



اصلاح و واسنجی مدل CRLE در مناطق با جریان همرفت شدید مطالعه موردی: مخازن چاه نیمه

- ناصر سعادت‌خواه**، کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی شریف، تهران *
- مسعود تجربی**، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران *
- احمد ابریشم‌چی**، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران *
- * تلفن: ۰۲۱-۶۰۳۶۰۱۶، شماره: ۰۲۱-۶۰۳۶۰۱۶، پست الکترونیکی: ewrc@sharif.edu

چکیده

برآورد دقیق تبخیر به عنوان یکی از مؤلفه‌های سیکل هیدرولوژیکی از دغدغه‌های فکری کارشناسان و متخصصین علوم آبشناسی در مطالعات منابع آب، به شمار می‌آید. روشهای متعددی برای برآورد تبخیر وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روشهای بیلان آبی، بیلان انرژی، انتقال جرم، روش ترکیبی انتقال جرم و بیلان انرژی (روابط نوع پنمن)، استفاده از تستک تبخیر و روابط تجربی اشاره نمود. با این وجود، تلاش برای ارائه روابط کاراتر که نیاز به اطلاعات کمتری دارد، از سوی محققین دنبال می‌گردد. یکی از این مدلها، مدل CRLE است که توسط مورتون برای برطرف نمودن برخی نقاط ضعف روابط پنمن و پرستلی-تیلور ارائه و در سال ۱۹۸۲ اصلاح شده است. براین اساس و با موجود بودن داده‌های نسبتاً کافی، این مدل برای مخازن چاه نیمه بکار برده شد که مقایسه نتایج مدل با مقادیر واقعی میزان تبخیر ماهانه (روش بیلان آبی)، حاکی از اختلافی در حدود ۲۷ درصد بین آن دو بود. از اینرو با استفاده از مقادیر واقعی تبخیر و داده‌های موجود باد، بدون اینکه روابط اصلی مدل دچار خدشه گردد، مدل CRLE اصلاح و با شرایط مناطقی نظیر سیستان واسنجی گردید، بطوریکه قابلیت‌های مدل علاوه بر مناطقی با جریان همرفت شدید، در مناطق دیگر نیز حفظ گردد.

کلید واژه‌ها: تبخیر، مخازن چاه نیمه، مدل CRLE، جریان همرفت.

۱- مقدمه

برآورد تبخیر از سطح آب یکی از محاسبات اصلی در مطالعات برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌باشد که عدم دقت در آن می‌تواند خطای زیادی در برنامه‌ریزی و طراحی پروژه‌های آبی بوجود آورد. بطور کلی، روشهای اندازه‌گیری و برآورد تبخیر را می‌توان به شش دسته تقسیم‌بندی نمود که عبارتند از تستکهای تبخیر، روابط تجربی، روش بیلان آبی، روش بیلان انرژی، روش انتقال جرم و روش ترکیبی انتقال جرم و بیلان انرژی. در بین این روشها، روش ترکیبی بیلان انرژی و انتقال جرم که اولین بار توسط پنمن (۱۹۴۸) ارائه گردید، کاربردی تر و همراه با نتایج قابل قبول می‌باشد. رابطه پنمن را محققین دیگری از جمله اسلاتیر و مک‌لیروی (۱۹۶۱)، پرستلی و تیلور (۱۹۷۲) و دی‌برون (۱۹۷۸) برای کاربردی تر نمودن آن اصلاح کرده‌اند [۶].

