ [%]	E [mm/hr]	ϵ [%]		
۰/۳۸	۵۸/۴۵	۰/۳۸۵	۵۷/۸	۰/۳۶۹	۵۹/۶	۰	
۰/۳۷۹	۵۸/۴	۰/۳۸۳	۵۸/۰۸	۰/۳۵۸	۶۰/۸	۱	
۰/۳۸۲	۵۸/۱۵	۰/۳۸۶	۵۷/۷	۰/۳۶۸	۵۹/۷	۳	
۰/۳۸۴	۵۷/۹	۰/۳۹۴	۵۶/۹	۰/۳۷۳	۵۹/۱۳	۴/۵	
۰/۳۸۹	۵۷/۳	۰/۳۹۸	۵۶/۴	۰/۳۷۷	۵۸/۷	۶/۵	
۰/۳۹۵	۵۶/۹	۰/۴۰۳	۵۵/۹	۰/۳۸۱	۵۸/۳	۸	
۰/۳۹۸	۵۶/۴	۰/۴۰۸	۵۵/۳	۰/۳۸۴	۵۷/۹۳	۱۰	
۰/۴۰۳	۵۵/۹	۰/۴۱۳	۵۴/۸	۰/۳۹۱	۵۷/۲	۱۲	
۰/۳۸۰۵	۵۸/۱۴	۰/۳۷۴	۵۸/۸۶	۰/۳۵۵	۶۰/۸	۰	نتایج مدل‌سازی
۰/۳۵۲	۶۱/۲۴	۰/۳۴۷	۶۱/۸۶	۰/۳۴	۶۲/۵	۱	
۰/۳۷۳	۵۸/۹۸	۰/۳۹۴	۵۶/۶۲	۰/۳۶۸	۵۹/۴۶	۳	
۰/۳۸۴	۵۸/۶۹	۰/۴۰۱	۵۶	۰/۳۷۱	۵۹/۲	۴/۵	
۰/۳۹۲	۵۶/۸	۰/۳۸۱	۵۸	۰/۳۸۸	۵۷/۳	۶/۵	
۰/۳۹۱	۵۶/۹۵	۰/۳۹۸	۵۶/۲	۰/۳۵۴	۶۱	۸	
۰/۳۹۲	۵۶/۹	۰/۴۲۸	۵۲/۹	۰/۳۸۳	۵۷/۸۶	۱۰	
۰/۴۱۱	۵۴/۸	۰/۴۱	۵۴/۹	۰/۴۱۲	۵۴/۶۶	۱۲	

