فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
بهار ۱۳۸۶، شماره‌ی سی و هفتم، ص. ۴۹-۵۶

بررسی اثر سرعت وزش باد بر تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه سیستان به روش دالتونی

پیمان دانش‌کارآراسته (استادیار)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
مسعود تجریشی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
مجید میرلطیفی (استادیار)
دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

روش تبادل جرم یکی از روش‌های متداول تخمین تبخیر از سطح آزاد آب است که در این تحقیق شکل دالتونی آن مورد توجه قرارگرفت. با استفاده از ییلان حجمی معلوم مخزن چاه نیمه واقع در محدوده‌ی سیستان، به واسنجی و برآورد ضریب معادله دالتون به‌صورت تجربی برای مخزن مزبور اقدام شد. مراحل توسعه‌ی مدل آماری، صحت‌یابی و تحلیل حساسیت با آزمون‌های متداول به انجام رسید. نتایج نشان داد که تغییر ۱۰± درصد در مقدار این ضریب، کم‌تر از ۱۰± درصد تغییر در حجم ذخیره‌ی مخزن به‌وجود آورده است. ضریب دالتونی در سال‌هایی که‌هامون‌ها فاقد آب‌اند از آستانه‌ی سرعت باد چهار متر بر ثانیه و بیشتر مستقل از سرعت باد بوده و در سرعت‌های کم‌تر تابعی غیرخطی از این کمیت جوی است. در حالی که این آستانه برای سال‌هایی که‌هامون‌ها آب دارند، معادل شش متر بر ثانیه برآورد شد.

۱. مقدمه

تبادل جرم[۱] عبارت است از انتقال ماده در محیط در مقیاس مولکولی.[۱] به‌عنوان مثال هنگامی که آب یک استخر یا برکه از سطح آن تبخیر و به اتمسفر دارای جریان مجاور وارد می‌شود، مولکول‌های بخار آب از هوای مجاور تا بخش اصلی توده هوا منتشر می‌شود. عبور هوای خشک از روی سطوح آب سبب تبخیر و افزایش محتوای مولکول‌های بخار آب در هوا خواهد شد که این عمل را مرطوب شدن[۲] می‌نامند. برعکس در صورتی که هوای خیلی مرطوب از مجاورت سطوح خشک وکم‌رطوبت عبور کند، سبب ریزش و کاهش محتوای رطوبتی هوا خواهد شد که این فرایند را خشک شدن[۳] هوا می‌نامند. در هر دو حالت، پخشیدگی (توزیع) مولکولی بخار آب به وقوع می‌پیوندد.[۱]

نرخ تبادل جرم بین دو فاز مایع و بخار بستگی به ضریب تبادل جرم[۴] دارد که بیان‌گر میزان انحراف از تعادل است. هرچه ضریب تبادل جرم بزرگ‌تر باشد، تعادل سریع‌تر حاصل، و تبادل جرم سریع‌تر متوقف می‌شود. بایستی بین پخشیدگی مولکولی که فرایند بسیار کندی است با اختلاط سریع در اثر یک محرک مکانیکی یا حرکت همرفتی سیال[۵] (که از اختلاف حرارت یا هر عامل خارجی دیگر ناشی می‌شود) تفاوت قائل شد. اختلاط مکانیکی سبب ایجاد جریانات چرخشی سریع[۶] و پیچه‌های کم و بیش بزرگی[۷] می‌شود که از خصوصیات جریانات آشفته است. انتشار مواد در محیط بدین شیوه را پخشیدگی پیچه‌یی[۸] می‌نامند که با پخشیدگی مولکولی کاملاً متفاوت است. از آنجا که حرکت پیچه‌ها بسیار سریع است، تبادل جرم در ناحیه‌ی آشفته بسیار سریع‌تر از ناحیه‌ی آرام که پخشیدگی مولکولی در آن صورت می‌گیرد، روی می‌دهد. در نتیجه‌ی حرکت پیچه‌ها، گرادیان غلظت در لایه مرزی آشفته به مراتب کم‌تر از لایه‌ی مرزی آرام است.

روش‌های تبادل جرم را می‌توان به سه گروه عمده: روش‌های دالتونی[۹]، روش‌های آئرودینامیکی[۱۰] و روش‌های شار پیچه‌یی[۱۱] تقسیم کرد. در این نوشتار ضمن واسنجی مدل دالتونی برای برآورد تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه سیستان، نحوه‌ی تأثیر وزش باد بر ضریب این معادله در منطقه مورد بررسی قرارگرفته است.

۱.۱. روش دالتونی

طبق قانون دالتون، و با فرض این که انرژی حرارتی لازم برای تبخیر در سطح تبخیر فراهم است، نرخ تبخیر از سطح مایع به اختلاف فشار بخار سطح مایع و اتمسفر مجاور بستگی دارد و در اثر گردش هوا، شدت تبخیر افزایش می‌یابد. طبق بررسی‌های دالتون بلافاصله در مجاورت سطح آب، لایه‌یی از اتمسفر به وجود می‌آید که دمای آن معادل دمای سطح آب است و این لایه از اتمسفر از بخار آب اشباع می‌شود. این

Archive of SID

www.SID.ir

لایه که به لایه‌ی مرزی آرام[12] موسوم است، ضخامت بسیار ناچیزی داشته، انتقال و تبادل بخار در آن به‌صورت توزیع مولکولی صورت می‌پذیرد. بعد از این لایه، لایه‌ی مرزی آشفته[13] قرار دارد که در آن جریان توده‌یی اتمسفر برقرار است. لایه‌ی اخیر که مسلماً نه اشباع شده است و نه درجه حرارتی معادل سطح آب دارد، سبب می‌شود که بین دولایه اختلاف فشار بخار به وجود آید. در صورت تداوم این اختلاف فشار، انرژی حرارتی یاد شده موجب تداوم فرایند تبخیر از سطح می‌شود. نرخ تبخیر به اختلاف محتوای رطوبتی دولایه یا به اختلاف فشار بخار بین دولایه بستگی دارد.

