

## بررسی اثر سرعت وزش باد بر تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه سیستان

### به روش دالتونی

بیمان دانش‌کارآراسته (استادیار)  
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)  
مسعود تجربینی (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 قرار گرفت. با استفاده از بیلان حجمی معلوم مخزن چاه نیمه واقع در محدوده‌ی سیستان، به واسطه‌ی و برآورد ضریب معادله دالتون به صورت 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  $\pm 10\%$  درصد در مقدار این ضریب، کم‌تر از  $\pm 10\%$  درصد تغییر در حجم ذخیره‌ی مخزن به وجود آورده است. ضریب دالتونی در سال‌هایی که هامون‌ها 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 که هامون‌ها آب دارند، معادل شش متر بر ثانیه برآورد شد.

### ۱. مقدمه

است. انتشار مواد در محیط بدین شیوه را پخشیدگی پیچه‌یی<sup>۱</sup> 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<sup>۱</sup>، روش‌های آنرویدینامیکی<sup>۲</sup> و روش‌های شار پیچه‌یی<sup>۱۱</sup> 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 قرار گرفته 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

تبادل جرم<sup>۱</sup> عبارت است از انتقال ماده در محیط در مقیاس مولکولی.<sup>[۱]</sup> به عنوان 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 نا 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<sup>۲</sup> می‌نامند. برعکس در صورتی که هوای خیلی مرطوب از مجاورت سطوح خشک و کم‌رطوبت عبور کند، سبب ریزش و کاهش محتوای رطوبتی هوا خواهد شد که این فرایند را خشک شدن<sup>۳</sup> هوا می‌نامند. در هر دو حالت، پخشیدگی (توزیع) مولکولی بخار آب به وقوع می‌پیوندد.<sup>[۱]</sup>

نرخ تبادل جرم بین دو فاز مایع و بخار بستگی به ضریب تبادل جرم<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> (که از اختلاف حرارت یا هر عامل خارجی دیگر ناشی می‌شود) تفاوت قائل شد. اختلاط مکانیکی سبب ایجاد جریانات چرخشی سریع<sup>۶</sup> و پیچه‌یی کم و بیش بزرگی<sup>۷</sup> می‌شود که از خصوصیات جریانات آشفته

در دریاچه‌ی هفت‌<sup>۱۷</sup> با استفاده از روش شار پیچیه‌ی، ابتدا تبخیر واقعی برآورد شده و سپس ضریب معادله‌ی انتقال جرم محاسبه شده است.<sup>[۹]</sup> در این تحقیقات، اطلاعات مربوط به شش روز با دوره‌های ۱۰ دقیقه‌ی مورد استفاده قرار گرفت.

با استفاده از روش بیلان انرژی، مدل انتقال جرم برای دریاچه‌ی پرتی<sup>۱۸</sup> واسنجی شده است.<sup>[۷]</sup> اطلاعات آب‌سنجی توسط لیمنوگراف‌هایی به صورت 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 پیچیه‌ی<sup>۱۹</sup>، تبخیر از سطح دریاچه‌ی باویا<sup>۲۰</sup> تعیین و تعدادی از مدل‌ها، از جمله مدل تبادل جرم دالتونی، واسنجی شد.<sup>[۱۰]</sup> 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) به صورت 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<sup>۲۱</sup> - اندونزی، مدل تبادل جرم دالتونی واسنجی، و ضریب تبادل جرم تعیین شد.<sup>[۱۲]</sup> در این تحقیق از ایستگاه شناسی که مجهز به سیستم همبستگی پیچیه‌ی 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 (تظیر تبخیر و نشست از بستر به اعماق) است. در شرایطی که وزش باد ناچیز، یا اتمسفر ساکن باشد، ضخامت لایه‌ی مرزی آرام توسعه یافته و بلافاصله از بخار آب اشباع می‌شود. از آنجا که سازوکار انتقال توده‌ی بخار آب وجود ندارد، VPD کاهش یافته و فرایند تبخیر کند و نهایتاً متوقف می‌شود.<sup>[۶]</sup> در نتیجه، بر طبق معادله‌ی دالتون (معادله‌ی ۱)، حاصل ضرب  $U(VPD)$  ناچیز یا صفر بوده، و تبخیر قابل صرف نظر است. لذا، تلفات از مخزن و تغییر سطح دریاچه فقط ناشی از نفوذ و نشست از بستر به اعماق خواهد بود. اگر تغییر حجم یا تغییر سطح دریاچه نسبت به  $U(VPD)$  رسم شود، در صورتی که عرض از مبدا ناچیز باشد، نشان‌دهنده‌ی ناچیز بودن نشست از بستر