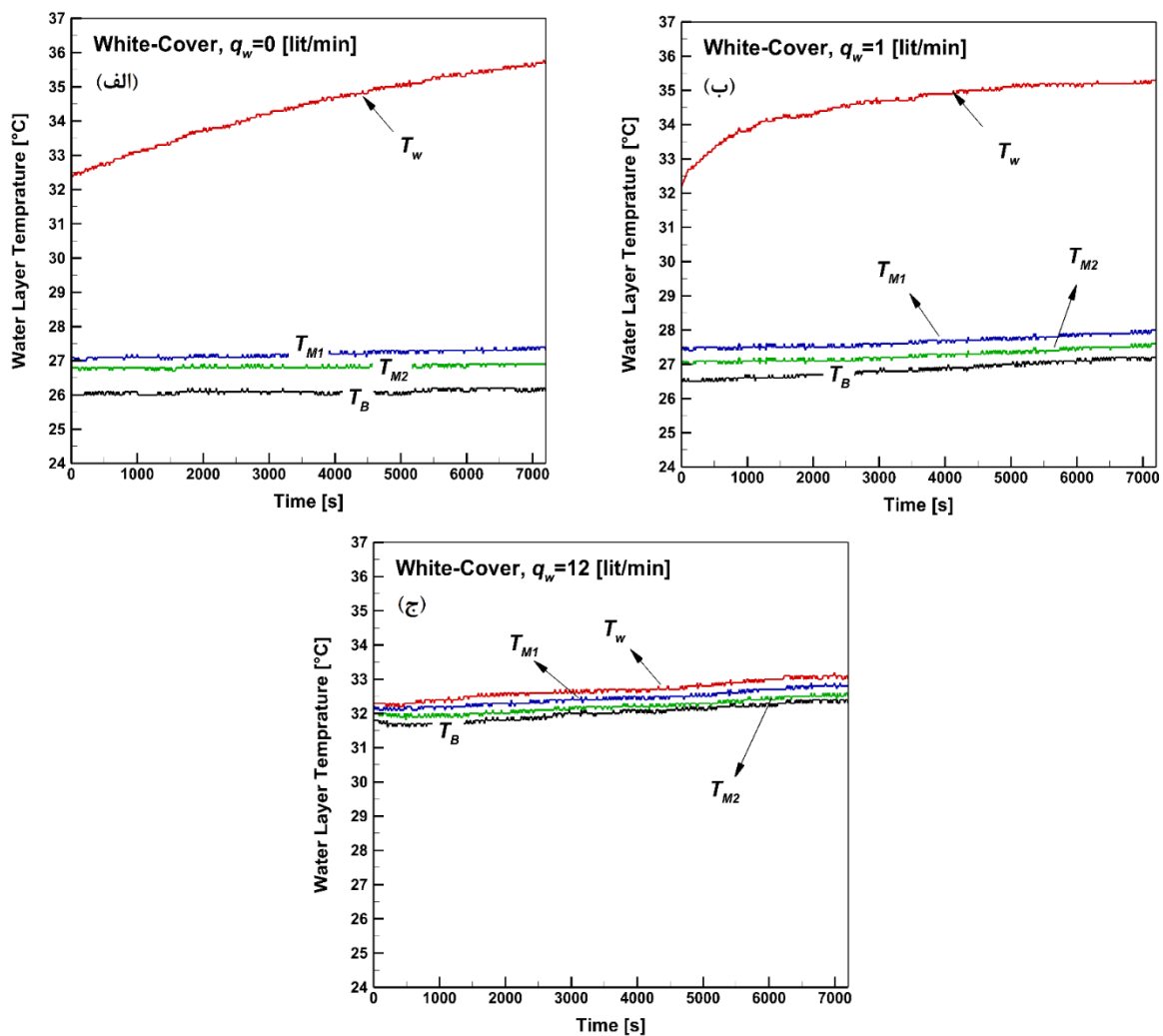


شکل ۴-۱۲: تصویر نشان‌دهنده میزان تبخیر سطحی و راندمان کاهش تبخیر به‌دست آمده تحت هر دو شرایط آزمایشگاهی و مدل‌سازی در حالت پوشش‌دهی با توپ‌های شناور با چگالی زیاد. (الف) میزان تبخیر سطحی در حالت آزمایشگاهی (ب) میزان تبخیر سطحی در حالت مدل‌سازی (ج) راندمان کاهش تبخیر سطحی در حالت آزمایشگاهی (د) راندمان کاهش تبخیر سطحی در حالت مدل‌سازی.

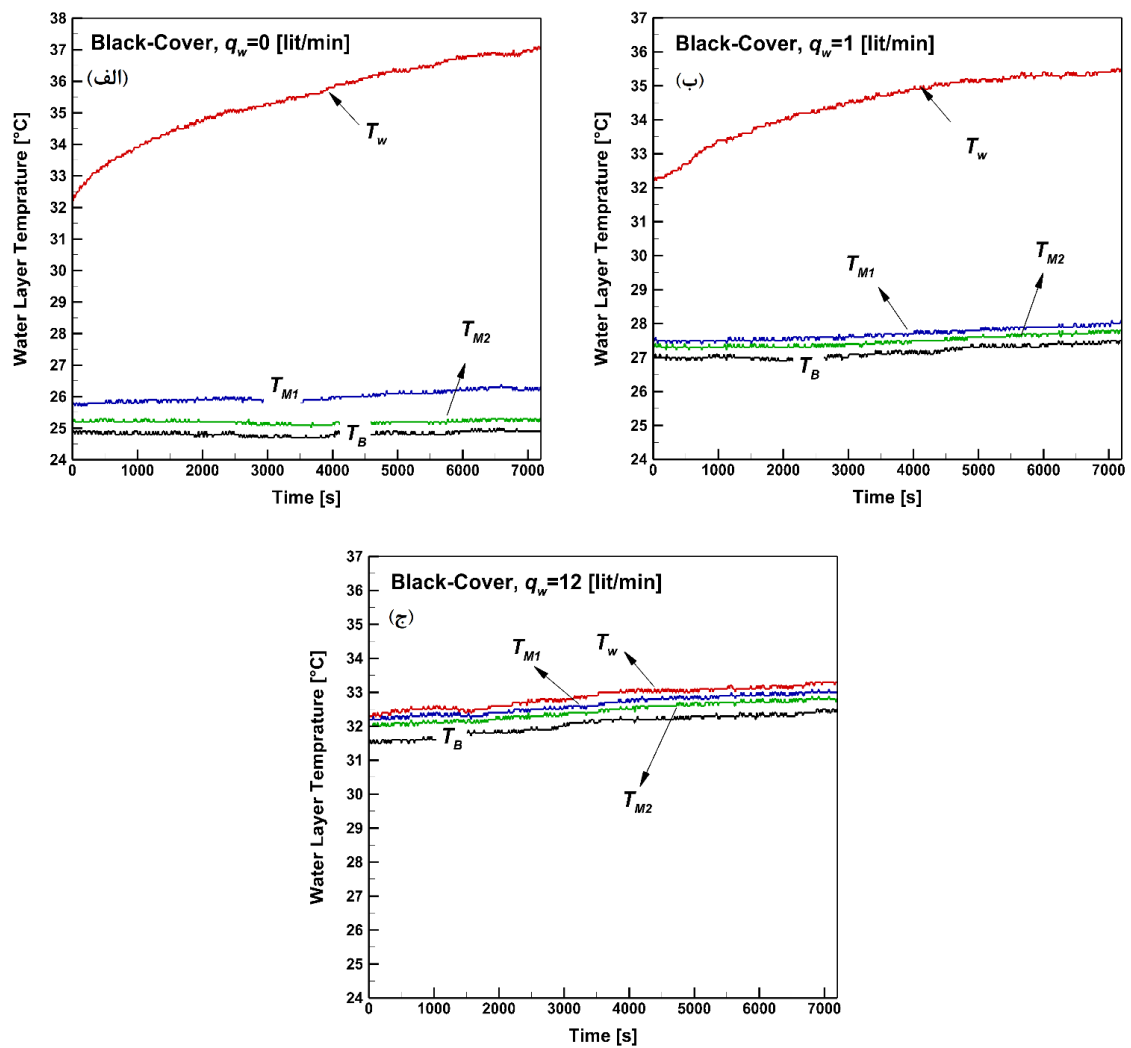
با توجه به شکل ۴-۱۲، مقایسه بین مقادیر تبخیر سطحی حاصل شده در حالت آزمایشگاهی و مدل سازی در حالت استفاده از توپ های شناور با چگالی زیاد را می توان به صورت شکل ۴-۱۳ نمایش داد. شکل ۴-۱۴ تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت پوشش دهی با توپ های سفید با چگالی زیاد در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) نمایش می دهد. در این شکل نیز، T_w دمای سطح آب و T_{M1} ، T_{M2} و T_B به ترتیب دمای آب در فاصله ۱۲ سانتی متری، ۲۴ سانتی متری و ۳۶ سانتی متری از سطح می باشد. شکل ۴-۱۵ و ۴-۱۶ به ترتیب تغییرات دمایی لایه ها را برای حالت پوشش دهی با توپ های سیاه رنگ با چگالی کم و چگالی زیاد و شکل ۴-۱۷ و ۴-۱۸ به ترتیب تغییرات دمایی لایه ها را در حالت پوشش دهی ترکیبی در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه) نمایش می دهد. با مقایسه ی رفتار دمای لایه های آب بین حالت های مختلف آزمایش شده می توان به دلیل افزایش تبخیر در شرایط استفاده از توپ های شناور با چگالی زیاد را پی برد. به عنوان مثال در شکل ۴-۹ که تغییرات دما لایه های آب را در شرایط پوشش دهی با توپ های شناور با چگالی کم را نشان می دهد تغییرات دمای سطح آب در مقایسه با شکل ۴-۱۴ که تغییرات دمای لایه های آب در شرایط پوشش دهی با توپ های شناور با چگالی زیاد را نشان می دهد، به دلیل کمتر شدن حرارت وارد شده به سطح آب، سرعت رشد کمتری دارد. پوشش های سیاه رنگ در مقایسه با پوشش های سفید رنگ به دلیل داشتن ضریب انعکاس پایین تر، حرارت بیشتری جذب می کند و سبب افزایش دمای سطح آب می شود. همانطور که مشاهده می شود، دمای سطح آب در شکل ۴-۱۵ نسبت به شکل ۴-۹ افزایش پیدا کرده است که این قضیه برای شرایط پوشش دهی با پوشش های شنلور با چگالی زیاد نیز مشهود است. در حالت پوشش دهی ترکیبی به صورت مخلوطی مساوی از توپ های سیاه و سفید به دلیل انعکاس یافتن بخشی از تابش ورودی به سطح آب، دمای سطح آب کمتر از حالت پوشش دهی با توپ های سیاه رنگ است. به عنوان مثال دمای سطح آب در شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸ که دمای لایه های آب در شرایط پوشش دهی ترکیبی را نشان می دهد کمتر از حالت پوشش دهی با توپ های شناور سیاه رنگ با چگالی کم و زیاد (شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶) به دست آمده است.