از طرف دیگر، اختلاف سرعت بین لایه‌های مرزی آرام و آشفته سبب ایجاد جریانات پیچه‌یی می‌شود. ابعاد پیچه‌ها به‌میزان اختلاف سرعت بین دولایه بستگی دارد و در اثر وجود پیچه‌ها، تبادل جرم به سرعت روی می‌دهد. از آنجا که لایه‌ی آرام عموماً ساکن است یا دارای سرعتی بسیار کم‌تر از سرعت جریان در لایه‌ی آشفته است، اختلاف سرعت بین دولایه در واقع با سرعت جریان هوا در لایه‌ی آشفته برابر است.

هرچه سرعت جریان هوا (باد) بیشتر باشد، پیچه‌ها و آشفتگی گسترش یافته، انتقال بخار از فصل مشترک دولایه سریع‌تر و بیشتر صورت می‌پذیرد. بدین ترتیب با افزایش اختلاف فشار بخار، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان قانون دالتون را به‌صورت معادله‌ی ۱ بیان کرد:[2-5]

$$E = K.U.(VPD) \qquad (1)$$

که در آن: K، ضریب تناسب یا ضریب انتقال جرم $[M^{-1}LT^{2}]$؛ U، سرعت افقی باد در لایه‌ی آشفته $[LT^{-1}]$ وVPD، کمبود فشار بخار[14] $[ML^{-1}T^{-2}]$ است. این ضریب به شکل نیمرخ سرعت باد، ابعاد دریاچه، نوسانات سطح آب، پایداری اتمسفر و فشار، چگالی و لزجت هوا بستگی دارد.[6] در بسیاری از تحقیقات اشاره شده که بهتر است به جای سرعت، تابعی خطی یا غیرخطی از سرعت سیال به نام «تابع باد» در معادله جایگزین شود.[6-8]

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، مهم‌ترین فعالیت در مدل‌سازی تبخیر به روش تبادل جرم، تعیین ضریب تبادل جرم است. برای تعیین این ضریب، محققان مختلف با استفاده از روش‌های بیلان انرژی[15] و شار پیچه‌یی ابتدا تبخیر واقعی از سطح دریاچه یا مخزن را تعیین، و سپس ضریب مزبور را برآورد کرده‌اند.[6,7,9-14]

در تحقیقاتی که بر دریاچه‌ی مید[16] صورت گرفته از اطلاعات بیلان انرژی استفاده شده است.[6] برای این منظور در یک دوره‌ی یک‌ساله با گام زمانی ماهانه، اطلاعات مربوط به سرعت باد، دمای سطح آب و سایر اطلاعات هواشناسی مورد نیاز در یک ایستگاه شناور جمع‌آوری شده است.

در دریاچه‌ی هفنر[17] با استفاده از روش شار پیچه‌یی، ابتدا تبخیر واقعی برآورد شده و سپس ضریب معادله‌ی انتقال جرم محاسبه شده است.[9] در این تحقیقات، اطلاعات مربوط به شش روز با دوره‌های ۱۰ دقیقه‌یی مورد استفاده قرار گرفت.

با استفاده از روش بیلان انرژی، مدل انتقال جرم برای دریاچه‌ی پرتی[18] واسنجی شده است.[7] اطلاعات آب‌سنجی توسط لیمنوگراف‌هایی به‌صورت کاملاً پیوسته ثبت و برداشت شده و اطلاعات هواشناسی نیز توسط یک ایستگاه شناور با گام زمانی ۳۰ ثانیه ثبت و هر دو ساعت یک بار معادل‌گیری شده است. در این تحقیقات، رکوردهای سه سال ۱۹۶۳ تا ۱۹۶۵ مورد بهره برداری قرار گرفته است.

با استفاده از یک سیستم همبستگی پیچه‌یی[19]، تبخیر از سطح دریاچه‌ی بایوا[20] تعیین و تعدادی از مدل‌ها، از جمله مدل تبادل جرم دالتونی، واسنجی شد.[10] در این تحقیق، مناسب‌ترین شیوه‌ی برآورد تبخیر در سطح دریاچه‌ی مزبور، روش تبادل جرم دالتونی تعیین شد. برای ثبت اطلاعات، یک سیستم همبستگی گردبادی مورد استفاده در یک ایستگاه شناور مستقر شد، و در یک دوره‌ی مطالعات (جمعاً پنج روز در طول یک سال) به‌صورت تماماً خودکار با گام زمان ۰٫۱ ثانیه فقط به مدت ۱۰ دقیقه در هر روز به کار گرفته شد. با سیستم و روشی تقریباً مشابه در دریاچه توبا[21] ـ اندونزی، مدل تبادل جرم دالتونی واسنجی، و ضریب تبادل جرم تعیین شد.[12] در این تحقیق از ایستگاه شناوری که مجهز به سیستم همبستگی پیچه‌یی بود، فقط برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه استفاده شده و سایر اطلاعات مورد نیاز در یک ایستگاه زمینی کاملاً خودکار در نزدیکی ایستگاه شناور، ثبت و برداشت شده است. کل دوره‌ی آمار برداری محدود به ۴۲ روز در ماه‌های ژانویه و فوریه‌ی سال ۱۹۸۹ بوده است.

با توجه به بیلان حجمی یا بیلان آب، با معلوم بودن مقادیر جریانات ورودی و خروجی، می‌توان نوسانات سطح آب را به تلفات آب از مخزن مرتبط ساخت. با توجه به معادله‌ی دالتون در دوره‌های فاقد جریانات ورودی و خروجی به مخزن، تغییر سطح دریاچه ناشی از تلفات آب در مخزن (نظیر تبخیر و نشت از بستر به اعماق) است. در شرایطی که وزش باد ناچیز، یا اتمسفر ساکن باشد، ضخامت لایه‌ی مرزی آرام توسعه‌یافته و بلافاصله از بخار آب اشباع می‌شود. از آنجا که سازوکار انتقال توده‌یی بخار آب وجود ندارد، VPD کاهش یافته و فرایند تبخیر کند و نهایتاً متوقف می‌شود.[1و6] در نتیجه، بر طبق معادله‌ی دالتون (معادله‌ی ۱)، حاصل‌ضرب $U.(VPD)$ ناچیز یا صفر بوده، و تبخیر قابل صرف‌نظر است. لذا، تلفات از مخزن و تغییر سطح دریاچه فقط ناشی از نفوذ و نشت از بستر به اعماق خواهد بود. اگر تغییر حجم یا تغییر سطح دریاچه نسبت به $U.(VPD)$ رسم شود، در صورتی که عرض از مبداء ناچیز باشد، نشان‌دهنده‌ی ناچیز بودن نشت از بستر

Archive of SID

www.SID.ir

بوده و شیب منحنی، ضریب انتقال و تبادل جرم را ارائه می‌دهد. در نوشتار حاضر از همین اصل استفاده شده و براساس بیلان آبی معلوم در مخزن چاه نیمه، ضریب معادله‌ی دالتونی به‌صورت تجربی واسنجی و تعیین شده است.

