



دانشگاه صنعتی شریف  
مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)

# تخمین تبخیر از سطح دریاچه ارومیه

تهیه کنندگان:

احسان جلیوند

سید فرید فاضل مجتهدی

سروش سراوانی

مرداد ۹۳



شناسه سند		
گزارش فنی تخمین تبخیر از سطح دریاچه ارومیه		عنوان سند
<input type="checkbox"/> پروپوزال	<input checked="" type="checkbox"/> گزارش فنی	نوع سند
<input type="checkbox"/> مقاله	<input type="checkbox"/> یادداشت فنی	
۱-۰۲-TR-۱۳۹۳۱۱ (ویرایش - کد موضوعی - کد تعیین کننده نوع - سال و ماه تهیه)		کد سند
		شماره قرارداد
		تاریخ قرارداد
		کارفرما
تخمین تبخیر		گروه فنی
دکتر سمیه سیما و مهندس احسان جلیوند		مدیر فنی طرح
سید فرید فاضل مجتهدی سروش سراوانی		کارشناسان فنی طرح
۱۳۹۳/۱۱/۲۱	تاریخ انتشار ویرایش فعلی	۱۳۹۳/۰۸/۰۸
		تاریخ انتشار اولیه
		ویرایش سوم

#### الگوی کد بندی موضوعی گزارشات

کد	موضوع گزارش	کد	نوع گزارش
۰۱	منابع آب	TR	گزارش فنی
۰۲	مصارف آب	TN	یادداشت فنی
۰۳	غبار و ریزگرد	PR	پروپوزال
۰۴	کاربری اراضی		
۰۵	تالاب	PA	مقاله
۰۶	برف سنجی		

مرکز تحقیقات سنجش از دور (RSRC)، دانشگاه صنعتی شریف، پژوهشکده زیست فناوری، شماره ۲۰۱

تلفن : ۶۶۱۶۴۱۳۸، ۶۶۱۶۴۱۸۵، ۶۶۱۶۴۱۸۵، ۶۶۰۳۶۰۱۶

## پیش‌گفتار

قرارگیری دریاچه ارومیه در آستانه بحرانی زیست‌محیطی در مقیاس بین‌المللی در سال‌های منتهی به سال ۱۳۹۲ شمسی و مطالبات مردم شریف منطقه، هیأت محترم وزیران را بر آن داشت که در اولین جلسه خود در دولت یازدهم، طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۱۱۱۴۶ مورخ ۱۳۹۲/۰۵/۲۸، تشکیل کارگروه نجات دریاچه ارومیه را به تصویب رسانند که پس از بررسی‌های گروه‌های کارشناسی، ۱۹ طرح اولویت‌دار جهت نجات دریاچه ارومیه در جلسه ۱۳۹۲/۰۷/۱۶ کارگروه نجات دریاچه ارومیه تصویب گردید.

به منظور تمرکز و تسریع در روند اقدامات مرتبط با احیای دریاچه ارومیه، پیشنهاد تشکیل «کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه» در جلسه مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ هیأت محترم وزیران مطرح و به موجب اختیارات اصل ۱۳۸ قانون اساسی، طبق مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۷۰۰۹۲ مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۱۲، مقرر گردید که ریاست کارگروه بر عهده معاون اول محترم رئیس‌جمهور باشد و جناب آقای دکتر عیسی کلانتری به عنوان دبیر کارگروه و مدیر اجرایی احیای دریاچه ارومیه تعیین گردیدند. ۷ وزیر، ۲ معاون رئیس‌جمهور و ۳ استاندار حوضه آبریز نیز به عنوان اعضای این کارگروه معرفی شدند.

در گام بعدی، ستاد احیای دریاچه ارومیه ضمن ایجاد کمیته‌های تخصصی شش‌گانه، ۲۰ کارگروه تخصصی، انجام مطالعات تطبیقی و ایجاد شوراهای منطقه‌ای، ضمن برگزاری ۹۸ جلسه متنوع کارشناسی و مدیریتی و بهره‌گیری از نظرات بیش از ۷۵۰ نفر از متخصصان داخلی و بین‌المللی در بازه زمانی ۱۳۶ روزه (از ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ تا ۱۳۹۳/۰۳/۱۷)، اقدام به تدوین و اجرای یک نقشه راه جامع در راستای احیای دریاچه ارومیه نمود که نقشه راه مذکور در جلسه مورخ ۱۳۹۳/۰۴/۰۸ به ریاست رئیس‌جمهور محترم جناب آقای دکتر روحانی، ارائه و مورد تصویب قرار گرفت و دستور شروع عملیات اجرایی راه‌کارهای مصوب توسط ایشان صادر گردید. کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیز طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۵۷۵۴۲ مورخ ۱۳۹۳/۰۵/۲۵ به طور رسمی مسئولیت مطالعه و طراحی طرح نجات دریاچه ارومیه را به دانشگاه صنعتی شریف سپرد.

در کنار دستاوردهای میدانی متعدد حاصل از طرح ملی نجات دریاچه ارومیه از جمله قرار گرفتن دریاچه در مسیر احیای پایدار و رفع مخاطرات بهداشتی و سلامتی، نقش محوری دانشگاه‌های ملی و استانی در کلیه امور مطالعه و پایش، شاخصه‌ای کم‌نظیر در پروژه بوده که توانسته است ضمن خلق تعاملی پویا و چندسویه با دستگاه‌های اجرایی، روح اقدامات علمی-پژوهشی را در کالبد همه پروژه‌های ذیل طرح، جاری نمایند.

لذا با هدف شفاف‌سازی اقدامات مطالعاتی و پژوهشی انجام شده و نیز به منظور فراهم شدن امکان استفاده مجامع علمی در رشته‌های مختلف دانشگاهی از آب (هیدرولوژی، آب زیرزمینی، هیدرولیک و هیدرودینامیک)، محیط‌زیست، اکولوژی و لیمنولوژی گرفته تا اقتصاد و جامعه‌شناسی از دانش بومی تولید شده در این طرح ملی، کلیه مطالعات انجام شده توسط دبیرخانه کارگروه در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی شریف در دسترس پژوهشگران محترم قرار گرفته است. یقیناً تدارک مطالعه و پژوهش در این منابع بومی ارزشمند که حاصل سال‌ها تلاش مجدانه محققان تراز اول داخلی و بین‌المللی بوده، سرآغازی خواهد بود برای تداوم نهضت علمی شکل گرفته و به زودی با بروز جهشی علمی در بستر استثنایی پدید آمده، شاهد شکوفا شدن برکات این گردش آزاد اطلاعات در اقصی نقاط کشور خواهیم بود.

کلیه تعابیر، نتایج و تفاسیری که در این اثر ذکر شده‌اند، محصول تلاش‌های نویسندگان (یا نویسندگان) آن بوده و لزوماً منعکس‌کننده دیدگاه‌های دبیرخانه کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیست. لذا مسئولیت صحت کلیه اطلاعات و نتایجی که توسط این اثر در دسترس عموم قرار می‌گیرد، به عهده نویسندگان (یا نویسندگان) آن می‌باشد.

## چکیده

دریاچه ارومیه یکی از دریاچه های شور جهان می باشد که نزدیک به ۱۰ درصد از مساحت حوزه آبریز ارومیه را تشکیل داده و از حدود سه دهه پیش به موازات افزایش بهره برداری از منابع آب حوضه، تراز آب در آن به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. برآورد نرخ تبخیر از سطح دریاچه ارومیه به عنوان تنها ترم تلفات آب از این پهنه آب شور از اهمیت بالایی در محاسبات بیلان و مدیریت منابع آب حوضه برخوردار است. در این گزارش در ابتدا میزان تبخیر دریاچه در سال ۲۰۱۰ از طریق ۱۲ روش تجربی محاسبه شده است و مقادیر بدست آمده با مقدار تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ به روش بیلان انرژی مقایسه شده که منجر به انتخاب روش دوبرین-کژمن به عنوان روشی که حداقل خطا را نسبت به روش بیلان انرژی دارد، شده است. در ادامه، میزان تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ که مصادف با زمان حداکثر تراز آب دریاچه می باشد مورد بررسی قرار گرفته و با میزان تبخیر دریاچه در سال ۲۰۱۰ مقایسه شد. همچنین اثر میزان شوری بر روی تبخیر دریاچه ارومیه بررسی شده است. برای انجام محاسبه میزان تبخیر از سطح دریاچه در سال ۱۹۹۵ از رابطه دوبرین - کژمن استفاده شده است. برای تأمین داده های مورد نیاز مدل، از تصاویر ماهواره ای NOAA-AVHRR ۱۰ روزه سنجنده و داده های ایستگاه های هواشناسی مجاور دریاچه استفاده شده است. سپس تغییرات زمانی، میانگین ماهیانه مقادیر تبخیر و پارامترهای تاثیرگذار بر روی میزان تبخیر از سطح دریاچه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ارتفاع تبخیر از سطح دریاچه برای سال ۱۹۹۵ در هفت ماه از اواسط فروردین تا اواسط آبان معادل ۱۱۵۸ میلی متر می باشد که در مقایسه با ۱۱۰۰ میلیمتر تبخیر از سطح دریاچه در سال ۲۰۱۰ اندکی بیشتر می باشد. بررسی ها نشان می دهد اندرکنش دو پارامتر حجم آب دریاچه و میزان شوری آن باعث شده تا ارتفاع تبخیر در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ تقریباً یکسان باشد. یعنی حجم بیشتر آب در سال ۱۹۹۵ در کنار آب با شوری کمتر اثری مشابه با آب با شوری بیشتر و حجم کمتر روی ارتفاع تبخیر داشته است. از طرفی دیگر میزان تبخیر برای سال ۱۹۹۵ از سطح دریاچه در حدود ۱۳۸۸ میلی متر در سال می باشد که تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از مقدار ۸۲۶ میلی متری که در گزارش ITC برای همان سال ارائه شده است، می باشد.

**کلید واژه ها:** تبخیر، دریاچه ارومیه، دوبرین-کژمن، شوری، سنجش از دور

## فهرست مطالب

۱	۱- مقدمه
۱	۲- ادبیات فنی و مروری بر مطالعات پیشین
۱	۲-۱- روشهای اندازه گیری تبخیر
۱	۲-۱-۱- اندازه گیری با تشتک تبخیر
۲	۲-۱-۲- روش بیلان آب
۳	۲-۱-۳- روش بیلان انرژی (BREB)
۴	۲-۱-۴- روش انتقال جرم
۴	۲-۱-۵- روش های ترکیبی
۵	۲-۲- مقایسه روش های مختلف تبخیر
۷	۲-۳- جمع بندی مطالعات پیشین
۷	۳- روش انجام کار
۹	۳-۱- روابط تجربی بررسی شده در این تحقیق
۹	۳-۱-۱- روش Dalton :
۱۰	۳-۱-۲- روش Bulk-Aerodynamic :
۱۰	۳-۱-۳- روش Ryan – Harleman :
۱۱	۳-۱-۴- روش Priestly- Taylor :
۱۲	۳-۱-۵- روش DeBruin – Keijman :
۱۲	۳-۱-۶- روش Penman :
۱۳	۳-۱-۷- روش Meyer :
۱۳	۳-۱-۸- روش Stephen – Stewart :
۱۴	۳-۱-۹- روش Turc :
۱۴	۳-۱-۱۰- روش Papadakis :

- ۱۴ ۳-۱-۱۱- روش Developed Meyer :
- ۱۵ ۳-۱-۱۲- روش Developed Harbeck :
- ۱۵ ۳-۲- نحوه بدست آوردن پارامترهای روابط تجربی:
- ۱۶ ۳-۲-۱- داده های مورد استفاده
- ۱۹ ۴- نتایج
- ۱۹ ۴-۱- نتایج مقایسه روش های تبخیر
- ۲۲ ۴-۲- نتایج مربوط به تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵
- ۲۸ ۴-۳- مقایسه نتایج تبخیر در تحقیقات مختلف
- ۳۰ ۴-۴- مقایسه نتایج تبخیر دریاچه با اندازه گیری های تشتک تبخیر آب شور:
- ۳۱ ۴-۵- مقایسه نتایج با مطالعات ITC:
- ۳۲ ۵- نتیجه گیری
- ۳۳ ۶- پیشنهادات
- ۳۴ ۷- فهرست منابع
- ۳۶ ۸- پیوست:
- ۳۶ پیوست الف: جدول کامل نتایج تبخیر روزانه در سال ۲۰۱۰ با ۱۲ روش تجربی
- ۳۷ پیوست ب: نحوه محاسبه پارامتر تشعشع خالص  $Q_n$
- ۴۰ پیوست ج: بررسی اثر شوری و شرایط فیزیکی تشتک در برآورد ارتفاع تبخیر با این روش

## فهرست شکلها

- شکل ۱- اجزای معادله بیلان انرژی در دریاچه ..... ۲
- شکل ۲- تغییرات زمانی دمای سطح دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵. .... **Error! Bookmark not defined.**
- شکل ۳- تغییرات زمانی گرمای نهان تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵. .... **Error! Bookmark not defined.**
- شکل ۴- تغییرات زمانی دلتا ( شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما در دمای هوا) دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ ... ۲۴
- شکل ۵- تغییرات زمانی ضریب سایکرومتریك دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ ..... ۲۵
- شکل ۶- تغییرات زمانی تشعشع خالص خورشیدی دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ ..... ۲۶
- شکل ۷- تغییرات زمانی ذخیره گرمایی دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ ..... ۲۷
- شکل ۸- نمودار سری زمانی تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ ..... ۲۷
- شکل ۹- مقایسه ارتفاع تبخیر بدست آمده از تشتك تبخیر و روش دوبرین - کژمن در سال ۱۹۹۵ ..... ۳۰

## فهرست جداول

- جدول ۱- نتایج مقایسه روابط تجربی تبخیر با نتایج بیلان انرژی (جهانبانی، ۱۳۹۱)..... ۹
- جدول ۲- تبخیر روزانه محاسبه شده از روشهای مختلف دریاچه ارومیه سال ۲۰۱۰..... ۱۵
- جدول ۳- ایستگاههای استفاده شده برای محاسبه مقدار فشار اتمسفریک دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵..... ۱۶
- جدول ۴- ایستگاههای استفاده شده برای محاسبه مقدار فشار اتمسفریک دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰..... ۱۶
- جدول ۵- ایستگاههای استفاده شده برای محاسبه مقدار سرعت باد دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰..... ۱۷
- جدول ۶- پارامترهای مورد نیاز روابط تجربی..... ۱۷
- جدول ۷- میانگین تبخیر ماهانه محاسبه شده با روش های مختلف (mm)..... ۱۹
- جدول ۸- شاخص های آماری نتایج میانگین ماهانه روابط تجربی در مقایسه با نتایج بیلان انرژی..... ۱۹
- جدول ۹- شاخص های آماری نتایج روزانه روابط تجربی در مقایسه با نتایج بیلان انرژی..... ۲۱
- جدول ۱۰- مقادیر متوسط نرخ تبخیر روزانه (mm/day) طی ماه های مختلف سال ۱۹۹۵..... ۲۱
- جدول ۱۱- مقایسه نتایج محاسبه میزان تبخیر از سطح دریاچه در مطالعات مختلف در سال های مختلف..... ۲۷
- جدول ۱۲- مقایسه نتایج محاسبه میزان تبخیر از سطح دریاچه در مطالعات مختلف در سال های مختلف..... ۲۹
- جدول ۱۳- مقایسه ارتفاع تبخیر ماهانه بدست آمده از تشتک تبخیر و روش دوبرین - کژمن در سال ۱۹۹۵..... ۳۰
- جدول ۱۴- جدول کامل تبخیر روزانه ۱۲ روش مختلف تجربی و روش بیلان انرژی در سال ۲۰۱۰..... ۳۵
- جدول ۱۵- محاسبه ضریب اصلاحی تشتک بصورت ماهیانه براساس داده های ایستگاه های گلخانه آبشور و آب شیرین در سال ۱۳۷۴ شمسی..... ۳۹
- جدول ۱۶- محاسبه ضریب اصلاحی تشتک بصورت سالیانه براساس داده های ایستگاه های گلخانه آبشور و آب شیرین در سال ۱۳۷۴ شمسی..... ۴۰
- جدول ۱۷- محاسبه ضریب اصلاحی تشتک و دریاچه بصورت ماهیانه براساس داده های ایستگاه های گلخانه آبشور و دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ میلادی..... ۴۰
- جدول ۱۸- محاسبه ضریب اصلاحی تشتک و دریاچه بصورت سالیانه براساس داده های ایستگاه های گلخانه آبشور و دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ میلادی..... ۴۱

## ۱- مقدمه

برآورد نرخ تبخیر از سطح دریاچه ارومیه به عنوان تنها ترم تلفات آب از این پهنه آب شور از اهمیت بالایی در محاسبات بیلان و مدیریت منابع آب حوضه برخوردار است. به همین جهت برای محاسبه تبخیر دریاچه در یک دوره طولانی، یافتن روشی که هم از دقت کافی برخوردار باشد و هم هزینه محاسباتی کمی را به دنبال داشته باشد اهمیت زیادی پیدا می‌کند. روش بیلان انرژی، یکی از روشهای محاسبه تبخیر، به عنوان دقیق ترین روش موجود برای محاسبه تبخیر پهنه های آبی شناخته شده است. اما در کنار این دقت مناسب، استفاده از الگوریتم بیلان انرژی به دلیل نیاز به داشتن داده‌های ورودی زیاد برای بازه‌های زمانی طولانی هزینه محاسباتی زیادی را در پی خواهد داشت. بنابراین یافتن یک روش جایگزین که در عین نیاز به داده های ورودی کمتر، دقت مناسبی را نیز فراهم می‌کند بسیار راهگشا خواهد بود. در این تحقیق ابتدا ۱۲ روش تجربی محاسبه تبخیر معرفی، سپس نتایج این روشها با خروجی روش بیلان انرژی مقایسه و نهایتا با توجه به میزان خطای هر روش و تعداد پارامترهای ورودی آن، کم هزینه ترین (از نظر تعداد داده های ورودی) و دقیقترین روش در مقایسه با الگوریتم بیلان انرژی معرفی خواهد شد.