مدل *CRLE* نیز توسط مورتون (۸۲-۱۹۷۸) بر مبنای رابطه پنمن، ارائه و توسعه داده شده است. مورتون بر اساس رابطه پنمن و تلفیق با تئوری بوچت، مدل *CRLE* را به منظور برطرف کردن برخی از نقاط ضعف روابط پنمن و پرستلی-تیلور ارائه داده است. طبق تئوری بوچت که اساساً برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر و تعرق پتانسیل بکار گرفته می‌شود، هرچه میزان آب در دسترس بیشتر باشد، تبخیر و تعرق پتانسیل کمتر و تبخیر و تعرق واقعی بیشتر می‌گردد که البته در یک حدی این دو به شرایط تعادل و تساوی می‌رسند. مورتون (۱۹۷۸) در ادامه مطالعات پیشین خود (۷۶-۱۹۶۵)، مدلی را با عنوان *CRAE*^۱، برای تخمین میزان تبخیر و تعرق واقعی از زمین ارائه داد [۱]. سپس در سال ۱۹۷۹، مدل را برای تخمین تبخیر از سطح دریاچه‌ها (مدل *CRLE*) توسعه و در سال ۱۹۸۲ این مدل را برای ارائه نتایج بهتر در مناطقی با اقلیم‌های مختلف اصلاح کرد [۲].

معایب روابط پنمن و پرستلی-تیلور، مورتون را برآن داشت تا مدل مفیدتری را برای تخمین تبخیر (و تعرق) ارائه دهد که عبارتند از: (۱) لحاظ نکردن تغییرات ذخیره گرمایی در لایه‌های زیرین آب و در نتیجه عدم کاربرد در دریاچه‌ها و مخازن عمیق، (۲) نادیده گرفتن اثر تغییرات درجه حرارت سطح آب، (۳) صرف‌نظر از انرژی همرفت در طی فصول سرد در اثر جابجایی‌های گسترده هوا، (۴) متاثر بودن رابطه از موقعیت اندازه‌گیری درجه حرارت هوا و دیگر پارامترهای اقلیمی و (۵) منظور نکردن میزان کمبود فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی [۳].

مدل برای تخمین تبخیر ماهانه از آبهای کم‌عمق، از میان پارامترهای اقلیمی فقط به دمای هوا، نقطه شبنم (یا فشار بخار واقعی و یا رطوبت نسبی) و تعداد ساعات آفتابی (یا تشعشع خورشیدی رسیده به سطح زمین) نیاز دارد [۳]. همچنین، برای آنکه اثر ذخیره گرمایی لایه‌های زیرین در میزان تبخیر ماهانه لحاظ گردد، دانستن اطلاعات مختصری از کیفیت آب (*TDS*) و عمق متوسط دریاچه و یا مخزن ضروری است [۴]. مراحلی که مدل برای برآورد تبخیر ماهانه طی می‌نماید به اختصار به شرح زیر است [۳]:

الف) محاسبه تشعشع رسیده به سطح آب با استفاده از روابط معتبر

ب) محاسبه ضرایب پایداری، انتقال بخار و انتقال گرما بصورت روابط زیر:

$$1/\xi = 0.28(1 + e_a/e_s) + \Delta R_{EP} / [\gamma p (p_s/p)^{0.5} b_0 f_z (e_s - e_a)] \leq 1 \quad (1)$$

$$f_T = (p_s/p)^{0.5} f_z / \xi \quad (2)$$

$$\lambda = \gamma p + 4\varepsilon\sigma(T + 273)^3 / f_T \quad (3)$$

در روابط فوق R_{EP} تشعشع خالص رسیده به سطح آب در درجه حرارت هوا برحسب $\frac{W}{m^2}$ ، ξ

ضریب پایداری، f_T ضریب انتقال بخار، λ ضریب انتقال گرما، T میانگین درجه حرارت حداکثر و

^۱ Complementary Relationship Areal Evapotranspiration

حداقل هوا بر حسب درجه سانتی گراد، e_s و e_a فشار بخار اشباع و واقعی هوا بر حسب $mbar$ ، p/p_s نسبت فشار منطقه مورد نظر به فشار در سطح آزاد آب، ε ضریب انتشار برابر 0.97 و σ ثابت استفان-بولتزمن (Stefan-Boltzmann) معادل $\frac{W}{m^2 K^4} \times 10^{-8} \times 0.5$ می‌باشند. همچنین f_z ، b_0 و γp ضرایب ثابت معادلات به ترتیب برابر با $\frac{W}{m^2}$ ، $25/0$ و $1/12$ و $\frac{mb}{^\circ C}$ و 0.66 در حالت $T \geq 0^\circ C$ و برابر با $\frac{W}{m^2}$ ، $28/75$ و $1/12$ و $\frac{mb}{^\circ C}$ 0.574 در حالت $T < 0^\circ C$ با کالیبره کردن نتایج مدل با نتایج دیگر روشها بدست آمده‌اند [۳].