۲.۱. منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی سیستان از جمله مناطقی است که رویدادهای حدی نظیر سیل و خشکسالی در آن به وفور حادث می‌شود. شرایط ویژه‌ی هیدرولیکی ـ هیدرولوژیکی و مکانی این منطقه حاکی از، خصوصیات منحصر به فرد آن است. قرارگرفتن در انتهای یک حوضه‌ی آبخیز بسته، سیستم پیچیده‌ی هیدرولیکی رودخانه هیرمند و تالاب‌های هامون، همچنین وزش بادهای ۱۲۰ روزه به همراه بارندگی ناچیز سالانه، دمای بالا و خاک با نفوذپذیری کم از یک سو، و محدودیت منابع آب زیرزمینی، منابع آب سطحی مشترک با کشور همسایه و عدم تسلط بر سرچشمه‌ی آن منابع آب در منطقه‌ی متعلق به ایران از سوی دیگر، شرایطی را به‌وجود آورده‌اند تا این ناحیه موقعیت ویژه‌یی داشته باشد.

با توجه به منابع آبی سطحی کنترل شده‌ی ورودی، محدودیت منابع آب زیرزمینی، و کمبود بارندگی در این بخش از کشور، «کمیت تبخیر» مهم‌ترین و ناشناخته‌ترین مؤلفه‌ی بیلان آب، است. نتایج مطالعات گذشته حاکی از عدم تطابق آماره‌ها و داده‌ها، مدل‌های آماری و زمین آماری و مدل‌های متداول برآورد تبخیر در این منطقه است.[۱۵-۱۷]

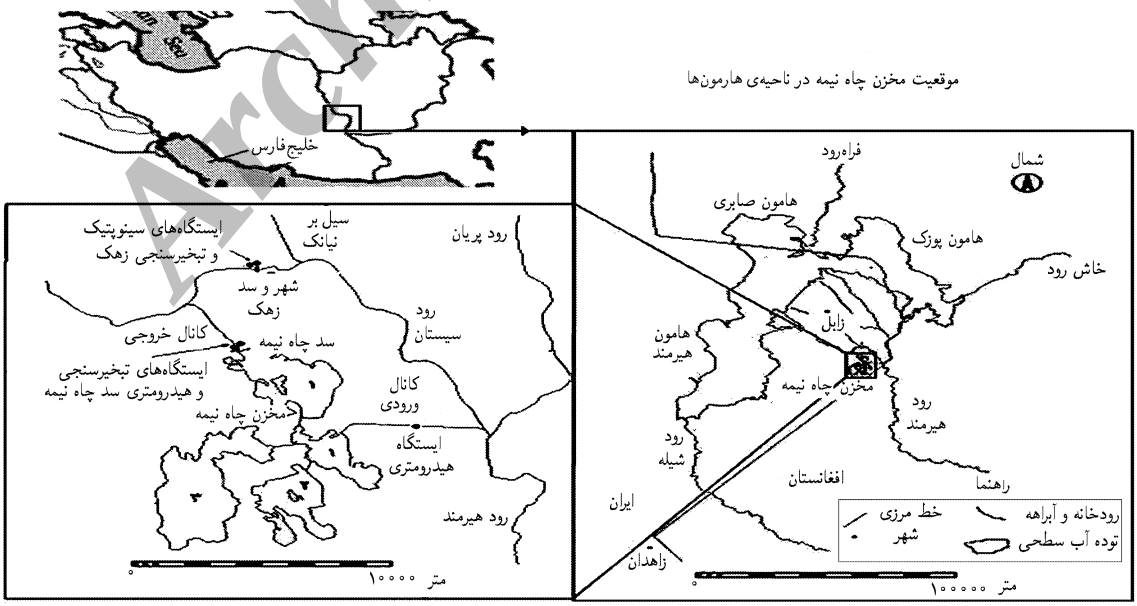
مخزن چاه نیمه که متشکل از سه گودال طبیعی سامان‌دهی شده است، در بخش شمالی دلتای رود هیرمند در منطقه سیستان ایران در محدوده‌ی جغرافیایی ′۴۵ °۳۰ تا ′۵۰ °۳۰ عرض شمالی، ′۳۸ °۶۱ تا ′۴۵ °۶۱ طول شرقی و ارتفاع متوسط ۵۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱).

این مخزن در سال‌های پر آبی پهنه‌ی واحدی را تشکیل می‌دهد و در سال‌های خشک، پهنه‌های آبی جداگانه‌یی به‌وجود می‌آورد. مخزن چاه نیمه با حداکثر گنجایش تقریبی ۶۳۰ میلیون متر مکعب و مساحتی بالغ بر ۴۷ کیلومتر مربع، منبع آب شرب شهرستان‌های زابل، زاهدان و سایر نواحی مسکونی سیستان را تشکیل می‌دهد و آب آبیاری حدود ۸۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی این منطقه را تأمین می‌کند. برآورد تبخیر از سطح این مخزن به روش بیلان حجمی، در گام‌های زمانی متفاوت و روش‌های مختلف تشکیل معادله‌ی بیلان مورد بررسی قرار گرفته است.[۱۶و۱۸و۱۹]

۳.۱. مطالعات تبخیرسنجی صورت گرفته در مخزن چاه نیمه

پژوهشگران مشخصات مخزن و اقلیم منطقه را مفصلاً تشریح، و به ازای گام زمان روزانه و برمبنای روش بررسی بیلان آب مدل دالتونی را واسنجی کردند.[۲۰و۱۶] در تحقیق مزبور دوره‌ی آماری ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۰ میلادی مورد استفاده قرارگرفت و ارتباط خطی میان تغییر ارتفاع مخزن با ضریب معادله‌ی دالتون برقرار شد که حداکثر خطایی معادل ۳/۵ میلی‌متر در روز داشت. ضریب تعیین روابط برازش داده شده[۲۰] بین ۷۱ تا ۸۶ درصد متغیر بود که حاکی از عدم تطابق رفتار مدل در ۱۴ تا ۲۹ درصد موارد است و ارتباطات غیرخطی برای تابع باد مورد توجه قرار نگرفت.