## ۲- ادبیات فنی و مروری بر مطالعات پیشین

به طور کلی روش های مورد استفاده در برآورد تبخیر از سطح آب را می توان به پنج دسته تقسیم نمود:

(۱) اندازه گیری با تشتک تبخیر<sup>۱</sup>، (۲) بیلان آب، (۳) بیلان انرژی، (۴) انتقال جرم<sup>۲</sup> و (۵) روش های ترکیبی (Gianniou et al., 2007). در ادامه هر یک از این روش ها به اختصار توضیح داده می شوند (سیما، ۱۳۹۲).

### ۲-۱- روشهای اندازه گیری تبخیر

#### ۲-۱-۱- اندازه گیری با تشتک تبخیر

روش اندازه گیری با تشتک تبخیر به منظور برآورد ارتفاع تبخیر بیش از یک قرن است که کاربرد دارد در این روش مقدار تبخیر به طور مستقیم و با اندازه گیری تغییرات عمق و حجم آب در تشتک صورت می گیرد. بطور معمول از دو نوع تشتک برای این منظور استفاده می‌شود که عبارتند از تشتک کلاس الف و تشتک کاسه‌ای که در

<sup>۱</sup> Evaporation pans

<sup>۲</sup> Mass transfer

ایران عموماً از نوع اول استفاده می‌شود. بین ارتفاع تبخیر اندازه گیری شده با تشتک تبخیر و تبخیر واقعی از دریاچه تفاوتی وجود دارد که با اعمال ضریب اصلاح می‌شود و موارد زیر در ایجاد شدن این اختلاف موثر می‌باشند:

۱. تفاوت در بازتابش آب کم عمق درون تشتک با آب دریاچه
۲. تفاوت در تبادل انرژی تشتک تبخیر با محیط پیرامون از طریق دیواره و کف تشتک نسبت به دریاچه یا مخزن
۳. تفاوت در آشفته‌گی اتمسفر مجاور سطح آب در تشتک و دریاچه
۴. تفاوت در دما و رطوبت نسبی اتمسفر مجاور سطح آب در تشتک و دریاچه
۵. تفاوت حجم آب تشتک و دریاچه که در توزیع انرژی تابشی مؤثر است. (Allen et al., 1998).

معمولاً صرف نظر از کلیه تفاوت‌های ذکر شده، برای اصلاح مقادیر اندازه گیری شده از تشتک از یک رابطه خطی به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$E_L = K_p E_p \quad (1)$$

که در آن:  $E_L$ ، تبخیر از دریاچه یا توده آب سطحی (mm)؛  $E_p$ ، تبخیر از تشتک (mm) و  $K_p$ ، ضریب تشتک تبخیر و بدون بعد می‌باشد. محدوده پیشنهادی این ضریب در مطالعات انجام شده برای برآورد ماهانه نرخ تبخیر ۰/۵-۲ می‌باشد و معمولاً برای مقادیر متوسط سالانه تبخیر ضریب ۰/۷ به کار گرفته می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود محدوده پیشنهادی وسیع این ضریب می‌تواند منجر به ایجاد خطای قابل ملاحظه در برآورد تبخیر به این روش شود.

## ۲-۱-۲- روش بیلان آب

روش بیلان آب بر اساس قانون بقای جرم یا پیوستگی بنا شده است. این روش یک روش ساده برای محاسبه تبخیر برای دوره‌های ماهانه و سالانه است که بر اساس میزان جریان ورودی، خروجی و مقدار تراوش از بستر، حجم تبخیر شده در آن محاسبه می‌شود. نتایج بدست آمده از این روش معمولاً به دلیل وجود عدم قطعیت در برآورد ترم تراوش با خطا همراه می‌باشد (Harbeck et al., 1954).

برای محاسبه تبخیر با استفاده از روش بیلان آب در حالت کلی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$E = (I_s + I_g + P) - (O_s + O_g) + \Delta S - T \quad (2)$$

که در آن،  $I_s$ ، جریان ورودی جریانات سطحی،  $I_g$ ، ورودی جریان زیرسطحی یا زهکشی آب زیرزمینی،  $P$ ، بارش مستقیم بر سطح دریاچه،  $O_s$ ، جریانات خروجی سطحی از مخزن می باشد که ممکن است تنظیم شده یا تنظیم نشده باشد،  $O_g$ ، نشت از دریاچه،  $E$ ، تلفات تبخیر از سطح دریاچه،  $\Delta S$ ، تغییرات میزان ذخیره دریاچه و  $T$ ، مصرف گیاهان آبی از آب دریاچه یا تعرق است. کلیه اجزای این معادله دارای بعد حجم در زمان بوده و در واقع برای یک دوره مشخص مانند روز، هفته، ماه و یا سال بیان می شوند (Hunt et al., 1959). کاربرد روش بیلان آب به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری جریانات عبوری از بستر دریاچه، محدودیت دارد. مگر اینکه زمین شناسی منطقه نشان دهد که جریانی از بستر عبور نکند.

### ۲-۱-۳- روش بیلان انرژی (BREB)<sup>۱</sup>

روش بیلان انرژی بر اساس قانون بقای انرژی بنیان نهاده شده است. در این روش با برآورد مجموع جبری انرژیهای ورودی، خروجی و تغییرات ذخیره آن در آب دریاچه مقدار تبخیر از سطح محاسبه شده که از نقطه نظر فیزیکی دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر به حساب می‌آید. با این حال با توجه به هزینه ابزاری نسبتاً بالای این روش از نظر پردازش داده‌های سنجش از دور و حجم عملیات میدانی معمولاً از آن در کالیبراسیون روش‌ها و مدل‌های دیگر استفاده می‌شود. معادله بیلان انرژی برای پهنه‌های آبی در حالت کلی به صورت زیر است (Anderson et al., 2004):

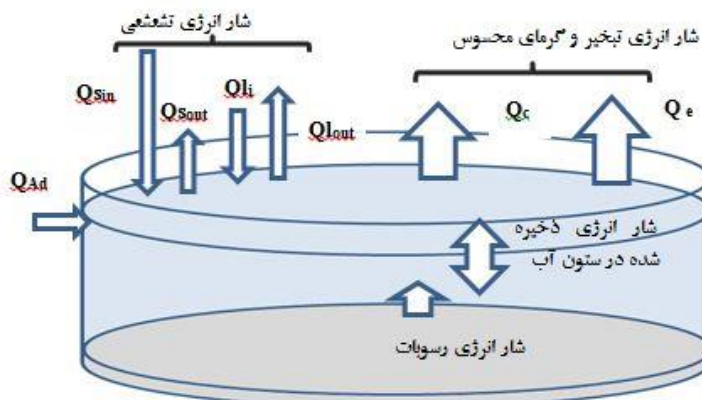
$$\Delta Q_n = Q_{SN} - Q_{LW} - Q_e - Q_c + Q_{AD} + Q_{Sed} \quad (3)$$

ترم‌های این معادله که در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند، عبارتند از:

$Q_{SN}$ : شار خالص تابش خورشیدی با طول‌موج کوتاه،  $Q_{LW}$ : شار انرژی خالص ناشی از تابش خورشیدی با طول‌موج بلند،  $Q_e$ : شار گرمای تبخیر (گرمای نهان)،  $Q_c$ : انرژی انتقالی به جو به عنوان شار گرمای محسوس،  $Q_{AD}$ : شار گرمای انتقال یافته<sup>۲</sup> به سطح آب از طریق بارش، جریان آب سطحی و زیرزمینی،  $Q_{Sed}$ : شار گرمای رها شده از رسوبات و  $\Delta Q_n$ : شار گرمای خالص ذخیره شده در ستون آب می‌باشد. واحد کلیه اجزای معادله بیلان انرژی، واحد شار انرژی ( $W/m^2$ ) می‌باشد.

<sup>۱</sup> Bowns Ratio Energy Balance

<sup>۲</sup> Advective Heat Flux



شکل ۱- اجزای معادله بیلان انرژی در دریاچه

## ۲-۱-۴- روش انتقال جرم<sup>۱</sup>

یکی دیگر از روشهای برآورد تبخیر روش انتقال جرم است که محاسبه تبخیر در آن بر مبنای اختلاط پیوسته و غیر پیوسته جرم یا بخار آب در لایه مرزی می‌باشد. تقریباً تمام معادلات انتقال جرم از یک قاعده مشترک استفاده می‌کنند که آن متناسب بودن مقدار تبخیر با اختلاف فشار بخار و سرعت باد می‌باشد (Harbeck et al., 1954). روش انتقال جرم برای محاسبه تبخیر، بر مبنای اختلاط پیوسته و غیر پیوسته جرم یا بخار آب در لایه مرزی به وجود آمده است. لازم به ذکر است که این نوع انتقال با انتقال در اثر فشار یا هر نیروی خارجی دیگر تفاوت دارد. تبادل جرم نتیجه تفاوت غلظت یا گرادیان است. روشهای تبادل جرم را می‌توان به سه گروه عمده روشهای دالتونی (Daltonian Methods)، روشهای آئرو دینامیکی (Aerodynamic Methods) و روشهای شار گردبادی (Eddy Flux Methods) تقسیم بندی نمود.

## ۲-۱-۵- روشهای ترکیبی

اصول این روشها مبتنی بر ترکیب معادلات بیلان انرژی و معادلات نیمرخ (جابجایی آئرو دینامیکی) و برخی روابط تجربی می‌باشد. از میان روشهای ترکیبی برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب، می‌توان به روشهای پنمن<sup>۲</sup>، پنمن مونتیت<sup>۳</sup>، پرستلی تیلورا<sup>۱</sup>، دوبرین-کژمن<sup>۲</sup> و فینچ<sup>۳</sup> اشاره کرد.

<sup>۱</sup> Mass Transfer

<sup>۲</sup> Penman

<sup>۳</sup> Penman-Monteith

## ۲-۲- مقایسه روش های مختلف تبخیر

طبق تحقیقات بسیاری از محققین روش بیلان انرژی (BREB) به عنوان مناسبترین روش برای محاسبه تبخیر از سطوح آبی معرفی شده است و در بسیاری از مراجع به عنوان روش مرجع برای مقایسه روش های مختلف به کار گرفته می شود (Assoulin et al., 1993). تحقیقات Winter در سال ۱۹۸۱ نشان داد؛ در صورتیکه نتایج روش بیلان انرژی به صورت فصلی میانگین گیری شوند در محدوده ۱۰ درصد مقادیر واقعی و اگر به صورت ماهانه میانگین گیری شوند در محدوده ۱۵ درصد مقادیر واقعی قرار می گیرند.

Winter و همکاران در سال ۱۹۹۵، یک سری از روش های مشابه تبخیر را برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه ویلیامز<sup>۴</sup> در اقلیم حاره ای شمال ایالت مینسوتا<sup>۵</sup> به کار بردند. آنها نتایج برآورد تبخیر ماهانه از ۱۱ معادله را با روش بیلان انرژی به عنوان روش مبنا در طول یک دوره ۵ ساله مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که روش اصلاح شده De-Bruin-Keijman، پرستلی تیلور و یک معادله اصلاح شده پنمن بهترین تطبیق را با نتایج حاصل از روش بیلان انرژی دارد.

Xu و Singh در سال ۱۹۹۷ نیز ۱۳ روش انتقال جرم را که برای چهار دریاچه در ایالت انتاریو<sup>۶</sup> در کانادا به کار برده و با نتایج اندازه گیری تبخیر از تشتک در مقیاس ماهانه مورد مقایسه قرار دادند. مطالعات ایشان نشان داد که نتایج حاصل از همه معادلات به میزان قابل قبولی با اندازه گیری ها تطبیق دارد. به علاوه آنها بیان کردند که هنگامی که معادله به دست آمده در یک سایت برای برآورد تبخیر در سایت دیگری به کار رود، نتایج مطلوبی نخواهد داشت (Singh et al., 1997).

Dalton و همکاران در سال ۲۰۰۴ نرخ تبخیر تعیین شده از چندین روش را برای دریاچه سمنول<sup>۷</sup> که مخزن بزرگی واقع در مرز ایالات فلوریدا و جورجیا است مورد مقایسه قرار دادند. در سه مطالعه ای که روش بیلان

---

<sup>۱</sup> Priestly- Taylor

<sup>۲</sup> Debruin-Keijman

<sup>۳</sup> Finch

<sup>۴</sup> Williams

<sup>۵</sup> Minnesota

<sup>۶</sup> Ontario

<sup>۷</sup> Seminole

انرژی به عنوان روش مبنای مقایسه به کاررفته است (مطالعات Winter و همکاران (۲۰۰۳)، Dalton و همکاران (۲۰۰۴) و Rosenberry و همکاران (۲۰۰۷))، نتیجه گیری شد که روش های تجربی که بر ارزیابی شار های انرژی تأکید دارند، بهترین برآورد از تلفات تبخیر به جو را ارائه می دهند.

اندازه گیری تبخیر به عنوان بخشی از مطالعات دراز مدت فرآیندهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در دریاچه کوچک میروور<sup>۱</sup> واقع در نواحی جنوبی نیو همشایر<sup>۲</sup> در ایالت متحده انجام گرفت (Winter et al., 1985). در این مطالعات برآوردهای تبخیر از این دریاچه با استفاده از تشتک تبخیر انجام شده بود اما در مطالعات بعدی، Winter و همکارانش در سال ۲۰۰۳ برای برآورد دقیق تر تبخیر، روش بیلان انرژی را به کار بردند. براساس این مطالعات، Rosenberry و همکاران نیز در سال ۲۰۰۷ برآورد تبخیر از دریاچه میروور را با ۱۵ روش مختلف انجام داده و نتایج را مقایسه نمودند که بر این اساس نسبت به روش مبنای بیلان انرژی و نسبت باونز (BREB)، نتایج حاصل از روش های پنمن، پرستلی تیلور و دبروین کیجمن<sup>۳</sup> در محدوده ۲۰ درصد نتایج روش BREB واقع شدند. همچنین آنها نتیجه گیری کردند که روش های تجربی که تنها به اندازه گیری دمای هوا یا دما و تابش خورشیدی نیاز دارند، روش های مقرون به صرفه ای برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه های کوچک هستند.