لایه که به لایه‌ی مرزی آرام<sup>۱۲</sup> موسوم است، ضخامت بسیار ناچیزی داشته، انتقال و تبادل بخار در آن به صورت توزیع مولکولی صورت می‌پذیرد. بعد از این لایه، لایه‌ی مرزی آشفته<sup>۱۳</sup> قرار دارد که در آن جریان توده‌ی اتمسفر برقرار است. لایه‌ی اخیر که مسلماً نه اشباع شده است و نه درجه حرارتی معادل سطح آب دارد، سبب می‌شود که بین دولاچه اختلاف فشار بخار به وجود آید. در صورت تداوم این اختلاف فشار، انرژی حرارتی باد شده موجب تداوم فرایند تبخیر از سطح می‌شود. نرخ تبخیر به اختلاف محتوای رطوبتی دولاچه یا به اختلاف فشار بخار بین دولاچه بستگی دارد.

از طرف دیگر، اختلاف سرعت بین لایه‌های مرزی آرام و آشفته سبب ایجاد جریان‌ات پیچیه‌ی می‌شود. ابعاد پیچیه‌ها به میزان اختلاف سرعت بین دولاچه بستگی دارد و در اثر وجود پیچیه‌ها، 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 دولاچه در واقع با سرعت جریان هوا در لایه‌ی آشفته برابر است. هرچه سرعت جریان هوا (باد) بیشتر باشد، پیچیه‌ها و آشفستگی گسترش یافته، انتقال بخار از فصل مشترک دولاچه سریع‌تر و بیشتر صورت می‌پذیرد. بدین ترتیب با افزایش اختلاف فشار بخار، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان قانون دالتون را به صورت معادله‌ی ۱ بیان کرد:<sup>[۵-۲]</sup>

$$E = K \cdot U \cdot (VPD) \quad (1)$$

که در آن:  $K$ ، ضریب تناسب یا ضریب انتقال جرم  $[M^{-1}LT^2]$ ؛  $U$ ، سرعت افقی باد در لایه‌ی آشفته  $[LT^{-1}]$  و  $VPD$ ، کمبود فشار بخار<sup>۱۴</sup>  $[ML^{-1}T^{-2}]$  است. این ضریب به شکل نیمرخ سرعت باد، ابعاد دریاچه، نوسانات سطح آب، پایداری اتمسفر و فشار، چگالی و لزجت هوا بستگی دارد.<sup>[۶]</sup> 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.<sup>[۶-۸]</sup>

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<sup>۱۵</sup> و شار پیچیه‌ی ابتدا تبخیر واقعی از سطح دریاچه یا مخزن را تعیین، و سپس ضریب مزبور را برآورد کرده‌اند.<sup>[۶، ۱۶-۱۷]</sup>

در تحقیقاتی که بر دریاچه‌ی مید<sup>۱۶</sup> صورت گرفته از اطلاعات بیلان انرژی استفاده شده است.<sup>[۶]</sup> 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.

تا  $۶۱^{\circ}۴۵'$  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 جداگانه‌ی 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. [۱۹، ۱۸، ۱۶]

**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 بر مبنای روش بررسی بیلان آب مدل دالتونی را واسنجی کردند. [۱۶، ۲۰] در تحقیق مزبور دوره‌ی آماری  $۱۹۹۴$  تا  $۲۰۰۰$  میلادی مورد استفاده قرار گرفت 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 برآزش داده شده  $۰/۲۰$  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