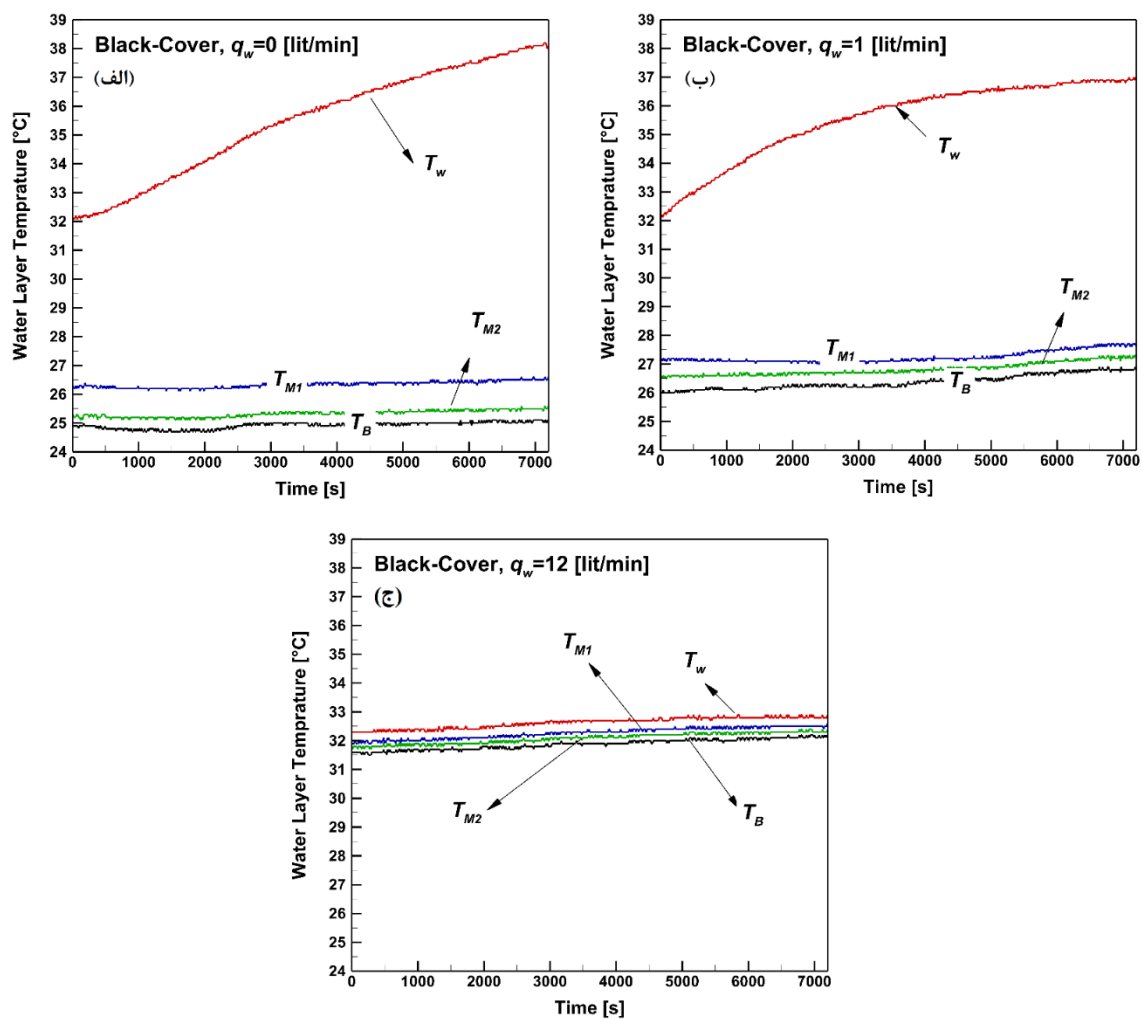
شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی بالانس انرژی میزان تبخیر (میلی متر بر ساعت) برای شرایط بدون پوشش و پوشش دهی با توپ های سفید با چگالی زیاد در تمامی هفت دبی جریان سطحی.