شایان ذکر است در صورتیکه R_{EP} از روابط قبلی منفی محاسبه گردد، مقدار آن در رابطه (۲) برابر صفر وارد می‌شود. نکته حائز اهمیت در این مدل این است که ضریب انتقال بخار، مستقل از میزان آشفستگی هوا و سرعت باد تعیین شده و پارامترهای مؤثر در این ضریب با استفاده از نتایج دیگر روشها تعیین شده‌است.

ج) محاسبه دمای معادل با استفاده از رابطه بدست آمده از تلفیق روابط انتقال جرم و بیلان انرژی
د) محاسبه تبخیر پتانسیل و تبخیر از آبهای کم عمق با استفاده از رابطه بدست آمده از تلفیق روابط پنمن (پریستلی-تیلور) و تئوری بوچت

ه) لحاظ کردن تاثیر ذخیره گرمایی لایه‌های زیرین با استفاده از معادلات ذخیره و بیلان آبی در یک سیستم آبی

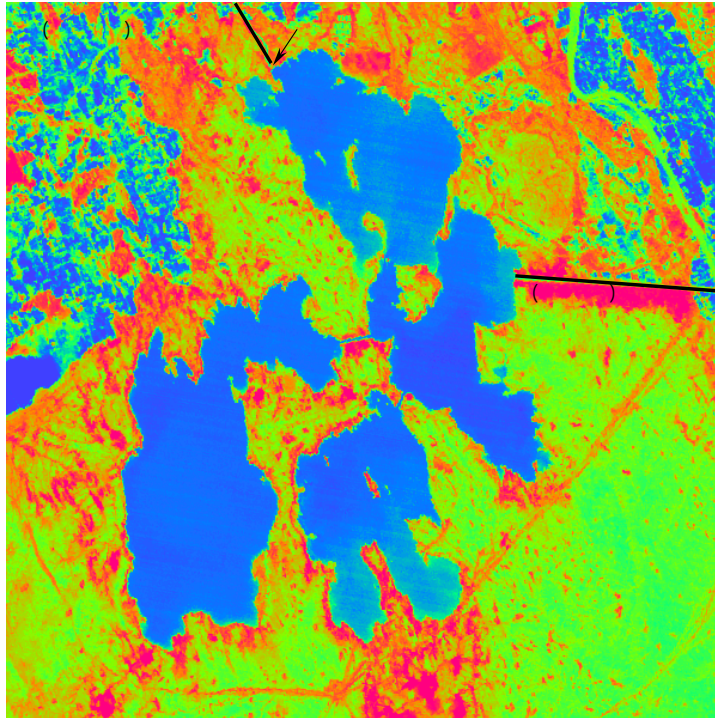
نتایج مدل و مقایسه آن با چند روش مختلف از جمله روش بیلان آبی در دریاچه‌ها و مناطق مختلف در کشورهای ایالات متحده آمریکا، کانادا، ایرلند و حتی کنیا، مصر و سودان، حاکی از نتایج نسبتاً مناسب آن می‌باشد [۲].

۲- مخازن چاه‌نیمه

مخازن چاه‌نیمه متشکل از سه فرورفتگی طبیعی واقع در بخش شمالی و منتهی الیه دلتای هیرمند در شهرستان زابل و در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان، در عرض جغرافیایی $30^\circ 49'$ و طول جغرافیایی $60^\circ 49'$ می‌باشند که مهمترین دلایل ساخت این مخازن عبارت بودند از: (۱) ذخیره آب رودخانه سیستان که دارای رژیم متغیر است و (۲) استفاده از آب ذخیره شده برای تامین آب شرب و کشاورزی ساکنان منطقه [۵]. مطالعات این مخازن از سال ۱۳۴۷ شروع گردیده، لیکن در سال ۱۳۶۴ مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌است. اجزای سیستم مخازن عبارت‌اند از: مخازن ۱ تا ۳، سازه دهانه آبگیر، کانال ورودی و خروجی، مجاری بین مخازن، سد چاه‌نیمه، سدهای فرعی چاه‌نیمه و دهانه آبگیر خروجی (شکل ۱).