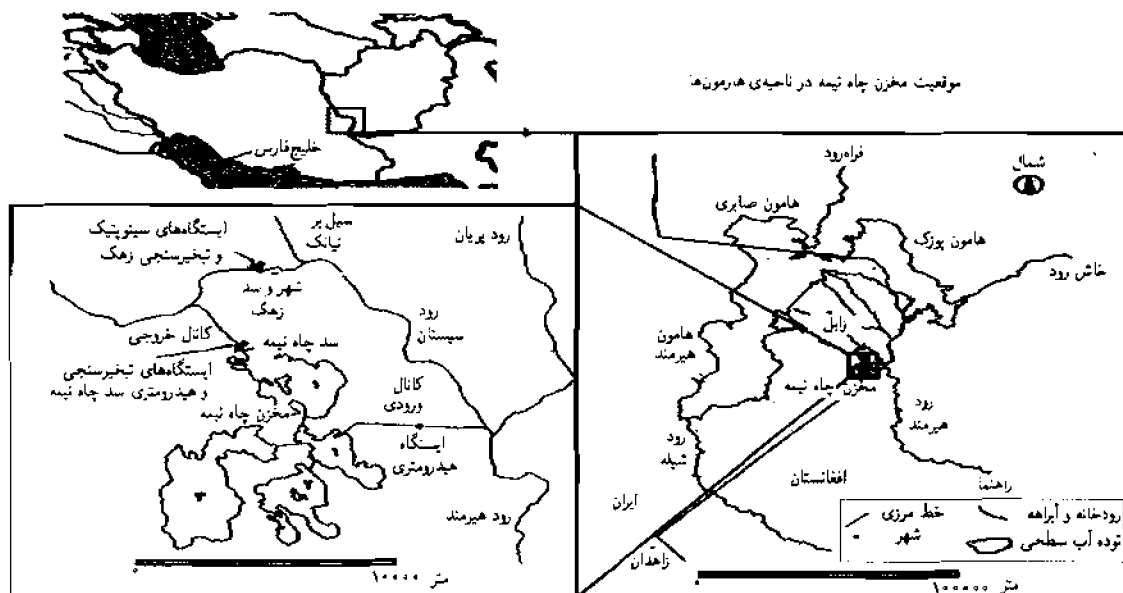
بوده و شیب منحنی، ضریب انتقال و تبادل جرم را ارائه می‌دهد. در نوشتار حاضر از همین اصل استفاده شده و براساس بیلان آبی معلوم در مخزن چاه نیمه، ضریب معادله‌ی دالتونی به‌صورت تجربی واسنجی و تعیین شده است.

## 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 هیدرولوژیکی - هیدرولوژیکی و مکانی این منطقه حاکی از خصوصیات منحصر به فرد آن است. قرار گرفتن در انتهای یک حوضه‌ی آبخیز بسته، سیستم پیچیده‌ی هیدرولوژیکی 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 ویژه‌ی 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  $۳۰^{\circ}۴۵'$  تا  $۳۰^{\circ}۵۰'$  عرض شمالی،  $۶۱^{\circ}۳۸'$



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

جدول ۱. خطای موجود در اندازه گیری متغیرهای ورودی به مدل بیلان آب بر مبنای تحلیل خطا.

گروه	گام زمان	واحد متغیر	DV	V <sub>in</sub>	V <sub>out</sub>	U (m/s)	VPD (kPa)
HG1	۵ روزه	MCM/5day	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۸	۰٫۰۷۶
		mm/day	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۰۵		
HG2	۱۰ روزه	MCM/10day	۰٫۲۱	۰٫۱۷	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۱۵۹
		mm/day	۰٫۴۳	۰٫۲۶	۰٫۰۸		
HG2	۵ روزه	MCM/5day	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۸	۰٫۰۵۰
		mm/day	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۰۷		
HG2	۱۰ روزه	MCM/10day	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۰۵	۰٫۰۸	۰٫۰۹۲
		mm/day	۰٫۲۹	۰٫۱۲	۰٫۱۲		