Elsawwaf و همکاران در سال ۲۰۱۰، نرخ تبخیر روزانه از دریاچه ناصر در مصر را با استفاده از ۶ روش معمول بر مبنای داده های ایستگاه های هواشناسی شناور روی سطح دریاچه محاسبه نموده و نتایج حاصل را با روش BREB مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که در مقیاس روزانه روش پنمن و در مقیاس ماهانه روش های پرستلی تیلور و دبروین کیجمن بهترین تطبیق را با بیلان انرژی دارند.

برای برآورد نرخ تبخیر از دریاچه ارومیه در ایران، چندین مطالعه انجام شده است. از جمله احمدزاده و همکاران در سال ۲۰۰۸ با اعمال یک ضریب تجربی بر حسب غلظت مواد جامد محلول در آب در روابط Meyer و Harbeck به دو رابطه جدید برای محاسبه تبخیر آب شور از تشتک تبخیر رسیدند. جهانبانی نیز در سال ۱۳۹۱، نتایج

---

<sup>۱</sup> Mirror

<sup>۲</sup> New Hampshire

<sup>۳</sup> deBruin-Keijman

حاصل از ۲۳ روش تجربی محاسبه تبخیر با اصلاح اثر شوری را با نتایج حاصل از روش بیلان انرژی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ مقایسه کرده و به این نتیجه رسید که ۱۰ روش از جمله روش‌های پرستلی تیلور و دبروین-کژمن دارای اختلاف‌های کم با روش بیلان انرژی می‌باشند و مقادیر مدل‌سازی با این روش‌ها روند مشابهی با مقادیر به دست آمده از روش استاندارد دارند.

## ۲-۳- جمع بندی مطالعات پیشین

- روش بیلان انرژی دقیقترین روش جهت برآورد تبخیر از سطح دریاچه‌ها می‌باشد.
- تعداد داده‌های ورودی زیاد و عدم دسترسی به برخی داده‌ها استفاده از روش بیلان انرژی را با مشکلاتی همراه می‌سازد بنابراین این روش بیشتر به عنوان مبنای مقایسه با روش‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- مطابق مطالعات گذشته روش‌های تجربی پرستلی-تیلور، دبروین-کژمن و در برخی موارد روش پنمن حداقل خطا را نسبت به روش بیلان انرژی دارند.
- در اکثر مطالعات انجام شده با این روش‌ها از داده‌های زمینی (ایستگاه‌های هواشناسی) به عنوان ورودی مدل استفاده شده است.
- در مطالعات انجام شده بر روی دریاچه ارومیه نیز مجموعاً ۱۲ روش تجربی از جمله روش‌های دبروین-کژمن و پرستلی تیلور کمترین اختلاف را نسبت به روش بیلان انرژی نشان داده‌اند.

## ۳- روش انجام کار

در این تحقیق ۱۲ رابطه تجربی به شکلی که در ادامه توضیح داده خواهد شد انتخاب شده‌اند و نتایج هر یک از این روش‌ها در دریاچه ارومیه برای ۵۴ روز از سال ۲۰۱۰ میلادی با نتایج حاصل از روش بیلان انرژی توزیعی مقایسه شده تا در نهایت بتوان بهترین روش را از نظر دقت و تعداد داده‌های ورودی مورد نیاز انتخاب کرد. انتخاب ۵۴ روز از سال ۲۰۱۰ طی ماه‌های آوریل تا اکتبر بر اساس بررسی کیفیت تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS می‌باشد. پس از یافتن مناسب‌ترین روش محاسبه میزان تبخیر، تبخیر آب دریاچه به کمک آن روش برای سال ۱۹۹۵ که در آن تراز آب دریاچه در بالاترین حد خود بوده است، برآورد شده است.

نحوه انتخاب روش ها بدین شکل بوده است که با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات جهانی در ۱۳۹۱ از میان ۲۳ روش بررسی شده ۱۰ روش از روشهایی که بهترین مطابقت را با نتایج بیان انرژی داشتند با توجه به مقدار انحراف جذر میانگین مربعات ( $RMSE^1$ )، میانگین قدر مطلق خطاها ( $MBE^2$ ) و میانگین خطاها ( $EF$ ) انتخاب شده و دو روش دیگر نیز با توجه به روابط حاصل از تحقیق احمدزاده و همکاران برگزیده شده اند (جدول ۱) سپس با توجه به دو معیار کمترین خطا نسبت به روش بیان انرژی و حداقل تعداد داده های ورودی، مناسبترین روش جهت برآورد مقدار تبخیر از سطح دریاچه ارومیه انتخاب شده است، در ادامه نحوه محاسبه تبخیر در هر یک از این ۱۲ روش توضیح داده می شود.

---

<sup>1</sup> Root-Mean-Square Error

<sup>2</sup> Mean Bias Error

جدول ۱- نتایج مقایسه روابط تجربی تبخیر با نتایج بیلان انرژی (جهانبانی، ۱۳۹۱)

روش	ME	MBE	MPE	RMSE	NRMSE	RRMSE	EF	CRM
Dalton	۳۸۰۲	۲۳۰۱	-۰۰۴	۲۵۰۵	۱۶۰۶	۰۰۳	۰۰۸	۰۰۳
Bulk-Aerodynamic	۳۴	۱۱۰۴	-۰۰۳	۱۶۰۷	۱۰۰۸	۰۰۲	۰۰۹	۰۰۱
Ryan-Harleman	۳۵۰۱	۱۴۰۲	-۰۰۳	۱۸۰۹	۱۲۰۳	۰۰۲	۰۰۹	۰۰۲
Trivett	۶۹۰۳	۳۵	-۰۰۵	۳۹۰۸	۲۵۰۹	۰۰۵	۰۰۴	۰۰۴
Quinn	۷۸۰۴	۴۱۰۳	-۰۰۶	۴۶۰۴	۳۰۰۲	۰۰۶	۰۰۲	۰۰۵
Thornthwaite	۵۴	۲۹۰۵	-۰۰۴۴	۳۱۰۸	۲۰۰۷	۰۰۴	۰۰۷	۰۰۴
Meyer	۳۴	۴۰۳	-۰۰۳	۱۷۰۶	۱۱۰۵	۰۰۲	۰۰۹	۰۰۵
Jensen-Haise	۶۶	-۱۸۰۶	۰۰۰۵	۳۴۰۱	۲۲۰۲	۰۰۴	۰۰۶	-۰۰۲
Makkink	۵۷۰۳	-۲۵۰۳	۰۰۷	۳۳۰۹	۲۲	۰۰۴	۰۰۶	-۰۰۳
Stephans-Stewart	۴۰	۱۷۰۹	-۰۰۳	۲۱۰۲	۱۳۰۸	۰۰۲۶	۰۰۸۴	۰۰۲
Turc	۳۱۰۶	-۳۰۵	-۰۰۰۷	۱۷۰۳	۱۱۰۳	۰۰۲	۰۰۸۹	۰
Hamon	۴۶۰۵	۱۷۰۹	-۰۰۴	۲۳۰۸	۱۵۰۵	۰۰۳	۰۰۸	۰۰۲
Blaney-Criddle	۶۱۰۹	-۹۰۵	-۰۰۰۶	۲۸۰۱	۱۸۰۳	۰۰۳	۰۰۷	-۰۰۱
Papadakis	۳۲۰۹	-۱۱۰۶	۰۰۳	۱۵۰۳	۱۰	۰۰۲	۰۰۹	-۰۰۱
Hargreaves-Samani	۵۰۰۴	-۱۶	۰۰۳	۲۶۰۴	۱۷۰۲	-۰۰۳	۰۰۸	-۰۰۲
Harbeck	۴۵۰۴	۲۵۰۷	-۰۰۵	۲۸۰۷	۱۸۰۷	۰۰۴	۰۰۷	۰۰۳
Priestly-Taylor	۲۶۰۷	۰۰۱	-۰۰۱	۱۲	۷۰۸	۰۰۲	۱	۰
DeBruin-Keijman	۲۹۰۵	-۱۰۴	۰	۱۲۰۵	۸۰۱	۰۰۲	۱	۰
Penman	۴۳۰۶	-۱۲۰۸	۰	۲۵	۱۶۰۳	۰۰۳	۰۰۸	-۰۰۲
Brutsaert-Stricker	۵۹۰۶	-۳۶۰۴	۰۰۶	۳۹	۲۵۰۴	۰۰۴۷	۰۰۵	-۰۰۴
DeBruin	۸۴۰۴	-۴۶۰۱	۰۰۸۶	۵۰۰۴	۳۲۰۸	۰۰۶	۰۰۱	-۰۰۶
Penman-Monteith	۱۲۱۰۸	-۴۹۰۷	۱۰۲	۵۹۰۷	۳۸۰۹	۰۰۷	-۰۰۲۵	-۰۰۶
Penman-Kimberly	۸۴۰۷۸	-۵۰	۰۰۶	۵۸۰۱۷	۳۷۰۸	۰۰۷	-۰۰۲	-۰۰۶

### ۳-۱- روابط تجربی بررسی شده در این تحقیق

۳-۱-۱- Dalton : روش

$$E = N \times U_2(e_0 - e_a) \times 10 \quad (۴)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$U_2$ : سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $ms^{-1}$ )

$N$  (ضریب انتقال جرم): بر اساس مطالعات قبلی در دریاچه ارومیه این ضریب برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شد.

$e_0$ : فشار بخار اشباع در دمای سطح آب (mbar)

$e_a$ : فشار بخار اشباع در دما و رطوبت نسبی هوا (mbar)

۳-۱-۲- روش Bulk-Aerodynamic :

$$E = K_E U_2 (e_0 - e_a) (86.4 * 10^6) \quad (5)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$K_E$ : ضریب تجربی ( $kPa^{-1}$ )

$U_2$ : سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $ms^{-1}$ )

$$K_E = \left( \frac{0.622 \rho_a}{P * \rho_w} \right) * \frac{0.4^2}{\left[ \ln \left( \frac{Z_m - Z_d}{Z_0} \right) \right]^2} \quad (6)$$

$e_0$ : فشار بخار هوا در بالای سطح آب ( $kPa$ )

$\rho_a$ : چگالی هوا ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$\rho_w$ : چگالی آب ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$P$ : فشار اتمسفریک ( $kPa$ )

$Z_m$ : ارتفاع که سرعت باد و فشار بخار هوا اندازه گیری می شود

$Z_d$ : جابجایی که برای سطوح آبی معمولی مانند دریاچه برابر صفر است.

$Z_0$ : ارتفاع زبری برای سطوح آبی معمولی

۳-۱-۳- روش Ryan - Harleman :

$$E = \frac{(2.7(T_0 - T_a)^{0.333} + 3.1U_2)(e_0 - e_a) * 86.4}{L * \rho_w} \quad (7)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$e_0$ : فشار بخار اشباع در دمای سطح آب (mbar)

$e_a$ : فشار بخار اشباع در دما و رطوبت نسبی هوا (mbar)

$U_2$ : سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $ms^{-1}$ )

$\rho_w$ : چگالی آب ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$L$ : گرمای نهان تبخیر ( $MJKg^{-1}$ )

گرمای نهان تبخیر  $L$  به صورت تابعی از دمای آب بر حسب ( $^{\circ}\text{C}$ ) از معادله زیر قابل محاسبه است.

$$L = 2.5 - 0.0024 T_s$$

۳-۱-۴- روش Priestly- Taylor :

$$E = \alpha * \left(\frac{\Delta}{\gamma + \Delta}\right) * \left(\frac{Q_n - Q_x}{L * \rho_w}\right) * 86.4 \quad (8)$$

$E$ : تبخیر ( $\text{mmd}^{-1}$ )

$\alpha$ : ضریب تجربی این روش برابر ۱,۲۶

$L$ : گرمای نهان تبخیر ( $\text{MJkg}^{-1}$ )

$\rho_w$ : چگالی آب ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

$\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما در دمای هوا ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$$\Delta = \frac{C_w * E_s}{(T_a + 237.3)^2} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $C_w$  معرف ظرفیت گرمایی ویژه آب می باشد. همچنین  $E_s$  فشار بخار اشباع ( $\text{kPa}$ )

می باشد که این پارامتر خود وابسته به دمای هوا ( $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ )) می باشد و به صورت زیر محاسبه می شود.

$$E_s = 0.611 * \exp\left(\frac{17.27 * T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (10)$$

$\gamma$ : ضریب سایکرومتری که به دما و فشار اتمسفریک بستگی دارد ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

این ضریب فشار جزئی آب را به دمای هوا مربوط می سازد و بر اساس رابطه زیر تابعی از فشار اتمسفریک

می باشد:

$$\gamma = 0.665 * \frac{P}{1000} \quad (11)$$

$Q_n$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ): تشعشع خالص خورشیدی که بر اساس روابط پیوست (۱) محاسبه می شود و  $Q_x$  تغییر

در ذخیره گرمایی دریاچه ( $\text{Wm}^{-2}$ ) است که بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_x = \frac{\rho_w * C_w * (\Delta T) * a_z * Z}{a_s} \quad (12)$$

$Q_x$ : ذخیره گرمایی دریاچه ( $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ )

$\rho_w$ : چگالی آب دریاچه ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

$C_w$ : ظرفیت گرمایی ویژه آب دریاچه ( $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ )

$\Delta T$ : اختلاف دمایی سطح دریاچه در دو بازه زمانی ۱۰ روزه ( $^\circ C$ )

$a_z$ : سطح دریاچه در عمق  $Z$  ( $km^2$ )

$Z$ : ضخامت لایه (m)

$a_s$ : سطح دریاچه ( $km^2$ )

۳-۱-۵- روش DeBruin - Keijman :

$$E = \left( \frac{\Delta}{0.63\gamma + 0.85\Delta} \right) * \left( \frac{Q_n - Q_x}{L * \rho_w} \right) 86.4 \quad (13)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$\gamma$ : ضریب سایکرومتری که به دما و فشار اتمسفریک بستگی دارد ( $Pa^\circ C^{-1}$ )

$Q_n$ : تشعشع خالص ( $Wm^{-2}$ )

$Q_x$ : تغییر در ذخیره گرمایی دریاچه ( $Wm^{-2}$ )

$L$ : گرمای نهان تبخیر ( $MJKg^{-1}$ )

$\rho_w$ : چگالی آب ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما در دمای هوا ( $kPa^\circ C^{-1}$ )

از آنجایی که آب دریاچه ارومیه شور است باید این ضریب برای آب شور اصلاح شود. مقدار این پارامتر

برای دریاچه ارومیه معادل ظرفیت گرمایی ویژه آب بحرالمیت برابر ۳۰۳۰ ژول بر کیلوگرم کلورین در نظر گرفته

شد (Lensky, 2005).