اقلیم منطقه بطور کلی خشک و نیمه‌خشک بوده و میزان تبخیر از تشتک استاندارد رقم بسیار بالایی (بیش از ۴ متر) را نشان می‌دهد. حداکثر سرعت باد و دما و حداقل رطوبت نسبی اغلب در یک دوره زمانی از سال (ماههای تیر و مرداد) اتفاق می‌افتد و این اصلی‌ترین دلیل افزایش تبخیر در این ایام

می‌باشد. بالا بودن تبخیر و ناچیز بودن بارندگی در منطقه، اهمیت تبخیر را به لحاظ کمبود آب در منطقه دوچندان نموده و تعیین روند و میزان آن در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب منطقه را الزامی می‌نماید.



شکل ۱: تصویر ماهواره‌ای مخازن چاه‌نیمه ۱ تا ۳ در سال ۱۹۹۸

۳- تبخیر از مخازن چاه‌نیمه

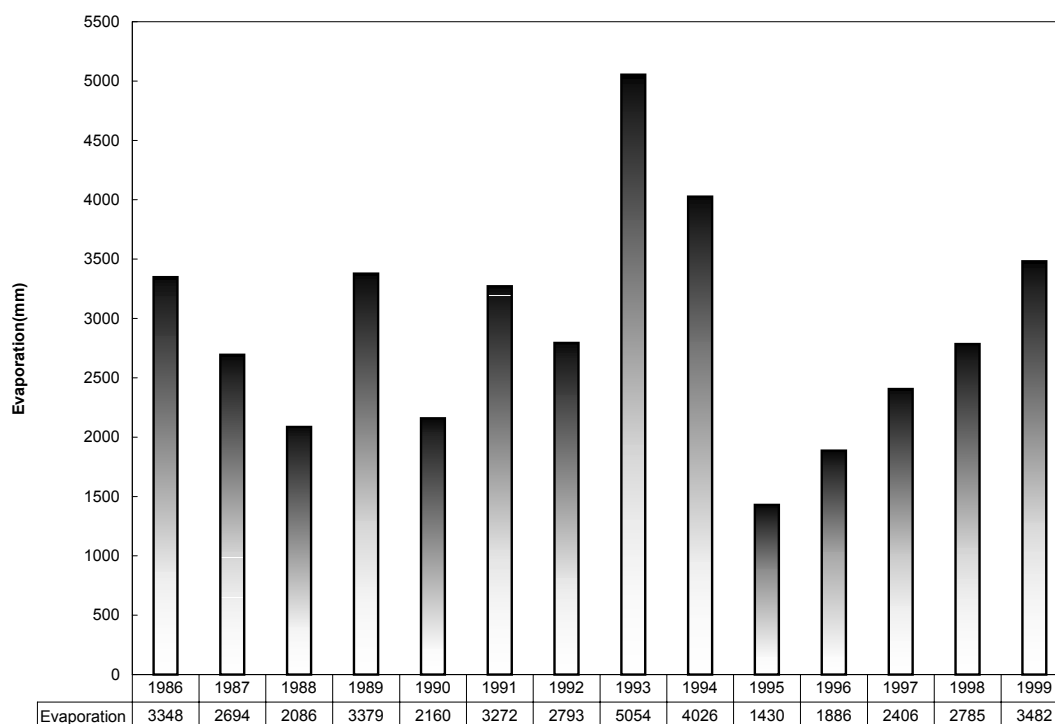
مخازن چاه نیمه دارای شرایط ویژه‌ای است که سبب استفاده مؤثرتر از روش بیلان آبی جهت تخمین تبخیر در این سیستم آبی می‌گردد. شرایط ژئوتکنیکی بستر و کناره‌های این مخازن نشان از وجود لایه‌های رس سیلتی می‌باشد که این لایه‌ها میزان نفوذ و تراوش زیرزمینی از مخازن را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، تا آنجا که صرفنظر کردن از میزان ورودیها و خروجیهای جریانهای زیرزمینی را توجیه می‌کند. از طرفی به سبب وجود بسیار ناچیز گیاهان و جلبکهای دریائی بر روی سطح دریاچه، مقدار تعرق از مخازن بسیار اندک بوده و در نتیجه تبخیر از سطح آزاد آب، تنها تلفات از مخازن می‌باشد. تنها جریان ورودی سطحی به داخل مخازن، از طریق کانال ورودی صورت گرفته و خروج جریانهای سطحی نیز به دو منظور شرب (از طریق ایستگاه پمپاژ) و کشاورزی (از طریق کانال خروجی) صورت می‌پذیرد. براین اساس میزان تبخیر در طی سالهای ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۹ با این روش برآورد گشته است [۶].