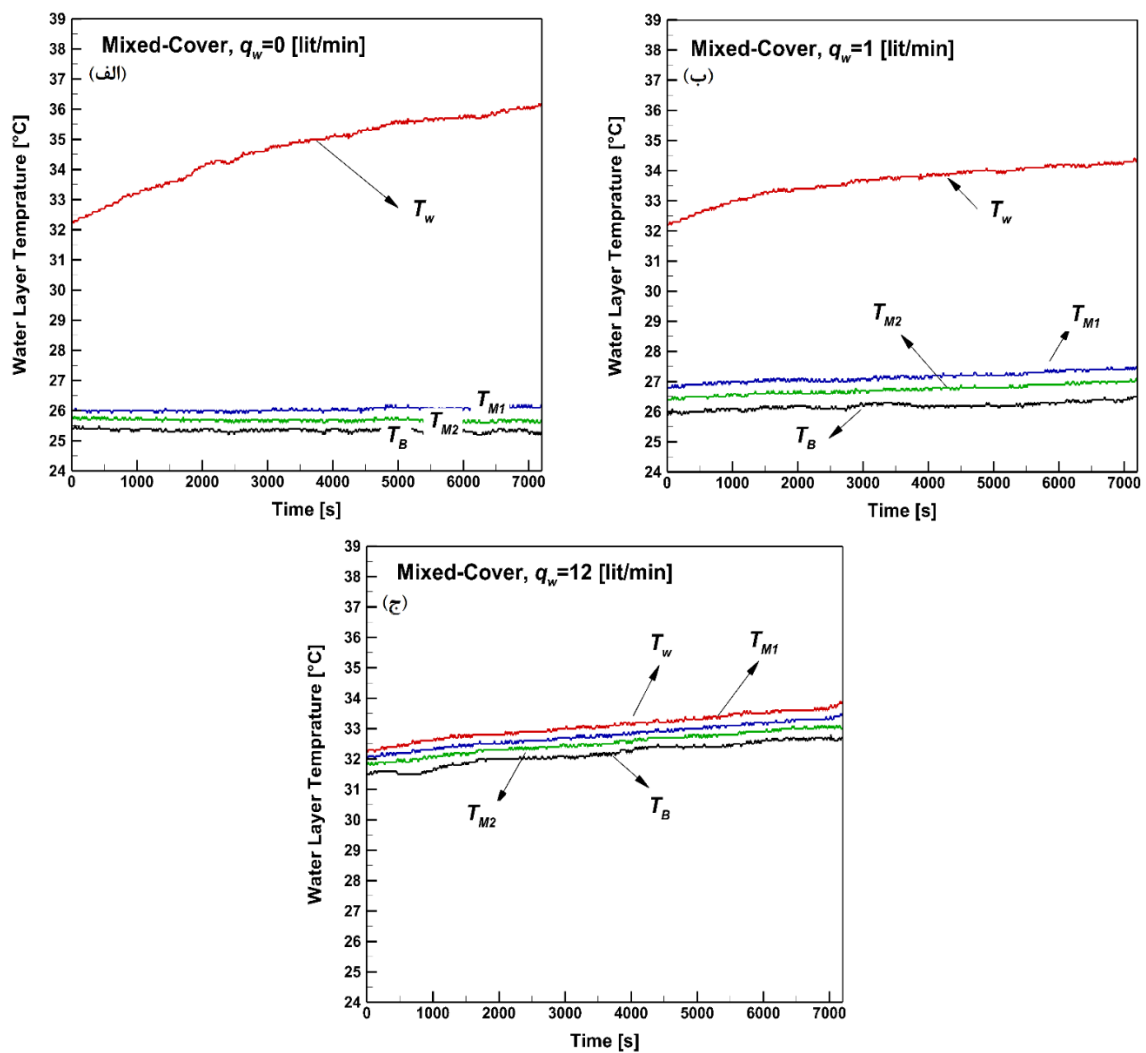
شکل ۴-۱۴: تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش برای حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سفید با چگالی زیاد در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه): (الف) بدون جریان (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه. T_w دمای سطح آب و T_{M1} ، T_{M2} و T_B به ترتیب دمای آب در فاصله ۱۲ سانتی‌متری، ۲۴ سانتی‌متری و ۳۶ سانتی‌متری از سطح می‌باشد



