مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۲۳-۳۲

Original Article

بررسی آثار استفاده از پوشش‌های تک‌لایه در مخازن سدها در میزان تبخیر

سهراب صالحی طرخورانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمدحسین نیک‌سخن * (دانشیار)
مجتبی اردستانی (استاد)
دانشکده‌ی محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

استفاده از پوشش‌های تک‌لایه، یکی از روش‌های متداول جهت کاهش تبخیر در مخازن آب‌های سطحی است. در پژوهش حاضر سعی شده است تا با استفاده از روابط تئوریک بیلان انرژی در مخازن، میزان کاهش تبخیر حاصل استفاده از یک پوشش تک‌لایه تحت سناریوهای زمانی مختلف بررسی شود. لذا سد استقلال میناب به‌عنوان مخزن مطالعه‌ی موردی و همچنین ستیل الکل به‌عنوان پوشش تک‌لایه انتخاب شدند و میزان تبخیر مخزن طی دوره‌ی ۵ ساله (۱۳۹۰ الی ۱۳۹۴) در حالت پایه و همچنین استفاده از پوشش تک‌لایه محاسبه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از پوشش تک‌لایه در تمام فصول سال، کاهش تبخیری معادل با ۸/۱٪ و در صورتی که پوشش تک‌لایه فقط در فصل تابستان استفاده شود، کاهش تبخیر برابر با ۲/۷٪ خواهد بود. این مقادیر کاهش تبخیر می‌تواند سبب افزایش سالیانه تا ۳/۵۴ میلیون مترمکعب ذخیره‌ی مخزن سد استقلال میناب شود.

واژگان کلیدی: پوشش، تک‌لایه، تبخیر، بیلان انرژی، مقاومت آئرودینامیکی.

so.salehi@ut.ac.ir
niksokhan@ut.ac.ir
ardestan@ut.ac.ir

۱. مقدمه

خشک‌سالی‌های کم‌سابقه‌ی اخیر و همچنین افزایش بی‌رویه‌ی تقاضای آب درکشور، باعث ایجاد فشار مضاعف بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی کشور شده است، لذا مسئله‌ی ذکر شده باعث ازدیاد برداشت از آب‌های زیرزمینی و بحرانی شدن وضعیت بیش از نیمی از دشت‌های کشور شده است.[۱] درکنار روش‌های مدیریتی اعمال شده جهت کاهش تقاضا و استفاده‌ی بهینه از آب، جلوگیری از هدررفت آب از زمان جمع‌آوری تا توزیع نیز بسیار مفید فایده و تأثیرگذار خواهد بود. تبخیر از سطح مخازن سدهای کشور، از مهم‌ترین موارد هدررفت آب جمع‌آوری شده جهت توزیع است. با توجه به اقلیم اکثراً گرم، تبخیر بالا و همچنین بارندگی کم کشور نسبت به میانگین‌های جهانی، مبحث جلوگیری از تبخیر آب مخازن پشت سدها، کارآمد و ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون روش‌های متعددی جهت کاهش تبخیر از مخازن آب سدها توسط پژوهشگران پیشنهاد و آزمایش شده است که یکی از آن‌ها، استفاده از پوشش‌های تک‌لایه‌یی[۱] بر سطح آب است. در پژوهش حاضر سعی شده است تا با استفاده از یک فرمول تئوریک ارائه شده جهت تبخیر، میزان آثار روش ذکر شده جهت کاهش میزان تبخیر از مخازن سدها، به همراه یک مطالعه‌ی موردی بررسی شود.

تک‌لایه‌ها، غشاهایی به ضخامت یک مولکول (حدود ۲ نانومتر) هستند که در حدفاصل میان دو فاز فیزیکی (نظیر آب و هوا) تشکیل می‌شوند.[۲] تک‌لایه‌هایی که بر روی آب تشکیل می‌شوند، شامل مولکول‌های قطبی هستند که هر دو قسمت آب‌دوست و آب‌گریز را دارند. چینش مولکول‌های قطبی اشاره شده بر روی آب به گونه‌یی است که قسمت آب‌دوست با ایجاد پیوند با مولکول آب بر سطح آب قرار می‌گیرد که باعث می‌شود تا مولکول‌های ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی تک‌لایه روی هم قرار نگیرند و روی سطح آب پخش شوند. قسمت آب‌گریز مولکول‌های قطبی نیز باعث عدم انحلال مولکول‌های ماده‌ی تک‌لایه در آب می‌شود. تک‌لایه‌ها می‌توانند در حالت‌های مختلفی بر روی سطح آب قرار گیرند که حالت مطلوب آن جهت کاهش میزان تبخیر، حالتی است که مولکول‌های تک‌لایه به‌صورت متراکم درکنار هم قرار گیرند. تمامی مواد تک‌لایه، قابلیت قرارگیری به‌صورت متراکم بر سطح آب را ندارند.[۲] الکل‌های سنگین (با زنجیره‌ی کربنی بزرگ‌تر از ۱۲ اتم کربن) ازجمله موادی هستند که امکان قرارگیری به‌صورت متراکم بر سطح آب را دارند، به همین جهت تاکنون پژوهش‌های متعددی بر روی خواص و آثار الکل‌های سنگین در میزان تبخیر از مخازن آب انجام شده است. الکل‌های سنگین، در تماس با آب سریعاً بر سطح آب پخش می‌شوند.

بیشتر موادی که تاکنون به‌عنوان تک‌لایه جهت کاهش تبخیر از آن‌ها استفاده شده

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۶/۸، اصلاحیه ۱۳۹۶/۸/۲۰، پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۶.
DOI:10.24200/J30.2017.4935.2183

است، به راحتی توسط باکتری‌ها تجزیه می‌شوند.[۳] همچنین مواد مذکور، خودشان نیز قابلیت تبخیر شدن دارند.[۴] بنابراین تک‌لایه‌ها موادی نسبتاً ناپایدار هستند که پس از پخش، شروع به تجزیه و تبخیر شدن می‌کنند؛ به همین جهت از مسائل بسیار مهم در استفاده از تک‌لایه‌ها، نیاز به شارژ دوره‌یی (۱ تا ۳ روز)، آن‌هاست. مقدار نیمه‌ی عمر برخی از تک‌لایه‌ها تحت شرایط دمایی مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. از ابتدای مطالعات بر روی تک‌لایه‌ها جهت کاهش تبخیر، مشخص شد که وجود ناخالصی در مواد تک‌لایه، باعث کاهش محسوس مقاومت مواد اشاره شده در برابر تبخیر می‌شود.[۵] عملاً تمامی گزارش‌ها درخصوص کاهش تبخیر با استفاده از تک‌لایه‌ها، برکاهش قابل توجه مقاومت مواد در زمان وزش بادهای شدید و نسبتاً شدید تأکید کرده‌اند. به طوری که میزان کاهش تبخیر ۱۰ تا ۲۰ درصدی ناشی از اثر تک‌لایه‌ها در سرعت باد (km/h) ۱۶ به میزان صفر در سرعت باد (km/h) ۲۴ رسیده است.[۶]

آزمایش‌هایی نیز بر روی یک مخزن در آفریقای جنوبی در شرایطی با سرعت باد (km/h) ۷-۴۰ نشان می‌دهد که در صورت پخش مداوم مخلوط ستیل الکل[۲] و استریل الکل[۳] محلول از ساحل سمت باد، می‌توان آثار مخرب باد را کاهش داد.[۷] در شرایطی با وزش مداوم باد، استفاده از الکل‌های انعطاف‌پذیرتر مانند الیل الکل[۴] می‌تواند موجب کاهش تبخیر بیشتر نسبت به الکل‌های محکم‌تر همچون ستیل الکل شود.[۸]

تاکنون مطالعات متعددی برای بررسی آثار استفاده از مواد مختلف به عنوان روشی جهت کاهش تبخیر انجام شده است. اولین پژوهشی که نشان داد استفاده از تک‌لایه‌ها می‌تواند در میزان تبخیر از سطح مخازن تأثیرگذار باشد، در سال ۱۹۲۵ انجام شد.[۱۰] پس از آن، مطالعات دیگری نیز در سال‌های ۱۹۴۳ و ۱۹۵۴ برای بررسی میزان کاهش تبخیر و علل آن با استفاده از تک‌لایه‌ها انجام شد.[۵،۱۱] همچنین نتایج پژوهشی در سال ۱۹۶۴، نشان داده است که استفاده از الکل‌هایی با زنجیره‌ی کربنی بلند و مستقیم (با بیش از ۱۴ اتم کربن)، بیشترین میزان کاهش تبخیر را نتیجه می‌دهد، لذا مولکول‌هایی با چند زنجیره‌ی کربنی در مقایسه با مولکول‌های تک‌زنجیره‌یی، عملکرد ضعیف‌تری در کاهش تبخیر دارند. با انجام آزمایش‌هایی بر روی الکل‌های سنگین (با تعداد کربن مابین ۱۴ تا ۲۲)، نیز مشخص شد که افزایش تعداد کربن باعث بهبود مقاومت تک‌لایه در برابر تبخیر می‌شود. بنابراین تعیین طول زنجیره‌ی کربنی تک‌لایه‌ی مورد استفاده باید با توجه به دو معیار ازدیاد لگاریتمی کاهش تبخیر با اضافه کردن طول زنجیره‌ی کربنی و همچنین لزوم کاهش میزان استفاده‌ی مواد تک‌لایه انتخاب شود.[۱۲] برای پخش مواد تک‌لایه بر سطح آب از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

۱. پخش به‌صورت محلول: در روش پخش به‌صورت محلول، آمفیفیل[۵] پس از انحلال در یک حلال فرار به‌صورت حجمی بر روی آب پخش می‌شود.

۲. پخش به‌صورت جامد: در روش پخش به‌صورت جامد، ماده‌ی تک‌لایه (همانند ستیل الکل و استریل الکل)، به‌صورت کریستال‌های جامد و یا به صورت پودر شده بر سطح آب پخش می‌شوند. در بیشتر مطالعات بزرگ انجام شده تاکنون، از روش پخش به‌صورت جامد استفاده شده است.