بر اساس مطالعات صورت گرفته، با توجه به کم بودن میزان ورودی و خروجی در طی ماههای می تا اکتبر، نتایج تبخیر ماهانه در این ایام دقت خوبی دارد. در جدول ۱، نتایج متوسط تبخیر ماهانه در ماههای می تا اکتبر (نیمه اردیبهشت تا نیمه مهر) و در شکل ۲، نتایج تبخیر سالانه در طی سالهای (۱۹۸۶

تا ۱۹۹۹) ارائه شده است. علل دقت قابل قبول نتایج بیلان ماهانه (می تا اکتبر) و سالانه تبخیر آنست که با توجه به شرایط خاص مخازن چاه نیمه (ناچیزی نفوذ و تراوش و نیز کم بودن تعرق) و نیز شرایط اقلیمی منطقه (کمبود بارش)، برآورد تبخیر در دوره های بلند مدت نظیر سالانه با خطای کمی مواجه است. از طرفی در ماههای می تا اکتبر ورودی و خروجی به/از مخزن ناچیز بوده و خطای ناشی از قرائت و ثبت این داده ها نیز به حداقل می رسد. از اینرو نتایج تبخیر ماهانه در این دوره زمانی قابل اطمینان می باشد [۷].

جدول ۱: میزان تبخیر متوسط ماهانه می تا اکتبر با استفاده از روش بیلان آبی (میلیمتر)

سال	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر
۱۹۹۹-۱۹۸۶	۲۹۳	۳۳۲	۴۵۶	۴۱۹	۳۸۲	۲۵۴