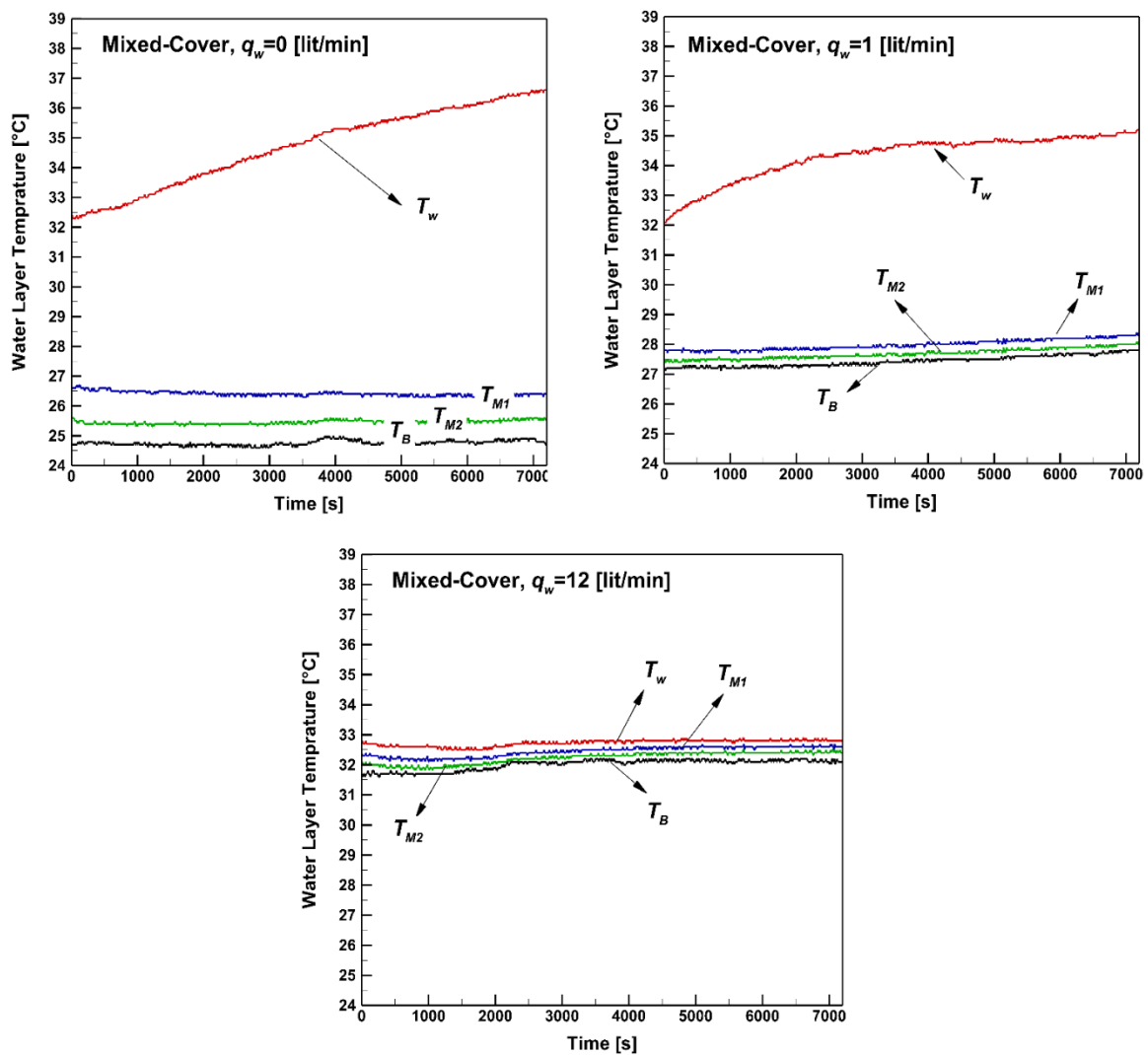
شکل ۴-۱۵: تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه‌رنگ با چگالی کم در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه): (الف) بدون جریان (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.



شکل ۴-۱۶: تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه‌رنگ با چگالی زیاد در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه): (الف) بدون جریان (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.



شکل ۴-۱۷: تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت پوشش‌دهی ترکیبی با توپ‌های شناور با چگالی کم در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه): (الف) بدون جریان (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.