۳-۱-۶- روش Penman :

$$E = \left( \left( \frac{\Delta}{\gamma + \Delta} \right) * \left( \frac{Q_n - Q_x}{L * \rho_w} \right) 86.4 \right) + \left( \frac{\Delta}{\gamma + \Delta} \right) (0.26(0.5 + 0.54U_2)(e_0 - e_a)) \quad (14)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما در دمای هوا ( $\text{kPa}^0\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$ : ضریب سایکرومتری که به دما و فشار اتمسفریک بستگی دارد ( $\text{kPa}^0\text{C}^{-1}$ )

$Q_n$ : تشعشع خالص ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$Q_x$ : تغییر در ذخیره گرمایی دریاچه ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$L$ : گرمای نهان تبخیر ( $\text{MJKg}^{-1}$ )

$\rho_w$ : چگالی آب ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )

$e_0$ : فشار بخار اشباع در دمای سطح آب (mbar)

$e_a$ : فشار بخار اشباع در دما و رطوبت نسبی هوا (mbar)

$U_2$ : سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $\text{ms}^{-1}$ )

۳-۱-۲- روش Meyer :

$$E = 0.36(1 + 0.2237U_2)(e_0 - e_a) \quad (15)$$

$e_0$ : فشار بخار اشباع در دمای سطح آب (mbar)

$e_a$ : فشار بخار اشباع در دما و رطوبت نسبی هوا (mbar)

$U_2$ : سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $\text{ms}^{-1}$ )

$E$ : تبخیر ( $\text{mmd}^{-1}$ )

۳-۱-۸- روش Stephen - Stewart :

$$E = (0.0082T_a - 0.19)(3.495 * 10^{-2})Q_s \quad (16)$$

$E$ : تبخیر ( $\text{mmd}^{-1}$ )

$Q_s$ : تشعشع خورشیدی ورودی ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$T_a$ : درجه حرارت هوا ( $^{\circ}\text{F}$ )

۳-۱-۹- Turc روش :

$$RH < 50\% \quad (17)$$

$$E = \left(0.013 \frac{T_a}{T_a + 15}\right) (Q_s + 50) \left(1 + \frac{50 - RH}{70}\right) * 86.4$$

$$E = \left(0.013 \frac{T_a}{T_a + 15}\right) (Q_s + 50) * 86.4$$

$$RH > 50\%$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$Q_s$ : تشعشع خورشیدی ورودی ( $Wm^{-2}$ )

$T_a$ : درجه حرارت هوا ( $F^0$ )

$RH$ : رطوبت نسبی بر حسب درصد

۳-۱-۱۰- Papadakis روش :

$$E = 0.5625(e_{amax} - e_{a \text{ dew point}}) * \frac{10}{d} \quad (18)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$e_{amax}$ ,  $e_{a \text{ dew point}}$ : فشار بخار اشباع در درجه حرارت حداکثر و فشار بخار اشباع در نقطه شبنم (معمولاً

درجه کمتر از حداقل دمای روزانه هوا) ( $Pa$ )

$d$ : تعداد روزهای ماه

۳-۱-۱۱- Developed Meyer روش :

$$E = 0.36(1 + 0.2237V)[(e_s X_{H_2O}) - e_a] \quad (19)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$V$ : سرعت باد ( $ms^{-1}$ )

$e_s$ : فشار بخار اشباع ( $mmHg$ )

$e_a$ : فشار بخار هوا ( $mmHg$ )

$T_a$ : دمای هوا ( $^0C$ )

$T_w$ : دمای آب ( $^0C$ )

۳-۱-۱۲- روش Developed Harbeck:

$$E = 0.119343V[1 - 0.03(T_a - T_w)] * [(e_s X_{H_2O}) - e_a] \quad (20)$$

$E$ : تبخیر ( $mmd^{-1}$ )

$V$ : سرعت باد ( $ms^{-1}$ )

$e_s$ : فشار بخار اشباع (mmHg)

$e_a$ : فشار بخار هوا (mmHg)

$T_a$ : دمای هوا ( $^{\circ}C$ )

$T_w$ : دمای آب ( $^{\circ}C$ )

### ۳-۲- نحوه بدست آوردن پارامترهای روابط تجربی:

برای محاسبه تبخیر از هر روش به تعدادی داده ها و پارامترهای پایه نیاز است. به این منظور ابتدا تمامی پارامترهای مورد نیاز هر روش برای برآورد تبخیر محاسبه و سپس با استفاده از مقادیر داده ها و پارامترهای بدست آمده مقدار تبخیر حساب شد. در جدول (۲) پارامترهای مورد نیاز هر یک از روابط آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای مورد نیاز روابط تجربی

نام رابطه	تعداد پارامتر	پارامترهای لازم
Turc	۳	درجه حرارت هوا / تشعشع خورشیدی / رطوبت نسبی
stephen stwart	۲	درجه حرارت هوا / تشعشع خورشیدی
Developed Meyer	۴	سرعت باد / فشار بخار اشباع در سطح آب / فشار بخار هوا در بالای سطح آب / غلظت نمک در آب دریاچه
Developed Harbeck	۵	سرعت باد / فشار بخار هوا در بالای سطح آب / غلظت نمک در آب دریاچه / دمای سطح آب / دمای هوا
Meyer	۳	سرعت باد / فشار بخار اشباع در سطح آب / فشار بخار هوا در بالای سطح آب
Papdakis	۲	فشار بخار اشباع هوا در نقطه شبنم / بخار اشباع هوا در درجه حداکثر
Debruin/Keijman	۵	گرمای نهان تبخیر / چگالی آب / دمای آب / تشعشع خالص / فشار هوا

گرمای نهان تبخیر / چگالی آب / دمای آب / تشعشع خالص / فشار هوا	۵	Priestly/Taylor
گرمای نهان تبخیر / چگالی آب / دمای آب / فشار هوا / تشعشع خالص / سرعت باد / فشار بخار هوا در بالای سطح آب)	۷	Penman
سرعت باد / گرمای نهان تبخیر / دمای سطح آب = فشار بخار اشباع در سطح آب / فشار بخار هوا در بالای سطح آب / چگالی آب / دمای هوا	۶	Ryan/Harleman
سرعت باد / فشار بخار اشباع در سطح آب / فشار بخار هوا در بالای سطح آب	۳	Dalton
سرعت باد / فشار بخار اشباع در سطح آب / فشار بخار هوا در بالای سطح آب / چگالی هوا / چگالی آب / فشار اتمسفریک	۶	Bulk/Aerodynamic

### ۳-۲-۱- داده های مورد استفاده

در ادامه روش بدست آوردن هر یک از پارامترهای موجود در روابط فوق شرح داده می شود:

$P$  (فشار اتمسفریک): برای بدست آوردن این پارامتر از داده های هواشناسی استفاده شد، به این ترتیب که ابتدا برای ماه ها و روزهای مختلف سال مقدار فشار اتمسفریک مشخص شد و از طرفی دیگر با توجه به مشخص بودن تراز تمام ایستگاه ها برای بازه های زمانی مورد نیاز (مثلا بازه های ده روزه برای محاسبه تبخیر سال ۱۹۵۵ دریاچه ارومیه) روابطی خطی بین تراز ایستگاه ها و مقدار فشار اتمسفریک بدست آمد. سپس با داشتن مقدار تراز آب دریاچه در بازه های زمانی یاد شده مقدار فشار اتمسفریک براساس تراز آب دریاچه و رابطه خطی بدست آمده، محاسبه شد. در جدول (۳) و (۴) ایستگاه های استفاده شده برای سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ آورده می شوند:

جدول ۳- ایستگاه های استفاده شده برای محاسبه مقدار فشار اتمسفریک دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

میانہ	پیرانشهر	ارومیه	سردشت
اهر	جلفا	ماکو	خوی
تکاب	سراب	تبریز	مراغه
مهاباد			

جدول ۴- ایستگاه های استفاده شده برای محاسبه مقدار فشار اتمسفریک دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰

خوی	کلیبر	کهریز	جلفا	بناب	اهر
-----	-------	-------	------	------	-----

نقده	میانه	میاندواب	مرند	مراغه	مهاباد
تبریز	سراب	سلماس	سهند	اشنویه	ارومیه

$U_2$  (سرعت در ارتفاع ۲ متری): این پارامتر بر اساس سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و رابطه بین ارتفاع و سرعت باد بدست آمده است. رابطه بین سرعت باد و ارتفاع بصورت زیر است:

$$\frac{U}{U_r} = \left(\frac{Z}{Z_r}\right)^\alpha \quad (21)$$

$U$ : سرعت باد در ارتفاع خواسته شده  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$U_r$ : سرعت باد در ارتفاعی که اطلاعات آن را داریم  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$Z$ : ارتفاعی که مقدار باد در آن ارتفاع خواسته شده است (m)

$Z_r$ : ارتفاعی که مقدار باد در آن ارتفاع موجود است (m)

همچنین برای استفاده از رابطه فوق باید از مقدار سرعت باد در یک ارتفاع خاص استفاده شود و از آنجایی که اطلاعات هواشناسی مقدار سرعت باد در ارتفاع ده متری را ثبت می‌کند، از اطلاعات زمینی استفاده شده و مقدار سرعت باد در ارتفاع دو متری برای هر ایستگاه بدست آورده شد. جدول (۵) نام ایستگاههای استفاده شده را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از درونیابی به روش Moving Average (IDW2) در نرم افزار ILWIS 3.3 نقشه های سرعت باد در ارتفاع دو متری بدست آورده شد. نهایتاً از روی این نقشه اطلاعات سرعت باد در محدوده دریاچه استخراج شد.

جدول ۵- ایستگاههای استفاده شده برای محاسبه مقدار سرعت باد دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰

ماکو	مهاباد	خوی	بانه	اهر
ارومیه	میانه	میاندواب	مرند	مراغه
تبریز	تبریز	سراب	سهند	اشنویه

$\rho_w$  (چگالی آب): مقادیر چگالی آب دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰ با توجه به نتایج اندازه گیری کیفی گزارش شده در مطالعه (Sima & Tajrishy, 2014) بدست آمد. اما برای سال ۱۹۹۵، با توجه به پیوسته نبودن اندازه گیری دانسیته آب دریاچه از دی ماه سال ۱۳۷۳ تا دی ماه ۱۳۷۴ وثبت غلظت املاح اصلی آب به صورت

موردی در چند ایستگاه ساحلی توسط سازمان آب منطقه ای ارومیه تصمیم بر آن شد که براساس مطالعه حسین پور، (۱۳۹۱) مقدار دانسیته برای کل سال ۱۹۹۵ برابر با مقدار ۱۱۴۴ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شده است. (حسین پور، ۱۳۹۱)

$T_s$  (دمای سطح آب): مقادیر متوسط دمای سطح آب دریاچه در سال های ۱۹۹۵ بر اساس داده های حاصل از محصولات دمای سطح سنجنده NOAA-AVHRR استخراج شد، مشخصات داده های دریافتی از این سنجنده در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶- مشخصات تصویر دریافتی از سنجنده NOAA-AVHRR برای استخراج داده های دمای سطح آب

قدرت تفکیک زمانی	قدرت تفکیک مکانی	سنجنده	ماهواره	الگوریتم محاسبه
لحظه ای روزانه	۱/۱ کیلومتر	AVHRR	NOAA	MCSST

$T_a$  (دمای هوا): به منظور برآورد دمای هوای مجاور دریاچه در سال ۱۹۹۵، با استفاده از داده های موردی دمای سطح آب و دمای هوای اندازه گیری شده توسط سازمان آب منطقه ای ارومیه طی سال های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۶، یک رابطه خطی به شرح زیر توسعه داده شد:

$$T_s = 0.99T_a + 2.0353 \quad (22)$$

$T_a$ : دمای هوا (درجه سانتی گراد)

$T_s$ : دمای سطح (درجه سانتی گراد)

سپس با استفاده از این رابطه و داده های دمای سطح، متوسط دمای هوای مجاور ( $T_a$ ) دریاچه بدست آمد.  $RH$  (رطوبت نسبی): با توجه به داده های دریافت شده از ایستگاه های هواشناسی حوزه آبریز دریاچه میزان رطوبت نسبی روی دریاچه برون یابی شده و سپس از مقادیر محاسبه شده روی دریاچه میانگین گیری شد.  $Q_n$  (تشعشع خالص): نحوه محاسبه این پارامتر در پیوست آورده شده است.

## ۴- نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده برای تبخیر ماهانه از روابط مختلف برای سال ۲۰۱۰ با یکدیگر مقایسه می شوند. سپس مقدار تبخیر ماهانه در سال ۱۹۹۵ به عنوان سالی که حداکثر تراز آب دریاچه ارومیه در آن رخ داده، بر اساس روش منتخب محاسبه شده و نتایج آن آورده می شود. همچنین در این بخش تغییرات ترمهای مختلف اثرگذار در محاسبه تبخیر در ماههای مختلف به صورت نمودار رسم شده است. نهایتاً مقادیر تبخیر بدست آمده در سال ۱۹۹۵ بر اساس فرمول تجربی منتخب با داده های تشتک تبخیر ایستگاه گلمانخانه و نتایج مطالعات انجام شده توسط ITC در همین سال مقایسه می شود.

### ۴-۱- مقایسه نتایج روشهای مختلف

در این قسمت مقادیر روزانه و ماهیانه تبخیر در سال ۲۰۱۰ که از طریق روشهای مختلف محاسبه شده است، آورده می شود و در ادامه مقادیر مذکور از طریق شاخصهای آماری با دادههای بدست آمده از طریق بیلان انرژی مقایسه می شوند.

مقادیر تبخیر محاسبه شده با ۱۲ روشی که انتخاب شده بودند و روش بیلان انرژی در ۵۵ روز از سال ۲۰۱۰ به صورت روزانه و میانگین ماهانه به ترتیب در جداول (۷) و (۸) ارائه گردیده است. میانگین گیری ماهانه به این صورت انجام شده است که میانگین میزان تبخیر روزهای موجود در هر ماه به عنوان نماینده تمام روزهای ماه مورد نظر در نظر گرفته شده است.

جدول ۷- تبخیر روزانه محاسبه شده از روشهای مختلف دریاچه ارومیه سال ۲۰۱۰

Julian Date	BREB EV	Developed meyer	Develped Harbeck	Debruin/Keijman	Penman	Priestly/Taylor	stephen stewart	Ryan/Harleman	Turc	Papdakis	Dalton	Bulk/Aerodynamic	Meyer
104	5.83	2.61	0.98	5.40	5.20	5.27	3.04	1.97	4.39	0.71	1.27	11.05	4.24
110	5.92	2.97	0.90	5.75	5.44	5.66	3.53	2.00	4.86	1.01	1.17	10.14	4.79
134	6.07	3.48	1.14	6.04	5.81	5.98	3.91	2.38	5.19	0.51	1.47	12.76	5.55
141	6.84	4.63	2.28	7.08	7.17	7.03	4.44	3.88	5.89	0.51	2.77	24.17	7.15
145	7.09	3.74	1.38	7.18	6.83	7.13	4.53	2.73	5.88	0.25	1.78	15.50	5.99
146	7.27	3.52	1.23	7.16	6.73	7.10	4.50	2.61	5.85	0.76	1.64	14.30	5.86
147	7.27	4.77	1.74	7.26	7.07	7.25	4.84	3.34	6.44	0.45	2.11	18.36	7.26

152	6.81	5.25	1.52	6.92	6.71	6.92	4.86	3.31	6.65	0.15	1.78	15.17	7.75
154	6.45	6.13	1.91	6.58	6.62	6.59	4.83	3.78	7.09	/0.22	2.16	18.44	8.73
161	6.39	6.08	2.17	6.46	6.63	6.46	4.69	3.93	6.96	/0.32	2.46	21.15	8.66
162	6.77	7.16	2.53	6.94	7.14	6.97	5.10	4.74	7.69	0.84	2.75	23.56	9.97
163	6.84	7.55	2.68	7.07	7.29	7.11	5.32	4.95	7.92	0.13	2.92	24.95	10.51
164	6.90	7.69	3.08	7.17	7.48	7.23	5.36	5.51	7.55	0.11	3.35	28.64	10.87

جدول ۸- میانگین تبخیر ماهانه محاسبه شده با روش های مختلف (mm)

نام رابطه	Apr	May	Jun.	Jul	Aug.	Sep.	Oct.
Developed Meyer	83.7	120.9	215.6	251.4	208.9	162.2	73.7
Developed Harbeck	28.2	46.6	76.4	111.5	81.7	63.3	24.9
Debruin/Keijman	167.3	208.3	208.8	202.5	168.3	115.5	79.8
Penman	159.5	201.7	214.1	220.7	182.9	134.1	89.1
Priestly/Taylor	163.9	206.9	210.0	204.4	169.5	115.7	78.5
stephen stwart	98.6	133.3	155.4	156.2	134.2	105.7	65.5
Ryan/Harleman	59.5	89.7	143.5	187.3	151.2	94.7	55.2

جدول ۸- میانگین تبخیر ماهانه محاسبه شده با روش های مختلف (mm)(ادامه)

Turc	138.7	175.6	226.6	220.3	183.7	141.6	93.7
papdakis	25.9	14.9	12.5	18.5	16.5	18.7	17.3
Dalton	36.5	58.6	83.4	121.1	91.2	56.8	35.1
Bulk/Aerodynamic	317.9	510.6	715.0	1039.5	781.6	485.8	299.1
Meyer	135.5	190.8	302.8	353.3	302.5	193.4	129.7
BREB	176.3	207.2	202.4	193.8	160.5	110.9	77.0

در جداول (۹) و (۱۰) به ترتیب نتایج میانگین ماهانه و روزانه روابط تجربی با بیلان انرژی از طریق شاخص های آماری مختلف مقایسه شده اند، بعنوان مثال یکی از شاخص هایی که مورد استفاده قرار گرفته است، انحراف جذر میانگین مربعات است که تفاوت میان مقدار پیش بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می باشد. RMSE ابزار خوبی جهت مقایسه خطاهای پیش بینی توسط یک مجموعه داده بوده که هر چه مقدار این شاخص به صفر نزدیکتر باشد بیانگر خطای کمتر می باشد. مقادیر RMSE روش های مختلف نسبت به روش مرجع یعنی بیلان

انرژی در جداول (۹) و (۱۰) نشان داده شده است، بر اساس این شاخص، روابط دوبرین-کژمن و پرستلی-تیلور کمترین مقدار خطا را هم در مقیاس روزانه و هم ماهانه دارا می باشند.