جدول ۱. نیمه‌ی عمر برخی از مواد تک‌لایه در فشار سطحی (mNm^{-1}) ۳۵.[۹]

ماده‌ی تک‌لایه	نیمه‌ی عمر در دمای $20^\circ C$ (ساعت)	نیمه‌ی عمر در دمای $40^\circ C$ (ساعت)
ستیل الکل	۴۸	۱٫۳
استریل الکل	> ۲۰۰	۹٫۶
مخلوط ۱ به ۲ ستیل الکل و استریل الکل	-	۳٫۲
مخلوط ۲ به ۱ ستیل الکل و استریل الکل	-	۱٫۹

روش‌های دیگر، همچون پخش امولسیون‌ها نیز در برخی پژوهش‌ها به‌صورت آزمایشی انجام شده است. طی مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته است میزان کاهش تبخیر مابین صفر تا بیش از ۵۰٪ گزارش شده است که می‌تواند ناشی از تفاوت در موارد متعددی باشد، که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است:

- منطقه‌ی مورد مطالعه (طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و ...)،
- اندازه و مشخصات فیزیکی مخزن مورد مطالعه (عمق و ابعاد مخزن)،
- روش‌های مورد استفاده جهت محاسبه‌ی میزان تبخیر،
- مدت مورد مطالعه.

همین تفاوت‌های ذکر شده سبب می‌شود تا نتوان میزان صحیح کاهش تبخیر در یک منطقه را به راحتی از طریق مطالعات پیشین تعیین کرد. لذا موارد ذکر شده، لزوم انجام مطالعات محلی را یادآور می‌شود. بیشتر مطالعات باد را یکی از عوامل کاهنده‌ی میزان اثر تک‌لایه‌ها می‌دانند. در ادامه، به نتایج برخی از مطالعات پیشین اشاره شده است.

فیتزجرالد[۶] و همکاران (۱۹۶۳)، پس از مطالعه بر روی دریاچه‌ی یک سد کوچک در استرالیا به مساحت (km^2) ۲٫۴ به مدت ۱۳۰ هفته، میزان ۲۰٪ کاهش تبخیر از مخزن سد را گزارش و بیان کردند که در زمان‌های باد شدید، تک‌لایه‌ها منقبض و جمع می‌شوند و به گوشه‌های مخزن حرکت می‌کنند. در حالتی که کناره‌های مخزن سنگی و با شیب تند باشند، بیشتر مواد جمع شده پس از قطع باد، دومرتبه پخش می‌شوند، اما اگر کناره‌های مخزنی از نوع ماسه‌یی و با شیب کم باشند، پخش دومرتبه رخ نمی‌دهد.[۶]

نایتس[۷] (۲۰۰۵)، نیز با بررسی آثار استفاده از ماده‌ی تک‌لایه‌یی بر پایه‌ی ستیل‌الکل بر روی چند مخزن آب کشاورزی، میانگین کاهش میزان تبخیر را ۲۰٪ (مابین صفر تا ۴۰٪) گزارش کرد.[۱۳] همچنین پیری[۸] و همکاران (۲۰۰۹)، آزمایش‌هایی با افشانه کردن الکل‌های هگزادکانول[۹] و اکتادکانول[۱۰] و ترکیبی از دو الکل مذکور (در حالت محلول در اتانول) بر روی تشت‌های تبخیر کلاس آ (با تناوب ۲ روز یک‌مرتبه) در غلظت‌هایی معادل ۲۰ و ۴۰ گرم در هکتار انجام و نتیجه‌گیری کردند که میزان اثر اکتادکانول بیش از هگزادکانول و نتایج ترکیب دو الکل ذکر شده، مؤثرتر از حالت‌های استفاده‌ی تکی از آن‌هاست. و نیز میزان کاهش تبخیر را حدود ۴۰ تا ۵۵ درصد در حالت ترکیب الکل‌ها گزارش کردند.[۱۴]

همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۰۵)، با مطالعه بر روی استفاده از مخلوط هگزادکانول و اکتادکانول به‌عنوان تک‌لایه بر روی نمونه‌هایی از آب دو مخزن در کشور برزیل نتیجه‌گیری کردند که استفاده از مخلوط اشاره شده باعث کاهش بیش از ۵۷٪ تبخیر می‌شود و عمر مفید مخلوط ذکرشده را حدود ۲ روز بیان کردند.[۱۵] گالیگو الویرا[۱۱] و همکارانش (۲۰۱۳)، در مطالعه‌یی بر روی سه نوع تک‌لایه (استریل الکل، اتیلن گلیکول مونواکتادسیل اتر و یک تک‌لایه‌ی تجاری) در شرایط اقلیمی مختلف و طی سه سرعت باد مختلف در شرایط آزمایشگاهی (گلخانه‌ی شیشه‌یی)، میزان تبخیر ناشی از استفاده از تک‌لایه‌ها را بر روی تشت تبخیر اندازه‌گیری و میزان کاهش آن را مابین ۱۳ تا ۷۱ درصد، در شرایط اقلیمی مختلف گزارش کردند. اتیلن گلیکول مونواکتادسیل اتر، به‌عنوان مؤثرترین تک‌لایه درکاهش تبخیر در شرایط اقلیمی مختلف منعکس شده است. درخصوص تأثیر باد در عملکرد تک‌لایه‌ها نیز بیان

شده است که بیشترین اثر تک‌لایه‌ها در کاهش تبخیر در سرعت بادی رخ می‌دهد که ضمن توان جابه‌جایی هوای اشباع بالای سطح آب، باعث بر هم‌خوردن تراکم تک‌لایه نشود و این سرعت را حدود ۱٫۵ متر بر ثانیه ذکر کرده‌اند. همچنین سرعت بادهای بیشتر از ۱٫۵ متر بر ثانیه، باعث بر هم‌خوردن تراکم تک‌لایه‌ها و کاهش اثر تک‌لایه می‌شود. سرعت‌های باد کمتر از ۱٫۵ متر بر ثانیه نیز با توجه به کاهش میزان کلی تبخیر در حالت بدون پوشش، باعث کاهش عملکرد تک‌لایه می‌شود. ضمناً دما و تابش بالا، تأثیر منفی در عملکرد تک‌لایه‌ها در کاهش تبخیر دارند.[۱۶]

محصول تجاری WaterSavr هم مخلوطی از حدوداً ۵٪ ستیل الکل، ۵٪ استریل الکل و ۹۰٪ اکسیدکلسیم است،[۱۶] و تاکنون در بسیاری از مطالعات استفاده شده است. ورلی[۱۲] و همکارش (۲۰۱۵)، نیز با انجام آزمایش‌های پخش تک‌لایه‌ی مذکور بر روی یک مخزن ۲۲۲۶ هکتاری در ایالت تگزاس آمریکا، کاهش تبخیر برابر با ۱۵٪ را گزارش کردند.[۱۷] همچنین در پژوهشی دیگری (۲۰۱۰) در کشور سنگاپور، آثار استفاده از تک‌لایه‌ی WaterSavr هم بر روی یکی از مخازن کوچک کشور سنگاپور در طول ۳ ماه آزمایش و تشت‌های تبخیر بررسی شدند. ماده‌ی مورد استفاده در پژوهش مذکور، به‌صورت پودر سفیدرنگ و بدون بویی بود که به محض پخش بر روی سطح آب به‌صورت لایه‌یی نازک و تک‌مولکولی و بی رنگ در می‌آمد و پوشش ایجاد شده در طول ۲ تا ۳ روز کاملاً تجزیه می‌شد. طی پژوهش انجام شده، میانگین کاهش تبخیر بیش از ۳۰٪ گزارش شد. همچنین تأثیر استفاده از محصول استفاده شده در کیفیت آب مخزن بررسی شد و با مطالعه‌ی پارامترهایی، نظیر: کل جامدات محلول، کدورت، اکسیژن محلول، اسیدیته، کلروفیل آ و ...، هیچ‌گونه اثر سویی در کیفیت آب مشاهده نشد.[۱۸]

زین‌الزاده[۱۳] و همکارش (۲۰۱۶)، نیز در بررسی آثار حاصل از پخش تک‌لایه‌ی WaterSavr با دوره‌ی تجدید ۲ روزه بر روی آب دریاچه‌ی ارومیه در طی ۱۸ روز آزمایش، میزان کاهش تبخیر ناشی از تک‌لایه‌ی WaterSavrرا با دو غلظت ۱۰۰ و ۱۶۰ میلی‌گرم برای هر مترمربع اندازه‌گیری کردند و نتیجه گرفتند که با استفاده از غلظت کمتر ماده‌ی تک‌لایه، ۴۸٪ از میزان تبخیر کاهش می‌یابد و در صورت استفاده از غلظت بیشتر، بازده میزان کاهش تبخیر به ۳۵٪ کاهش می‌یابد.[۱۹]

همچنین کاویان‌پور و همکاران (۲۰۰۹)، با انجام ۱۲ نوبت آزمایش پخش الکل جوجوبا بر روی آب مقطر در بشرهای ۳ لیتری نشان دادند که متوسط کاهش تبخیر با استفاده از الکل جوجوبا برابر با ۳۲٫۴٪ است. الکل جوجوبا که مخلوطی از الکل‌هایی با زنجیره‌ی طویل ۱۶ تا ۲۴ کربنه است، خاصیت سمی ندارد، خاصیت ضد ویروس و قارچ دارد و از رشد موجودات ذره‌بینی در آب نیز جلوگیری نمی‌کند.[۲۰]