شکل ۴-۱۸: تغییرات دمای چهار لایه مختلف اندازه‌گیری شده در طول زمان آزمایش را برای حالت پوشش‌دهی ترکیبی با توپ‌های شناور با چگالی زیاد در سه دبی مختلف (صفر، بهینه و بیشینه): (الف) بدون جریان (ب) دبی ۱ لیتر بر دقیقه (ج) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی میزان تبخیر سطحی از مخازن روباز تحت شرایط جریان سطحی و عدم جریان سطحی و تأثیر توپ‌های محافظ با دو چگالی مختلف (مورد اول دارای جرم ۱۴ گرم و مورد دوم جرمی معادل ۵۰ گرم) به عنوان 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 پمپ آب ایجاد می‌شود که در هر کدام از دبی‌های مذکور، وضعیت نرخ تبخیر سطحی در حالت‌های بدون پوشش، پوشش‌دهی با توپ‌های سفید، پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه و پوشش‌دهی ترکیبی (به صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید) در مدت زمان شش ساعت مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج بدست 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 در هر دو پوشش با چگالی مختلف، دارند. بطوریکه پوشش‌های سفیدرنگ با چگالی کم در دبی ۱ لیتر بر دقیقه (به عنوان مثال)، در حدود ۷۱/۵ درصد و در حالتی که در اثر افزایش چگالی تا نیمه در آب فرو می‌روند حدود ۶۰/۸ درصد در بهبود راندمان کاهش تبخیر نقش ایفا می‌کنند. لازم به ذکر است که استفاده از چیدمان ترکیبی به صورت مخلوطی مساوی از توپ‌های سیاه و سفید راندمان کاهش تبخیر بیشتری نسبت به پوشش‌دهی با توپ‌های سیاه در هر دو نوع پوشش حاصل خواهد کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تبخیر سطحی 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. این موضوع در شرایط بدون پوشش کاملاً مشهود است. 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 انتقال حرارت محسوس 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 لازم به توضیح است، در حالتی که توپ‌های ۵۰ گرمی تا نیمه در آب فرو می‌روند، به دلیل کم شدن ارتفاع زبری سطح پوشش داده شده، نرخ انتقال حرارت محسوس بین آب و هوا بیشتر می‌شود. بنابراین نرخ تبخیر نسبت به حالت استفاده از توپ‌های پلاستیکی با چگالی کم، افزایش می‌یابد. همچنین در این پژوهش، به منظور برآورد تقریبی تبخیر از سطح مخازن تحت شرایط آزمایش شده، از مدل سازی بالانس انرژی در سطح آب و پوشش استفاده شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد استفاده از روش مدل سازی بالانس انرژی با تقریب بسیار خوبی قادر است میزان تبخیر را با داشتن دمای سطح و دمای متوسط لایه‌های آب برای تمامی حالت‌های با پوشش دهی، بدون پوشش دهی، با حضور جریان سطحی و بدون جریان سطحی پیش‌بینی نماید.

۵-۲- پیشنهادات

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 شرایط جریان (عمق نفوذ و سطح اثر) و ابعاد مخزن (به ویژه عمق) بر راندمان کاهش تبخیر گردید. از این رو اندازه‌گیری در شرایط طبیعی و مدل سازی‌های هیدرودینامیکی برای تأیید نتایج و ارائه چهارچوب‌های طراحی برای استفاده از این روش به منظور کاهش تبخیر ضروری می‌باشد.

مراجع

- [۱] صادقی س. (۱۳۸۵). "هیدرولیک و بحران آب"، اطلاعات سیاسی و اقتصادی، شماره ۱۱۵-۱۱۶، ص ۴۵.
- [۲] سپاس خواه ع. (۱۳۹۷). "کاهش تبخیر از مخزن آب سدها"، مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۳ شماره ۱، ص ۱۳ تا ۲۶.
- [۳] باریده م. (۱۳۸۷). "برآورد میزان تبخیر از دریاچه سدهای کشور با استفاده از طشت تبخیر"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، صفحه ۱، تبریز.
- [۴] محسنی م. (۱۳۹۷). "تبخیر سطحی چیست؟"، برگرفته از لینک [www. mmscience.ir](http://www.mmscience.ir)
- [5] Gundalia, M.J. and Dholakia, M.B., 2013. "Estimation of pan evaporation using mean air temperature and radiation for monsoon season in Junagadh region". *Int. J Eng. Res. Appl*, 3(6), pp.64-70.
- [۶] وزیری ژ، سلامت ع، انتصاری م، مسچی م، حیدری ن، دهقانی ح. (۱۳۸۷). "تبخیر - تعرق گیاهان". جلد اول، چاپ اول، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران، ص ۱۰۹.
- [7] Vercauteren, N., Huwald, H., Bou-Zeid, E., Selker, J.S., Lemmin, U., Parlange, M.B. and Lunati, I., 2011." Evolution of superficial lake water temperature profile under diurnal radiative forcing". *Water resources research*, 47(9).
- [8] Mor, Z., Assouline, S., Tanny, J., Lensky, I.M. and Lensky, N.G., 2018." Effect of water surface salinity on evaporation: the case of a diluted buoyant plume over the dead sea". *Water Resources Research*, 54(3), pp.1460-1475.
- [۹] ایسنا، (۱۳۹۵). "به روزترین فناوری های دنیا در جلوگیری از تبخیر آب سدها". برگرفته از لینک www.isna.ir
- [10] Schouten, P., Putland, S., Lemckert, C.J., Parisi, A.V. and Downs, N., 2012. "Alternative methods for the reduction of evaporation: practical exercises for the science classroom". *Physics Education*, 47(2), p.202.
- [۱۱] شمسایی ا، حسنی ا، (۱۳۸۶)، "مروری بر روش های کاهش میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی در مناطق خشک و نیمه خشک"، اولین همایش سازگاری با کم آبی، ص ۶، تهران،
- [۱۲] هاشمی منفرد آ، رضاپور م، ژیان ت، (۱۳۹۶)، "کنترل سرعت باد جهت کاهش تبخیر از سطح دریاچه ها و مخازن به کمک بادشکن"، کنفرانس هیدرولیک ایران، ص ۱، اردبیل.

[۱۳] هجران‌فر، ا.، مطیعی، ه.، نادری، ش.، احمدی، م.، (۱۳۹۰)، " رویکردی دوباره به استفاده از مخازن سنتی ذخیره آب شرب (آب انبارها) در مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت شرایط اقلیم"، همایش بین‌المللی بتن‌های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، ص ۵، رشت.