یکی دیگر از شاخص های بکار رفته، ضریب تعیین می باشد که هر چه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد تطابق بیشتری بین مدل و واقعیت وجود خواهد داشت. ضریب تعیین، شاخصی است که نشان می دهد تا چه اندازه معادله رگرسیونی نمونه ها، داده ها را به خوبی برازش می کند. البته لازم است توجه شود که ملاک  $R^2$  را نمی توان و نبایستی به تنهایی در نظر گرفت، بلکه این ملاک را باید به موازات سایر شاخص ها بکار برد. مقادیر  $R^2$  در مقیاس روزانه و ماهانه در جداول (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. مطابق این جداول، روابط دوبرین-کژمن و پرستلی-تیلور بالاترین مقادیر ضریب تعیین را دارا می باشند.

جدول ۹- شاخص های آماری نتایج میانگین ماهانه روابط تجربی در مقایسه با نتایج بیلان انرژی

نام رابطه	MBE	MAE	RMSE	$R^2$	تعداد پارامترها
Developed Meyer	1.7	50.4	59.2	0.36	4
Developed Harbeck	99.4	99.4	107.9	0.32	6
Debruin-Keijman	-3.2	5.7	6.4	0.99	5
Penman	-10.6	16.9	18.3	0.95	7
Priestly-Taylor	-3.0	6.6	7.8	0.99	5
stephen stwart	39.9	39.9	47.8	0.86	2
Ryan-Harleman	49.6	49.6	67.4	0.42	6
Turc	-7.4	27.2	27.9	0.81	3
papdakis	143.4	143.4	150.8	0.31	2
Dalton	92.2	92.2	100.4	0.42	3
Bulk-Aerodynamic	-431.6	431.6	487.8	0.43	6
Meyer	-68.5	84.9	98.0	0.45	3

جدول ۱۰- شاخص های آماری نتایج روزانه روابط تجربی در مقایسه با نتایج بیلان انرژی

نام رابطه	MBE	MAE	RMSE	$R^2$
Debruin/Keijman	0.19	0.22	0.24	0.99
Priestly/Taylor	0.21	0.25	0.29	0.98
Penman	0.56	0.65	0.72	0.91
Turc	0.59	0.91	1.16	0.60
stephen stewart	1.18	1.30	1.48	0.68
Ryan/Harleman	1.16	1.37	1.86	0.41
Developed Meyer	0.76	1.65	2.11	0.22
Dalton	2.86	2.86	3.10	0.38
Developed Harbeck	3.08	3.17	3.39	0.18
Meyer	3.35	3.78	4.22	0.44
Papdakis	5.02	5.02	5.27	0.00
Bulk/Aerodynamic	18.12	18.71	20.47	0.39

#### ۴-۲- نتایج مربوط به تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

مطابق محاسبات انجام شده در بخش قبل بهترین روش از نظر هزینه محاسباتی و دقت در سال ۲۰۱۰، روش دوبرین-کژمن انتخاب شد. از طرفی یکی از پرآب ترین سالهای آبی دریاچه ارومیه در چند دهه اخیر سال ۱۹۹۵ می باشد. بنابراین در این گزارش تصمیم بر آن شد که برای سال ۱۹۹۵ نیز محاسبات تبخیر تنها بر اساس روش دوبرین-کژمن انجام گیرد. تنها تفاوتی که بین سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ وجود دارد در پارامتر  $Q_x$  (ذخیره گرمایی دریاچه) می باشد. این پارامتر برای سال ۲۰۱۰ به دلیل کم بودن حجم دریاچه، برابر صفر در نظر گرفته شد درحالیکه در سال ۱۹۹۵ به دلیل حجم زیاد آب در دریاچه محاسبه شده است. بطور کلی برای محاسبه تبخیر از سطح آب دریاچه با استفاده از روش دوبرین-کژمن شش پارامتر استفاده می شود:

۱- گرمای نهان تبخیر آب دریاچه (L)

۲- چگالی آب ( $\rho_w$ )

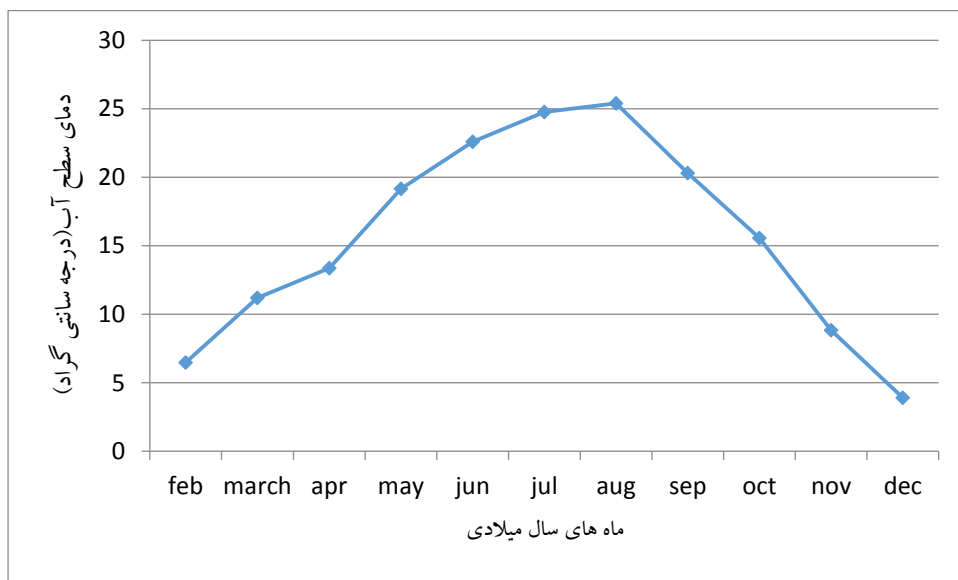
۳- دلتا: شیب منحنی فشار بخار اشباع-دما در دمای هوا ( $\Delta$ )

۴- تشعشع خالص ( $Q_n$ )

۵- ضریب سایکرومتریک ( $\gamma$ )

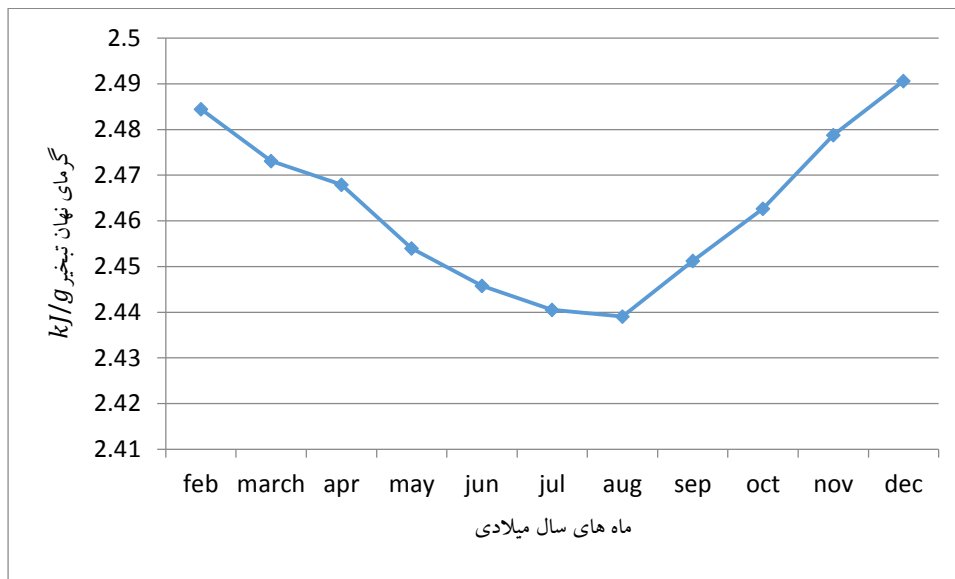
۶- ذخیره گرمایی دریاچه ( $Q_x$ )

یکی از موثرترین پارامترها در محاسبه تبخیر از سطح آب، دمای سطح بوده که به صورت غیر مستقیم در محاسبه همه ترمهای رابطه دوبرین-کژمن وارد شده است. بر اساس داده های استخراج شده از سنجنده NOAA-AVHRR در سال ۱۹۹۵ و میانگین گیری آنها روی سطح دریاچه، تغییرات دمای سطح در ماههای مختلف رسم شده است. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، تغییرات دمای سطح در طول سال به صورت زنگوله ای شکل می باشد که بیشترین مقدار آن در فصل تابستان و ماه آگوست رخ داده است.



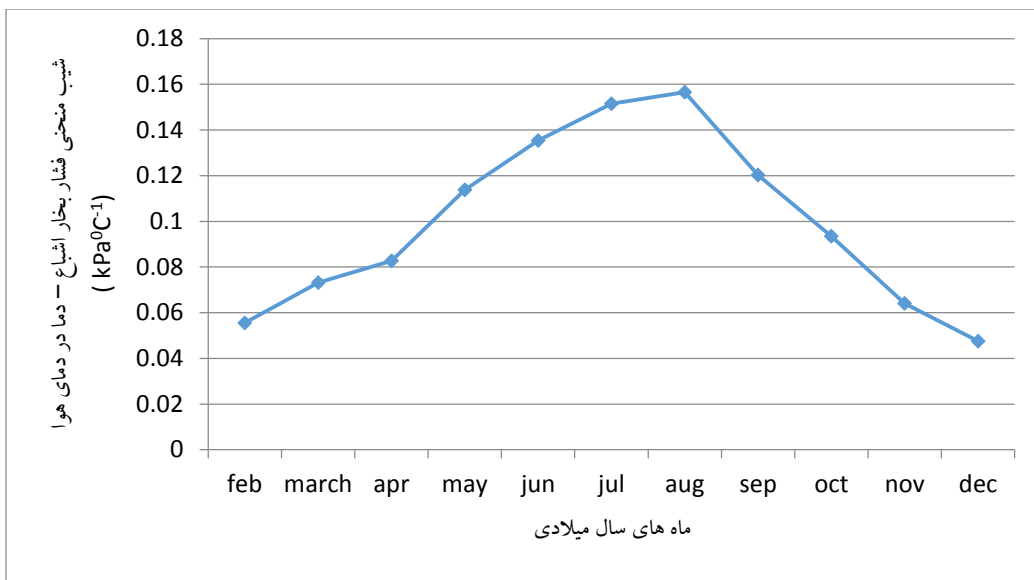
شکل ۲- تغییرات زمانی دمای سطح آب دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

پارامتر تاثیرگذار دیگر، گرمای نهان تبخیر بوده که تغییرات آن در طول سال ۱۹۹۵ میلادی در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، با توجه به وجود رابطه عکس بین گرمای نهان تبخیر و دمای سطح، مقدار این پارامتر در ماه آگوست به حداقل مقدار خود می رسد.



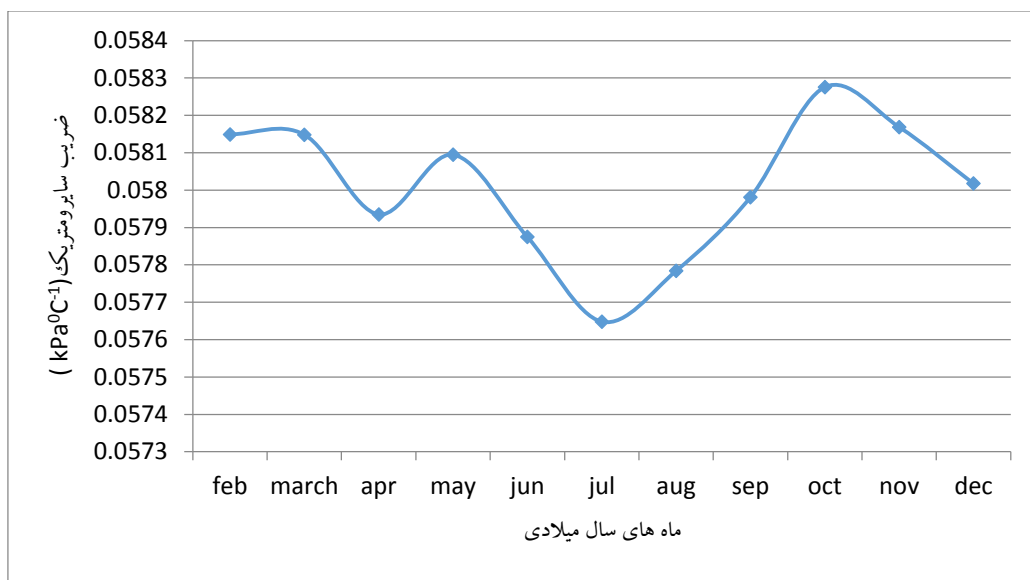
شکل ۳- تغییرات زمانی گرمای نهان تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

نمودار تغییرات سری زمانی دلتا (شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما در دمای هوا) در طول سال ۱۹۹۵ میلادی بصورت شکل (۴) نشان داده شده است، شکل کلی نمودار دلتا زنگوله‌ای شکل است. این پارامتر وابسته به دو عامل فشار بخار اشباع و دمای هوا است و از طرفی دیگر پارامتر دمای هوا نیز رابطه مستقیم با پارامتر فشار بخار اشباع دارد پس می‌توان گفت که پارامتر دلتا تنها وابسته به پارامتر فشار بخار اشباع می‌باشد. حال همانطور که در شکل مشاهده می‌شود فشار بخار اشباع در ماه آگوست به حداکثر مقدار خود می‌رسد و حالت کلی نمودار آن بصورت زنگوله می‌باشد بنابراین نمودار دلتا نیز زنگوله مانند است که در ماه آگوست به حداکثر مقدار خود رسیده است.