بررسی‌های بعدی نشان داد که با توجه به وجود و فقدان آب در هامون‌ها، می‌توان اطلاعات اقلیمی برداشت شده در منطقه، خصوصاً



شکل ۱. مخزن چاه نیمه و ایستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در منطقه.

Archive of SID
www.SID.ir

تبخیر از سطح آب را در دو گروه همگن آماری مربوط به سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ میلادی (مربوط به سال‌های خشکی که هامون‌ها فاقد آب‌اند HG۱) و سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۹ میلادی (مربوط به سال‌های نرمال ـ مرطوبی که هامون‌ها دارای آب می‌باشند HG۲) طبقه‌بندی کرد.[۱۸] بدین ترتیب آنها اطلاعاتِ دو گروه مزبور را تفکیک، و بیلان آب مخزن چاه نیمه را مجدداً بررسی کردند. آنها ضمن واسنجی ضریب تشت تبخیر برای مخزن مزبور، اثر وجود و فقدان آب در هامون‌ها بر ضریب تشت تبخیر مخزن چاه نیمه را بررسی کردند. در این بررسی مشخص شد که در سال‌هایی که هامون‌ها فاقد آب‌اند، ضریب تشت تبخیر از ۰٫۵ تا ۰٫۷۷ تغییر می‌کند. در حالی که این تغییرات در سال‌هایی که هامون‌ها آب دارند، بین ۰٫۵ تا ۰٫۵۶ است.

۲. مدل مخزن چاه نیمه

همان‌طورکه در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، در ساحل شمالی این مخزن (مجاور آبگیر خروجی در محل سد چاه نیمه) یک ایستگاه تبخیرسنجی احداث شده که با بیش از ۱۰ سال آمار روزانه مناسب برای انجام مطالعات، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. همچنین از دو ایستگاه سینوپتیک شهر زهک، و تبخیرسنجی پایاب سد زهک که در فاصله‌ی پنج‌کیلومتری در شمال مخزن و در مجاورت یکدیگر واقع شده‌اند، برای تدقیق، تصحیح، تکمیل و تطویل دوره‌ی آماری بهره‌گیری شده است. در تحقیق حاضر، دوره آماری نه ساله از ماه مه ۱۹۹۴ تا سپتامبر سال ۲۰۰۲ میلادی مد نظر قرار گرفته است که در این بازه زمانی می‌توان یک دوره‌ی کامل از سال‌های خشک، نرمال و مرطوب را مشاهده کرد.

با استفاده از اطلاعات بیلان حجمی مورد استفاده‌ی محققان[۱۸]، و مطابق با روش تبادل جرم دالتونی بین تغییر حجم مخزن در گام‌های زمانی ۵ و ۱۰ روزه، و گروه‌های همگن سال‌های آماری مشابه دسته‌بندی محققان[۱۸]، روابطی مانند معادلات ۲ و ۳ مورد بررسی قرار گرفت.

$$DV = V_{in} - V_{out} - K \cdot U \cdot (VPD) \qquad (۲)$$

$$DV = V_{in} - V_{out} - K \cdot U^{a} \cdot (VPD)^{b} \qquad (۳)$$

که در آنها: DV، تغییر حجم ذخیره‌ی مخزن؛ V_{in} و V_{out}، به‌ترتیب حجم جریانات ورودی و حجم جریانات خروجی سطحی همگی بر حسب میلیون مترمکعب (MCM)؛ U، سرعت متوسط وزش باد در ارتفاع دو متری (m/s)؛ VPD، کمبود فشار بخار (kPa)؛ a و b، متغیرهای معادلات‌اند که از طریق رگرسیون به دست می‌آیند و K، ضریب معادله‌ی دالتون است که بُعد آن در معادلات فوق $[M^{-1}L^{3}T^{-3}]$ است.

متغیر DV، با استفاده از اطلاعات تراز سطح آب در ابتدا و انتهای گام زمان، و با بهره‌گیری از منحنی تراز ـ سطح ـ حجم مخزن چاه نیمه[۱۷] تعیین و نیز برای تعیین کمبود فشار بخار از معادله‌ی ویس[۲۲] [۲۱] استفاده

جدول ۱. خطای موجود در اندازه‌گیری متغیرهای ورودی به مدل بیلان آب برمبنای تحلیل خطا.

گروه	گام زمان	واحد متغیر	DV	V_{in}	V_{out}	U (m/s)	VPD (kPa)
HG۱	۵ روزه	MCM/۵day	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰۷۶
		mm/day	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۰۵		
HG۲	۱۰روزه	MCM/۱۰day	۰٫۲۱	۰٫۱۷	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۱۵۹
		mm/day	۰٫۴۳	۰٫۳۶	۰٫۰۸		
HG۲	۵ روزه	MCM/۵day	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰۵۰
		mm/day	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۰۷		
HG۲	۱۰روزه	MCM/۱۰day	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۰۹۴
		mm/day	۰٫۲۹	۰٫۲۹	۰٫۱۲		

شد. برای یافتن فشار بخار اشباع در معادله‌ی ویس، از معدل‌گیری بین فشار بخار اشباع در دماهای حداقل و حداکثر روزانه استفاده شد. فشار بخار واقعی نیز از دمای نقطه‌ی شبنم محاسبه شد. قبل از برقراری معادله‌ی بیلان و محاسبات مربوطه، حدود ۲۰ درصد از اطلاعات در هر گروه همگن به‌صورت تصادفی از محاسبات کنار گذاشته شد تا برای مرحله‌ی صحت‌یابی نتایج مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات هواشناسی از ایستگاه تبخیرسنجی سد چاه نیمه، و اطلاعات هیدرولوژیکی از ایستگاه‌های هیدرومتریِ مستقر در ورودی و خروجی مخزن به‌صورت روزانه اخذ شد. تحلیل خطا بر اطلاعات اقلیمی ــ از جمله سرعت وزش باد و کمبود فشار بخار ــ حاکی از میزان خطای مترتب بر داده های ورودی به معادله دالتونی است (جدول ۱). این خطا در جدول ۱ شامل هر دو نوع خطای سیستماتیک (ابزاری) و خطای تصادفی است.