شد. برای یافتن فشار بخار اشباع در معادله ویس، از معدل گیری بین فشار بخار اشباع در دماهای حداقل و حداکثر روزانه استفاده شد. فشار بخار واقعی نیز از دمای نقطه شبنم محاسبه شد. قبل از برقراری معادله بیلان و حساب مربوطه، حدود ۲۰ درصد از اطلاعات در هر گروه همگن به صورت تصادفی از محاسبات کنار گذاشته شد تا برای مرحله صحت یابی نتایج مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات هواشناسی از ایستگاه تبخیرسنجی سد چاه نیمه، و اطلاعات هیدرولوژیکی از ایستگاه های هیدرومتری مستقر در ورودی و خروجی مخزن به صورت روزانه اخذ شد. تحلیل خطا بر اطلاعات اقلیمی - از جمله سرعت وزش باد و کمبود فشار بخار - 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، جمله سوم در سمت راست تساوی، بیان کننده ی تلفات از سطح مخزن (شامل کلیه ی متغیرهای ناشناخته بیلان، نظیر تبخیر، خطاهای سیستماتیک برداشت داده و یا هر عامل نادیده گرفته شده ی دیگر) است. اما از آنجا که عمده ترین مؤلفه ی ناشناخته ی 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 به عنوان بیانگر تبخیر از سطح مخزن مورد توجه قرار گرفته است.

### ۳. نتایج

به کارگیری روش تشکیل معادله ی بیلان آب به شکل معادلات ۲ و ۳ منجر به نتایجی شد که در ادامه مورد توجه قرار می گیرند. جدول ۲ معادلات برازش یافته، ضریب تعیین  $(R^2)$ ، تعداد نمونه (n)، میانگین

تبخیر از سطح آب را در دو گروه همگن آماری مربوط به سال های ۱۹۹۴، ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ میلادی (مربوط به سال های خشکی که هامون ها فاقد آباند HG1) و سال های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۹ میلادی (مربوط به سال های نرمال - مرطوبی که هامون ها دارای آب می باشند HG2) طبقه بندی کرد [۱۸] بدین ترتیب آنها اطلاعات دو گروه مزبور را تفکیک، و بیلان آب مخزن چاه نیمه را مجدداً بررسی کردند. آنها ضمن واسنجی ضریب شست تبخیر برای مخزن مزبور، اثر وجود و فقدان آب در هامون ها بر ضریب شست تبخیر مخزن چاه نیمه را بررسی کردند. در این بررسی مشخص شد که در سال هایی که هامون ها فاقد آب اند، ضریب شست تبخیر از ۰٫۵ تا ۰٫۷۷ تغییر می کند. در حالی که این تغییرات در سال هایی که هامون ها آب دارند، بین ۰٫۵ تا ۰٫۵۶ است.

### ۲. مدل مخزن چاه نیمه

همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می شود، 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 بهره برداری قرار گرفته است. همچنین از دو ایستگاه سینوتیک شهر زهک، و تبخیرسنجی پایاب سد زهک که در فاصله ی پنج کیلومتری در شمال مخزن و در مجاورت یکدیگر واقع شده اند، برای تدقیق، تصحیح، تکمیل و تطویل دوره ی آماری بهره گیری 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 می توان یک دوره ی کامل از سال های خشک، نرمال و مرطوب را مشاهده کرد. با استفاده از اطلاعات بیلان حجمی مورد استفاده ی محققان [۱۸]، و مطابق با روش تبادل جرم دالتونی بین تغییر حجم مخزن در گام های زمانی ۵ و ۱۰ روزه و گروه های همگن سال های آماری مشابه دسته بندی محققان [۱۸]، روابطی مانند معادلات ۲ و ۳ مورد بررسی قرار گرفت.

$$DV = V_{in} - V_{out} - K \cdot U \cdot (VPD) \quad (2)$$

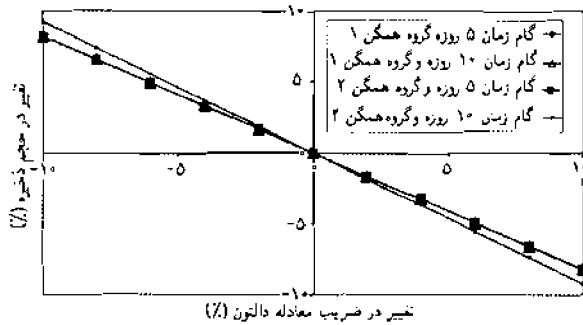
$$DV = V_{in} - V_{out} - K \cdot U^{0.7} \cdot (VPD)^{0.7} \quad (3)$$