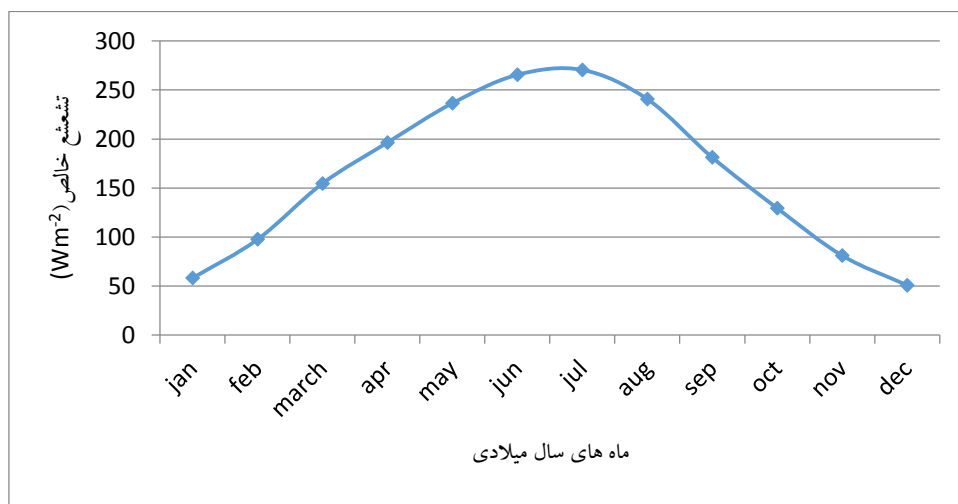
شکل ۴- تغییرات زمانی دلتا ( شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما در دمای هوا ) دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

نمودار تغییرات سری زمانی ضریب سایکرومتریك در طول ۱۱ ماه سال ۱۹۹۵ میلادی بصورت شکل (۴) می‌باشد. تغییرات ضریب سایکرومتریك در طول سال نوسانی است. این ضریب طبق فرمول (۱۱) رابطه مستقیم با فشار اتمسفریك دارد، همچنین برای تغییرات سری زمانی فشار اتمسفریك در طول سال روند مشخصی وجود ندارد، همین موضوع باعث می‌شود که پارامتر ضریب سایکرومتریك نیز نوسانهایی مشابه الگوی نوسانات فشار اتمسفری داشته باشد و نمودار تغییرات ضریب سایکرومتریك بصورت شکل (۵) باشد.



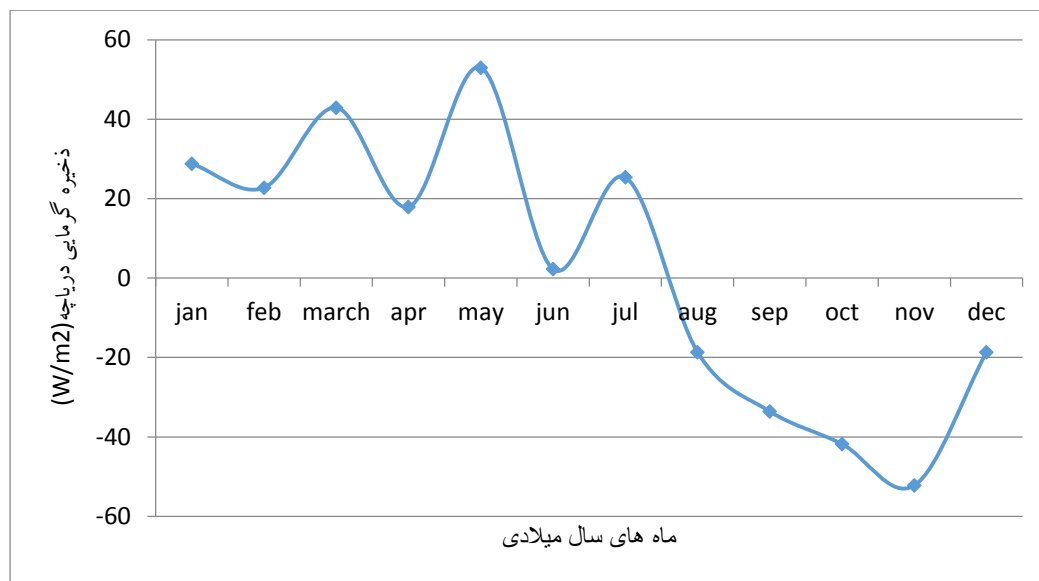
شکل ۵- تغییرات زمانی ضریب سایکرومتریکی دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

تغییرات سری زمانی تشعشع خالص امواج خورشیدی در طول سال ۱۹۹۵ میلادی در شکل (۶) نشان داده شده است. تشعشع خالص به پارامترهای مختلفی وابسته است، ولی موثرترین پارامتر در محاسبه مقدار آن دمای سطح می باشد. بنابراین، نحوه تغییرات تشعشع خالص مشابه تغییرات دمای سطح دریاچه می باشد.



شکل ۶- تغییرات زمانی تشعشع خالص خورشیدی دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

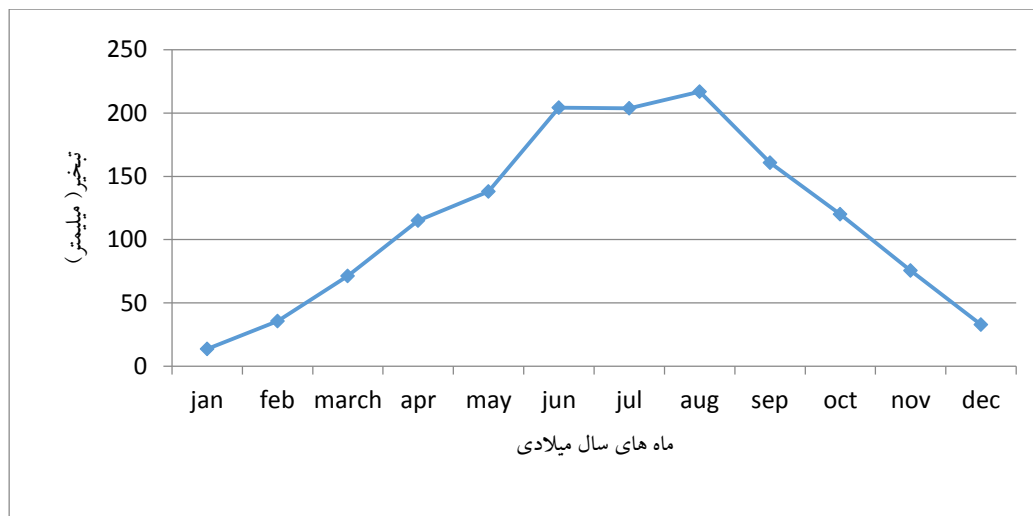
شکل (۷) تغییرات ذخیره گرمایی دریاچه را در سال ۱۹۹۵ نشان می‌دهد. در این شکل نیز مانند شکل (۵) مشاهده می‌شود که تغییرات زمانی ذخیره گرمایی در طول سال نوسانی است و تغییرات آن در طول سال روند مشخصی ندارد و از طرفی دیگر چون رابطه ذخیره گرمایی با اختلاف دمای سطح در دو بازه متوالی زمانی مستقیم بوده و تغییرات اختلاف دمای سطح در دو بازه متوالی زمانی در طول سال روند مشخصی ندارد، نمودار تغییرات ضریب سایکرومتریک بصورت شکل (۷) بدست می‌آید.



شکل ۷- تغییرات زمانی ذخیره گرمایی دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

در نهایت نحوه تغییرات تبخیر ماهیانه سال ۱۹۹۵ در شکل (۸) ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر میزان تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ در ماه آگوست رخ داده است. تاثیرگذارترین پارامتر بر شکل کلی منحنی، پارامتر دمای سطح می‌باشد و شکل کلی منحنی تبخیر از تغییرات این پارامتر تبعیت می‌کند، دلیل این موضوع تاثیر مستقیم یا با واسطه‌ی دمای سطح بر سایر پارامترهای دخیل در محاسبه تبخیر از دریاچه (مانند دمای هوا یا مقدار تشعشع خالص) می‌باشد. همچنین تغییرات زمانی پارامترهای ضریب سایکرومتریک، گرمای نهان تبخیر آب عکس تغییرات زمانی میزان تبخیر آب از سطح دریاچه بوده که با شکل (۸) و رابطه دو برین-کژمن مطابقت دارد.

ارتفاع کل تبخیر در سال ۱۹۹۵ برابر ۱۳۸۸ میلیمتر بدست آمد که حداکثر مقدار آن در فصل تابستان و در ماه آگوست (مرداد و شهریور سال ۱۳۷۴) و برابر ۲۱۷ میلیمتر و حداقل مقدار آن در فصل زمستان و ماه ژانویه (دی و بهمن سال ۱۳۷۳) و برابر ۱۳/۷ میلیمتر برآورد شده است. همچنین مطابق شکل (۸) مقدار حداکثر تبخیر در ماههای گرم سال تقریباً ثابت باقی مانده است. مقادیر میانگین تبخیر روزانه در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ در جدول (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودار سری زمانی تبخیر دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵

جدول ۱۱- مقادیر متوسط نرخ تبخیر روزانه (mm/day) طی ماه های مختلف سال ۱۹۹۵

ماه های سال	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
میزان تبخیر روزانه	۰/۴۴	۱/۲۷	۲/۲۹	۳/۸۲	۴/۴۴	۶/۸۱	۶/۵۷	۶/۹۹	۵/۳۵	۳/۸۷	۲/۵۱	۱/۰۵

#### ۴-۳- مقایسه نتایج تبخیر در تحقیقات مختلف

در زمینه محاسبه میزان تبخیر از سطح دریاچه سه مطالعه سیما و همکاران (۱۳۹۲)، جهانبانی و همکاران (۱۳۹۱) و گزارش حاضر انجام گرفته که در جدول (۱۲) با یکدیگر مقایسه شده اند. بر اساس نتایج بدست آمده از مطالعات سیما و همکاران (۱۳۹۲) برای هفت ماه سال ۲۰۱۰ میلادی از اواسط فروردین تا اواسط آبان، میزان تبخیر در حدود ۱۱۰۰ میلیمتر بوده در حالی که میزان تبخیر محاسبه شده در گزارش حاضر در در همین سال و برای

بازه زمانی مشابه برابر ۱۱۵۰ میلیمتر می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که نسبت به مطالعات سیما و همکاران (۱۳۹۲) در سال ۲۰۱۰ کمتر از ۵٪ تفاوت وجود دارد.

ارتفاع تبخیر در سال ۱۹۹۵ در بازه زمانی ذکر شده برابر ۱۱۵۸ میلیمتر بدست آمده است که در مقایسه با نتایج بدست آمده در سال ۲۰۱۰ تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد. علت این موضوع می‌تواند این باشد که با کاهش تراز آب دریاچه از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۰ میزان حجم دریاچه نیز کاهش یافته است، از طرفی می‌دانیم هر چه حجم آب بیشتر باشد بیشتر انرژی رسیده به آن صرف گرم کردن توده آب شده و سهم کمتری از انرژی صرف تبخیر می‌شود، بنابراین با کاهش حجم آب دریاچه در سال ۲۰۱۰ انتظار می‌رود که مقدار تبخیر افزایش یافته باشد. اما همزمان با کاهش حجم دریاچه مقدار شوری آب نیز افزایش یافته که باعث کاهش نرخ تبخیر از دریاچه شده است. بنابراین اثر توأمان کاهش حجم و افزایش شوری آب (که در جهت مخالف یکدیگر بر روی نرخ تبخیر اثر می‌گذارند) باعث شده تا نرخ تبخیر تغییر چندانی نسبت به سال ۲۰۱۰ نشان ندهد، یعنی حجم بیشتر آب در سال ۱۹۹۵ در کنار شوری کمتر آن اثری مشابه با شوری بیشتر و حجم کمتر آب در سال ۲۰۱۰ روی ارتفاع تبخیر داشته است. شایان ذکر است که در مطالعات سیما و همکاران (۱۳۹۲) مقدار تبخیر با لحاظ اثر شوری از طریق مدل سازی دینامیکی بیلان آب و نمک دریاچه صورت گرفته است و برای محاسبه میزان تبخیر از توزیع مکانی بجای تک ایستگاه سینوپتیکی استفاده شده است. در گزارش حاضر نیز با استفاده از توزیع مکانی داده‌ها و لحاظ کردن اثر شوری میزان تبخیر از دریاچه برآورد شده است. جهت اعمال اثر شوری در این گزارش پارامترهای ظرفیت گرمایی ویژه آب و چگالی آب شور دریاچه ارومیه بجای پارامترهای ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی آب شیرین، استفاده شده است و از طرف دیگر برای محاسبه فشار بخار اشباع آب شور دریاچه، یک ضریب کاهش بر روی محاسبات فشار بخار اشباع آب شیرین اعمال شده است. این در حالیست که در مطالعات جهانبانی و همکاران (۱۳۹۱) تنها از اطلاعات سینوپتیک ارومیه استفاده شده است و اثر شوری نیز با یک ضریب کاهش در روابط لحاظ شده است. براساس مطالعات جهانبانی و همکاران (۱۳۹۱) که برای بازه زمانی سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ میلادی انجام شده است میزان تبخیر سالانه براساس روش بیلان انرژی برای سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ به ترتیب برابر ۱۱۱۸، ۱۰۹۴، ۹۳۳، ۹۲۵ و ۸۸۷ میلیمتر بدست آمده که نسبت به عدد ۱۳۸۸ میلیمتر تبخیر برای سال ۱۹۹۵ میلادی عددی کمتری می‌باشند.

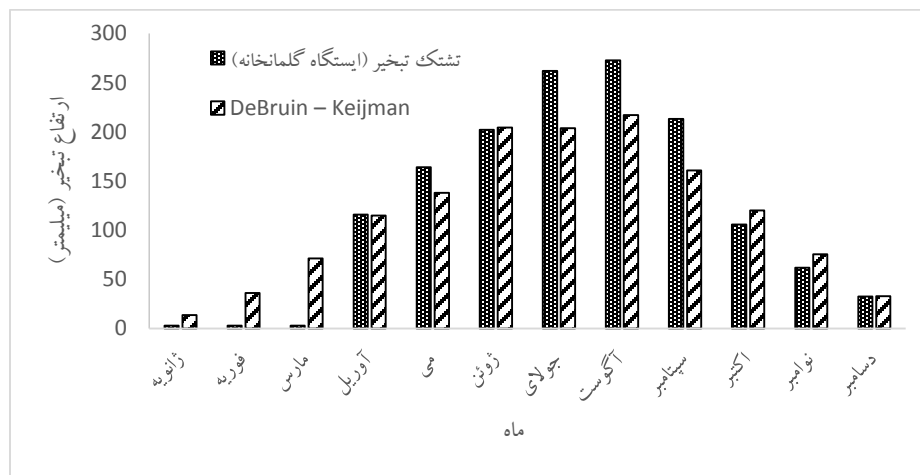
جدول ۱۲- مقایسه نتایج محاسبه میزان تبخیر از سطح دریاچه در مطالعات مختلف در سال‌های مختلف

مطالعه	سال انجام مطالعه	ارتفاع تبخیر	روش	فرضیات روش
سیما ۱۳۹۲	۲۰۰۹	۹۲۳ میلی متر (از آوریل تا اکتبر)	بیان انرژی اصلاح شده (مدل	استفاده از اطلاعات سینوپتیکی چند ایستگاه) توزیع مکانی اطلاعات)
	۲۰۱۰	۱۱۰۰ میلی متر (از آوریل تا اکتبر)	دینامیکی)	
جهانبانی ۱۳۹۱	۲۰۰۵	۱۱۱۸ میلی متر	بیان انرژی اصلاح شده (ضریب اصلاحی)	استفاده از اطلاعات سینوپتیک تک ایستگاه ارومیه
	۲۰۰۶	۱۰۹۴ میلی متر		
	۲۰۰۷	۹۳۳ میلی متر		
	۲۰۰۸	۹۲۵ میلی متر		
	۲۰۰۹	۸۸۷ میلی متر		
RSRC (۱۳۹۳)	۱۹۹۵	۱۳۸۸ میلی متر	معادله دوبرین/کژمن	فرضیات معادله دوبرین/کژمن و استفاده از اطلاعات سینوپتیکی چند ایستگاه (توزیع مکانی اطلاعات)
	۲۰۱۰	۱۱۵۸ میلی متر (از آوریل تا اکتبر)		

#### ۴-۴- مقایسه نتایج تبخیر دریاچه با اندازه گیری های تشتک تبخیر آب شور:

نتایج اندازه گیری ارتفاع تبخیر در تشتک تبخیر آب شور ایستگاه گلمانخانه در حاشیه دریاچه ارومیه، برای ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ در کنار نتایج تبخیر محاسبه شده از رابطه دوبرین - کژمن در شکل (۹) و جدول (۱۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار تبخیر اندازه گیری شده با تشتک در ماههای گرم سال ۱۹۹۵ بیشتر و در ماههای سرد سال کمتر از مقادیر بدست آمده در روش دوبرین - کژمن می باشد که دلیل آن تفاوت در ذخیره گرمایی آب تشتک و دریاچه می باشد، به این ترتیب که دمای آب تشتک با مقدار کمتری از انرژی بالا رفته و به آستانه تبخیر می رسد و با از دست دادن انرژی کمتری کاهش یافته و به آستانه یخ زدن می رسد، بنابراین در فصول گرم با افزایش نرخ تبخیر و در فصول سرد با کاهش این نرخ و یخ زدگی (یا بعضا نبود اطلاعات به دلیل خالی کردن آب تشتک) مواجه می شویم. نهایتا مقدار تبخیر سالانه بر اساس اندازه گیری های تشتک برابر ۱۴۳۹

میلیمتر بدست آمده که در مقایسه با ۱۳۸۸ میلیمتر بدست آمده از روش دوبرین - کژمن کمتر از ۴ درصد اختلاف دارد. بررسی اثر تفاوت در شرایط فیزیکی فرایند تبخیر در تشتک و دریاچه و همچنین اثر شوری آب روی مقدار تبخیر از تشتک در پیوست ۳ آورده شده است.