در معادلات ۲ و ۳، جمله‌ی سوم در سمت راست تساوی، بیان‌کننده‌ی تلفات از سطح مخزن (شامل کلیه‌ی متغیرهای ناشناخته بیلان، نظیر تبخیر، خطاهای سیستماتیک برداشت داده و یا هر عامل نادیده گرفته شده‌ی دیگر) است. اما از آنجا که عمده‌ترین مؤلفه‌ی ناشناخته‌ی بیلان آب مخزن، «تبخیر از سطح آزاد آب» است و تحلیل خطا نیز حاکی از مقادیر اندک خطا برای متغیرهای ورودی بوده است، سایر متغیرها در مقابل آن ناچیز فرض شده و لذا این جمله فقط به‌عنوان بیانگر تبخیر از سطح مخزن مورد توجه قرار گرفته است.

۳. نتایج

به‌کارگیری روش تشکیل معادله‌ی بیلان آب به شکل معادلات ۲ و ۳ منجر به نتایجی شد که در ادامه مورد توجه قرار می‌گیرند. جدول ۲ معادلات برازش یافته، ضریب تعیین[۲۳] (R^2)، تعداد نمونه (n)، میانگین

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲. مدل‌های برازش یافته برای برآورد تغییر حجم مخزن چاه نیمه.

گروه	گام زمان	معادله	n	$R^2(\%)$	MAE(MCM)	مقدارp
HG۱	۵روزه	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰/۰۷۵\bar{U}_2(VPD)$	۱۸۳	۹۴/۳	۰/۹۵۵	۰/۰۰۲
		$DV = V_{in} - V_{out} - ۰/۷۹۴\bar{U}_2^{۰/۱۸}(VPD)^{۰/۲۲}$		۹۵/۲	۰/۹۳۹	۰/۰۰۵
	۱۰ روزه	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰/۱۶۶\bar{U}_2(VPD)$	۸۲	۹۸/۹	۱/۲۷۵	۰/۰۰۱
		$DV = V_{in} - V_{out} - ۱/۱۲۲\bar{U}_2^{۰/۵۳}(VPD)^{۰/۲۵}$		۹۹/۳	۰/۹۰۵	۰/۰۰۲
HG۲	۵ روزه	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰/۱۱۳\bar{U}_2(VPD)$	۲۷۶	۹۰/۷	۱/۶۳۵	۰/۰۰۲
		$DV = V_{in} - V_{out} - ۰/۳۶۹\bar{U}_2^{۰/۹۶}(VPD)^{-۰/۳۲}$		۹۴/۲	۱/۲۲۹	۰/۰۰۴
	۱۰ روزه	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰/۲۹۷\bar{U}_2(VPD)$	۱۴۸	۹۶/۴	۲/۸۲۴	۰/۰۰۱
		$DV = V_{in} - V_{out} - ۰/۶۶۴\bar{U}_2^{۱/۱۱}(VPD)^{-۰/۱۷}$		۹۷/۹	۱/۹۰۱	۰/۰۰۳

مطلق خطا[۲۴] (MAE) و مقدار p را برای گام‌های ۵ و ۱۰ روزه و گروه‌های همگن نشان می‌دهد.

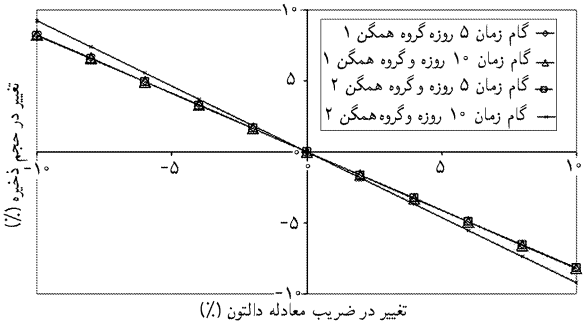
با توجه به مقادیر p مندرج در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که کلیه‌ی روابط در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد معنی‌دار هستند. هر چه گام زمان بزرگ‌تر می‌شود به‌واسطه‌ی حذف روندهای تصادفی و تعدیل نوسان در داده‌ها، ضریب تعیین افزایش یافته است. اما به‌دلیل تجمیع اطلاعات در گام‌های طولانی‌تر و به دنبال آن تجمیع خطا، عموماً مقدار خطای برآورد (MAE) با افزایش گام زمان، افزایش یافته است.

مقادیر MAE مندرج در جدول ۲ نشان می‌دهد که علی‌رغم اضافه شدن ضرایب و ترکیب غیرخطی، دقت معادلات به‌میزان ناچیزی افزایش یافته است (به‌خصوص برای گروه همگن HG۱). بیشترین مقدار افزایش دقت مربوط به گام زمان پنج روزه در گروه همگن HG۲ به میزان ۳/۵ درصد است، لذا همان شکل خطی روابط برای مراحل اعتبارسنجی به‌کار گرفته شد.

برای صحت‌یابی معادلات به‌دست آمده، چنانچه قبلاً ذکر شد، ۲۰ درصد از اطلاعات کنار گذاشته شده بود. آزمون x^2 به‌منظور صحت‌یابی روابط به ازای این اطلاعات انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. برای این منظور، مقادیر DV از معادلات مندرج در جدول ۲ تعیین، و با مقادیر مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفت، و مقادیر x^{2*} برای آزمون مورد نظر محاسبه شد. جدول ۳ نشان می‌دهد که معادلات به‌دست آمده در گام‌های ۵ و ۱۰ روزه در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد

جدول ۳. آزمون x^2 برای نتایج صحت‌یابی معادلات جدول ۲ در مخزن چاه نیمه.