که در آنها: DV، تغییر حجم ذخیره ی مخزن؛  $V_{in}$  و  $V_{out}$ ، به ترتیب 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)؛  $\alpha$  و  $\beta$ ، متغیرهای معادلات اند که از طریق رگرسیون به دست می آیند و K، ضریب معادله ی دالتون است که بعد آن در معادلات فوق  $[M^{-1}L^2T^{-2}]$  است. متغیر DV، با استفاده از اطلاعات تراز سطح آب در ابتدا و انتهای

گام زمان، و با بهره گیری از منحنی تراز - سطح - حجم مخزن چاه نیمه [۱۷] تعیین و نیز برای تعیین کمبود فشار بخار از معادله ی ویس [۲۱، ۲۲] استفاده

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

مقدار p	MAE(MCM)	R <sup>2</sup> (%)	n	معادله	گام زمان	گروه
۰٫۰۰۰۲	۰٫۹۵۵	۹۴٫۳	۱۸۳	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰٫۰۷۵\bar{U}_t(VPD)$	۵ روزه	HG۱
۰٫۰۰۰۵	۰٫۹۳۹	۹۵٫۲		$DV = V_{in} - V_{out} - ۰٫۷۹۴\bar{U}_t^{۰٫۷۸}(VPD)^{۰٫۲۲}$		
۰٫۰۰۰۱	۱٫۲۷۵	۹۸٫۹	۸۲	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰٫۱۶۶\bar{U}_t(VPD)$	۱۰ روزه	
۰٫۰۰۰۲	۰٫۹۰۵	۹۹٫۳		$DV = V_{in} - V_{out} - ۱٫۱۲۲\bar{U}_t^{۰٫۵۲}(VPD)^{۰٫۱۵}$		
۰٫۰۰۰۲	۱٫۶۳۵	۹۰٫۷	۲۷۶	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰٫۱۱۳\bar{U}_t(VPD)$	۵ روزه	HG۲
۰٫۰۰۰۴	۱٫۲۲۹	۹۲٫۲		$DV = V_{in} - V_{out} - ۰٫۳۶۹\bar{U}_t^{۰٫۸۶}(VPD)^{۰٫۲۲}$		
۰٫۰۰۰۱	۲٫۸۲۲	۹۶٫۴		$DV = V_{in} - V_{out} - ۰٫۲۹۷\bar{U}_t(VPD)$	۱۰ روزه	
۰٫۰۰۰۳	۱٫۹۰۱	۹۷٫۹	۱۴۸	$DV = V_{in} - V_{out} - ۰٫۶۶۴\bar{U}_t^{۰٫۱۱}(VPD)^{۰٫۱۷}$		



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

قادر به شبیه‌سازی بیلان و تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه‌اند. مقادیر  $\alpha^*$  کوچک‌تر از  $\alpha^*$  سطح مخاطره ۱٪ برای 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  $\pm 1\%$  درصد تغییر در ضرایب معادلات جدول ۲ میزان درصد تغییرات حجم مخزن مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که به‌ازای  $\pm 1\%$  درصد تغییر در ضریب رگرسیونی K تنها کم‌تر از  $\pm 1\%$  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. 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 تغییر صریحی در مورد ضریب مدل دالتونی ارائه نداد.

مطلق خطا<sup>۲۴</sup> (MAE) و مقدار p برای گام‌های ۵ و ۱۰ روزه و گروه‌های همگن نشان می‌دهد.