شکل ۹- مقایسه ارتفاع تبخیر بدست آمده از تشتک تبخیر و روش دوبرین - کژمن در ماه‌های مختلف سال ۱۹۹۵

جدول ۱۳- مقایسه ارتفاع تبخیر ماهانه بدست آمده از تشتک تبخیر و روش دوبرین - کژمن در سال ۱۹۹۵

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن
ارتفاع تبخیر ماهانه با استفاده از روش دوبرین - کژمن	۱۳/۷	۳۵/۶	۷۱/۳	۱۱۴/۹	۱۳۷/۹	۲۰۴/۴
ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلمانخانه)	۳	۳	۲/۹	۱۱۵/۸	۱۶۴/۲	۲۰۲/۳
ماه	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ارتفاع تبخیر ماهانه با استفاده از روش دوبرین - کژمن	۲۰۳/۷	۲۱۷	۱۶۰/۷	۱۲۰/۱	۷۵/۵	۳۲/۹
ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلمانخانه)	۲۶۱/۹	۲۷۲/۷	۲۱۳/۳	۱۰۵/۸	۶۱/۹	۳۲/۴

#### ۴-۵- مقایسه نتایج با مطالعات ITC:

دانشکده علوم مکانی و پایش زمین دانشگاه توینت<sup>۱</sup> (ITC) با توسعه مدل SEBAL برای حوضه آبریز ارومیه میزان تبخیر و تعرق کل حوضه را برای سال ۱۹۹۵ محاسبه کرده است. ITC میزان تبخیر را برای محدوده

<sup>۱</sup> The Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente

دریاچه ۸۲۶ میلیمتر گزارش کرده است. مقایسه بین نتایج مطالعه ITC در سال ۱۹۹۵ و نتایج این گزارش، نشان می دهد که مقادیر تبخیر سالانه در گزارش حاضر تقریباً پنجاه درصد بیشتر از برآورد ITC بدست آمده است. دلیل این اختلاف تفاوت در روش محاسبه تبخیر می باشد. ITC با تعمیم الگوریتمی که برای محاسبه تبخیر و تعرق حوضه توسعه داده شده به محاسبه تبخیر از محیط آبی دریاچه پرداخته و شوری آب را نیز در محاسبات خود لحاظ نکرده است. این در حالیست که روش تجربی دوبرین-کژمن برای محاسبه تبخیر در محیطهای آبی توسعه داده شده و شوری آب نیز در آن لحاظ شده است که هر دوی این موارد منجر به بالا رفتن دقت محاسبات تبخیر با این روش می شود (Yekom Consulting Engineers, 2002).

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایجی که در جداول بخش قبل آورده شد دقیق ترین روابط برای محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه بر مبنای شاخص جذر میانگین مجموع مربع خطاها (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) روابط Debruin/Keijman، Penman، Priestly/Taylor و Turc بوده که به ترتیب دقیق ترین روابط در مقیاس روزانه و ماهانه هستند. دو رابطه اول نیاز به ۵ نوع داده (گرمای نهان تبخیر/چگالی آب/ دمای آب / تشعشع خالص / فشار هوا) دارند. رابطه پنمن علاوه بر داده های مورد نیاز دو روش قبل نیاز به داده های سرعت باد و فشار بخار هوا در بالای سطح آب نیز دارد. این در حالیست که اضافه شدن این دو داده مورد نیاز منجر به افزایش دقت این روش نسبت به دو روش اول نشده است. رابطه Turc با وجود دقت پایین تری که نسبت به سه روش دیگر دارد داده های مورد نیاز آن به سه نوع داده درجه حرارت هوا، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی محدود می شود و از نظر هزینه محاسباتی روش مقرون به صرفه ای محسوب می شود.

به طور خلاصه می توان به نتایج زیر در محاسبه تبخیر سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ اشاره کرد:

۱- در تبخیر محاسبه شده، مشاهده می شود که میزان تبخیر با تغییرات دمای سطح ( $T_s$ ) تغییرات مشابهی دارند؛ هر چند دمای سطح به طور مستقیم در محاسبات میزان تبخیر وارد نمی شود ولی بر روی اکثر پارامترهایی که در محاسبه مقدار تبخیر دخالت دارند (مانند پارامترهای گرمای نهان تبخیر، دلتا و تشعشع خالص) تاثیر گذار می باشد. از این رو دمای سطح متغیر بسیار مهمی در برآورد تبخیر می باشد.

۲- نمودار میزان تغییرات تبخیر نشان دهنده تغییرات بصورت یک نرخ صعودی است که نهایتاً در ماه آگوست که زمان پایان فصل گرما است به حداکثر مقدار خود یعنی ۲۱۷ میلی متر در ماه می‌رسد. پس از آن و همزمان با آغاز فصول سرد سال، میزان تبخیر از سطح دریاچه با یک نرخ نزولی در انتهای بازه زمانی به میزان ۱۴ میلی متر در ماه در ماه ژانویه می‌رسد.

۳- مقایسه بین نتایج مطالعه ITC در سال ۱۹۹۵ و نتایج این گزارش نشان می‌دهد که مقادیر تبخیر سالانه در گزارش حاضر تقریباً پنجاه درصد بیشتر از برآورد ITC می‌باشد که دلیل آن لحاظ نکردن اثر شوری و استفاده از الگوریتمهای برآورد تبخیر و تعرق در برآورد تبخیر از محیط آبی در مطالعات ITC می‌باشد که استفاده از الگوریتمهای تبخیر-تعرق برای خاک و پوشش گیاهی، منجر به دست کم برآورد کردن نرخ تبخیر از پهنه‌های آبی می‌شود.

۴- مقایسه بین مقادیر تشتک تبخیر براساس ایستگاه گلمانخانه آبشور و نتایج این گزارش در سال ۱۹۹۵ نشان می‌دهد که مطابق انتظار مقادیر تبخیر بدست آمده از تشتک در فصول گرم بیشتر و در فصول سرد کمتر است که با توجه به حجم زیاد آب دریاچه در مقایسه با تشتک قابل توجه می‌باشد. اما در مقیاس سالانه ارتفاع تبخیر از دریاچه بر اساس نتایج بدست آمده اختلاف کمتر از ۴ درصد با اندازه گیری های تشتک تبخیر دارد.

## ۶- پیشنهادات

در پایان پیشنهاد می‌شود برای پیش بینی روند تغییرات تبخیر از سطح دریاچه از سال ۱۹۹۵ که مصادف با زمان حداکثر تراز آب دریاچه می‌باشد تا سال ۲۰۱۳ از فرمول دوبرین/کژمن استفاده شود و نحوه تغییرات سری زمانی میزان تبخیر را در این سالها بررسی کرد.

## ۷- فهرست منابع

جهانبانی، س.، (۱۳۹۱). "مقایسه روشهای تجربی تبخیر از سطح دریاچه های شور با استفاده از معادله بیلان انرژی"، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران

سیما، س.، (۱۳۹۲). "تحلیل دینامیکی / مکانی تغییرات تبخیر و نمک در دریاچه های شور / مطالعه موردی دریاچه ارومیه". پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران

حسین پور، ا.، (۱۳۹۱). "شیمی فیزیک دریاچه ارومیه محاسبه پارامترهای شیمی فیزیکی از شورابه ی دریاچه ارومیه". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، دانشکده شیمی.

Ahmadzadeh Kokya, Bahman, Ahmadzadeh Kokya, Taher. (2008). Proposing a formula for evaporation measurement from salt water resources. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, No. 22, pp. 2005/2012

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Fao Irrigation and Darainage paper No. 56.

Anderson, E. R. (1952). *Energy budget studies in water loss investigations: Lake Hefner Studies*. US Geological Survey Circular, No 229, pp. 71/119.

Assouline, S., & Mahrer, Y. (1993). Eddy correlation system measurement and energy budget estimates. *Water resources research*, No. 29, Vol. 4, pp. 901/910.

Basso, E. (2000). Alteration of the water balance of lakes. *Lake and Reservoirs*, No.5, pp. 5/9  
. Hunt , J. I. (1959). Evaporation of lake Ontario. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, No. 85, pp. 13/33.

Dalton, M.S., Aulenbach, B.T., Torak, L.J. (2004). *Ground/water and surface/water flow and estimated water budget for Lake Seminole, northwestern Georgia and northwestern Florida*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004/5073, 49 pages.

Elsawwaf, M., Willems, M., Feyen, J. (2010). Assessment of the sensitivity and prediction uncertainty of evaporation models applied to Nasser Lake, Egypt. *Journal of Hydrology*, No. 395, pp. 10/22.

Gianniou, S. K., Antonopoulos V. Z. (2007). Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *Journal of Hydrology*, No. 345, 2007, pp. 212/223.

Harbeck, G.E., Kohler, M.A., Koberg, G.E., and others. (1954). 'Water loss investigations, Vol. 1, Lake Hefner studies', US Geological Survey Paper 269, (US Government Printing office), Washington, D.C.

Lensky, N. G., Dvorkin, Y., Lyakhovsky, V. (2005). Water, salt, and energy balances of the Dead Sea. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 41, W12418, doi: 10.1029/2005WR004084.

Rosenberry, D. O., Winter, T. C., Buso, D. C., Likens, G. E. (2007). Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. Journal of Hydrology, No. 340, pp. 149/166.

Singh, Xu. (1997). Sensitivity of mass transfer-based evaporation equations to errors in daily and monthly input data. Hydrological processes, Vol. 11, pp. 1465/1473.

Winter, T. C. (1981). Uncertainties in estimating the water balance of lakes. Water Resour. Bull. 17:82–115.

Winter, T. C. (1985). Mirror Lake and its watershed, p. 40–53. In G. E. Likens [ed.], An ecosystem approach to aquatic ecology: Mirror Lake and its environment. Springer.

Winter, T. C., Rosenberry, D. O. (1995). Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central United states. Water Resources Research, Vol. 31, NO. 4, Pages 983-993, April 1995

Winter, T. C. et al. (2003). Evaporation determined by the energy/budget method for Mirror Lake, New Hampshire. Limnology and Oceanography, No. 48, Vol. 3, pp. 995/1009.

Yekom consulting engineers. (2002). Management Plan for the Lake Urmia Ecosystem. 4 Volumes.

## ۸- پیوست:

### پیوست الف: جدول کامل نتایج تبخیر روزانه در سال ۲۰۱۰ با ۱۲ روش تجربی

در جدول (۱۴) مقادیر ارتفاع تبخیر (بر حسب میلیمتر) محاسبه شده با دوازده روش تجربی برای ۵۴ روز از

سال ۲۰۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۴- جدول کامل تبخیر روزانه محاسبه شده با ۱۲ روش مختلف تجربی و روش بیلان انرژی در سال ۲۰۱۰

Julian Date	BREB EV	Developed meyer	Developed Harbeck	Debruin-Keijman	Pennan	Priestly-Taylor	stephen stewart	Ryan-Harleman	Ture	papdakakis	Dalton	Bulk-Aerodyna mic	Meyer
104	5.83	2.61	0.98	5.40	5.20	5.27	3.04	1.97	4.39	0.71	1.27	11.05	4.24
110	5.92	2.97	0.90	5.75	5.44	5.66	3.53	2.00	4.86	1.01	1.17	10.14	4.79
134	6.07	3.48	1.14	6.04	5.81	5.98	3.91	2.38	5.19	0.51	1.47	12.76	5.55
141	6.84	4.63	2.28	7.08	7.17	7.03	4.44	3.88	5.89	0.51	2.77	24.17	7.15
145	7.09	3.74	1.38	7.18	6.83	7.13	4.53	2.73	5.88	0.25	1.78	15.50	5.99
146	7.27	3.52	1.23	7.16	6.73	7.10	4.50	2.61	5.85	0.76	1.64	14.30	5.86
147	7.27	4.77	1.74	7.26	7.07	7.25	4.84	3.34	6.44	0.45	2.11	18.36	7.26
152	6.81	5.25	1.52	6.92	6.71	6.92	4.86	3.31	6.65	0.15	1.78	15.17	7.75
154	6.45	6.13	1.91	6.58	6.62	6.59	4.83	3.78	7.09	-0.22	2.16	18.44	8.73
161	6.39	6.08	2.17	6.46	6.63	6.46	4.69	3.93	6.96	-0.32	2.46	21.15	8.66
162	6.77	7.16	2.53	6.94	7.14	6.97	5.10	4.74	7.69	0.84	2.75	23.56	9.97
163	6.84	7.55	2.68	7.07	7.29	7.11	5.32	4.95	7.92	0.13	2.92	24.95	10.51
164	6.90	7.69	3.08	7.17	7.48	7.23	5.36	5.51	7.55	0.11	3.35	28.64	10.87
165	6.77	7.69	2.83	7.04	7.30	7.10	5.33	5.32	7.60	0.53	3.07	26.21	10.83
178	6.91	6.68	2.39	7.10	7.19	7.14	5.14	4.57	7.29	0.85	2.65	22.83	9.55
179	6.82	7.85	2.78	7.11	7.34	7.17	5.44	5.21	7.89	0.31	3.03	26.04	10.98
180	6.71	8.30	2.67	7.01	7.23	7.08	5.42	5.36	8.22	0.37	2.81	24.16	11.37
181	6.84	8.66	3.45	7.15	7.59	7.21	5.47	5.95	8.21	0.45	3.61	31.01	11.78
184	6.93	8.39	4.17	7.14	7.83	7.20	5.41	6.41	7.52	0.13	4.55	39.10	11.76
185	6.57	8.26	3.63	6.77	7.28	6.83	5.06	6.24	7.03	1.16	3.72	31.98	11.44
187	6.24	9.63	3.96	6.42	7.17	6.49	5.20	6.61	8.13	0.48	4.01	34.48	12.82
188	6.47	8.85	3.21	6.69	7.15	6.77	5.43	5.79	8.05	0.44	3.45	29.66	12.16
190	6.47	10.32	4.45	6.74	7.55	6.83	5.54	7.45	8.39	0.63	4.62	39.65	14.03
191	6.47	10.61	3.91	6.76	7.38	6.87	5.70	7.10	8.61	-0.02	3.99	34.18	14.32
193	6.63	9.23	3.58	7.10	7.55	7.21	5.72	6.42	7.79	0.17	3.90	33.45	12.95
194	6.52	9.08	3.32	6.96	7.34	7.05	5.54	6.28	7.77	1.13	3.54	30.52	12.67
196	6.51	7.09	3.46	6.81	7.31	6.86	5.01	5.77	6.38	1.56	3.97	34.27	10.51
198	6.58	6.50	2.81	6.89	7.17	6.95	5.10	4.93	6.44	0.30	3.32	28.56	9.76
200	6.48	6.76	2.74	6.98	7.19	7.04	5.20	5.00	6.62	-0.03	3.17	27.28	10.03
207	6.27	6.57	3.21	6.52	7.00	6.56	4.68	5.45	5.96	0.37	3.65	31.38	9.79
209	6.24	8.03	4.48	6.56	7.57	6.59	4.91	6.55	7.08	0.38	5.02	43.00	11.43
211	6.29	8.31	4.35	6.48	7.43	6.51	4.89	7.04	7.29	0.57	4.73	40.42	11.64
212	6.22	8.07	4.49	6.40	7.45	6.42	4.74	6.59	7.07	0.69	4.90	41.82	11.35
214	6.19	7.05	3.18	6.37	6.95	6.38	4.67	5.19	6.99	0.54	3.50	29.90	9.93
222	5.57	8.31	3.42	5.83	6.52	5.89	4.76	6.03	6.87	0.96	3.70	31.73	11.70
230	5.34	7.18	2.96	5.60	6.20	5.64	4.53	5.10	6.31	0.19	3.36	28.92	10.32
232	5.37	7.66	2.83	5.68	6.19	5.74	4.73	5.28	6.45	-0.03	3.15	27.00	10.95