گروه	Δt	X^{2*}	$x^2(\alpha = ۰/۹۹)$	$x^2(\alpha = ۰/۹۵)$
HG۱	۵ روزه	۰/۰۹	۱/۲۴	۲/۱۷
	۱۰ روزه	۰/۱۱	۰/۵۵	۱/۱۵
HG۲	۵ روزه	۰/۰۶	۰/۸۷	۱/۶۴
	۱۰ روزه	۰/۱۳	۰/۸۷	۱/۶۴



شکل ۲. تحلیل حساسیت معادلات جدول ۲ نسبت به تغییرات ضریب k.

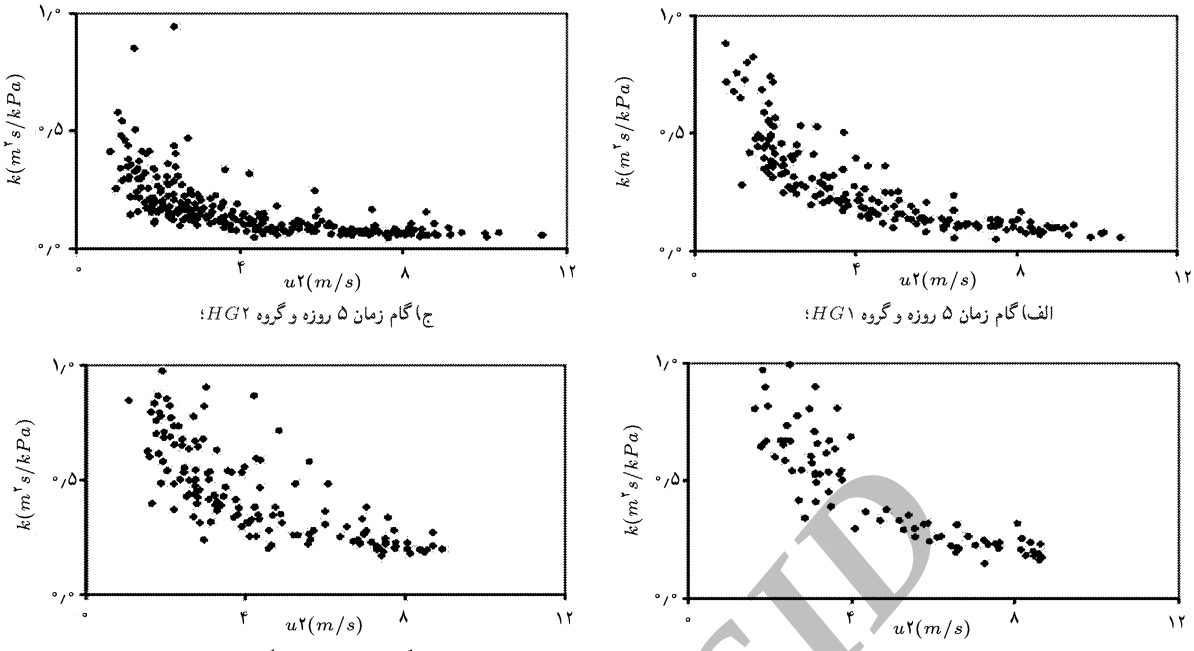
قادر به شبیه‌سازی بیلان و تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه‌اند. مقادیر x^{2*} کوچک‌تر از x^2 سطح مخاطره ۰/۰۱ بر این نکته تأکید می‌کند.

برای بررسی حساسیت روابط برازش یافته به ضرایب رگرسیونی به دست آمده، تجزیه و تحلیل حساسیت به شرح ذیل صورت گرفت. برای این تجزیه و تحلیل، به‌ازای ±۱۰ درصد تغییر در ضرایب معادلات جدول ۲ میزان درصد تغییرات حجم مخزن مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که به ازای ±۱۰ درصد تغییر در ضریب رگرسیونی K تنها کم‌تر از ± ۱۰ درصد تغییر در برآورد حجم مخزن به‌وجود آمده است و گروه همگن و گام زمان نیز تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارند.

۴. بحث

جدول ۲ نشان می‌دهد که علی‌رغم افزایش شدید ضرایب و ترکیب غیرخطی، دقت معادلات به‌میزان ناچیزی افزایش می‌یابد ــ به‌خصوص برای گروه همگن HG۱. از آنجا که معادله‌ی ۲ در مرحله‌ی صحت‌یابی کارایی خود را به اثبات رسانیده و همچنین تفاوت دقت ترکیب غیرخطی در مقابل ترکیب خطی چندان نیست، لذا همان معادله‌ی ۲ به‌عنوان معادله‌ی بیلان آب مورد تأیید قرار گرفت و جمله‌ی سوم سمت راست آن به‌عنوان مدل برآورد تبخیر منظور شد. از طرف دیگر، ترکیب غیرخطی تعبیر صریحی در مورد ضریب مدل دالتونی ارائه نداد.

Archive of SID
www.SID.ir



الف) گام زمان ۵ روزه و گروه $HG1$؛
ب) گام زمان ۱۰ روزه و گروه $HG1$؛
ج) گام زمان ۵ روزه و گروه $HG2$؛
د) گام زمان ۱۰ روزه و گروه $HG2$.

شکل ۳. ارتباط ضریب تبادل جرم با سرعت باد به‌ازای گام زمان.

در برخی تحقیقات ضریب مدل دالتونی را تابعی خطی از سرعت باد معرفی کرده‌اند.[۲۲] اما در بسیاری از تحقیقات نیز، این ارتباط را غیرخطی دانسته[۱۰و۱۲] و برای آن یک آستانه‌ی سرعت تعریف کرده‌اند که از آن آستانه به بعد ضریب مدل دالتون مستقل از سرعت باد بوده و ثابت خواهد شد. به‌عنوان مثال در تحقیقات آیکبوچی مقدار ۳ متر بر ثانیه و در تحقیقات سین مقدار ۳٫۵ متر بر ثانیه برای این آستانه‌ی سرعت تعیین شده است. برای بررسی ارتباط ضریب مدل دالتونی (K) با سرعت باد در محدوده‌ی چاه نیمه، مقادیر K در مقابل سرعت باد ترسیم شد که در شکل ۳ (الف تا د) این ارتباط برای گروه‌های همگن و گام‌های زمان مختلف نشان داده شده است. برای این منظور، از K مندرج در جدول ۲ به صورت معادله‌ی ۲ استفاده شده است.