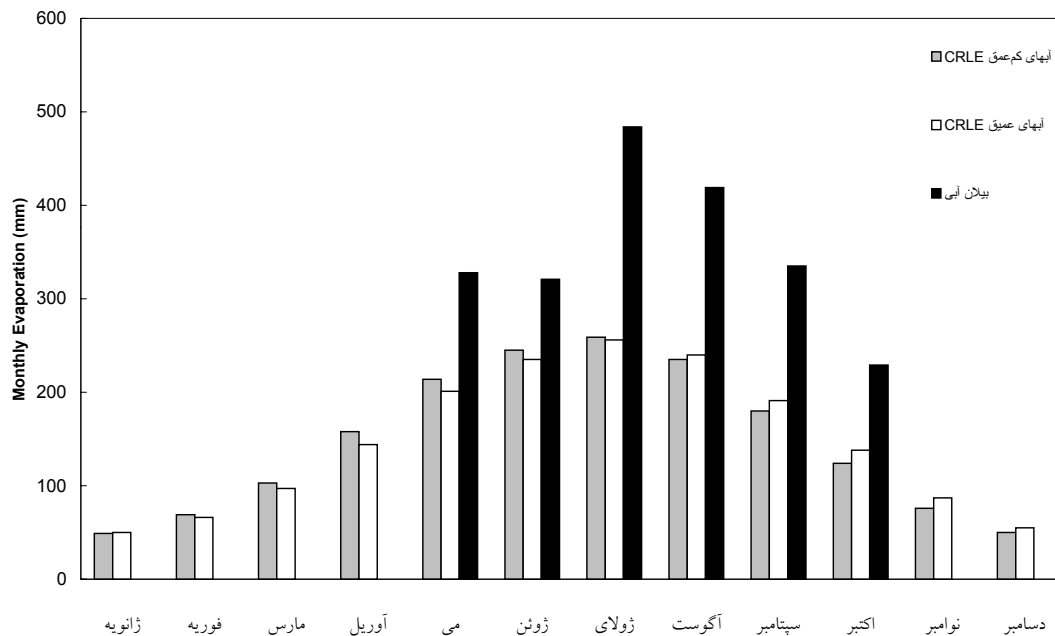


شکل ۲: میزان تبخیر سالانه یا استفاده از بیلان آبی

نکته لازم به ذکر آنست که روش بیلان آبی جهت برآورد تبخیر، جزو روشهای مستقیم محسوب شده و این درحالیست که روشهای معمول دیگر نظیر روابط نوع پنمن و روابط آیرودینامیکی، به صورت غیر مستقیم تبخیر را به نوعی تخمین می زنند. بنابراین مبنا قرار دادن این روش (در صورتیکه نتایج قابل قبولی ارائه دهد)، برای بررسی و احتمالاً واسنجی دیگر روابط و روشها غیر منطقی نیست.

۴- نتایج مدل CRLE

نتایج تخمین تبخیر متوسط ماهانه و سالانه با استفاده از مدل CRLE برای آبهای کم عمق (صرفنظر از تاثیر ذخیره گرمایی لایه‌های زیرین) و آبهای عمیق و نیز مقایسه آن با نتایج بیلان آبی (ماه‌های می تا اکتبر سالهای ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۹) در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج مدل بر اساس داده‌های ایستگاه تبخیرسنجی چاه نیمه واقع در مجاورت مخازن و داده‌های تعداد ساعات آفتابی ایستگاه سینوپتیک زابل، طی سالهای ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۹ بدست آمده است. مقایسه نتایج ماهانه مدل CRLE برای آبهای کم عمق و آبهای عمیق نشان می‌دهد اثر گرمای ذخیره شده در مخازن تأثیری زیادی بر تبخیر ماهانه نمی‌گذارد. مقایسه نتایج مدل با مقادیر واقعی تبخیر نشان می‌دهد که این مدل نمی‌تواند میزان تبخیر از مخازن چاه نیمه را با دقت مناسبی برآورد کند.



شکل ۳: نتایج تبخیر مدل CRLE برای آبهای کم عمق و عمیق و مقایسه با نتایج بیلان آبی

۵- واسنجی مدل

علت عدم تطابق نتایج مدل با نتایج واقعی را می‌توان در بررسی دوباره الگوریتم مورتون یافت. عمده ضعف این مدل منظور نکردن اثر آشفته‌گی هوای بالای سطح آب (باد) در انتقال رطوبت و افزایش پتانسیل تبخیر از سطح آب می‌باشد. همانگونه که پیشتر گفته شد، مورتون ضریب انتقال بخار را بصورت تابعی از ضریب پایداری اتمسفر و فشار هوا ارائه کرده است که هیچ‌یک از این پارامترها در روابطشان به سرعت باد بستگی ندارند. مورتون در توجیه این فرض سه دلیل عمده را بیان می‌دارد: (۱) ضریب انتقال بخار با افزایش زبری سطح و نیز سرعت باد زیاد می‌شود و از طرفی در مناطق هموار، سرعت باد عاملی در جهت کاهش ضریب زبری می‌باشد؛ (۲) ضریب انتقال بخار با افزایش ناپایداری اتمسفر زیاد