برخی پژوهشگران (۲۰۱۵) نیز در مقایسه‌ی الکل جوجوبا و دو تک‌لایه‌ی تجاری با نام‌های Aquatain و WaterSavr برای استفاده به‌عنوان تک‌لایه در مخازن آب ایران، ضمن معرفی گیاه جوجوبا به‌عنوان گیاهی مناسب برای کشت در مناطقی که منشأ گرد و غبار در ایران هستند، بیان کرده‌اند که الکل جوجوبا (حاصل فرایند هیدرولیز روغن جوجوبا) می‌تواند به عنوان یک تک‌لایه جهت کاهش تبخیر از مخازن آب کشور استفاده شود. میزان کاهش تبخیر نیز برای تک‌لایه‌های الکل جوجوبا، Aquatain و WaterSavrبه ترتیب ۳۳، ۴۰ و ۳۰ درصد ذکر شده است. در بین هر ۳ تک‌لایه‌ی ذکر شده، فقط الکل جوجوبا، تک‌لایه‌یی است که باعث خارش چشم و پوست نمی‌شود و کاهش دید پرندگان شکاری را نیز در پی ندارد و همچنین متوسط زمان شارژ مجدد الکل جوجوبا از دو تک‌لایه‌ی دیگر بیشتر است.[۲۱]

همچنین پنجابی و همکاران (۲۰۱۶)، آثار استفاده از یک تک‌لایه‌ی متشکل از استریل الکل و ستیل الکل را به نسبت ۱:۱ در میزان تبخیر در مخزن سد آجی در کشور هند، با استفاده از ۶ ماه آزمایش ممتد بررسی کردند و میزان متوسط کاهش تبخیر برابر با ۱۹٫۲۶٪ و مقدار کل کاهش تبخیر از مخزن سد طی ۶ ماه مطالعه را برابر با ۰٫۱۸ میلیون مترمکعب گزارش کردند. سد آجی منبع اصلی آب شرب شهر یک میلیون نفری راجکوت (واقع در ایالت گجرات هند) است و در سال‌هایی که بارندگی کم باشد (نظیر سال ۱۹۸۵)، در صورت کمبود، آب شرب باید از دیگر مناطق کشور به شهر راجکوت حمل شود. نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که در سال ۱۹۸۵، هزینه‌ی حمل ۱۰۰۰۰۰ لیتر آب از راه جاده، ۷ دلار و از طریق مسیر ریلی، ۳ دلار است و این در حالی است که هزینه‌ی جلوگیری از تبخیر ۱۰۰۰۰۰ لیتر آب برابر با ۰٫۴۵ دلار است و این مسئله نمایانگر اقتصادی بودن این طرح، خصوصاً در مواردی نظیر سد آجی است.[۲۲] برخی دیگر از مطالعات نیز به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

با توجه به جست‌وجو در مراجع در دسترس (مطابق جدول ۱)، بیشتر آزمایش‌های انجام شده تاکنون، بر روی مخازن کوچک انجام شده‌اند. به گونه‌یی که بیشتر مطالعات بر روی مخازنی با مساحت کوچک‌تر از ۴ کیلومترمربع انجام شده‌اند. لذا با توجه تفاوت‌های زیاد در نتایج (که در مورد علل احتمالی تفاوت‌ها پیش‌تر بحث شده است)، انجام مطالعات محلی بیشتر، خصوصاً در مورد مخازن بزرگ‌تر، مفید به نظر می‌رسد. با توجه به نتایج جدول ۱، به نظر می‌رسد که مطالعات در مخازن کوچک‌تر، میزان تبخیر بیشتری را نتیجه داده‌اند. این مطلب را می‌توان به مشکل بودن نگاهداشت ممتد و یکسان تک‌لایه‌ها بر سطح آب، خصوصاً در زمان رخداد باد و موج‌های شدید، مرتبط دانست.[۳۲] طی مطالعات کتابخانه‌یی انجام گرفته درخصوص اجرای روش ذکر شده‌ی کاهش تبخیر در مخازن سدها، در داخل کشور نتیجه‌یی به‌دست نیامده و به نظر می‌رسد که تاکنون از روش مذکور به طور عملیاتی در مخازن سدهای کشور استفاده نشده است. علت این امر را می‌توان به پراکندگی و عدم قطعیت بسیار زیاد نتایج مطالعات انجام شده تاکنون و همچنین نبود شناخت کافی از آثار زیست‌محیطی مواد ذکر شده در کیفیت آب و محیط زیست منطقه‌ی مربوطه دانست.

۱.۱. آثار استفاده از تک‌لایه‌ها در کیفیت آب مخازن

به‌طور کلی آثار استفاده از مواد شیمیایی به‌عنوان تک‌لایه را می‌توان به ۳ دسته تقسیم کرد:

۱. آثار ناشی از تجزیه‌ی مولکول‌های ماده‌ی تک‌لایه،

۲. تغییرات در میزان جابه‌جایی گاز از میان‌لایه‌ی آب ـ هوا،

۳. آثار ناشی از تغییرات در توازن انرژی در مخزن.

در بسیاری از پهنه‌های آبی، تجزیه‌ی مواد آلی به طور طبیعی باعث به وجود آمدن ریزلایه‌هایی بر سطح آب می‌شود. به همین جهت برخی از پژوهشگران ایجاد تک‌لایه‌های مصنوعی بر روی آب را نیز بی‌خطر برای سلامت آب می‌دانند.[۳۳] مطالعات نشان می‌دهد که ضخامت لایه‌های طبیعی ذکر شده حدود ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر است.[۳۴] به همین جهت، هرگونه مطالعه‌یی بر روی آثار استفاده از تک‌لایه‌های مصنوعی در کیفیت آب باید با توجه و بررسی تک‌لایه‌های طبیعی اشاره شده در محل مورد مطالعه باشد. در صورتی که بتوان نوعی برابری اکولوژیکی در دو نوع ریزلایه‌ی طبیعی و مصنوعی ایجاد کرد، می‌توان به کمینه‌ی آثار غیرطبیعی استفاده از تک‌لایه‌ها دست یافت. با توجه به موارد مطرح شده، تعیین تأثیر استفاده از تک‌لایه‌ها به جهت کاهش تبخیر، در کیفیت آب مخازن متضمن انجام مطالعات گسترده‌ی محلی است. درخصوص محصول تجاری WaterSavr، تاکنون مشکل بهداشتی گزارش نشده است. تک‌لایه‌ی WaterSavr به سادگی تخریب‌پذیر و غیرسمی است،

جدول ۲. برخی از مطالعات صحرایی انجام گرفته درخصوص کاهش میزان تبخیر با استفاده از تک‌لایه‌ها.

پژوهشگر	مساحت مخزن مورد مطالعه (Km^2)	مدت زمان مطالعه	میزان کاهش تبخیر
Sutherland et al (۱۹۷۵)[۲۳]	۴	۱۴ هفته	٪۳۷
Grundy(۱۹۸۵)[۷]	۰٫۵	۱۰ روز	٪۱۱٫۵
McArthur(۱۹۶۰)[۲۴]	۰٫۱۲	۷ هفته	٪۳۵
McArthur(۱۹۶۰)[۲۴]	۰٫۱۲	۱۰٫۵ هفته	٪۳۱
Vines(۱۹۶۲)[۲۵]	۱	۲ ماه	٪۱۵
Walter(۱۹۶۳)[۲۶]	۰٫۱	۳ سال	٪۲۰
		۵ روز	٪۳۱
Craig(۲۰۰۵)[۲۷]	۱٫۲	۱۰ روز	٪۲۷
		۸ روز	٪۰
Crow(۱۹۶۳)[۲۸]	۰٫۰۰۱	۶۶ روز	٪۲۵
Hamburg(۱۹۶۲)[۲۹]	۹٫۷	۸ هفته	٪۸
Hamburg(۱۹۶۲)[۲۹]	۴	۷ هفته	٪۱۴
Roberts(۱۹۶۲)[۳۰]	۰٫۰۱	۳ ماهه‌ی تابستان	٪۴۳
Oklahoma Department Of Health(۱۹۵۹)[۳۱]	۱۰	۱۲ هفته	٪۹

همچنین محصول مذکور توسط NSF [۱۴] به‌عنوان یک ماده‌ی شیمیایی بی‌خطر جهت استفاده در آب شرب معرفی شده است. NSF مانع نفوذ اکسیژن به داخل آب نیز نمی‌شود، هر چند ادعا می‌شود که تک‌لایه‌های متشکل از الکل‌های سنگین، تأثیری در میزان اکسیژن محلول در آب ندارند، در برخی پژوهش‌های صورت گرفته، نرخ پخش اکسیژن تا ۱۰ الی ۱۵ درصد کاهش یافته است و این امر می‌تواند به کاهش میزان اکسیژن محلول در آب بینجامد که نیاز به بررسی‌های دقیق‌تری دارد. پوشش‌های تک‌لایه‌یی، تأثیری در ورود پرتوهای خورشید ندارند، اما با کاهش تبخیر باعث می‌شوند تا مقدار انرژی خروجی از پهنه‌ی آبی کاهش یابد. کاهش انرژی خروجی از پهنه‌ی آبی باعث افزایش دمای لایه‌ی سطحی آب می‌شود. این افزایش دمای لایه‌ی سطحی به مشخصات محل مورد مطالعه وابسته است. با توجه به مطالعات پیشین انجام گرفته، میانگین افزایش دمای لایه‌ی سطحی به دلیل استفاده از پوشش‌های تک‌لایه‌یی به طور میانگین مابین ۱ تا ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد است.[۳۵]

ویکسون[۱۵] (۱۹۶۶)، در پژوهشی درخصوص تأثیر اکولوژیکی استفاده از تک‌لایه‌های کاهش تبخیر، سه دوره‌ی ۳۰ روزه‌ی آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی با استفاده از پخش یک ماده‌ی تک‌لایه‌ی تجاری به نام (Aquasave ترکیب ۱:۱ ستیل الکل و استریل الکل) بر روی آب انجام دادند،[۳۶] و نتیجه گرفتند که:

۱. PH: هر چند که در بیشتر مواقع، PH نمونه با پوشش تک‌لایه، اندکی کمتر از نمونه‌ی بدون پوشش است، اما در صورتی که PH اولیه‌ی آب مابین ۷ تا ۱۰ باشد، این تفاوت مضر نخواهد بود.

۲. سختی: آب استفاده شده در پژوهش ویکسون، سختی کربناته‌ی ۸ تا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر دارد و تأثیر معناداری در میزان سختی نداشته است. بنابراین نتایج آن بیانگر عدم تأثیر استفاده از تک‌لایه‌ی Aquasave در میزان سختی در آب‌های نرم دارد.