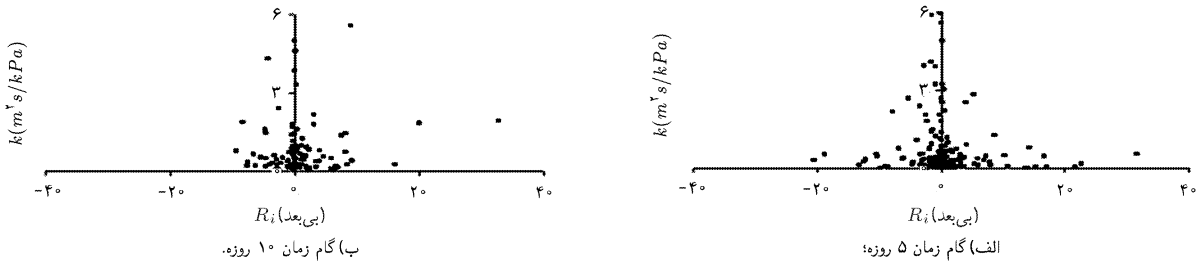
چنانچه ملاحظه می‌شود، ارتباطات کاملاً غیرخطی است. بررسی دقیق شکل‌های ۳الف تا ۳د نشان می‌دهد که به‌ازای گروه همگن HG۱ در گام زمان ۵ و ۱۰ روزه سرعت آستانه حدود ۶ متر در ثانیه است؛ در حالی که برای گروه همگن HG۲ در گام زمان ۵ روزه این آستانه حدود ۴ متر در ثانیه، و برای گام زمان ۱۰ روزه به‌دلیل پراکنش شدید داده‌ها، آستانه‌ی قابل تشخیصی مشاهده نمی‌شود. اما اگر تعدادی از اطلاعات پراکنده نادیده انگاشته شوند، برای این گام زمان و گروه همگن نیز می‌توان آستانه‌یی معادل ۴ متر در ثانیه در نظر گرفت.

ارتباط غیرخطی به مفهوم افزایش پایداری اتمسفر بر اثر افزایش سرعت باد و به دنبال آن کاهش ضریب مدل دالتونی است.[۱۲] آستانه‌ی مزبور نشان می‌دهد که از این سرعت به بعد ضریب مدل دالتونی مستقل از سرعت باد بوده که به‌معنی ثابت ماندن طول زبری است و نهایتاً معرف عدم وابستگی ضریب مدل دالتونی به پایداری اتمسفر از این آستانه به بعد خواهد بود.[۱۲]

در مورد تخطی از ارتباط خطی بین ضریب معادله‌ی دالتون و سرعت باد، مراجع مختلف اثرات امواج دریاچه را مؤثر می‌دانند.[۹و۲۲] در حالی که دیگر محققان پایداری اتمسفر را عامل اصلی این مسئله بر می‌شمارند.[۱۰و۱۲و۱۴] لذا با توجه به مجاورت ایستگاه سینوپتیک زهک با مخزن چاه نیمه و وجود اطلاعات مورد نیاز برای تعیین عدد ریچاردسون[۲۵] (R_i) در آن ایستگاه و به دنبال آن بررسی شرایط پایداری اتمسفر در منطقه، اطلاعات این ایستگاه برای این منظور استفاده شد. عدد ریچاردسون که مقدار بی‌بعدی است برای تقسیم‌بندی شرایط آئرودینامیکی اتمسفر در مقابل شرایط پایداری، از اطلاعات دمای سطح و ارتفاع ۲ متری و سرعت باد در ۲ متری تعیین شده است. در شکل ۴ رابطه‌ی بین عدد ریچاردسون و ضریب مدل دالتونی توسعه‌یافته برای مخزن چاه نیمه را به‌ازای گام‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد.

چنانچه ملاحظه می‌شود، هیچ‌گونه ارتباط قابل تشخیصی بین دو پارامتر مشاهده نمی‌شود. البته در کلیه‌ی تحقیقات صورت گرفته بر این پدیده از ادوات بسیار حساس و دقیقی مانند سیستم‌های هم‌بستگی پیچه‌یی استفاده شده است که در کسری از ثانیه، و در فواصل ارتفاعی کوچک اقدام به اندازه‌گیری سرعت باد و دما می‌کنند و بدین‌ترتیب پیچه‌های بسیارکوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته در همان تحقیقات به دلیل حجم قابل توجه داده‌های گردآوری شده، اطلاعات در گام‌های

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۴. بررسی ارتباط ضریب تبادل جرم در مخزن چاه نیمه و پایداری اتمسفر در منطقه الف و ب.

زمان طولانی‌تر از چند دقیقه تا چند ساعت میانگین‌گیری می‌شوند. در تحقیق حاضر از اطلاعات ۳ ساعتی برداشت شده در ایستگاه سینوپتیک زهک استفاده شده که از این بابت نسبت به تحقیقات سایرین دارای دقت کم‌تری است و شاید بتوان گفت در این تحقیق پیچه‌های بزرگ‌تر مورد پایش قرار گرفته است.

مطابق پیشنهاد آیکبوچی و همکاران[۱۰] برای شرایط ناپایدار $R_i <$ ۰٫۰۳−، برای شرایط پایدار ۰٫۰۳ $< R_i$ و برای شرایط خنثی مقادیر میانی منظور شده است. براساس R_i به دست آمده در ایستگاه زهک و با استفاده از شروط ارائه شده در فوق و پس از دسته‌بندی، شرایط حاکم بر اتمسفر، منطقه مورد مطالعه در ۵۰ درصد مواقع ناپایدار، در ۱۴ درصد مواقع خنثی، و در ۳۶ درصد مواقع پایدار طبقه‌بندی شد.

۵. نتیجه‌گیری

۱. بررسی مدل دالتونی به‌صورت توابع توانی، اثر قابل توجهی بر میزان دقت مدل نداشته و شکل اولیه‌ی مدل دالتونی برای مخزن چاه نیمه مناسب‌تر تشخیص داده شد.

۲. بررسی ارتباط ضریب دالتونی با سرعت باد در منطقه‌ی چاه نیمه حاکی از استقلال این ضریب نسبت به سرعت باد از آستانه‌ی ۴ متر بر ثانیه و بیشتر برای گروه سال‌های خشک و آستانه‌ی ۶ متر بر ثانیه و بیشتر برای گروه سال‌های نرمال ـ مرطوب است.