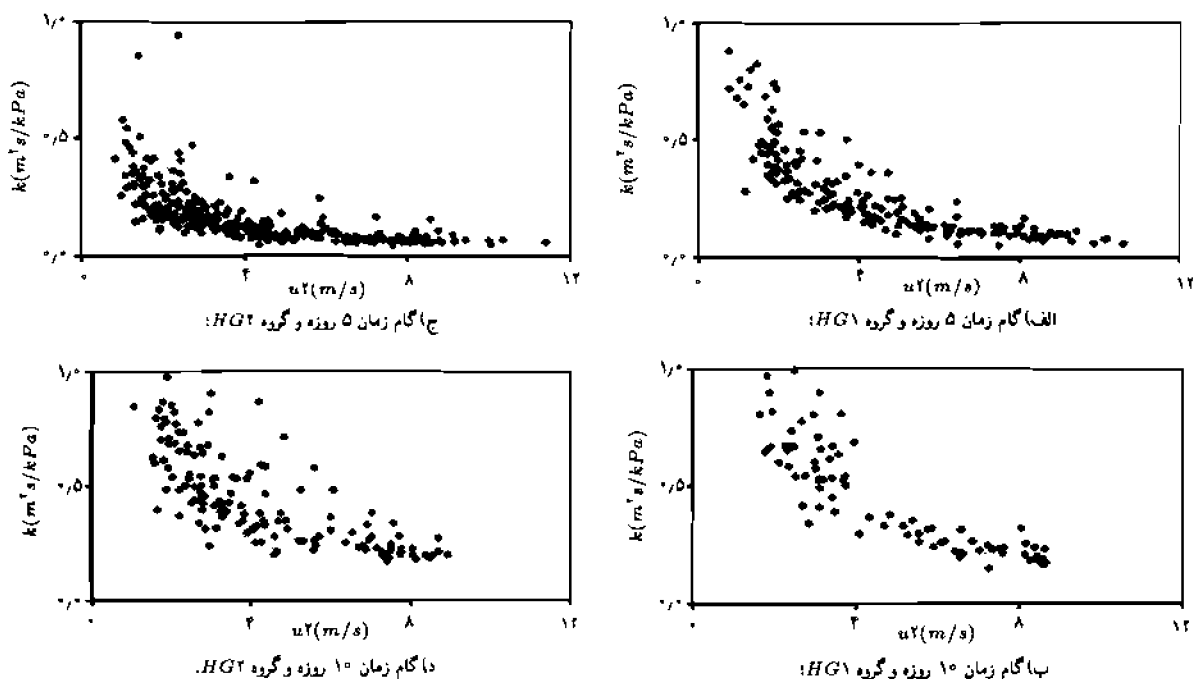
با توجه به مقادیر p مندرج در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که کلیه روابط در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد معنی‌دار هستند. هر چه گام زمان بزرگ‌تر می‌شود به‌واسطه‌ی حذف روندهای تصادفی و تعدیل نوسان در داده‌ها، ضریب تعیین افزایش یافته است. اما به‌دلیل تجمع اطلاعات در گام‌های طولانی‌تر و به دنبال آن تجمع خطا، عموماً مقدار 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  $\chi^2$  به‌منظور صحت‌یابی روابط به‌ازای 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  $\chi^2$  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  $\chi^2$  برای نتایج صحت‌یابی معادلات جدول ۲ در مخزن چاه نیمه.

گروه	$\Delta t$	$\chi^2_{\alpha}$	$\chi^2(\alpha = ۰٫۹۹)$	$\chi^2(\alpha = ۰٫۹۵)$
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 ۳. ارتباط ضریب تبخیر با سرعت باد به ازای گام زمان.

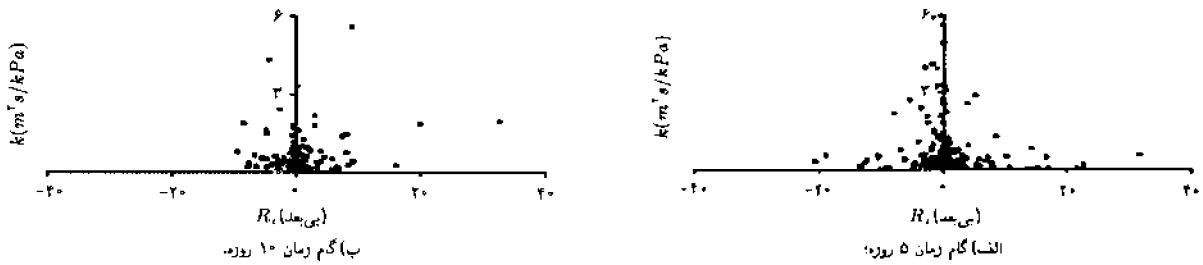
دالتونی مستقل از سرعت باد بوده که به معنی ثابت ماندن طول زبری است و نهایتاً معرف عدم وابستگی ضریب تبخیر مدل دالتونی به پایداری اتمسفر از این آستانه به بعد خواهد بود.<sup>[۱۲]</sup>