۳. کدورت: آزمایش‌های صورت گرفته طی پژوهش اخیر در محیط آزمایشگاهی نشان داده است که استفاده‌ی مداوم از تک‌لایه‌ی Aquasave می‌تواند باعث رشد برخی میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه افزایش کدورت آب شود.

۴. اکسیژن محلول: نتایج مطالعه‌ی ویکسون، تغییرات متعددی را طی دوره‌ی ۳۰ روزه‌ی آزمایش‌ها نشان داده است، به گونه‌یی که نتایج آن بیانگر بیشتر بودن میزان اکسیژن محلول در حالت بدون پوشش نسبت به حالت با پوشش طی ۱۵ روز اول آزمایش و بیشتر بودن آن در حالت با پوشش نسبت به حالت بدون پوشش طی ۱۵ روز دوم دوره‌ی آزمایش است.

۵. میزان باکتری‌ها: استفاده از پوشش تک‌لایه‌یی در پژوهش ویکسون، موجب افزایش میزان باکتری‌ها در آب شده است، به‌طوری که در پایان آزمایش، هر میلی‌گرم نمونه‌ی با پوشش، ۵۸۰۰ کلنی باکتریایی بیش از نمونه‌ی بدون پوشش داشته است. این افزایش تعداد باکتری‌ها می‌تواند به افزایش میزان اکسیژن‌خواهی آب منجر شود.

۲.۱. آثار استفاده از تک‌لایه‌ها در محیط‌زیست منطقه

با توجه به گستره‌ی بسیار وسیع آثار احتمالی تک‌لایه‌ها در محیط‌زیست و اکوسیستم گیاهی و جانوری مناطق مورد استفاده، تاکنون مطالعات اندکی بر روی موارد ذکر شده صورت پذیرفته است و هنوز بسیاری از آن‌ها ناشناخته مانده‌اند. ویکسون (۱۹۶۶)،[۳۶] در بررسی آثار استفاده از تک‌لایه‌ی Aquasave در زندگی آبزیان بر روی ۲ نوع ماهی و به مدت ۳۰ روز در شرایط آزمایشگاهی نتیجه گرفته است که اختلاف معناداری مابین تلفات ماهی‌های قرار گرفته در آکواریوم‌های با پوشش و بدون پوشش وجود ندارد. همچنین بیان کرده است مواقعی که اکسیژن محلول آب به حدود ۴-۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد، ماهی‌ها جهت دریافت اکسیژن بیشتر به سطح آب می‌آیند و باعث شکسته شدن موقت پوشش تک‌لایه می‌شوند. لازم به ذکر است که هر چند تک‌لایه‌ی Aquasave، تأثیر مستقیمی در میزان تلفات

ماهی‌ها نداشته است، ولی آثار ناشی از استفاده از تک‌لایه‌های Aquasave در میزان اکسیژن محلول، به‌ویژه در دریاچه‌هایی با آب گرم و آلوده می‌تواند باعث بروز مرگ‌ومیر در جمعیت آبزیان شود. در مطالعه‌ی بابو[16] و همکاران (۲۰۱۰) بر روی محصول تجاری WaterSavr نیز اثری در گیاهان حاشیه‌ی مخزن و حیات آبزیان مشاهده نشده است. حمل و نقل WaterSavr، کم‌خطر است و فقط در صورت برخورد با چشم، باعث سوزش و خارش می‌شود که جهت جلوگیری از آن، در هنگام حمل و نقل و پخش باید از ماسک استفاده شود.[18] همچنین ستیل الکل و استریل الکل، به طور گسترده در لوازم آرایشی استفاده می‌شود و تاکنون گزارشی مبنی بر وجود آثار مضر الکل‌های اشاره شده بر بدن انسان منتشر نشده است.[37]

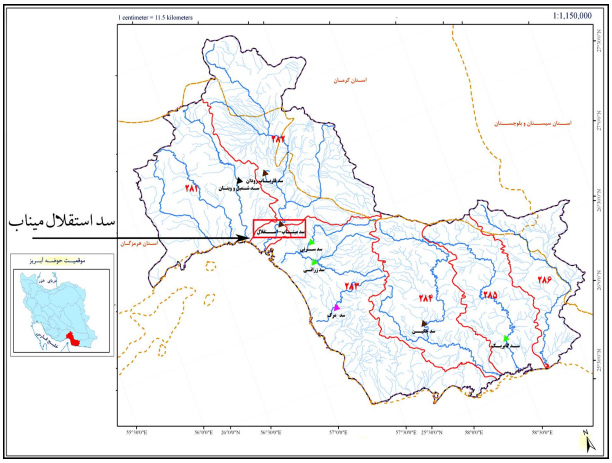
در پژوهش حاضر سعی شده است تا با استفاده از روابط تئوریک محاسبه‌ی تبخیر از سطح آزاد مخازن و با استفاده از آثار تک‌لایه‌ها در پارامترهای روابط ذکرشده، میزان کاهش تبخیر در حالت استفاده از تک‌لایه‌ها محاسبه شود. در راستای همین موضوع، سد استقلال میناب جهت مطالعه‌ی موردی انتخاب و بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه‌ی مورد مطالعه

سد استقلال میناب از مهم‌ترین سدهای استان هرمزگان است که در سال ۱۳۶۲ بر روی رودخانه‌ی میناب احداث شده است. رودخانه‌ی میناب از پرآب‌ترین رودخانه‌های استان هرمزگان است که از دو شاخه‌ی اصلی رودان و جغین تشکیل شده است. سد استقلال میناب در حوضه‌ی اصلی خلیج فارس و حوضه‌ی فرعی بندرعباس ـ سدیج، در مختصات جغرافیایی ″۵۷ ′۵ °۵۷ طول شرقی و ″۳۴ ′۹ °۲۷ عرض شمالی واقع شده است. در حوضه‌ی بندرعباس ـ سدیج، میزان بارندگی عمدتاً کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال و فقط در ایستگاه فاریاب به میزان ۲۹۶٫۳ میلی‌متر در سال است. کمینه‌ی بارندگی مربوط به مناطق جنوب شرقی حوضه‌ی مذکور به میزان ۱۴۲٫۸ میلی‌متر در سال در ایستگاه جاسک و متوسط دمای آن از کمینه‌ی ۲۲٫۴ درجه‌ی سانتی‌گراد تا بیشینه‌ی ۲۸٫۴ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر است. میزان رطوبت نسبی به طور متوسط از کمینه‌ی ۴۴٪ تا بیشینه‌ی ۸۲٪ متغیر است. حجم کل سد استقلال میناب، ۳۵۰ میلیون مترمکعب، حجم مفید آن ۲۷۰ میلیون مترمکعب و حجم قابل تنظیم سالیانه‌ی آن ۲۳۶ میلیون مترمکعب بوده و با هدف تأمین آب شرب و کشاورزی (با سطح زیرکشت بیش از ۱۰۰۰۰ هکتار) و همچنین کنترل سیلاب احداث شده است. سد استقلال میناب از نوع بتنی پایه‌دار با ۱۴ دریچه‌ی قوسی با ظرفیت کلی ۱۲۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه دبی خروجی است. جانمایی سد استقلال میناب در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

اخیراً، نیز رشد بی‌رویه‌ی مصارف و همچنین تغییرات اقلیم منطقه، باعث فشار مضاعف بر منابع آب در منطقه‌ی سد استقلال، خصوصاً منابع آب زیرزمینی شده است، به نحوی که برخی اوقات تأمین آب شرب و کشاورزی را با مشکلاتی مواجه می‌سازد. در مقابل، سالیانه میلیون‌ها مترمکعب آب شیرین از مخزن سد استقلال میناب تبخیر می‌شود و هدر می‌رود. با توجه به میزان بارندگی کم (کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر سالیانه) و همچنین اقلیم خشک منطقه‌یی که سد استقلال میناب در آن واقع شده است، هدررفت ناشی از تبخیر برای سد استقلال، بسیار مهم و تأثیرگذار است. به همین جهت ارائه‌ی راهکارهایی جهت کاهش میزان تبخیر از مخازن سدها



شکل ۱. جانمایی حوزه‌ی آبریز و سد استقلال میناب.

خصوصاً در مناطق گرم کشور می‌تواند آثار مثبت به‌سزایی را در مدیریت منابع آب مناطق گرم کشور داشته باشد.

برای محاسبه‌ی تبخیر از سطح آزاد مخزن سد استقلال میناب، از فرمول‌های تئوریک بیلان انرژی استفاده شده است. ابتدا مدل‌سازی با استفاده از فرمول‌های مذکور انجام شد و میزان تبخیر از مخزن سد در حالت عادی برای دوره‌ی ۵ ساله منتهی به سال ۱۳۹۴ به دست آمد. سپس میزان کاهش تبخیر در حالت استفاده از تک‌لایه‌ها برای ۲ سناریوی استفاده از تک‌لایه‌ها در تمامی طول سال و استفاده از تک‌لایه‌ها فقط در فصل تابستان محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه، روابط مورد استفاده شرح داده شده است.