جدول ۱۴- جدول کامل تبخیر روزانه محاسبه شده با ۱۲ روش مختلف تجربی و روش بیلان انرژی در سال ۲۰۱۰ (ادامه)

235	5.19	5.99	2.48	5.47	5.84	5.52	4.19	4.93	5.25	1.03	2.81	24.04	9.16
236	4.99	7.15	2.68	5.22	5.76	5.27	4.34	5.09	5.92	0.04	2.99	25.62	10.33
241	5.20	5.30	1.62	5.52	5.61	5.55	4.31	3.56	5.44	0.18	1.94	16.64	8.07
242	4.96	7.08	2.62	5.17	5.69	5.22	4.25	5.13	5.77	0.91	2.87	24.58	10.20
244	4.62	6.63	2.53	4.85	5.38	4.89	3.93	5.13	5.14	1.11	2.77	23.75	9.79
246	4.52	7.81	3.00	4.78	5.54	4.82	4.16	5.49	6.02	0.71	3.25	27.83	10.99
252	0.50	6.97	3.00	0.54	2.18	0.54	3.80	-2.78	5.36	0.49	-1.80	-15.38	-5.38
253	4.43	5.51	2.53	4.54	5.21	4.55	3.65	4.41	4.70	0.43	3.04	26.05	8.43
255	4.45	4.54	1.81	4.52	4.90	4.52	3.53	3.53	4.55	-0.10	2.25	19.21	7.20
259	4.10	4.69	1.72	4.16	4.59	4.15	3.34	3.38	4.44	0.40	2.08	17.75	7.19
260	3.97	4.33	1.49	4.20	4.51	4.19	3.37	3.14	4.37	0.65	1.85	15.80	6.84
264	3.58	4.37	1.43	3.74	4.11	3.74	3.06	3.23	4.08	0.93	1.70	14.50	6.78
273	3.11	3.79	1.46	3.34	3.83	3.33	2.85	2.87	3.79	0.26	1.90	16.25	6.18
282	2.73	2.94	1.31	2.92	3.46	2.88	2.34	2.48	3.30	0.34	1.82	15.59	5.07
291	2.52	2.89	0.95	2.49	2.92	2.45	2.13	1.98	3.06	0.57	1.25	10.70	4.72
292	2.50	1.53	0.40	2.69	2.72	2.65	2.13	1.24	3.06	0.70	0.69	5.86	3.25
293	2.52	2.47	0.66	2.54	2.78	2.50	2.15	1.66	3.07	0.70	0.91	7.73	4.26

### پیوست ب: نحوه محاسبه پارامتر تشعشع خالص $Q_n$

این پارامتر برای محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه برای سال ۲۰۱۰ بر اساس تصاویر ماهواره‌ای بدست آمد و برای سال ۱۹۹۵ پارامتر تشعشع خالص به این صورت محاسبه شد که مقدار تابش خورشیدی طول موج کوتاه که به سطح زمین رسیده به میزان جذب و پراکنش طول موج کوتاه در اتمسفر بستگی دارد. تابش خالص خورشیدی طول موج کوتاه که به درون آب نفوذ می کند با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_{SN} = (Q_{S \text{ dir}} + Q_{S \text{ diff}}) - (BSA \cdot Q_{S \text{ dir}} + WSA \cdot Q_{S \text{ diff}}) \quad (23)$$

$$Q_{SN} = Q_{S \text{ in}} - Q_{S \text{ out}} \quad (24)$$

در رابطه فوق  $Q_{S \text{ in}}$  و  $Q_{S \text{ out}}$  به ترتیب عبارتند از شار تابش طول موج کوتاه رسیده و برگشتی از سطح. بازتابش طول موج کوتاه رسیده به سطح عبارتست از، حاصلضرب آلبدوی سطحی ( $\alpha_s$ ) در تابش طول موج کوتاه رسیده به سطح:

$$Q_{S \text{ out}} = \alpha_s \cdot Q_S \quad (25)$$

روابط متعددی برای محاسبه شار تابش طول موج کوتاه رسیده به سطح پیشنهاد شده است. مقدار  $\alpha_S$  برابر ۰,۰۶ گرفته شده است.

$$Q_{s \text{ dir (daily)}} = \left(a + b \frac{n}{N}\right) \frac{SC}{\pi \cdot d^2} (\omega_{hs} \cdot \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\omega_{hs}) \quad (26)$$

در روابط فوق  $SC$ : ثابت خورشیدی (برابر  $1367 \text{ Wm}^2$ )؛  $d$ : فاصله زمین و خورشید در هر لحظه؛  $n$  و  $N$  تعداد ساعات آفتابی مشاهده شده و محتمل در طی روز بر حسب ساعت است که مقدار  $n$  بر اساس تصاویر ماهواره ای سال ۱۹۹۵ بدست می آید؛  $a, b$ : ضرایب تجربی خاص منطقه مورد مطالعه است که در گزارش طرح جامع آب کشور حوضه آبریز ارومیه (جاماب) مقادیر  $a$  و  $b$  در ایستگاه سینوپتیک ارومیه، ۳۲۰ و ۵۰ پیشنهاد شده است.  $\omega_{hs}$ : زاویه ساعت طلوع خورشید (رادیان)؛  $\varphi$ : عرض جغرافیایی (رادیان) دریاچه است که برای محاسبات مقدار  $37,75$  درجه را گرفته است؛  $\omega$ : زاویه خورشیدی (رادیان) و  $\delta$ : زاویه میل خورشید (رادیان) می باشند. به منظور تعیین  $N$  از رابطه زیر استفاده می شود:

$$N = \left[\frac{2.24}{360}\right] \omega_{hs} \quad (27)$$

$$\omega_{hs} = \arccos(-\tan(L)\tan(\delta)) \quad (28)$$

$L$ ، عرض جغرافیایی بر حسب درجه می باشد.  $\delta$ ، زاویه میل خورشید است که از رابطه Cooper (1969) محاسبه می گردد:

$$\delta = 23.5 \sin\left[\frac{360(D+284)}{365}\right] \quad (29)$$

که در آن  $D$  نشانگر شماره روز تصویر مورد نظر در سال است.

$$d = 1 + 0.0167 \sin\left(2\pi \cdot \frac{D - 93.5}{365}\right) \quad (30)$$

شار خالص تابش طول موج بلند از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$Q_{LW} = -Q_a + Q_{a \text{ out}} + Q_{bs} \quad (31)$$

$Q_a$  و  $Q_{a \text{ out}}$  مولفه‌های تابش طول موج بلند رسیده به سطح دریاچه و برگشتی از اتمسفر و  $Q_{bs}$  تابش طول موج بلند برگشتی از سطح دریاچه است که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$Q_a = \varepsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (32)$$

$$Q_{a \text{ out}} = 0.03 \times Q_a \quad (33)$$

$$Q_{bs} = \varepsilon_{surface} \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (34)$$

در روابط فوق:  $T_a$  و  $\varepsilon_{sky}$  به ترتیب دما و گسیلندگی هوای روی سطح دریاچه،  $T_s$ : دمای سطح آب و  $\sigma$  ثابت استفان بولترمن معادل می‌باشند. همچنین در این روابط، دما بر حسب درجه کلونین، گسیلندگی بی‌بعد و ثابت بولترمن معادل  $675 \times 10^8 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ K}^4$  می‌باشد. مقدار گسیلندگی سطح دریاچه بر اساس تصاویر گسیلندگی سطح حاصل از محصول MOD11B3V04، مقداری ثابت و برابر ۹۸۰ تعیین شد. مقدار متوسط  $\varepsilon_{sky}$  یعنی مقدار گسیلندگی اتمسفر روی سطح دریاچه ۷۷۰ گرفته شد.

$Q_s$ : **تسشع خورشیدی ورودی** : این پارامتر بر اساس تصاویر ماهواره‌ای برای سال ۲۰۱۰ بدست آمد.

## پیوست ج: بررسی اثر شوری و شرایط فیزیکی تشتک در برآورد ارتفاع تبخیر با این روش

در این قسمت ابتدا ارتفاع تبخیر ثبت شده برای تشتک آب شیرین و شور دریاچه در سال ۱۹۹۵ با یکدیگر مقایسه می شود و اثر شوری آب روی برآورد میزان تبخیر مورد بررسی قرار می گیرد، سپس با مقایسه ارتفاع تبخیر از تشتک شور با مقادیر تبخیر از سطح دریاچه اثر تفاوت شرایط فیزیکی تشتک و دریاچه در مقدار تبخیر مورد بررسی می گیرد.

بطور کلی در مایعات بین غلظت مایع و میزان تبخیر رابطه معکوس وجود دارد. این موضوع در مورد آبهای شور سبب کاهش میزان تبخیر نسبت به آبهای شیرین معمولی می شود. چنین بیان می شود که به ازای هر ۱٪ نمک موجود در آب، ۱٪ از شدت تبخیر کاسته می شود پس برای یک ایستگاه خاص برای دو تشتک آب شور و تشتک آب شیرین میزان تبخیر برای تشتک آب شور باید کمتر از میزان تبخیر از تشتک آب شیرین باشد. همین موضوع برای ایستگاه گلخانه که نزدیکترین ایستگاه به دریاچه ارومیه می باشد، بصورت ماهیانه (شش ماهه اول سال ۱۳۷۴ به عنوان ماههایی که داده تبخیر برای هر دو تشتک ثبت شده است) و بصورت سالانه بررسی شده است و در جداول (۱۵) و (۱۶) آورده شده است.

جدول (۱۵) محاسبه ضریب اصلاحی تشتک بصورت ماهیانه براساس داده های ایستگاه های گلخانه آب شور و آب شیرین در سال ۱۳۷۴ شمسی

شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	ماه
۱۷۶/۵	۲۰۸/۱	۲۰۵	۲۱۷/۲	۱۳۹/۹	۵۹/۳	ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلخانه آب شور)
۲۰۸/۷	۲۶۲/۴	۲۵۱/۸	۲۳۱/۷	۱۳۷/۹	۷۷/۸	ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلخانه آب شیرین)
۰/۸۴	۰/۷۹	۰/۸۱	۰/۹۳	۱/۰۱	۰/۷۶	ضریب اصلاحی ( ارتفاع تبخیر ماهانه آب شیرین / آب شور )

جدول ۱۶) محاسبه ضریب اصلاحی تشتک بصورت سالیانه براساس داده‌های ایستگاه‌های گلخانه آبشور و آب شیرین در سال ۱۳۷۴ شمسی

سال	۱۳۷۴ (شش ماهه اول سال)
ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلخانه آبشور) (شش ماهه اول سال)	۱۰۰۶
ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلخانه آب شیرین)	۱۱۷۰/۳
ضریب اصلاحی ( ارتفاع تبخیر ماهانه آب شیرین آب شور)	۰/۸۶

بر اساس اعداد جداول بالا برای ماه‌های مختلف می‌توان با استفاده از این ضرایب، تنها با اندازه‌گیری تبخیر در تشتک آب شیرین، به میزان تبخیر در تشتک آب شور ایستگاه دست یافت. شایان ذکر است که در آبپایی با سطوح بیشتر مانند دریاچه ارومیه، اتلاف انرژی کمتری صورت می‌گیرد و منجر به جذب انرژی بیشتری می‌شود ولی از طرفی دیگر چون حجم دریاچه نسبت به حجم آب تشتک خیلی بیشتر است، تعدیلی در میزان انرژی جذب شده انجام می‌شود، پس باید رابطه‌ای (ضریب اصلاحی تشتک) بین تشتک آب شور و میزان تبخیر از سطح دریاچه یافت. همین موضوع مجدداً برای ایستگاه گلخانه بصورت ماهیانه (سال ۱۹۹۵ میلادی) و سالانه بررسی شده است و در جداول (۱۷) و (۱۸) آورده شده است.

جدول ۱۷) محاسبه ضریب اصلاحی تشتک و دریاچه بصورت ماهیانه براساس داده‌های ایستگاه‌های گلخانه آبشور و دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ میلادی

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن
ارتفاع تبخیر ماهانه با استفاده از روش دوبرین - کژمن	۱۳/۷	۳۵/۶	۷۱/۳	۱۱۴/۹	۱۳۷/۹	۲۰۴/۴
ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلخانه)	۳	۳	۲/۹	۱۱۵/۸	۱۶۴/۲	۲۰۲/۳
ضریب اصلاحی (ارتفاع تبخیر ماهانه تشتک آب شور / دریاچه)	۴/۵۶	۱۱/۸۶	۲۴/۵۸	۰/۹۹	۰/۸۳	۱/۰۰

جدول ۱۷) محاسبه ضریب اصلاحی تشتک و دریاچه بصورت ماهیانه براساس داده‌های ایستگاههای گلخانه آبشور و دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ میلادی (ادامه)

ماه	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ارتفاع تبخیر ماهانه با استفاده از روش دوبرین - کژمن	۲۰۳/۷	۲۱۷	۱۶۰/۷	۱۲۰/۱	۷۵/۵	۳۲/۹
ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلخانه)	۲۶۱/۹	۲۷۲/۷	۲۱۳/۳	۱۰۵/۸	۶۱/۹	۳۲/۴
ضریب اصلاحی (ارتفاع تبخیر ماهانه آب شور / ارتفاع تبخیر ماهانه دریاچه)	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۷۵	۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۰۱

جدول ۱۸) محاسبه ضریب اصلاحی تشتک و دریاچه بصورت سالیانه براساس داده‌های ایستگاههای گلخانه آبشور و دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۵ میلادی

سال	۱۹۹۵ میلادی
ارتفاع تبخیر ماهانه با استفاده از روش دوبرین - کژمن	۱۴۴۰
ارتفاع تبخیر ماهانه (داده های تشتک ایستگاه گلخانه)	۱۳۸۸
ضریب اصلاحی (ارتفاع تبخیر ماهانه آب شور / ارتفاع تبخیر ماهانه دریاچه)	۰/۹۶



**Sharif University of Technology**  
**Remote Sensing Research Center**

## **Estimating Evaporation from Urmia Lake**

### **Providers:**

Ehsan Jalilvand  
Seyyed farid Fazel Mojtahedi  
Soroush saravani

February 10, 2015