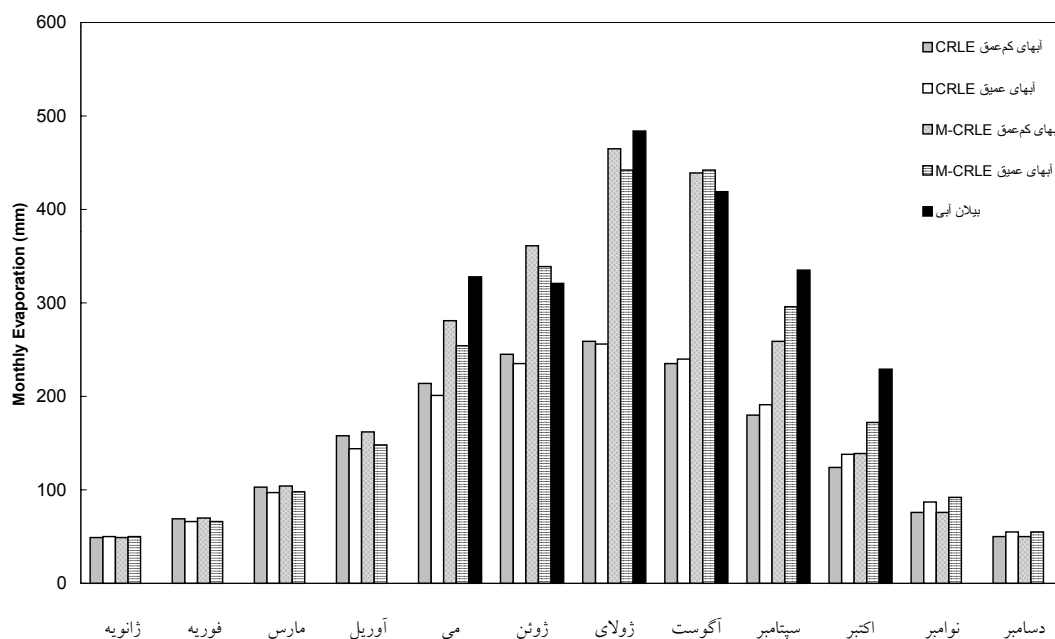
می‌شود و این موضوع در سرعت‌های پایین باد بیشتر از سرعت‌های بالای باد آشکار می‌شود و (۳) استفاده از آمار باد ایستگاه‌های خشکی و ساحلی سبب افزایش خطا به علت موقعیت نصب تجهیزات می‌گردد [۳].
وی با ارائه دلایل فوق استفاده از داده‌های سرعت باد را سبب افزایش خطا در برآورد تبخیر دانسته است. با این وجود به نظر می‌رسد که در نظر نگرفتن میزان آشفستگی هوا در انتقال بخار در مناطقی همچون سیستان که باد نقش مهمی در تغییر اقلیم منطقه دارد، نسبت به منظور کردن آن به عنوان یک پارامتر تعیین کننده، خطای بیشتری را متوجه تخمین تبخیر (و تبخیر و تعرق) خواهد نمود. براین اساس مدل *CRLE* با استفاده از نتایج تبخیر واقعی در ۶ ماه از سال واسنجی گردید. پارامتر f_z در ضریب انتقال بخار (رابطه ۲) مؤثر بوده و در مدل بصورت یک عدد ثابت وارد می‌گردد. در واسنجی مدل این پارامتر با استفاده از داده‌های باد ایستگاه تبخیرسنجی چاه‌نیمه بصورت تابعی از سرعت باد تعیین گردید.