جهت تعیین میزان تبخیر در حالت عادی (بدون استفاده از تک‌لایه‌ها)، از رابطه‌ی پنمن ـ مانیث اصلاح شده که بر پایه‌ی معادلات بیلان انرژی به‌دست آمده است، استفاده شد.[38] هر چند که رابطه‌ی اخیر در ابتدا جهت محاسبه‌ی میزان تبخیر و تعرق گیاهان ارائه شده است، لکن با ایجاد تغییراتی در پارامترهای مقاومت و ذخیره‌ی گرمایی، می‌توان از آن جهت برآورد میزان تبخیر از سطح مخازن آب، مطابق رابطه‌ی ۱ استفاده کرد:

$$E = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{\Delta_w (Q^* - N) + 86400\,\rho_a C_a (e_w^* - e_a)/r_a}{\Delta_w + \gamma}\right) \qquad (1)$$

که در آن، E: میزان تبخیر روزانه بر حسب میلی‌متر؛

λ: میزان گرمای نهان تبخیر ($MJ\,Kg^{-1}$)؛

ρ_a: چگالی هوا ($Kg.m^{3}$)؛

C_a گرمای ویژه‌ی هوا ($MJ.Kg^{-1}.^{\circ}K^{-1}$)؛

γ: ثابت سایکومتری ($Kpa^{\circ}C$)؛

Δw: شیب نمودار دمای هوای اشباع در نقطه‌ی دمای آب؛

Q^*: میزان تابش خالص نور خورشید ($MJm^{-2}d^{-1}$)؛

N: میزان تغییر در ذخیره‌ی انرژی گرمایی ($MJm^{-2}d^{-1}$)؛

e_w^*: میزان فشار بخار اشباع در دمای آب (Kpa)؛

e_a: میزان فشار بخار در دمای هوا (Kpa)؛

r_a: مقاومت آئرودینامیکی ($s.m^{-1}$).

با توجه به اینکه روش پنمن ـ مانیث مورد استفاده در پژوهش حاضر بر پایه‌ی بیلان انرژی مخزن اصلاح شده است، میزان تغییر در ذخیره‌ی انرژی گرمایی

جدول ۳. برخی از پارامترها و ضرایب مورد استفاده جهت برآورد میزان تبخیر.

پارامتر یا ضریب	مقدار یا رابطه	واحد
λ	$۲/۵۰۱ - ۰/۰۰۲۳۶۱T_a$	$MJKg^{-۱}$
ρ_a	$۱/۲$	$Kg.m^{۳}$
ρ_w	۱۰۰۰	$Kg.m^{۳}$
C_a	$۰/۰۰۱۰۱۳$	$MJ.Kg^{-۱}.^{\circ}K^{-۱}$
C_w	$۰/۰۰۴۱۸۵$	$MJ.Kg^{-۱}.^{\circ}K^{-۱}$
γ	$۱۶۰/۷۷ \times (C_a/\lambda)$	$Kpa^{\circ}C$
Δ_w	$\Delta_w = \frac{۴۰۹۸(۰/۶۱۰۸\exp(\frac{۱۷/۲۷T_w}{T_w+۲۳۷/۳}))}{(T_w+۲۳۷/۳)^{۲}}$	-

$N(MJm^{-۲}d^{-۱})$ مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$N = \rho_w C_w Z(T_w - T_{w^{\circ}}) \qquad (۲)$$

که در آن، T_w دمای سطح آب در گام فعلی و $T_{w^{\circ}}$ دمای سطح آب در گام قبلی (در پژوهش حاضر، روز پیش موردنظر است)، C_w گرمای ویژه‌ی آب $(MJ.Kg^{-۱}.^{\circ}K^{-۱})$ و Z نیز عمق متوسط لایه‌ی دمایی سطحی آب است. جهت برآورد دمای سطح آب از روابط به دست آمده در سال ۱۹۸۲،[۳۹] استفاده شد. برخی از ضرایب، پارامترها، و روابط تئوری یا تجربی استفاده شده جهت برآورد میزان تبخیر در جدول ۳ ارائه شده است. درخصوص انجام محاسبات و همچنین محاسبه‌ی دمای آب (T_w) از روابط تئوری و تجربی و همچنین روند ارائه شده در پژوهش مک ژانت[۱۷] و همکاران (۲۰۰۸)، استفاده شد.[۳۲] برای محاسبه‌ی میزان تبخیر، به پارامترهای متعدد هواشناسی، نظیر: دمای هوای خشک، دمای هوای تر، نقطه‌ی شبنم و میزان رطوبت نیاز است که در پژوهش حاضر، برای دوره‌ی ۵ ساله‌ی ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۴ و به‌صورت متوسط روزانه جمع‌آوری و محاسبات تبخیر در حالت بدون دخالت جهت کاهش تبخیر (حالت پایه) محاسبه شد.

۲.۲. استفاده از تک‌لایه‌ها جهت کاهش تبخیر

مقاومت آئرودینامیکی (r_a) در حالت پایه، به‌صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:[۴۰]

$$r_a = \frac{\rho_a C_a}{\gamma(f(u)/۸۶۴۰۰)} \qquad (۳)$$

که در آن، r_a: مقاومت آئرودینامیکی $(s.m^{-۱})$ است.

همچنین، در رابطه‌ی ۳، تابع باد $f(u)(MJ\,m^{-۲}d^{-۱}Kpa^{-۱})$، با توجه به متوسط سرعت باد در فاصله‌ی ۱۰ متری سطح زمین $(U_{۱۰})$ و مساحت مخزن $A(Km)$، مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$f(u) = (\frac{۵}{A})^{۰/۰۵}(۳/۸۰ + ۱/۵۷U_{۱۰}) \qquad (۴)$$

برای محاسبه‌ی آثار استفاده از تک‌لایه‌ها در میزان تبخیر، باید میزان مقاومت افزوده شده توسط تک‌لایه، در رابطه‌ی تعیین میزان تبخیر (رابطه‌ی ۱)، اعمال شود. با استفاده از تک‌لایه‌ها بر سطح آب، لایه‌ی مرزی در تماس با هوا ضخیم‌تر می‌شود که افزایش ضخامت ایجاد شده باعث افزایش مقاومت در برابر تبخیر می‌شود. همان‌گونه که ذکر شد، وقوع باد باعث کاهش مقاومت تک‌لایه‌ها در برابر تبخیر می‌شود. در ابتدا تصور می‌شد که علت کاهش مقاومت تک‌لایه‌ها در حضور باد، چرخش زنجیره‌های کربنی مولکول‌های تک‌لایه به سبب وزش باد است.[۴۱] در مطالعات اخیر، علت کاهش مقاومت ذکر شده، جمع شدن و در نتیجه کاهش سطح پوشیده شده توسط تک‌لایه‌ها بیان شده است.[۹]

در نوشتاری در سال ۱۹۷۱، مقاومت در برابر تبخیر (r_m) برای چند ماده‌ی مختلف طی آزمایش‌هایی به دست آورده شد،[۴۲] که میزان $۳۰۰ s.m^{-۱}$، بیشترین میزان مقاومتی بود که در پژوهش اخیر گزارش شده است. در پژوهش دیگری نیز در همان سال،[۴۳] همین مقدار به‌عنوان بیشینه‌ی میزان مقاومت تک‌لایه‌ها (در حالت عدم حضور باد) استفاده شده است. با توجه به مطالعات اندکی که درخصوص تأثیر باد در میزان مقاومت تک‌لایه‌ها در برابر تبخیر انجام شده است، در پژوهش حاضر از روش مک‌ژانت و همکارانش (۲۰۰۸)،[۳۲] استفاده شده است. لذا در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به نتایج مطالعات پیشین،[۳۲،۶] یک رابطه‌ی خطی ساده برای تعیین میزان مقاومت تک‌لایه‌در برابر تبخیر ارائه شده است (رابطه‌ی ۵):

$$r_m = ۳۰۰ - ۴۴/۷۴U \quad \text{برای} \quad U < ۶/۷۱ \qquad (۵)$$

که در آن، r_m مقاومت تک‌لایه در برابر تبخیر $(s.m^{-۱})$ و U سرعت باد $(m.s^{-۱})$ هستند.

رابطه‌ی ۵، برای سرعت‌های باد کمتر از $۶/۷۱ m.s^{-۱}$ معتبر است و برای مواقع وزش باد با سرعت بیش از $۶/۷۱ m.s^{-۱}$، با توجه به عدم تأثیر تک‌لایه‌ها در میزان تبخیر،[۶] میزان مقاومت تک‌لایه در برابر تبخیر برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