[۱۴] مجدزاده، ب.، رهنما، م.، (۱۳۸۶)، " بررسی آبیاری کوزه‌ای درخت پسته به‌صورت خودکار با نیروی مکش خاک"، سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، ص ۱، کرمان.

[۱۵] اصلانی، ب.، مقیمان، م.، (۱۳۹۱)، " بررسی آزمایشگاهی اثر غلظت نمک بر روی نرخ تبخیر در سرعت‌های مختلف هوا"، کنفرانس دینامیک شاره‌ها، ص ۱، بیرجند.

[۱۶] نجفوند دریکوندی، م.، اسلامی، ج.، (۱۳۹۵)، "مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب"، فصلنامه علمی و تخصصی مهندسی آب، ص ۱، شوشتر.

[17] Aminzadeh, M., Lehmann, P. and Or, D., 2018. "Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements". *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7), pp.4015-4032.

[18] Elsebaie, I.H., Fouli, H. and Amin, M., 2017. "Evaporation reduction from open water tanks using palm-frond covers: Effects of tank shape and coverage pattern". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(7), pp.2977-2983.

[19] Álvarez, V.M., Baille, A., Martínez, J.M.M. and Real, M.M.G., 2006. "Effect of black polyethylene shade covers on the evaporation rate of agricultural reservoirs". *Spanish Journal of Agricultural Research*, (4), pp.280-288.

[20] Helfer, F., Zhang, H. and Lemckert, C., 2010. "Evaporation reduction by windbreaks: Overview, modelling and efficiency". *Urban Water Security Research Alliance*.

[21] Assouline, S., Narkis, K. and Or, D., 2011. "Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers". *Water Resources Research*, 47(7).

[22] Yao, X., Zhang, H., Lemckert, C., Brook, A. and Schouten, P., 2010. "Evaporation reduction by suspended and floating covers: overview, modelling and efficiency". *Urban water security research alliance technical report*, (28).

[23] Chaudhari, N. and Chaudhari, N.D., 2015. "Use of thermocol sheet as floating cover to reduce evaporation loss in farm pond". International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering, IIT Roorkee, India.

[24] Silva, C., González, D. and Suárez, F., 2017. "An experimental and numerical study of evaporation reduction in a salt-gradient solar pond using floating discs". *Solar Energy*, 142, pp.204-214.

[25] Alam, S. and AlShaikh, A.A., 2013. "Use of palm fronds as shaded cover for evaporation reduction to improve water storage efficiency". *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 25(1), pp.55-58.

[۲۶] مظاهری، ا.، عابدی کوهپایی ج.، (۱۳۹۷)، "کاهش تبخیر از مخازن آب با استفاده از پوشش‌های شناور"، تحقیقات آب و خاک ایران، ص ۱، تهران.

[27] Benzaghta, M.A., Mohammed, T.A., Ghazali, A.H. and Soom, M.A.M., 2013. "Testing of evaporation reduction methods in humid climates". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 166(4), p.207.

[28] Assouline, S., Narkis, K. and Or, D., 2010. "Evaporation from partially covered water surfaces". *Water resources research*, 46(10).

[29] Cooley, K.R., 1970. "Energy relationships in the design of floating covers for evaporation reduction". *Water resources research*, 6(3), pp.717-727.

[۳۰] حسینی، ا.، عابدی کوهپایی ج.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی روش‌های کاهش تبخیر در سد ساوه (الغدير)"، تحقیقات منابع آب ایران، ص ۱۱.

[31] Ali, S., Ghosh, N.C. and Singh, R., 2008. "Evaluating best evaporation estimate model for water surface evaporation in semi-arid region", India. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(8), pp.1093-1106.

[32] Gorjizade, A., Akhondali, A.M., Zarei, H. and Seyyed Kaboli, H., 2014. "Evaluation of eight evaporation estimation methods in a semi-arid region (Dez reservoir, Iran)". *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(5), pp.1823-1836.

[33] Masoner, J.R. and Stannard, D.I., 2010. "A comparison of methods for estimating open-water evaporation in small wetlands". *Wetlands*, 30(3), pp.513-524.

[34] Singh, V.P. and Xu, C.Y., 1997. "Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation". *Hydrological Processes*, 11(3), pp.311-323.

[35] Asmar, B.N. and Ergenzinger, P., 1999. "Estimation of evaporation from the Dead Sea". *Hydrological Processes*, 13(17), pp.2743-2750.

[36] Helfer, F., Zhang, H. and Lemckert, C., 2012. "Evaporation reduction from farm dams using air-bubble plume destratification". In *IWA World Congress on Water, Climate and Energy* (pp. 13-18).

[37] Van Dijk, M. and Van Vuuren, S.J., 2009. "Destratification induced by bubble plumes as a means to reduce evaporation from open impoundments". *Water SA*, 35(2).

[38] Cox, C.W., 1999. "Water supply enhancement in Cyprus through evaporation reduction (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology)".

[39] Sherman, B., Lemckert, C. and Zhang, H., 2010. "The impact of artificial destratification on reservoir evaporation". Brisbane, QLD: *Urban Water Security Research Alliance*.

[40] Fernandez, R.L., Bonansea, M., Cosavella, A., Monarde, F., Ferreyra, M. and Bresciano, J., 2012. "Effects of bubbling operations on a thermally stratified reservoir:

Implications for water quality amelioration". *Water Science and Technology*, 66(12), pp.2722-2730.