$$f_z = f'(u_2 - 2.2) \geq f' \quad (4)$$

که در این رابطه u_2 سرعت متوسط ماهانه باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب متر بر ثانیه و f' همان f_z در الگوریتم مورتون می‌باشد. نتایج مدل *CRLE* اصلاح شده (*M-CRLE*) برای آبهای کم عمق و عمیق و مقایسه آن با میزان تبخیر بیلان آبی بصورت متوسط ماهانه و سالانه در شکل ۴ ارائه شده است.
از مقایسه نتایج مدل *M-CRLE* با نتایج مدل *CRLE* اینگونه دریافت می‌شود که نتایج این دو مدل در مواقعی از سال که وزش بادهای بیش از ۳/۲۰ متر بر ثانیه (سرعت باد در ارتفاع ۲ متری) وجود نداشته باشد، تفاوتی باهم نخواهند داشت. لیکن با شروع دوره وزش بادهای در منطقه (اواخر ماه می) اختلاف دو مدل بیشتر گردیده تا در ماههای ژولای و آگوست به حداکثر خود رسیده و پس از آن تا ماه اکتبر اختلاف کم شده و در مابقی سال تفاوت چندانی نخواهند داشت. مقایسه مدل با بیلان آبی نشان می‌دهد که نتایج مدل *M-CRLE* با بیلان آبی همخوانی بیشتری بویژه در ایام وزش بادهای شدید دارد.

۶- بحث و نتیجه گیری

همانطور که گفته شد مدل *CRLE* تبخیر سالانه و ماهانه منطقه را در طول وزش بادهای صدویست روزه، کمتر از میزان واقعی آن برآورد می‌کند. نتایج مدل مذکور برای تبخیر سالانه مخازن برابر ۱/۸ متر است که در حدود ۲۷٪ با میزان واقعی تفاوت دارد. به نظر می‌رسد علت عمده این تفاوت، ناشی از منظور نکردن اثر آشفستگی هوای بالای سطح آب، در مدل *CRLE* می‌باشد. با توجه به ضعف مدل *CRLE* در تخمین تبخیر در مناطقی نظیر مخازن چاه‌نیمه (علیرغم کاربرد وسیع آن در سایر مناطق جهان)، سعی گردید مدل براساس نتایج بیلان آبی در ماههای می تا اکتبر سالهایی که نتایج مدل نیز در دسترس می‌بود، واسنجی گردد. بنابراین ضریب انتقال بخار که در مدل اصلی بصورت تابعی مستقل از سرعت باد مطرح گردیده بود، اصلاح شده و اثر باد نیز در آن منظور شد. نتایج مدل اصلاح شده همخوانی بهتری با نتایج واقعی منطقه داشته و میزان تفاوت نتایج سالانه آن با تبخیر واقعی سالانه در حدود ۲٪ می‌باشد.



شکل ۴: مقایسه مدل CRLE و M-CRLE با بیلان آبی

بر این اساس می توان مدل اصلاح شده را با توجه به اینکه تغییر کلی در ساختار مدل اصلی ایجاد نموده است، برای مناطقی که دارای جریان همرفت شدید بر اثر باد می باشند، توصیه نمود. همچنین با توجه به اینکه در نتایج مدل اصلاح شده در ایامی که وزش بادهای شدید تداوم زیادی ندارد، با نتایج مدل اصلی تفاوت محسوسی مشاهده نمی شود، استفاده از مدل اصلاح شده در سایر مناطق نیز می تواند جوابهای قابل قبولی در حد نتایج مدل اصلی ارائه دهد.

۷- مراجع

- [1] Morton, F.I., "Estimating Evapotranspiration from Potential Evaporation: Practicability of an Iconoclastic Approach", J. of Hydrology, 38:1-32, 1978.
- [2] Morton, F.I., "Climatological Estimates of Lake Evaporation", Water Resources Research, 15(1): 64-76, 1979.
- [3] Morton, F.I., "Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and their Significance to the Science and Practice of Hydrology", J. of Hydrology, 66:1-76, 1983.
- [4] Morton, F.I., "Operational Estimates of Lake Evaporation", Journal of Hydrology, 66:77-100, 1983.
- [5] مهندسین مشاور کاژه-سانپو، گزارش نهایی مرحله دوم: عملیات مخازن، طرح استفاده از آب رودخانه سیستان، بهمن ۱۳۴۹.
- [6] سعادت خواه، ناصر، "برآورد تبخیر از سطح آب در مناطق خشک ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۰.
- [7] سعادت خواه، ناصر، سارنگ، امین، تجریشی، مسعود، ابریشم چی، احمد، "برآورد تبخیر از مخازن چاه نیمه"، مجله آب و فاضلاب، شماره ۴۰، زمستان ۱۳۸۰.