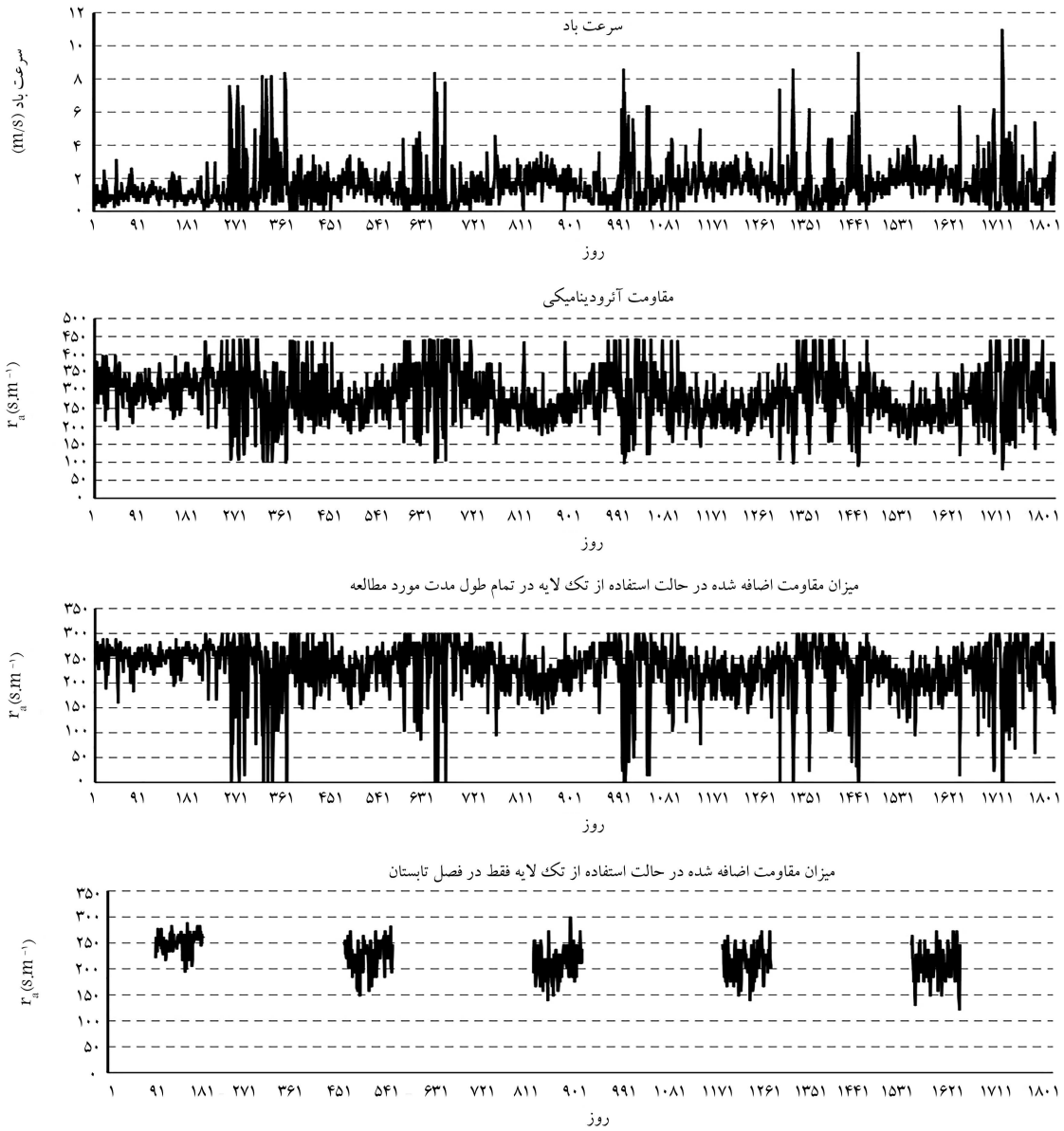
با توجه به مطالعات اشاره شده و همچنین عدم وجود مطالعات آزمایشگاهی در خصوصیات مواد تک‌لایه در داخل کشور، برای انجام پژوهش حاضر، ماده‌ی تک‌لایه‌یی با بیشینه‌ی مقاومت $۳۰۰ (s.m^{-۱})$ (با کاهش خطی مقاومت در برابر باد) مطابق رابطه‌ی ۵ مطالعه شده است که میزان مقاومت آن در برابر تبخیر کاملاً به جنس ماده‌ی تک‌لایه وابسته است و مقادیر در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر بر پایه‌ی استفاده از ستیل الکل به‌عنوان تک‌لایه بوده است. براساس مطالب طرح شده، برای محاسبه‌ی میزان تبخیر روزانه با اعمال مقاومت اضافه شده در رابطه‌ی ۱ از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است:

$$E = \frac{۱}{\lambda}(\frac{\Delta_w(Q^* - N) + ۸۶۴۰۰\rho_a C_a(e_w^* - e_a)/(r_a + r_m)}{\Delta_w + \gamma} \qquad (۶)$$

که در آن، تمامی پارامترهای استفاده شده مشابه رابطه‌ی ۱ بوده و فقط پارامتر مقاومت تک‌لایه (r_m) اضافه شده است. میزان تبخیر در دو حالت استفاده از تک‌لایه در تمام طول سال و نیز فقط در فصل تابستان با استفاده از رابطه‌ی ۶ محاسبه شد. توضیح اینکه در تمامی حالت‌ها فرض شده است که پوشش تک‌لایه در تمام مدت مدل‌سازی به طور مداوم روی سطح مخزن حاضر باشد، که این مطلب مستلزم شارژ مجدد دوره‌یی (۱ تا ۳ روز یک‌بار بر حسب لزوم) به‌صورت منظم است. به جهت اطمینان از حضور دائم تک‌لایه بر سطح آب مخزن فرض شد که پخش تک‌لایه‌ها در دوره‌ی مدت مطالعه به‌صورت روزانه (روزی یک‌مرتبه) انجام شود.

۳. نتایج

مدل‌سازی میزان تبخیر روزانه‌ی سد استقلال میناب برای دوره‌ی ۵ ساله منتهی به سال ۱۳۹۴ (سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۴) و در سه حالت پایه (بدون پوشش تک‌لایه)، استفاده از پوشش تک‌لایه در تمام سال و استفاده از پوشش تک‌لایه فقط



شکل ۲. نمودارهای سری زمانی سرعت باد، مقاومت آئرودینامیکی و میزان اضافه مقاومت ناشی از استفاده از پوشش‌های تک‌لایه.

در فصل تابستان انجام شد. در ادامه، برخی از پارامترهای ورودی (شامل سرعت باد، مقاومت آئرودینامیکی و میزان اضافه مقاومت ناشی از استفاده از تک‌لایه) و همچنین نتایج مطالعه ارائه شده است. توضیح اینکه محورافقی در تمامی نمودارهای ارائه شده، نشان‌دهنده‌ی شماره‌ی روز و شمارش شده به طور ممتد و بلافصل از ابتدای دوره (ابتدای سال ۱۳۹۰) تا پایان دوره (انتهای سال ۱۳۹۴) است (مدت مورد مطالعه به طورکلی برابر ۱۸۲۶ روز است).

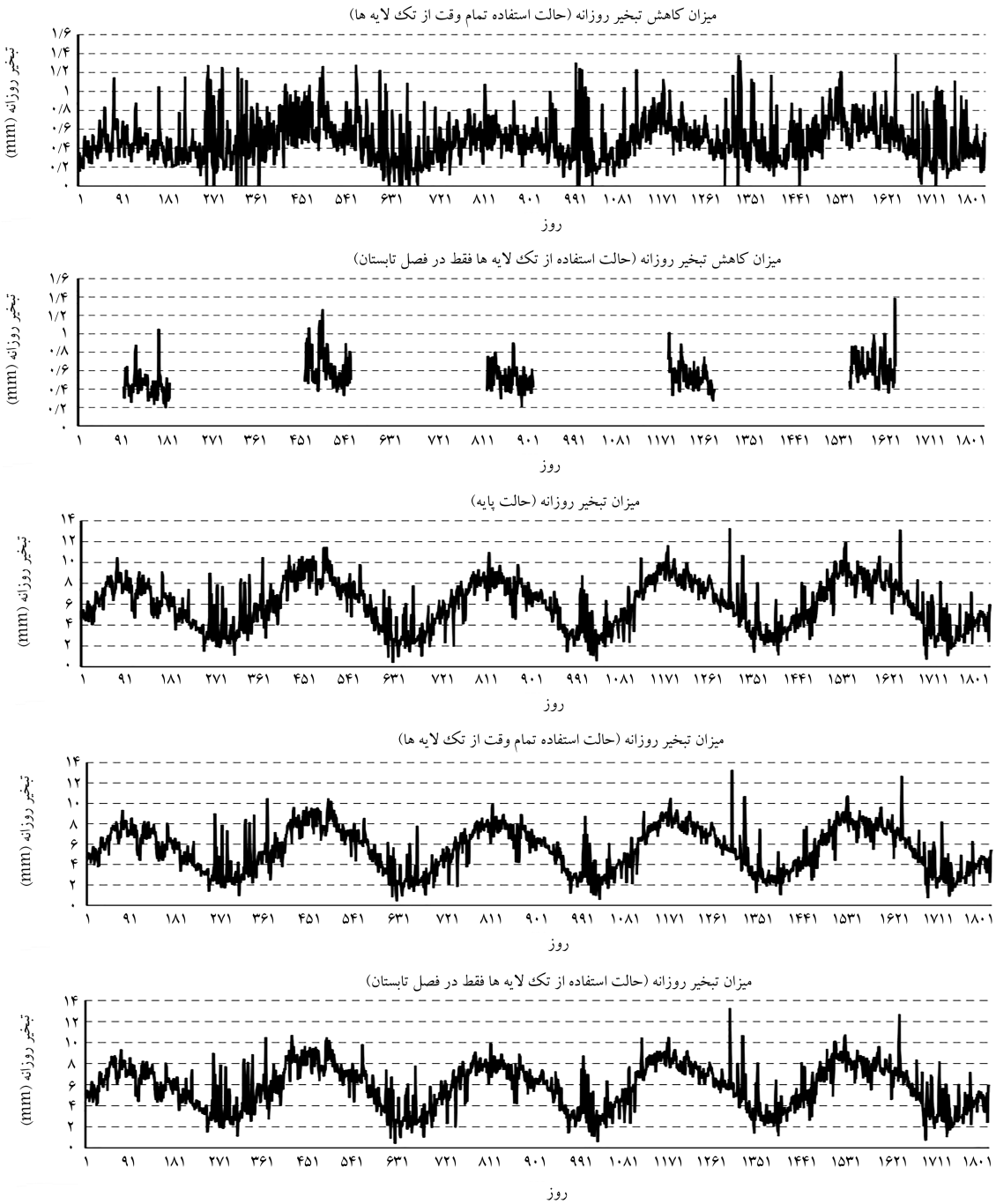
نمودارهای سری زمانی برخی از پارامترهای ورودی، شامل: سرعت باد، مقاومت آئرودینامیکی و میزان اضافه مقاومت ناشی از استفاده از تک‌لایه در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. نمودارهای سری زمانی مقدار تبخیر روزانه‌ی سد استقلال میناب در حالت‌های پایه‌ی استفاده از تک‌لایه در تمام مدت مطالعه و استفاده از تک‌لایه در فصول تابستان مدت مورد مطالعه و همچنین نمودارهای سری زمانی کاهش تبخیر ناشی از استفاده از تک‌لایه‌ها در حالت‌های مذکور در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.

۱.۳. جمع‌بندی

جمع‌بندی نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر، به طور خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است. این توضیح لازم است که حالت پایه، حالت عادی و بدون پوشش است حالت ۱، حالت استفاده از تک‌لایه در تمام مدت مطالعه و حالت ۲ نیز، حالت استفاده از تک‌لایه فقط در فصول تابستان در مدت زمان مورد مطالعه است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به جدول ۴، استفاده از تک‌لایه‌ها در حالت استفاده‌ی تمام وقت (حالت ۱)، به طور میانگین در ۵ سال مدت مطالعه، به میزان ۸٫۱٪ کاهش سالیانه‌ی تبخیر را نتیجه داده است. این میزان کاهش تبخیر در سال ۱۳۹۴ کمترین مقدار (۶٫۸٪)



شکل ۳. میزان کاهش تبخیر و تبخیر روزانه سد استقلال میناب در حالات مختلف.