[41] Xing, Z., Chow, L., Meng, F.R., Rees, H.W., Steve, L. and Monteith, J., 2008. "Validating evapotranspiration equations using bowen ratio in New Brunswick, Maritime, Canada". *Sensors*, 8(1), pp.412-428.

[42] Gallego-Elvira, B., Baille, A., Martin-Gorriz, B., Maestre-Valero, J.F. and Martinez-Alvarez, V., 2012. "Evaluation of evaporation estimation methods for a covered reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain)". *Journal of hydrology*, 458, pp.59-67.

[43] Swinbank, W.C., 1963. "Long-wave radiation from clear skies". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), pp.339-348.

[44] Bowen, I.S., 1926. "The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface". *Physical review*, 27(6), p.779

[45] Henderson-Sellers, B., 1986. "Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review". *Reviews of Geophysics*, 24(3), pp.625-649.

[46] Dake, J.M. and Harleman, D.R., 1969. "Thermal stratification in lakes: analytical and laboratory studies". *Water Resources Research*, 5(2), pp.484-495.

[47] Van Bavel, C.H.M., 1966. "Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification". *Water Resources Research*, 2(3), pp.455-467.

[48] Moreo, M.T. and Swancar, A., 2013. "Evaporation from Lake Mead, Nevada and Arizona, March 2010 through February 2012". *US Geological Survey Scientific Investigations Report*, 5229, p.40.

[49] Haghighi, E. and Or, D., 2015. "Interactions of bluff-body obstacles with turbulent airflows affecting evaporative fluxes from porous surfaces". *Journal of Hydrology*, 530, pp.103-116.

[50] Van Reeuwijk, M. and Lari, K.S., 2012. Asymptotic solutions for turbulent mass transfer at high Schmidt number. *Proc. R. Soc. A*, 468(2142), pp.1676-1695.

[51] Aminzadeh, M. and Or, D., 2014. "Energy partitioning dynamics of drying terrestrial surfaces". *Journal of hydrology*, 519, pp.1257-1270.

[52] Haghighi, E. and Or, D., 2013. "Evaporation from porous surfaces into turbulent airflows: Coupling eddy characteristics with pore scale vapor diffusion". *Water Resources Research*, 49(12), pp.8432-8444.

Abstract

Freshwater is one of the most precious gifts of nature that human life on earth is going on. Countries have a different share of this vital resource, depending on the climatic and geographical conditions. In recent years, population growth and community development have reduced freshwater supplies in many parts of the world, especially in dry and semi-arid countries. If the necessary measures to manage, suitable use and reduce water losses do not occur, dehydration will become a major and serious threat to human life. These actions, if they are public, can make a significant contribution to preventing water losses. In arid and semi-arid areas, the main reason for water losses can be called a phenomenon called surface evaporation that occurs at temperatures below the boiling point of water. In Surface evaporation, molecules on the surface of the water are exposed to sunlight or wind blowing, and with increasing jerking, they are separated from the water surface and converted to water vapor. Hence, evaporation is an inevitable phenomenon, and plays a significant role in the rate of water losses in a country, given the country's climate and climate conditions. One of the major ways to reduce evaporation from the surface of open reservoirs, which is used in many warm and dry areas, is to use physical coatings. These coatings prevent from direct contacting sunlight with the surface of the water and reduce the rate of evaporation. In most studies that investigate the reduction of evaporation losses by physical coatings, the velocity of water flow was zero and the rate of evaporation reduction in stagnant conditions have been estimated. Considering the fact that many reservoirs have inlet and outlet flows, the study of surface flow effects on evaporation rates and the proper estimation of evaporation rates from these reservoirs can be helpful in managing and controlling evaporation losses. To achieve this, a 500-liter polyethylene reservoir as a water storage tank, six 500-watt projectors to simulate sunlight, plastic balls with two different densities (The first case has a mass of about 14 grams, and the second case, which falls to half the water, has a mass of 60 grams) in two colors, black and white, as a protective coating, a pump with a constant flow to create a surface flow and from A Mariott bottle is used to measure the surface evaporation rate of the reservoir. The results show that, in the uncoated conditions, surface water evaporation in the presence of a surface flow to a specified discharge, which is called an optimal Flow rate decreases as compared to the non-flowing state, With the increase of discharge and the passage of optimal discharge, the evaporation rate begins to increase. Also, in all conditions of existence and absence of surface flow, the results indicate that white coatings due to the

high reflection coefficient higher than the black coatings have the highest evaporation reduction efficiency and the evaporation rate in the combined coating conditions is equal to the black balls and White is less than black balls. When floating coatings collapse in water due to the increase in density, the height of the surface roughness decreases. Hence, the heat transfer coefficient increases between the air and the water. Therefore, the rate of evaporation is increased compared to the use of lightweight coatings and reduces the efficiency of evaporation reduction. in order to estimate the evaporation of water in surface flow mode, energy balance modelling was considered at the surface of water and coating. The results show that using the energy balance modeling method with a very good approximation can predict the evaporation rate by having the parameters required for all modes with the coating, without coating, with the presence of surface flow and without surface flow.

Keywords: surface evaporation, surface flow, Plastic balls, Protective coatings, optimal Flow rate, Energy balance.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

**Experimental investigation evaporation of water using floating
elements on the surface of Water storage reservoirs under conditions of
surface flow**

Amir Rezazadeh

Supervisor:

Dr. Pouria Akbarzadeh

Advisor:

Dr. Milad Aminzadeh

January 2019