۳. به‌ازای سرعت‌های کم‌تر از آستانه، ضریب دالتونی نسبت به پایداری اتمسفر حساسیت دارد. اما در این تحقیق مشاهده شد که گام زمان در اینجا نقشی نداشته و عدد ریچاردسون با ضریب دالتونی نشان‌گر هیچ ارتباط قابل تشخیصی در مخزن مزبور نبود.

۴. تغییر به‌میزان ±۱۰ درصد در ضریب معادله‌ی دالتونی، کم‌تر از ±۱۰ درصد تغییر در حجم ذخیره‌ی مخزن به‌وجود آورد و همچنین تفاوت ناچیزی بین گام‌های زمانی مختلف و گروه همگن (وجود و فقدان آب در هامون‌ها) مشاهده شد.

۵. برای برآورد تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه به‌ازای گام زمان و دوره‌ی همگن آماری می‌توان از معادلات زیر استفاده کرد:

دوره‌ی خشک و گام زمان ۵ روزه

$$E = ۰٫۰۷۵U_۲(VPD)$$

دوره‌ی خشک و گام زمان ۱۰ روزه

$$E = ۰٫۱۱۶U_۲(VPD)$$

دوره‌ی نرمال ـ مرطوب و گام زمان ۵ روزه

$$E = ۰٫۱۱۳U_۲(VPD)$$

دوره‌ی نرمال ـ مرطوب و گام زمان ۱۰ روزه

$$E = ۰٫۲۹۷U_۲(VPD)$$

پانوشت

1. mass transfer
2. humidification
3. dehumidification
4. mass transfer coefficient
5. convection
6. fast vortices
7. large eddies
8. eddy diffusion
9. daltonian methods
10. aerodynamic methods
11. eddy flux methods
12. laminar boundary layer
13. turbulent boundary layer
14. vapor pressure deficit
15. energy balance
16. Lake Mead
17. Lake Hefner
18. Pretty Lake
19. eddy correlation system
20. Lake Biwa

Archive of SID
www.SID.ir

21. Lake Toba
22. Weiss
23. coefficient of determination
24. mean absolute error
25. Richardson number

منابع

1. Treyball, R.E. Mass Transfer Operation, McGraw Hill Inc., Tokyo, Japan (1990).
2. Fry, W.E. Determination of evaporation from Lake Hefner by energy and water budget methods. MSc. Thesis, Oklahoma State University (1965).
3. Linsley, R.K., Kohler, M.A. and Paulhus, J.C. Hydrology for Engineers. McGraw Hill Inc., New York, USA (1958).
4. Marciano, J.J. and Harbeck, G.E.Jr. Mass transfer studies, Water loss investigation: Lake Hefner studies. Technical Report 269, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., USA (1954).
5. Shuttleworth, W.J. Evaporation. NERC Report No. 56, Washington D.C., USA (1979).
6. Harbeck, G.E.Jr. A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass transfer theory. USGS Professional Paper 272-E, Washington D.C., USA (1962).
7. Ficke, J.F. Comparison of evaporation computation methods: Pretty Lake, Lagrange County, Northeast Indiana. USGS Professional Paper 686-A, Washington D.C., USA (1972).
8. Seckler, D., Amarasinghe, U., Molden, D., De Silva, R. and Beker, R. World water demand and supply, 1990-2025: Scenarios and issues. Research Report No. 19, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka (1998).
9. Easterbrook, C.C. A study of the effects of waves on evaporation from free water surfaces. Research Report No. 18, Water Resources Technical Publication, USBR, Washington, D.C., USA (1969).
10. Ikebuchi, S., Seki, M. and Ohtoh, A. "Evaporation from Lake Biwa", *Journal of Hydrology*, **102**, pp. 427-449 (1988). 11
11. Keijman, J.Q. "The estimation of the energy balance of a lake from simple weather data", *Boundary Layer Meteorology*, **8**, pp. 465-474 (1974).
12. Sene, K.J., Gash, J.H.C. and McNeil, D.D. "Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements", *Journal of Hydrology*, **127**, pp. 193-217 (1991).
13. Smith, S.D. "Eddy fluxes measurements over Lake Ontario", *Boundary Layer Meteorology*, **6**, pp. 235-255 (1974).
14. Stauffer, R.E. "Testing lake energy budget models under varying atmospheric stability conditions", *Journal of Hydrology*, **128**, pp. 115-135 (1991).

۱۵. دانش‌کارآراسته، پ. «بررسی کفایت و کیفیت اطلاعات و مطالعات تبخیرسنجی در محدوده‌هامون‌ها»، نشریه تخصصی-فنی هامون، شماره ۳، دفتر مطالعات آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۳).

۱۶. سعادت‌خواه، ن. «برآورد و پهنه‌بندی تبخیر»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ص. ۱۲۵، (۱۳۸۰).

۱۷. دفتر مطالعات آب و محیط زیست. مطالعات تبخیرسنجی مخزن چاه نیمه، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۸۱).

۱۸. دانش‌کارآراسته، پ.، تجریشی، م.، میرلطیفی، م. و ثقفیان، ب. «مدل آماری برآورد تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه سیستان به روش بیلان حجمی»، *پژوهش و سازندگی*، ۱۸،(۳) صص. ۲-۱۴، (۱۳۸۳).

۱۹. محمدی، ع. «بررسی تأثیر تبخیر بر شوری مخازن آب شیرین در مناطق خشک مطالعه موردی: مخازن چاه نیمه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۸۲).

۲۰. دانش‌کارآراسته، پ.، تجریشی، م.، میرلطیفی، م. و ثقفیان، ب. «لزوم بازنگری بر مدل‌های برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب در مناطق خشک دارای اثر واحه‌یی: مطالعه موردی در مخزن چاه نیمه»، *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۵، (۱) صص. ۳۷-۵۸، (۱۳۸۳).

21. Weiss, A. "Algorithms for the calculation of moist air properties on a hand calculator", *Transaction of ASAE*, **20**(6), pp. 1133-1136 (1977).
22. Deacon, E.L. and Webb, E.K. Interchange of properties between sea and air. International Science Publishers (1962).

Archive of SID

www.SID.ir