و در سال ۱۳۹۱ بیشترین مقدار (۸٫۳٪) را در مدت مورد مطالعه دارد. در صورت استفاده از تک‌لایه فقط در فصول تابستان مدت مورد مطالعه (حالت ۲)، میزان میانگین کاهش سالیانه‌ی تبخیر ۲٫۷٪ بوده است. همچنین در حالت اخیر، کمترین میزان کاهش تبخیر در سال ۱۳۹۴ (۱٫۲۶٪) و بیشترین میزان در سال ۱۳۹۱ (۳٫۱٪) رخ داده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، سال‌های وقوع بیشینه و کمینه‌ی مقادیر کاهش تبخیر در هر دو حالت مورد بررسی، یکسان هستند.

جهت عملیاتی‌تر ساختن نتایج مطالعه‌ی حاضر، میزان کاهش تبخیر سالیانه با استفاده از تک‌لایه‌ها در حالت‌های مورد مطالعه برای سد استقلال میناب، در جدول ۵ ارائه شده است. توضیح اینکه ارقام ذکر شده در جدول ۵ برای حالتی است که حجم مخزن تقریباً در حالت نرمال و سطح دریاچه حدود $20\ km^2$ بوده است. در صورتی که حجم آب مخزن کمتر از حالت نرمال باشد، به تناسب مساحت دریاچه، میزان کاهش تبخیر به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

مقادیر ذکر شده در جدول ۵، به ویژه در خصوص تأمین آب شرب (که یکی از مهم‌ترین اهداف سد استقلال میناب نیز هست)، قابل توجه و تأثیرگذار هستند و پس از انجام مطالعات امکان‌سنجی دقیق اقتصادی و فنی و همچنین بررسی آثار مواد تک‌لایه‌ها در کیفیت آب مخزن می‌تواند به‌عنوان روشی مفید جهت کاهش تبخیر استفاده شود.

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج حالت‌های مختلف مطالعه.

سال	میزان تبخیر		مقدار کاهش تبخیر در حالت ۱ نسبت به حالت پایه (درصد)	میزان تبخیر در حالت ۲ (میلی‌متر)	مقدار کاهش تبخیر در حالت ۲ نسبت به حالت پایه (درصد)
	حالت پایه (میلی‌متر)	در حالت ۱ (میلی‌متر)			
۱۳۹۰	۲۰۲۹	۱۸۷۲	۷٫۸	۱۹۷۹	۲٫۴۶
۱۳۹۱	۲۲۲۶	۲۰۴۲	۸٫۳	۲۱۵۷	۳٫۱
۱۳۹۲	۲۱۲۴	۱۹۵۷	۷٫۹	۲۰۷۳	۲٫۴۱
۱۳۹۳	۲۲۷۱	۲۰۸۶	۸٫۲	۲۲۱۷	۲٫۳۸
۱۳۹۴	۲۲۲۶	۲۰۵۷	۶٫۸	۲۱۹۸	۱٫۲۶
مجموع	۱۰۹۱۶	۱۰۰۳۲	-	۱۰۶۲۴	-
متوسط	۲۱۸۳	۲۰۰۶	۸٫۱	۲۱۲۵	۲٫۷

جدول ۵. خلاصه‌ی میزان کاهش تبخیر با استفاده از تک‌لایه‌ها در مخزن سد استقلال میناب.

حالت استفاده	میانگین میزان کاهش تبخیر سالیانه	
	(میلی‌متر)	(میلیون‌متر مکعب)
حالت ۱ (استفاده در تمام طول سال)	۱۷۷	۳٫۵۴
حالت ۲ (استفاده فقط در فصول تابستان)	۵۸	۱٫۱۶

۱.۴. تحلیل اقتصادی

در بخش حاضر، یک تحلیل اقتصادی اولیه جهت برآورد تقریبی از هزینه‌های لازم به منظور اجرای طرح حاضر و طرح‌های مشابه انجام شده است. جهت برآورد هزینه‌ها باید از یکی از محصولات تجاری شبیه به تک‌لایه‌ی مورد استفاده در پژوهش حاضر استفاده کرد، به همین جهت محصول WaterSavr که متشکل از ستیل الکل، استریل الکل و کلسیم هیدروکسید است، برای برآورد هزینه‌ها انتخاب و این فرضیات با توجه به مطالعات پیشین در نظر گرفته شده است:

۱. به ازاء هر هکتار از مساحت مخزن، باید روزانه از ۳۵۰ گرم پودر WaterSavr استفاده شود که هزینه‌ی تهیه‌ی آن، ۱۰ دلار به ازاء هر کیلوگرم است.[۳۲]

۲. عملیات تجدید پخش تک‌لایه‌ی WaterSavr، باید هر ۱ تا ۳ روز تجدید شود. در مطالعه‌ی حاضر جهت اطمینان از حضور تمام وقت WaterSavr بر روی آب مخزن فرض شد که پخش به‌صورت روزانه انجام شود.

۳. برای پخش میزان ذکرشده‌ی تک‌لایه‌ی WaterSavr، از ۱۰ دستگاه پخش‌کننده‌ی مدل JV-۲۲۵ استفاده شود. پخش‌کننده‌ی JV-۲۲۵، باید بر روی قایق نصب شود و به دو نفر نیروی کار نیاز دارد. مطابق ادعای سازنده‌ی دستگاه مذکور، توانایی پوشش‌دهی آن حدود ۶۰ هکتار از سطح مخزن در هر ساعت است.[۴۴] قیمت هر دستگاه حدود ۳۰۰۰ دلار و هزینه‌ی هر دستگاه قایق موتوری نیز برابر با ۱۰۰۰۰ دلار در نظر گرفته شد. ضمناً عمر دستگاه‌های پخش‌کننده و قایق‌ها در هر دو حالت، ۱۰ سال در نظر گرفته شد. همچنین هزینه‌ی خرید تجهیزات مذکور طی ۱۰ سال مدت عمرشان به طور مساوی مستهلک شد.

۴. تعداد ۲۰ نفر نیروی انسانی تمام‌وقت برای انجام عملیات پخش و نگهداری در حالت اول و ۲۰ نفر نیروی انسانی فصلی (فقط فصل تابستان) برای حالت دوم نظر گرفته شوند.

۵. هزینه‌های حمل و نقل، انبارش، تعمیرات، سوخت پخش‌کننده‌ها و غیره نیز حدود ۲۰٪ هزینه‌ی سالیانه‌ی تهیه‌ی تک‌لایه فرض شده است.

در صورتی که تراز مخزن حدوداً در حالت نرمال ثابت باشد، محاسبات هزینه‌های اجرای تک‌لایه‌ها بر سطح مخزن در دو حالت ذکر شده، در جدول ۶، ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده و میزان کاهش تبخیر پیش‌بینی شده برای هر حالت، هزینه‌ی کاهش تبخیر به روش ذکر شده برای حالت اول، برابر با ۰٫۹۹ دلار به ازاء هر مترمکعب کاهش میزان تبخیر آب و برای حالت دوم، برابر با ۰٫۸۱ دلار به ازاء هر مترمکعب کاهش میزان تبخیر آب خواهد بود. همان‌گونه که ذکر شد، تأمین آب شرب و کشاورزی، اصلی‌ترین اهداف ساخت سد استقلال میناب هستند. البته با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر، تأکید متولیان آب منطقه به استفاده از آب سد استقلال جهت تأمین آب شرب شهر بندرعباس بوده است. به منظور انجام یک برآورد اولیه برای بررسی اقتصادی‌بودن طرح مذکور، هزینه‌ی اجرای طرح مذکور با هزینه‌ی استحصال آب به روش شیرین‌سازی آب دریا مقایسه شد. هزینه‌ی شیرین‌سازی آب دریا در حدود ۱٫۲ تا ۱٫۵ دلار به ازاء هر متر مکعب بود؛[۳۲] بنابراین استفاده از پوشش‌های تک‌لایه‌یی در مخزن سد استقلال میناب می‌تواند مقرون به صرفه باشد، هر چند جهت بررسی دقیق‌تر، نیاز به آزمایش در محل مخزن ضروری به نظر می‌رسد. درخصوص مصارف کشاورزی، با توجه به تعرفه‌ی آب‌در حال حاضر (۶۸۱ ریال به ازاء هر مترمکعب برای محصولات زراعی و ۳۳۳ ریال به ازاء هر مترمکعب برای محصولات باغی در دشت میناب)،[۴۵] اجرای این طرح فعلاً اقتصادی به نظر نمی‌رسد.

روش‌های کاهش تبخیر در مخازن سد را می‌توان به دو دسته‌ی فیزیکی (نظیر پوشش‌های شناور و سایه‌انداز) و شیمیایی (نظیر پوشش‌های تک‌لایه‌یی) تقسیم‌بندی کرد. به‌طورکلی، بازده کاهش تبخیر روش‌های فیزیکی بیشتر از روش‌های شیمیایی است. هزینه‌ی سرمایه‌گذاری روش‌های فیزیکی بیشتر از روش‌های شیمیایی است، اما هزینه‌های تعمیرات و نگهداری در روش‌های شیمیایی بیشتر است. روش‌های فیزیکی معمولاً همواره بر روی مخزن به طور ثابت استفاده می‌شوند، در حالی که

جدول ۶. هزینه‌ی اجرای پوشش تک‌لایه‌یی بر روی مخزن سد استقلال میناب در حالت نرمال.