در مورد تخطی از ارتباط خطی بین ضریب معادله‌ی دالتون و سرعت باد، مراجع مختلف اثرات امواج دریاچه را مؤثر می‌دانند.<sup>[۲۲، ۲۱]</sup>

در حالی که دیگر محققان پایداری اتمسفر را عامل اصلی این مسئله بر می‌شمارند.<sup>[۱۲، ۱۱، ۱۰]</sup> لذا با توجه به مجاورت ایستگاه سینوپتیک زهک با مخزن چاه نیمه و وجود اطلاعات مورد نیاز برای تعیین عدد ریچاردسون<sup>۲۵</sup> (Rz) 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 اترودینامیکی 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 تبخیر مدل دالتونی توسعه‌یافته برای مخزن چاه نیمه را به ازای 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 بیجه‌ی استفاده شده است که در کسری از ثانیه، و در فواصل ارتفاعی کوچک اقدام به اندازه‌گیری سرعت باد و دما می‌کنند و بدین‌ترین بیجه‌های بسیار کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته در همان تحقیقات به دلیل حجم قابل توجه داده‌های گردآوری شده، اطلاعات در گام‌های

در برخی تحقیقات ضریب مدل دالتونی را تابعی خطی از سرعت باد معرفی کرده‌اند.<sup>[۲۲]</sup> اما در بسیاری از تحقیقات نیز، این ارتباط را غیرخطی دانسته<sup>[۱۲، ۱۰]</sup> و برای آن یک آستانه‌ی سرعت تعریف کرده‌اند که از آن آستانه به بعد ضریب تبخیر مدل دالتون مستقل از سرعت باد بوده و ثابت خواهد شد. به عنوان مثال در تحقیقات آیکوچی 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 تبخیر 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 ۳ الف تا د نشان می‌دهد که به ازای گروه همگن HG1 در گام زمان ۵ و ۱۰ روزه سرعت آستانه حدود ۶ متر در ثانیه است؛ در حالی که برای گروه همگن HG2 در گام زمان ۵ روزه این آستانه حدود ۴ متر در ثانیه، و برای گام زمان ۱۰ روزه به دلیل 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 آستانه‌ی 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 تبخیر مدل دالتونی است.<sup>[۱۲]</sup> آستانه‌ی مزبور نشان می‌دهد که از این سرعت به بعد ضریب تبخیر



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

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 به میزان  $\pm 10\%$  درصد در ضریب معادله‌ی دالتونی، کم‌تر از  $\pm 10\%$  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

$$E = 0.075 U_1 (VPD)$$

دوره‌ی خشک و گام زمان ۱۰ روزه

$$E = 0.116 U_1 (VPD)$$

دوره‌ی نرمال - مرطوب و گام زمان ۵ روزه

$$E = 0.112 U_1 (VPD)$$

دوره‌ی نرمال - مرطوب و گام زمان ۱۰ روزه

$$E = 0.297 U_1 (VPD)$$

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 پیچیدگی‌های بزرگ‌تر مورد پایش قرار گرفته است.

مطابق پیشنهاد آیکوجی و همکاران<sup>[۱۰]</sup> برای شرایط ناپایدار  $R_i < 0.3$ ، برای شرایط پایدار  $R_i > 0.3$  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  $50\%$  درصد مواقع ناپایدار، در  $14\%$  درصد مواقع خنثی، و در  $36\%$  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 - مرطوب است.

۳. به‌ازای سرعت‌های کم‌تر از آستانه، ضریب دالتونی نسبت به پایداری

## پانوش

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

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. Keijuan, J.Q. "The estimation of the energy balance of a lake from simple weather data", *Boundary Layer Meteorology*, **8**, pp. 465-474 (1974).
12. Seno, 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. دانش کارآراسته، پ. «بررسی کفایت و کیفیت اطلاعات و مطالعات تبخیرسنجی در محدوده هامون‌ها»، 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. دانش کارآراسته، پ.، تجریشی، م.، میرلطیفی، م. و تقیان، 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. دانش کارآراسته، پ.، تجریشی، م.، میرلطیفی، م. و تقیان، 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).