شرح عملیات	مقادیر لازم			هزینه‌های سالیانه (هزار دلار)		
	حالت ۱	حالت ۲	واحد	هزینه‌ی واحد	حالت ۱	حالت ۲
تهیه‌ی تک‌لایه	۲۵۵/۵	۶۵/۱	TON/year	۱۰	۲۵۵۵	۶۵۱
تهیه‌ی قایق و پخش‌کننده	۱۰	۱۰	unit	۱۳	۱۳	۱۳
نیروی انسانی	۲۰	۲۰	person	۲۰	۴۰۰	۱۵۰
انبارش، تعمیرات، سوخت پخش‌کننده‌ها و غیره	-	-	-	-	۵۲۸	۱۲۸
مجموع	-	-	-	-	۳۴۹۶	۹۴۲

استفاده از روش‌های شیمیایی می‌تواند در زمان‌های خاصی صورت پذیرد (نظیر حالت دوم ـ فصل تابستان ـ در مطالعه‌ی حاضر). با توجه به پراکندگی نتایج به‌دست آمده در مطالعات گوناگون درخصوص عملکرد روش‌های مختلف در کاهش تبخیر و همچنین وابسته بودن نتایج ذکر شده به منطقه‌ی موردمطالعه، مقایسه‌ی دقیق بین روش‌های مختلف کاهش تبخیر نیازمند آزمایش و محاسبات روش‌های گوناگون در منطقه و تابع شرایط مخزن است.

پانوشت‌ها

1. monolayers
2. Cetyl alcohol
3. Stearyl alcohol
4. Oleoyl alcohol
5. Amphiphile
6. Fitzgerald
7. Knights
8. Piri
9. Hexadecanol
10. Octadecanol
11. Gallego-Elvira
12. Verlee
13. Zeinalzadeh
14. national sanitation foundation (NSF)
15. Wixson
16. Babu, P.S.
17. McJannet

منابع (References)

1. Committee of Collaborators, "Investigating changes in water sector legislation and its impact on groundwater resources", Deputy Head of Infrastructure Research, No. 14309 (2015).
2. Gaines, G.L. "Insoluble monolayers at liquid-gas interfaces", Interscience Publishers, New York (1966).
3. Chang, S., McClanahan, M. and Kabler, P. "Effect of bacterial decomposition of hexadecanol and octadecanol in monolayer films on the suppression of evaporation loss of water", Retardation of Evaporation by Monolayers: Transport Processes, pp. 119-131 (1962).
4. Brooks, J.H. and Alexander, A.E. "Losses by evaporation and solution from monolayers of long-chain aliphatic alcohols", In Proceedings of the 3ed International Congress of Surface Activity, 4, pp. 196-201 (1960).
5. Archer, R.J. and LaMer, V.K. "The effect of monolayers on the rate of evaporation of water", *Annals of the New York Academy of Sciences*, **58**(1), pp. 807-829 (1954).
6. Fitzgerald, L.M. and Vines, R.G. "Retardation of evaporation by monolayers: Practical aspects of the treatment of large water storages", *Australian Journal of Applied Science*, **14**(4), pp. 340-346 (1963).
7. Grundy, F. "Some problems of maintaining a monomolecular film on reservoirs affected by winds", In Retardation of Evaporation by Monolayers: Transport Processes, Academic Press New York, pp. 213-218 (1962).
8. Garrett, W.D. "A novel approach to evaporation control with monomolecular films", *Journal of Geophysical Research*, **76**(21), pp. 5122-5123 (1971).
9. Barnes, G.T. "The potential for monolayers to reduce the evaporation of water from large water storages", *Agricultural Water Management*, **95**(4), pp. 339-353 (2008).
10. Rideal, E.K. "On the influence of thin surface films on the evaporation of water", *The Journal of Physical Chemistry*, **29**(12), pp. 1585-1588 (1925).
11. Langmuir, I. and Vincent J.S. "Rates of evaporation of water through compressed monolayers on water", *Journal of the Franklin Institute*, **235**(2), pp. 119-162 (1943).
12. La Mer, V.K., Healy, T.W. and Aylmore, L.A.G. "The transport of water through monolayers of long-chain n-paraffinic alcohols", *Journal of Colloid Science*, **19**(8), pp. 673-684 (1964).
13. Knights, S. "Reducing evaporation with chemical monolayer technology", *Aust. Cottongrower*, **26**, pp. 32-33 (2005).
14. Piri, M., Hesam, M., Dehghani, A.A. and et al. "Determining of effect of using heavy alcohols on reduction of evaporation in water storage surface", *J. Agricultural Sci. and Natural Resources*, **16**(2), pp. 284-293 (In Persian) (2009).
15. Gugliotti, M., Baptista, M.S. and Politi, M.J. "Reduction of evaporation of natural water samples by

monomolecular films", *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **16**(6A), pp. 1186-1190 (2005).

16. Gallego-Elvira, B., Martinez-Alvarez, V., Pittaway, P. and et al. "Impact of micrometeorological conditions on the efficiency of artificial monolayers in reducing evaporation", *Water Resources Management*, **27**(7), pp. 2251-2266 (2013).
17. Verlee, D. and Zetland, D. "Extending water supply by reducing reservoir evaporation: A case study from wichita falls, Texas", *In Proceedings of Mine Water Solutions in Extreme Environments*, Vancouver, Canada (2015).
18. Babu, P.S., Eikaas, H.S., Price, A. and et al. "Reduction of evaporative losses from tropical reservoirs using an environmentally safe organic monolayer", *Singapore International Water Week*, Singapore (2010).
19. Zeinalzadeh, K. and Eskandari, S. "Study of the effect of chemical methods on reducing evaporation from lake Urmia", *2nd International Conference on Sustainable Development, Strategies and Challenges with a Focus on Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism*, Tabriz, Iran (In Persian) (2016).
20. Kavianpour, M., kiani, A. and Nozari, N. "Reduce water evaporation rates using Jojoba Alcohol", 8th International Civil Eng. Congress, Shiraz, Iran (In Persian) (2009).
21. Noazari, N. and Miri, M. "Comparison of aquatin and waterSavr with jojoba plant base coating to reduce evaporation in water Resources", *National Conference Water Crisis in Iran and the Middle East*, Shiraz, Iran (in Persian) (2015).
22. Panjabi, K., Rudra, R. and Goel, P. "Evaporation retardation by monomolecular layers: An experimental study at the aji reservoir (India)", *Open Journal of Civil Engineering*, **6**(3), pp. 346-357 (2016).
23. Sutherland, K.L. "Economic methods of controlling evaporation of water", *Research and Science and Its Application to Industry*, **10**(5), pp. 198-204 (1957).
24. McArthur, J.K.H., "Fatty alcohols for water conservation", *Proceedings of the 3rd International Congress of Surface Activity*, Mainz, Germany, pp. 595-598 (1960).
25. Vines, R.G. "Reducing evaporation with cetyl alcohol films: A new method of treating large water storages", *Australian Journal of Applied Science*, **11**, pp. 200-204 (1960).
26. Walter, J. "The use of monomolecular films to reduce evaporation", *International Union of Geodesy and Geophysics*, pp. 39-48 (1963).
27. Craig, I., Green, A., Scobie, M. and et al. "Controlling evaporation loss from water storages", National Centre for Engineering in Agriculture Publication, 1000580/1, pp. 43-45 (2005).
28. Crow, F.R. "The effect of wind on evaporation suppressing films and methods of modification", International Union of Geodesy and Geophysics Assembly, Berkeley, California, pp. 26-37 (1963).
29. Hamburg, G.R. "Water loss investigations, Lake Cachuma", US Bureau of Reclamation, Chemical Engineering Laboratory, report no.SI-33 (1962).
30. Roberts, W.J. "Reducing water vapor transport with monolayers", Retardation of Evaporation by Monolayers: Transport Processes, pp. 193-201 (1962).
31. Committee of Collaborators "Water-loss investigations: Lake Hefner evaporation reduction investigations", U.S. Bureau of Reclamation, pp. 1-80 (1959).
32. McJannet, D., Cook, F., Knight, J. and et al. "Evaporation reduction by monolayers: overview, modelling and effectiveness", Urban Water Security Research Alliance Technical, Report 6, pp. 1-32 (2008).
33. Norkrans, B. "Surface microlayers in aquatic environments", In Advances in Microbial Ecology, Springer US, pp. 51-85 (1980).
34. Münster, U., Heikkinen, E. and Knulst, J. "Nutrient composition, microbial biomass and activity at the air-water interface of small boreal forest lakes", *Hydrobiologia*, **363**(1-3), pp. 261-270 (1997).
35. Jennison, I. "Methods for reducing evaporation from storages used for urban water supplies", GHD Department of Natural Resources and Mines Queensland Technical Report, pp. 2-18 (2003).
36. Wixson, B.G. "Studies on the ecological impact of evaporation retardation monolayers", Texas Water Resources Institute, pp. 29-86 (1966).
37. Winter, M. "Predicting the optimum time to apply monolayers to irrigation channels", M.sc Thesis, University of Southern Queensland, pp. 24 (2012).
38. Monteith, J.L. "Evaporation and environment", In Symp. Soc. Exp. Biol., 19, pp. 205-234 (1965).
39. De Bruin, H.A.R. "Temperature and energy balance of a water reservoir determined from standard weather data of a land station", *Journal of Hydrology*, **59**(3-4), pp. 261-274 (1982).
40. Calder, I.R. and Neal, C. "Evaporation from saline lakes: a combination equation approach", *Hydrological Sciences Journal*, **29**(1), pp. 89-97 (1984).
41. MacRitchie, F. "Role of monolayers in retardation of evaporation", *Nature*, **218**(5142), pp. 669-670 (1968).
42. Navon, U. and Fenn, J.B. "Interfacial mass and heat transfer during evaporation: II. Effect of monomolecular films on natural convection in water", *AIChE Journal*, **17**(1), pp. 137-140 (1971).
43. Mansfield, W.W. "Influence of monolayers on the natural rate of evaporation of water", *Nature*, **175**, pp. 247-249 (1955).
44. Choosing the Right Applicator for WaterSavr, Retrieved from http:// www.flexiblesolutions.com/ products/ watersavr/documents/ws_brochure08.pdf (n.d.).
45. Sadatjahromi, A., Najibi, S., Jamalzadeh, A. and et al. "A comparative study of the surface water selling fee with the cost of water extracted from assistive canal wells in the irrigation and drainage network of minab plain", *4th International Conference on Applied Research in Agricultural Science*, Tehran, Iran (In Persian) (2016).